

**LOS RECURSOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS
TRANSFRONTERIZAS ENTRE MÉXICO Y ESTADOS
UNIDOS: EL PASO DEL NORTE Y LA GOBERNANZA
BINACIONAL DEL AGUA**



**HYDROLOGICAL RESOURCES IN TRANSBOUNDARY
BASINS BETWEEN MEXICO AND THE UNITED
STATES: EL PASO DEL NORTE AND THE BINATIONAL
WATER GOVERNANCE**

Alfredo Granados Olivas
Coordinador





Los recursos hidrológicos en cuencas
transfronterizas entre México y
Estados Unidos: El Paso del Norte y la
gobernanza binacional del agua

Hydrological Resources in
Transboundary Basins between Mexico
and the United States: El Paso del Norte
and the Binational Water Governance



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Juan Ignacio Camargo Nassar

Rector

Daniel Constandse Cortez

Secretario General

René Soto Cavazos

Abogado General

Jesús Meza Vega

Director General de Comunicación Universitaria

Beatriz Araceli Díaz Torres

Coordinadora General de Investigación y Posgrado

Juan Francisco Hernández Paz

Director del Instituto de Ingeniería y Tecnología



Universidad Autónoma de Chihuahua

Dr. Jesús Villalobos Jión

Rector

Dr. Sergio Rafael Facio Guzmán

Secretario General

Lic. Gustavo Macedo Pérez

Director de Extensión y Difusión Cultural

M.A. Herik Germán Valles Baca

Director Académico

Dr. Myrna Isela García Bencomo

Directora de Investigación y Posgrado

M.I. Ricardo Ramón Torres Knight

Director de Planeación y Desarrollo Institucional

M.C. Francisco Márquez Salcido

Director Administrativo

This material is based upon work that is supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

Los recursos hidrológicos en cuencas
transfronterizas entre México y
Estados Unidos: El Paso del Norte y la
gobernanza binacional del agua

Hydrological Resources in
Transboundary Basins between Mexico
and the United States: El Paso del
Norte and the Binational Water
Governance

Alfredo Granados Olivas
Coordinador

Universidad Autónoma de Chihuahua
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Chihuahua, México, 2022

Primera edición, 2022

Granado Olivas, Alfredo

Los recursos hidrológicos en cuencas transfronterizas entre México y Estados Unidos: El Paso del Norte y la gobernanza binacional del agua / Alfredo Granados Olivas. — México: Universidad Autónoma de Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2022
324 pp.

ISBN 978-607-536

1. Geología. hidrología. meteorología

This material is based upon work that is supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

Los recursos hidrológicos en cuencas transfronterizas entre México y Estados Unidos: El Paso del Norte y la gobernanza binacional del agua.

Edición: Dirección de Extensión y Difusión Cultural

Director: Gustavo Macedo Pérez

Jefe editorial: Berenice León Galindo

Producción: Susana Cristina Perea Ochoa

Diseño de maquetación y portada: Ángel Javier Machado Favela

Coordinación editorial: Alfredo Granados Olivas

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de esta obra por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, en cualquier forma, sin permiso previo por escrito del autor y de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez o de la Universidad Autónoma de Chihuahua

Derechos reservados para esta edición, 2022

D. R. © 2022 Alfredo Granados Olivas, por la coordinación

D. R. © 2022 Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Av. Plutarco Elías Calles 1210

Fovissste Chamizal, C. P. 32310

Ciudad Juárez, Chih., México

D. R. © 2022 Universidad Autónoma de Chihuahua

Campus Universitario I s/núm.

Chihuahua, Chih., México. C. P. 31178

Correo: editoria@uach.mx

Tel. (614) 439-1853

ISBN 978-607-536

Tabla de contenido

Agradecimientos	9
Acknowledgements	10
Reconocimientos	11
Mensaje del rector de la UACJ	12
Mensaje del rector de la UACH	13
Prefacio	14
Prólogo	16
I. Geoinformatics, LULC, and Physical Geography	19
I.1 Vulnerability of Irrigated Agriculture to a Drier Future in New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys	20
Introduction	20
Methods	21
Results and discussion	23
Conclusion	25
I.2 Impacto del cambio climático en el índice de áreas verdes para un futuro cercano 2030 en Ciudad Juárez, Chihuahua	27
Introducción	28
Metodología	35
Resultados y discusión	37
Conclusiones	43
I.3 Cambios de coberturas y uso de suelo del río Bravo (1990-2015): temporal y espacial vs. NDVI 54	48
Introducción	48
Resultados	52
Discusión	58
Conclusiones	58
I.4 Análisis de evolución piezométrica del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) en la cuenca baja del río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua	60
Introducción	61
Materiales y métodos	62
Resultados y discusión	66
Conclusiones	70
II. Geopolítica y la colaboración binacional para la sustentabilidad hídrica	72
II.1 Transboundary Scientific Collaboration in Water Security Research: A Case Study on the U.S.-Mexico Border in the Paso del Norte Region	73
Introduction	74
Water Supplies and Use in the Transboundary Paso Del Norte	74
Transboundary Water Research Challenges	75
Modes of Collaboration	77
Discussion	81
Conclusions	82
II.2 Gobernanza en la cuenca transfronteriza del río Bravo y el tratado de 1944. Análisis de la situación en el río Conchos: datos, hidrometría y estrategias	84
Introducción	85
Diagnóstico	90
Discusión	92
Conclusiones	95
II.3 Advancing Transboundary Groundwater Resiliency Research through Systems Science	97
Introduction	97
Methodology	98
Results	100
Conclusion	101

III. Modelación hidrológica (aguas superficiales y subterráneas)	105
III.1 Simulación del flujo del agua subterránea de la porción mexicana del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco	106
Introducción	106
Materiales y métodos.	109
Resultados y discusión.	110
Conclusiones y recomendaciones	124
III.2 New Conceptual Models of Groundwater Flow and Salinity in the Eastern Hueco Bolson Aquifer	126
Introduction	127
Discussion	137
Conclusions.	140
III.3 Estimación de la transmisividad de un acuífero en un solo pozo	143
Introducción	143
Metodología	144
Resultados	145
Conclusión y discusión	146
III.4 Assessment of water availability and water scarcity in an irrigated watershed using SWAT	146
Introduction	147
Methodology.	148
Results.	153
Summary and Recommendations	158
III.5 Aspectos de modelación del balance hídrico y recarga para el acuífero Valle de Juárez, incorporando escenarios de eficiencias de riego, cultivos agrícolas y escenarios de recarga inducida.	161
Introducción	162
Metodología	165
Conclusiones y trabajo futuro de investigación	180
IV. Datos en red y mapas digitales.	183
IV.1 Monitoring crops water use with unmanned aerial vehicle (UAV)	184
Introduction	184
Evapotranspiration (ET).	184
Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Method	185
IV.2 Una plataforma bilingüe basada en web para el modelado y la visualización de datos para la sustentabilidad de recursos hídricos.	188
Introducción	188
Resultados	193
Conclusiones	198
V. Special chapter: Conservation of shared groundwater resources in the binational Mesilla Basin-El Paso del Norte region – A hydrogeological perspective.	202
Conservation of shared groundwater resources in the binational Mesilla Basin-El Paso del Norte region — A hydrogeological perspective	203

Agradecimiento

A los rectores de la UACJ y la UACH:

Agradezco a los rectores de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y de la Universidad Autónoma de Chihuahua su invaluable apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación que duró un poco más de seis años (2015-2020), al permitir las condiciones adecuadas para que se realizara la agenda propuesta del proyecto. Es importante mencionar que sin este soporte muchas de las tareas que se diseñaron para el desarrollo de los trabajos de investigación planeados, hubieran sido imposibles de lograr.

Ambos rectores han demostrado interés por los temas medioambientales en general y, en particular, en lo referente a la problemática del agua en el estado de Chihuahua, y por aquellos que son transversales e interdisciplinarios, como las interrelaciones en el asunto del agua, en donde se trastoca lo relacionado a la sociedad y su bienestar, a las leyes que la rigen y su aplicación para el desarrollo sustentable, a la economía regional y la correcta planeación del desarrollo económico, buscando las transformaciones adecuadas para tener infraestructura que permita las inversiones en aspectos hidráulicos a gran escala, así como al derecho humano al acceso a suficiente agua de calidad que permite asegurar la calidad de vida y la salud pública de las poblaciones.

Muchas gracias, señores rectores, por su compromiso institucional y su respaldo específico, pues siempre se nos trató con profesionalismo y respeto, procurando siempre las soluciones viables a los retos que presentó el desarrollo de las investigaciones y el proceso de integración de esta obra.

A mis colegas y alumnos:

Un agradecimiento especial va para mis colegas y alumnos que participaron en el desarrollo del proyecto durante este tiempo, los cuales son demasiados para mencionarlos a todos y cada uno de ellos por su nombre. Del consorcio de universidades participantes en el proyecto binacional que permitió el desarrollo de la investigación y la integración de esta obra, se destacan y se agradece a los colegas y alumnos de licenciatura y graduados de las siguientes instituciones: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP), de la Universidad Estatal de Nuevo Mexico (NMSU), de la Universidad de Nuevo Mexico (UNM), de la Universidad de Texas A&M-AgriLife El Paso Extension (TexasA&M) y de la Michigan Tech University (MTU). Todos ellos jugaron un papel preponderante y lograron con creces alcanzar dos de las principales metas del proyecto: desarrollar el conocimiento del tema referente al recurso agua transfronteriza en la región Paso del Norte y formar cuadros de nuevos profesionistas que retomen en un futuro la agenda binacional del agua entre México y Estados Unidos.

Alfredo Granados Olivas

Acknowledgements

This book is the result of recent research on the sustainability of water resources in a critical region of the Middle Rio Grande/Rio Bravo basin, the Paso del Norte. It integrates research conducted on both sides of the U.S./Mexico border, aimed at characterizing current and future conditions of critical surface water and groundwater shared by three states (Chihuahua, Texas, and New Mexico) in two nations (Mexico and the U.S.). The editors and producers of the book gratefully acknowledge the significant scientific contributions of all the authors and their institutions. The majority of the contributions (twelve of the fifteen chapters) were supported wholly or in part by a grant from the United States Department of Agriculture (USDA-NIFA Award No. 2015-68007-23130; March 1, 2015-February 29, 2021, W.L. Hargrove, Project Director). The project funded by this grant was implemented by a binational consortium of universities led by the University of Texas at El Paso and including Michigan Technological University, New Mexico State University, Oklahoma State University, Texas A&M AgriLife-El Paso, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, and the University of New Mexico. The support of these universities is gratefully acknowledged. Finally, we acknowledge the many collaborating institutions and water stakeholders (too numerous to name) who participated in the research in a variety of ways; thank you for your support and cooperation.

W.L. Hargrove, Ph.D., The University of Texas at El Paso

Reconocimientos

Este libro es el resultado de una investigación reciente sobre la sostenibilidad de los recursos hídricos en una región crítica de la cuenca del Río Grande Medio/Río Bravo, el Paso del Norte. Integra la investigación realizada en ambos lados de la frontera entre Estados Unidos y México, cuyo objetivo es caracterizar las condiciones actuales y futuras de las aguas superficiales y subterráneas críticas compartidas por tres estados (Chihuahua, Texas y Nuevo México) en dos naciones (México y Estados Unidos). Los editores y productores del libro agradecen las importantes contribuciones científicas de los autores y sus instituciones. La mayoría de las contribuciones (doce de los quince capítulos) fueron financiadas total o parcialmente por una subvención del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-NIFA Award No. 2015-68007-23130; 1 de marzo de 2015-29 de febrero de 2021, WL Hargrove, director de proyectos). El proyecto financiado por esta subvención fue implementado por un consorcio binacional de universidades liderado por la Universidad de Texas en El Paso e incluyendo la Universidad Tecnológica de Michigan, la Universidad Estatal de Nuevo México, la Universidad Estatal de Oklahoma, Texas A&M AgriLife-El Paso, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y la Universidad de Nuevo México. Se agradece el apoyo de estas instituciones. Finalmente, agradecemos a las muchas instituciones colaboradoras y partes interesadas del agua (demasiado numerosas para nombrarlas) que participaron en la investigación de diversas formas. Gracias por su apoyo y cooperación

**W.L. Hargrove, Ph.D.,
Universidad de Texas en El Paso**

Mensaje del rector de la UACJ

Desde el origen de la humanidad, el hombre ha vivido entorno al agua. El agua siempre ha jugado un papel primordial en el crecimiento y prosperidad económica de las comunidades en el mundo. Las grandes civilizaciones se asentaron en donde existían las condiciones ambientales adecuadas para este crecimiento y prosperidad.

Las sociedades han tenido avances impresionantes en el tema de la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos. Se habla de “ciudades inteligentes” en el manejo del agua; de la “agricultura de precisión”; se proyectan grandes obras hidráulicas para generar electricidad y almacenar agua destinada a distintos usos; se desarrollan y se usan nuevas tecnologías para dar la calidad apropiada para el consumo humano al agua de mar y agua subterránea. Sin embargo, la meta de lograr que todo ser humano tenga disponible un vaso de agua está lejos de cumplirse. Los efectos mundiales del cambio climático han impactado en la disponibilidad de agua.

Las guerras por el agua comienzan a ser una amenaza para los pueblos que colindan en cuencas transfronterizas; el manejo unilateral del agua se sigue presentando entre países con acuerdos signados, generando conflictos que son cada vez más álgidos, al grado de que existen pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura hidroagrícola de cada territorio. En la gobernanza del agua en las cuencas transfronterizas del mundo, las sociedades tienen encuentros y acuerdos en la administración del agua, bajo un concepto holístico de justicia por el acceso al agua, estos acuerdos geopolíticos extienden la vida útil de los acuíferos compartidos.

En México, el reto de la administración eficiente del agua es una tarea continua y constante de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que se ocupa de regular y resolver los retos hidrológicos que tiene el país. En su publicación “Estadísticas del agua en México”, se informa a la comunidad científica nacional e internacional de la condición del agua de las cuencas del país, se presenta una radiografía de los diferentes usos, calidades y volúmenes de agua disponible a nivel nacional. Por otro lado, la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) se encarga de las acciones diplomáticas de alto nivel entre los países limítrofes que colindan con México.

En la frontera México-Estados Unidos, dadas las condiciones geopolíticas que implica el manejo transfronterizo del agua en las cuencas compartidas, la naturaleza de su formación y geografía del entorno, el enfoque internacional del agua es de especial interés. La gobernanza es un reto mayor para ambos países, al ubicarse la mayoría de las cuencas transfronterizas en dos de las regiones desérticas más importantes del mundo: el desierto de Chihuahua y el desierto de Sonora, representando mayores esfuerzos en la consecución de la sustentabilidad hídrica en la región binacional México-Estados Unidos.

Con base en lo anterior se hace evidente el que los investigadores dentro de las universidades obtengan y generen acceso a conocimientos, descubrimientos e información científicamente validada y accesible.

Una prioridad institucional de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez es la formación profesional de su profesorado en instituciones especializadas en los diversos temas del agua tanto nacionales como del extranjero, fortaleciendo el área de investigación y consolidando un liderazgo reconocido internacionalmente en esta temática. También, en una agresiva estrategia de vinculación interinstitucional, nuestros profesores participan de forma activa en la toma de decisiones a alto nivel gerencial dentro de los organismos responsables de la buena administración del agua en México.

La investigación dentro de la UACJ en temas del agua ha avanzado en forma importante. Nuestros investigadores han concursado y ganado importantes bolsas económicas internacionales de fondeo para la investigación y apegados al sentir social de justicia por el acceso al agua, se han generado conocimientos utilizando tecnología de vanguardia y generando insumos y equipamiento para la investigación de la temática, además de la formación de recursos humanos especializados en los diferentes temas del agua, al involucrar a los alumnos de niveles de pre y posgrados locales, nacionales y en el extranjero.

El libro que aquí se presenta es resultado de los esfuerzos de investigadores, alumnos, gestores e instituciones impulsoras, a los que agradecemos su excelente trabajo, además de una especial felicitación a los autores de este trabajo académico, y quienes, en conjunto con el personal correspondiente, seguirán buscando las soluciones holísticas necesarias para atender el reto que se presenta: la disponibilidad del agua para ambos países en la región transfronteriza que se comparte.

M. C. Juan Ignacio Camargo Nassar
Rector de la UACJ

Mensaje del rector de la UACH

Durante mucho tiempo la humanidad con frecuencia pensaba los temas de forma aislada. Los Estados-Nación, dentro de su construcción jurídica y organizativa, trazaban respuestas a los problemas de su tiempo. El modelo desde hace tiempo entró en crisis. La creación de bloques de integración de economías de mercado, las agendas en común en temas como los derechos humanos, la creación de figuras de orden y mandato entre países, como la Unión Europea, nos han hecho cambiar el enfoque para pensar los problemas.

Hoy día, ante los grandes desafíos, se necesitan dos cosas: enfoques interdisciplinarios que pongan el énfasis en encontrar soluciones holísticas y de largo alcance, y, segundo, reconocer que la acción aislada entre países ante un problema se vuelve un paliativo, pero está muy lejos de ofrecer una respuesta de largo alcance.

El tema del cambio climático es un claro ejemplo de lo antes expuesto. Las situaciones que se han generado del calentamiento global y la destrucción del medio ambiente nos han puesto frente a una situación que puede ser catastrófica. Corresponde a las universidades dar los marcos conceptuales para actuar al respecto, pero también debemos, en los hechos, contribuir en el tema.

Por eso celebro este texto tan importante, por el conocimiento de quienes son expertas y expertos en este tema, ya que nos ofrecen una guía muy precisa del problema de las áreas verdes para un futuro que ya llama a la puerta y centrado en Ciudad Juárez.

A su vez, me da mucho gusto y es un honor compartir estas páginas con el rector de nuestra universidad hermana, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, el apreciado maestro Juan Ignacio Camargo Nassar.

La UACH, en su proceso de renovación, arribó a un modelo de desarrollo sustentable, donde todas las acciones universitarias dentro y fuera de las aulas deben de tener repercusión en los objetivos que nos trazó la Organización de las Naciones Unidas. Hemos repetido muchas veces que nuestras y nuestros estudiantes deben tener conciencia de sus problemas inmediatos, pero con una visión global.

Este libro será, sin duda, de gran utilidad, ya que nos hace entender a detalle el tema del medio ambiente como algo central en el futuro de la especie humana y nos hace repensar gran parte de nuestros modelos económicos, sociales y culturales. Un texto oportuno y esperanzador que nos invita a poner manos a la obra para dejar a las próximas generaciones un mundo mejor del que hemos heredado.

M.E.S. Luis Alberto Fierro Ramírez
Rector de la UACH

Prefacio

Hace varias generaciones, la región del Paso del Norte era eso: el paso hacia el norte de lo que entonces era aún territorio mexicano. “El Paso” era una referencia a un cambio geográfico, social e, incluso, a una perspectiva diferente del mundo y del futuro. La migración hacia el norte siempre ha formado parte de la conciencia social y del sentido antropológico de los mexicanos, primero bajo dominio español en su estrategia de evangelizar la región norte del territorio y después como país independiente como fenómeno migratorio hacia la búsqueda de mejores oportunidades. Hacia finales del siglo pasado, el crecimiento poblacional, el desarrollo tecnológico, la promoción de la migración como política pública, la apertura del comercio exterior y el desarrollo exponencial del sector maquilador provocaron un crecimiento desproporcional y una redefinición de la frontera a como la conocemos el día de hoy: una región rica y poderosa, con un crecimiento descontrolado, desconectada del resto de sus países y enfrentando los niveles de vulnerabilidad ambiental (encabezada por la hídrica, por supuesto) más altos del continente americano. La cuenca del río Bravo es considerada la cuenca con mayor estrés hídrico en el mundo.

La lógica fronteriza adquiere variantes únicas que incrementan los problemas de ambas naciones a una escala binacional. La región es reconocida como la quinta economía mundial, con un cruce de un millón de personas y 300 000 automóviles diarios. Al mismo tiempo, las comunidades fronterizas arrojan los más altos índices de inseguridad social en ambos países, con niveles de educación y de calidad de vida por debajo de las medias nacionales. Paralelamente, el nivel de interacción y de integración económica y social es tal que la región fronteriza se entiende más en la lógica fronteriza que en sus respectivos contextos domésticos nacionales. La centralización del lado mexicano, como sistema político operativo, y la descentralización y autonomía del lado de Estados Unidos, ha fomentado la inercia de la integración de una región histórica y culturalmente ligada más a las condiciones del norte (en el caso de México) y del sur (en el caso de los EUA), promoviendo así la negligencia y la apatía de los gobiernos centrales a lo que sucede más allá de las capitales. La pobreza, la marginación, la inseguridad, el deterioro ambiental, los retos son tales que la vulnerabilidad regional ante la escasez hídrica adquiere, en el mejor de los casos, un nivel de atención tal vez cercano al de la pobreza y la marginación que constituyen la ordinalidad de las condiciones fronterizas.

La compilación que aquí se presenta es el resultado no solo de un esfuerzo binacional de desarrollo de conocimiento, sino también de reconocimiento de un Paso del Norte como una región que continúa siendo estratégica para el desarrollo económico y de movilidad social entre ambos países. Un norte cargado de peso histórico, de valor social de posibilidades económicas, pero también de retos sin precedentes en términos de seguridad hídrica y social. Esta aportación ofrece nuevos datos, actualizaciones, revisiones, ideas, opciones. Tanto este trabajo como la literatura reciente en temas similares, integra además de modelos matemáticos y estimaciones técnicas, los análisis cualitativos enfocados en evaluaciones institucionales, de política pública y de gobernanza de agua. Los indicios del desarrollo de investigaciones académicas que promueven un estudio holístico donde la administración binacional del agua se perfila más como el objetivo final y no el desarrollo técnico y científico por sí mismo, parecen ocupar cada vez más la atención de la academia y del desarrollo de la teoría de política pública en la temática de aguas transfronterizas a nivel mundial. El caso de México y Estados Unidos es un claro ejemplo de esta tendencia temática donde el problema de la administración y gobernanza de agua en un contexto transfronterizo parecen encabezar las discusiones académicas. Sin embargo, queda mucho por hacer. Por ejemplo, los estudios de evaluación de acuíferos limitados a un solo lado de la frontera por falta de información o de actualización de datos en ambos lados de la frontera refleja no solo una deficiencia real técnica, sino también la ausencia de comunicación y de confianza para el intercambio de información entre ambos países. La frontera resulta ser una paradoja de integración económica y social, por un lado, y de desconfianza y sensibilidad, por otro. El tema de la seguridad nacional y, por lo tanto, de la protección de la soberanía simbolizada en la propiedad de los recursos hídricos, encabezan entonces la lógica hídrica transfronteriza. La incertidumbre, la permanencia del *statu quo* y la negligencia dirigen los canales de comunicación sobre estos temas y definen la calidad de la atención a las problemáticas hídricoambientales que por definición y naturaleza son compartidos. Es decir, entre mayor sea el problema compartido, más fuerte resulta ser el llamado a la soberanía nacional (o estatal, en el caso de EUA)

para evitar abordar el problema de fondo: el reconocimiento a la vulnerabilidad, la innegable dependencia y la corresponsabilidad.

El trabajo de los académicos y expertos es y seguirá siendo la concientización, la publicación, pero, sobre todo, el trabajo de comunicación y de fomento a la colaboración en diferentes escalas y ámbitos. Pareciera una tarea ordinaria, pero realmente es la tarea más complicada. La comunicación efectiva resulta ser el reto más importante hacia la colaboración binacional en materia de agua, pues solo a través de la comunicación efectiva se construyen los canales de comunicación que fomentan la confianza, el involucramiento de las instituciones, los alcances de largo plazo y de impacto sistémico, así como el permanente intercambio de ideas, de fomento al diálogo y promoción de propuestas binacionales. Esta tarea es la que nos une, nos concientiza, nos hace partes, nos motiva y nos da la certeza de mejores posibilidades hacia un posible futuro hídrico sostenible, siempre y cuando sea compartido. Hoy, más que nunca, nuestra frontera comparte y reparte los costos del deterioro ambiental y de la escasez de agua. Es tiempo de poner en perspectiva la utilidad del llamado encubierto a la soberanía y abordar el problema como lo que realmente es: una amenaza a la seguridad binacional. Ante las amenazas fronterizas actuales, y en especial la hídrica, los asuntos de seguridad nacional resultan precederos y la seguridad compartida adquiere relevancia como estrategia regional. El reto: el cambio. Lo indispensable: liderazgo y voluntad.

Rosario Sánchez

Prólogo

Poco a poco vamos tomando consciencia de la escasez de agua en la región. Nos damos cuenta de que esto tiene implicaciones ambientales, sociales, económicas y políticas que nos plantean retos como sociedad. Y sentimos la necesidad de entender la situación y buscar alternativas de solución, y en cada paso que damos para tratar de comprender, nos acercamos con humildad y esperanza a la complejidad del fenómeno. Esta realidad hace que textos como el que ahora tiene en sus manos representen un oasis en el desierto de la incertidumbre sobre el futuro del agua en nuestra región.

Hace muchos siglos, el rincón del planeta objeto de este estudio estaba surcado libremente por un río que surgía en las montañas San Juan de Colorado y atravesaba el gran desierto chihuahuense en su larga trayectoria hasta el mar. Era un precioso y gran caudal inagotable que se renovaba constantemente.

No existían entonces fronteras políticas ni población permanente, ya que los habitantes de esta región eran nómadas o seminómadas, por lo tanto, tampoco había urbanizaciones ni explotaciones agrícolas.

La región Paso del Norte es parte de un sistema hidrológico con una escala más amplia desde las fuentes del río Bravo/río Grande que, en sus dos nombres nos da idea de su condición natural, *Grande* por la abundancia del deshielo de nieve en las Montañas Rocallosas y los escurrimientos de la cuenca alta, y *Bravo* por las crecidas que afectaban las zonas ribereñas por donde cruzaba. Precisamente, la posibilidad de que los viajeros del Camino Real cruzaran el río en este punto generó el nombre con el que hasta la fecha se le conoce: Paso del Norte.

En el siglo XVIII, esta región adquiere su geografía política actual que incluye tres estados y dos naciones. Parte del sistema hídrico de esta región, además del río, son los acuíferos que subyacen y que interactúan con las aguas superficiales: la Cuenca de Tularosa, el Bolsón del Hueco y el Bolsón de Mesilla.

El desarrollo de la zona se ha dado paulatinamente a partir de los primeros asentamientos permanentes en la región que datan del siglo XVII, con lo que se empezó una incipiente urbanización, lo que, a su vez, dio inicio a la utilización de agua para actividades agropecuarias. A principios del siglo XX se concluyó la construcción de las presas en Nuevo México: Elephant Butte y Caballo, con propósitos de uso agrícola y control de avenidas, y se generalizó la utilización de pozos para el aprovechamiento de agua subterránea.

El desarrollo demográfico y económico de la región ha ido en aumento hasta convertirse en una importante frontera con actividades industriales, comerciales y turísticas que han rebasado, pero no han disminuido, el desarrollo de las actividades agropecuarias.

Como parte de la evolución institucional binacional en la región, se puede apuntar la creación en el siglo XIX de la Comisión Internacional de Límites que se encargaba de medir y vigilar la frontera entre ambos países. Posteriormente, ante la necesidad de administrar las aguas transfronterizas, se constituye la Comisión Internacional de Límites y Aguas. En la segunda mitad del siglo XX se crean otras instituciones para la cooperación binacional en materia ambiental, entre ellas el Acuerdo de La Paz; la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el Banco de Desarrollo de América del Norte.

También se han dado esfuerzos de cooperación informales, como el Paso del Norte Water Task Force, y múltiples colaboraciones académicas o científicas a través de universidades y centros de investigación de la región.

Este valioso texto constituye un hito en el conocimiento de los recursos hídricos de la región y sus procesos de gobernanza binacional y responde a la búsqueda de entendimiento para enfrentar los retos presentes y futuros. Se manifiesta en su confección la colaboración institucional y la convivencia de comunidades binacionales y cada capítulo involucra investigadores de ambos lados de la frontera y de distintas instituciones académicas o gubernamentales.

La toma de conciencia de los retos que plantea el entorno regional actual que se derivan de una demanda cada vez mayor de agua para diferentes usos y una mayor complejidad institucional y política, se ven acentuados por la incertidumbre y modificaciones derivadas del cambio climático.

Revisar el territorio, las características hidrológicas, la colaboración binacional a través de instrumentos de modelación hídrica y plataformas tecnológicas para compartir información, se convierten en una herramienta poderosa para abonar a la toma de conciencia y generar orientaciones para enfrentar los retos presentes y futuros que tiene la región.

Algunas de las cosas que ustedes encontrarán estudiadas y discutidas en el texto incluyen evidencia de disminución en las superficies de cultivo en las últimas tres décadas, así como revisión de escenarios para el siglo XXI, que muestran reducción de disponibilidad de agua en el río utilizando distintas herramientas de modelación, con una escasez acentuada hacia la segunda mitad del presente siglo.

Esas condiciones ponen en riesgo las prácticas agrícolas actuales, por lo que se plantea la necesidad de explorar alternativas de desalación, modificación de cultivos y entender con mayor precisión la interacción entre aguas subterráneas y superficiales en la región.

La evaluación y modelación de áreas verdes en Ciudad Juárez arroja un importante déficit que, a su vez, implica riesgos a la salud y una mayor demanda de agua, a menos que se opte por forestar con plantas xerófitas y reforzar la infraestructura para una mayor reutilización de agua tratada.

La utilización de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales para evaluar un trecho a lo largo del río Bravo/Grande hasta su confluencia con el río Conchos en las últimas tres décadas, muestra evidencia de la pérdida de cubierta vegetal en zonas de bosque y de uso agrícola.

También en el texto se pueden encontrar innovaciones en métodos para monitoreo de pozos y sus variaciones piezométricas, así como la estimación de transmisividad de acuíferos a partir de datos de un solo punto, además de la estimación de evapotranspiración utilizando métodos indirectos apoyados en tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Estos datos y métodos que acrecientan nuestro conocimiento y las posibilidades de aumentarlo son solo una de las vertientes de esta importante obra, ya que además contiene mecanismos y evidencia de la necesaria colaboración binacional para avanzar en el conocimiento y la gestión de los recursos hídricos transfronterizos.

El proyecto de investigación que dio origen a la mayoría de los artículos de esta obra fue documentado para analizar los mecanismos exitosos de colaboración binacional en un contexto de mayor demanda y menor disponibilidad de agua, que incluyen un equipo de expertos binacionales, bases de datos y modelaciones transfronterizas, involucramiento de actores interesados en los temas abordados, reconocimiento igualitario de las contribuciones científicas y los retos en ambos lados de la frontera, y, finalmente, la apreciación de la *hidrodiplomacia* como una herramienta válida a consolidar y utilizar en el futuro hasta institucionalizar foros de discusión basados en evidencia científica.

Otro de los capítulos aborda la reciente crisis social generada por la escasez de agua y la necesidad de cumplir con el tratado de aguas de 1944 en la cuenca y, a partir de esa experiencia, se plantean alternativas de gestión concertada, incrementar la medición y modelación del recurso, acordar y reglamentar restricciones acordadas en el uso de agua, e incluso se dibujan esquemas institucionales novedosos para la gestión estatal del agua, que tendrían que ser replanteados considerando el marco legal federal vigente de gestión de agua en México.

La complejidad de la gestión de los recursos hídricos se aborda usando un enfoque sistémico en otro de los capítulos, buscando incorporar los elementos socioeconómicos y políticos a los modelos de disponibilidad y demanda hídrica.

La realidad binacional impone restricciones para compartir y hacer accesibles datos en ambos lados de la frontera, por lo que se generó una plataforma bilingüe, usando un modelo integrado agua-suelo (SWIM) que permite simplificar y visualizar los resultados de modelos más complejos. El capítulo respectivo aborda el proceso que se realizó en esa construcción y plantea la posibilidad de incorporar más datos y resultados de modelaciones más complejas una vez que estén disponibles.

Una sección muy importante del libro contiene esfuerzos de modelación de aguas superficiales y subterráneas, donde en uno de los artículos se encuentra evidencia de flujos de agua subterránea diferenciados en distintas zonas del acuífero del Bolsón del Hueco, donde es claro el impacto de la sobreexplotación urbana de agua en Ciudad Juárez en el flujo y en el abatimiento del acuífero.

En el lado estadounidense también se presentan nuevos modelos conceptuales que permiten ubicar flujos de agua subterránea con variaciones de concentración salina y edad de agua, que ayudan a construir escenarios de degradación de la calidad del recurso en las zonas de mayor explotación en el futuro.

Una modelación con una herramienta que evalúa la interacción agua-suelo (SWAT) permite construir escenarios en condiciones de sequía para la cuenca, sin embargo, se reconoce que es necesario incorporar las variables socioeconómicas y la interacción de aguas subterráneas y superficiales para mejorar los datos.

Usando la misma herramienta de modelación también se generaron datos para tratar de calcular un balance hídrico, explorando escenarios de eficiencia de riego y recarga inducida en la zona del Valle de Juárez. Son herramientas que buscan alternativas a la evidente reducción en la disponibilidad del recurso.

El capítulo final del libro es especial por diversas razones. Es un bello colofón a esta obra comprensiva, ya que recoge el historial de investigaciones realizadas por décadas sobre los recursos hídricos en la región y sus distintos hallazgos se convierten en acicates para nuevas investigaciones.

El autor nos prepara para la lectura de este último capítulo usando la metáfora de la *capirotada* y explicando la mezcla de investigaciones y hallazgos que contiene; yo recojo la metáfora en otra de sus perspectivas. La *capirotada* ciertamente es una comida de Cuaresma que pretendía utilizar pan viejo y duro como comida austera durante ese tiempo de penitencia, sin embargo, el ánimo festivo de la cultura mexicana (que estuvo siempre en los orígenes de esta región) transformó esa comida penitencial en un postre delicioso al agregar miel, nueces, coco o algunos otros ingredientes. Ese texto final es, pues, un “postre” necesario al final de una gran “comida” compuesta por los capítulos precedentes.

Estoy seguro de que tanto los estudiosos de los recursos hídricos como los tomadores de decisiones encontrarán datos, información, métodos y reflexiones útiles para afrontar las condiciones de mayor demanda y menor disponibilidad de agua que caracterizarán el futuro de esta cuenca transfronteriza.

Gracias y felicidades a la comunidad epistémica que aportó para generar este acervo hídrico.

**Dr. Oscar Fidencio
Ibáñez Hernández**

I

Geoinformatics, LULC, and Physical Geography

Geoinformática, territorio y geografía física

I.1 Vulnerability of Irrigated Agriculture to a Drier Future in New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys

Vulnerabilidad de la agricultura de riego a un futuro más seco en los Valles de Mesilla y Rincón de Nuevo México

Maryam Samimi¹, Ali Mirchi^{1*}, David Gutzler², Saleh Taghvaeian¹, Zhuping Sheng³, Alfredo Granados-Olivas⁴, Daniel Moriasi⁵, Sara Alian¹, William Hargrove⁶

¹Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Oklahoma State University, 111 Agricultural Hall, Stillwater, OK 74078, USA, ²Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA, ³Texas A&M AgriLife Research Center, 1380 A&M Circle, El Paso, Texas 79927-5020, USA, ⁴Department of Civil and Environmental Engineering-Geoscience Academic Group, Autonomous University of Ciudad Juárez, C.P. 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico, ⁵USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, 7207 W Cheyenne St., El Reno, OK 73036, USA, ⁶Center for Environmental Resource Management, The University of Texas at El Paso, 500 W University Ave., El Paso, TX 79968, USA

Abstract

Agriculture depends on irrigation in many regions, especially in arid and semi-arid areas. Climate variability and prolonged droughts in water-scarce regions further limit water availability, posing dire water sustainability concerns. The challenge is particularly grave in regions like New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys where water resources are increasingly strained due to growing water demand in domestic, industrial, and agricultural sectors. Understanding the vulnerability of irrigated agriculture to future climate conditions helps water authorities and farmers to better plan for future crop production.

Resumen

La agricultura depende del riego en muchas regiones, especialmente en áreas áridas y semiáridas. La variabilidad climática y las sequías prolongadas en regiones con escasez de agua limitan aún más la disponibilidad de agua, lo que plantea graves preocupaciones sobre la sostenibilidad del agua. El desafío es particularmente grave en regiones como los valles de Mesilla y Rincón de Nuevo México, donde los recursos hídricos están cada vez más agotados debido a la creciente demanda de agua en los sectores doméstico, industrial y agrícola.

Comprender la vulnerabilidad de la agricultura de regadío a las condiciones climáticas futuras ayuda a las autoridades del agua y a los agricultores a planificar mejor la producción futura de cultivos.

Introduction

Agriculture depends on irrigation in many regions, especially in arid and semi-arid areas. Climate variability and prolonged droughts in water-scarce regions limit water availability, posing dire water sustainability concerns. The challenge is particularly grave in regions like New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys where water resources are increasingly strained due to growing water demand in domestic, industrial, and agricultural sectors. Understanding the vulnerability of irrigated agriculture to future climate conditions helps water authorities and farmers to better plan for future crop production.

The Rio Grande/Rio Bravo (RGRB) River is the main renewable water source in the study watershed with an area of about 6,000 km² in New Mexico and Texas, US (Figure 1) and an average annual precipitation of about 270 mm. The agricultural watershed is part of the RGRB River Basin shared by the US and Mexico. The RGRB River originates in mountains located in San Juan County, Colorado, and flows south through the states of Colorado, New Mexico, and Texas in the US and Chihuahua in Mexico, ending at the Gulf of Mexico, covering about 924,300 km² (IBWC N.D.).

The RGRB is a heavily managed transboundary river where reservoirs and water diversions help regulate the river flow for human uses. The 1906 treaty between the US and Mexico allocates about 74 million cubic meters (MCM) (60,000 acre-feet) annually to northern Chihuahua, Mexico during normal years (IBWC 1906). The Elephant Butte Reservoir (EB) is the main source of surface water with a capacity of about 2.7 billion cubic meters, which marks the upstream physical boundary of our study area. Releases from the EB Reservoir to downstream users are regulated at the Caballo Reservoir, a small reservoir downstream from EB (capacity: about 424 million cubic meters). The water released from EB and Caballo reservoirs is almost entirely used for irrigation purposes, with a much smaller use for urban demands by El Paso, TX. Besides using river water, farmers pump groundwater from Mesilla Bolson to supplement surface water shortage.

Major agricultural activities in the area are concentrated in the Elephant Butte Irrigation District

(EBID) in New Mexico where pecan, alfalfa, corn, cotton, and pepper are the most common crops (Figure 2). Pecan orchards are an attractive investment because of the high economic return of pecan crops. However, pecan trees are sensitive to water stress and salinity (Miyamoto *et al.*, 1995; Miyamoto and Storey 1995), making pecan production vulnerable to prolonged droughts that may affect water availability for irrigation. This is evident in the annual impacts of drought on cultivation decisions in the study area. For example, the cultivation area of other crops in the EBID decreased during the severe droughts in 2003-2004 and 2011-2013, to sustain valuable pecan trees.

The agricultural community is cognizant of the challenges related to increasing water demand coupled with intensified water scarcity due to a potentially warmer and drier future climate (Hargrove and Heyman 2020). It is critical to better understand the vulnerability of irrigated agriculture to severe droughts to inform long-term agricultural planning in the region. A key question is whether the current level of agricultural production can be sustained if the strain on limited water resources grows. This chapter seeks

to answer this question using a scenario of warm-dry future and computer-based simulations of watershed hydrology in this heavily managed agricultural region.

Methods

Future Climate: Warm-Dry Scenario

Future climate conditions are projected using advanced tools such as General Circulation Models (GCMs) and regional models that are run under scenarios of greenhouse gas emissions (IPCC, 1990). There are many GCMs that are run under different assumptions of future greenhouse gas emissions, providing numerous future climate projections whose trajectories may diverge widely. It is not possible to exactly predict the weather condition or river flow in the coming years using existing models, especially far into the future. Nonetheless, warm-dry projections that agree well with overall observed regional trends offer useful information to conduct analyses of climate impacts on water resources and agricultural vulnerability.

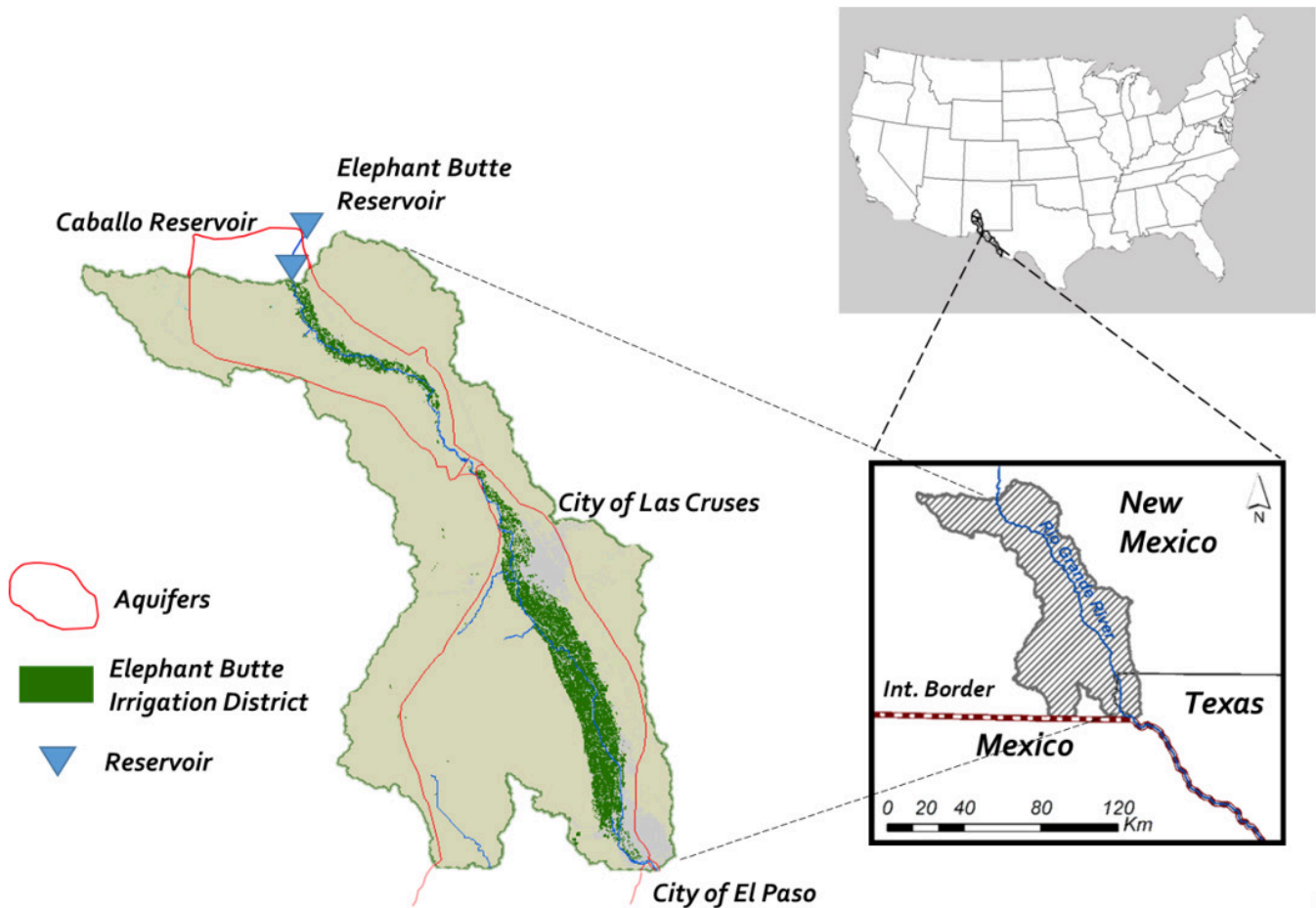


FIGURE 1: Study area in New Mexico and Texas.

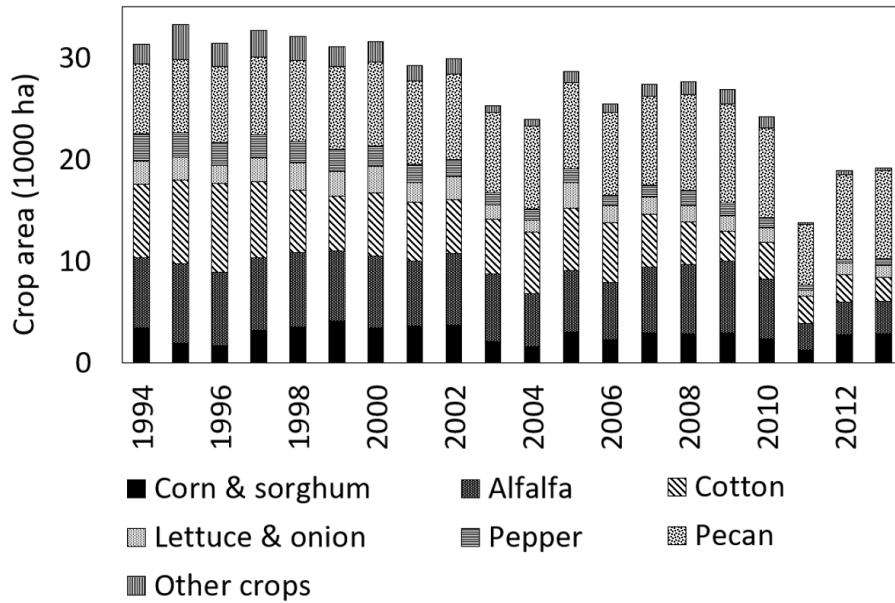


FIGURE 2: Changes in cultivation area of major crops in the EBID during the 1994-2013 period.

In this study, 97 different GCM-based projected river flow scenarios were available up to the year 2100 for San Marcial gauge (USBR 2016; Townsend and Gutzler, 2020), covering a range of wet to dry conditions. To address the key question posed by the agricultural stakeholders about the potential impact of a drier future, we selected a river flow projection with the highest number of dry years. Figure 3 compares the projected average river flow under the selected warm-dry scenario with the historical average annual river flow at San Marcial gauge. The projected river flow in almost all the years is lower than the average of historical river flow (1965-2015). In addition, under this projected scenario, the river flow entering EB Reservoir is at its lowest for 10 years from 2070 to 2080, which implies a

long drought. This projected RGRB river flow scenario was used to evaluate the vulnerability of irrigated agriculture using a watershed hydrology model.

Watershed Modeling

Watershed models use mathematical equations with different parameters to simulate the components governing the water cycle, providing a useful tool for water resources planning and management (Mirchi *et al.*, 2010; Ogden, 2021). The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a common watershed model that simulates the water cycle components and the impacts of changes in climate conditions or management operations (irrigation, fertilization, etc.) on water quantity and quality and crop growth (Arnold

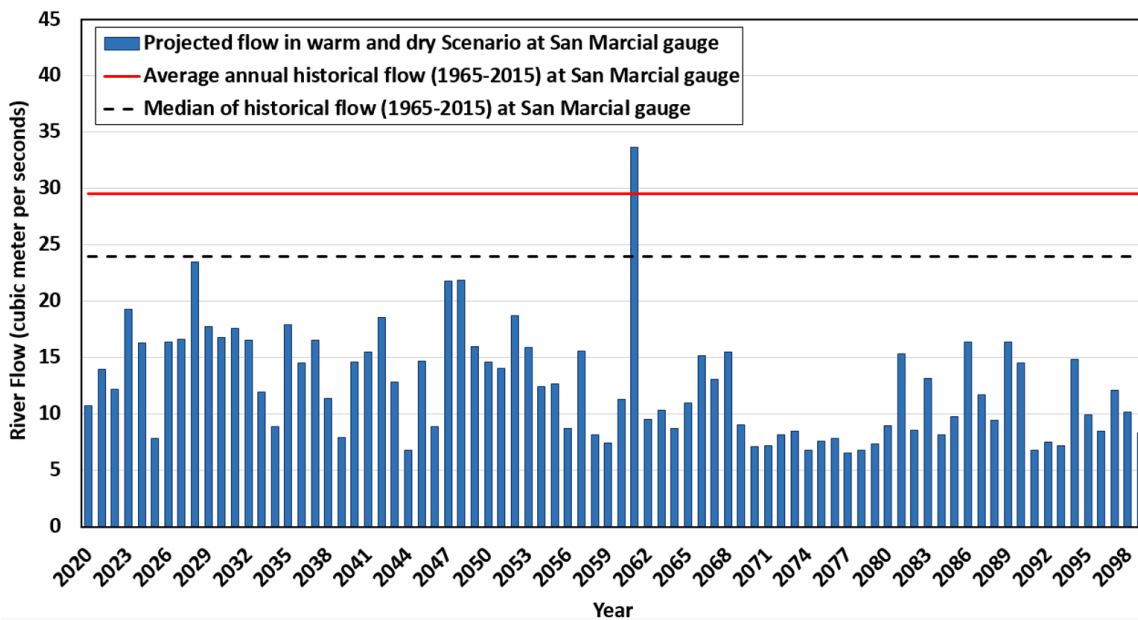


FIGURE 3: Projected river flow under the warm-dry scenario compared to historical average annual river flow and median river flow at San Marcial gauge.

et al., 1998). The SWAT model uses physical data and physiographic information about the watershed including elevation, land use/land cover, soil type, weather condition (e.g., precipitation, temperature, wind speed, etc.), and agricultural operations such as irrigation.

We used the crop pattern practiced during the latest severe drought (2011-2013) to examine if current cropping change during droughts would be adequate to cope with a significantly drier future. Thus, the type of crops grown and the area of farms were conservatively assumed to be the same as the year 2011. In actuality, the crop pattern in the study area is quite variable each year based on available water and potential expansion of pecan orchards. We also used the projected temperature and precipitation at different weather stations in the study area along with the river flow projections at San Marcial stations upstream of the EB Reservoir (USBR 2016), accounting for upstream human impacts on the flow (Townsend and Gutzler, 2020).

We applied a simplified reservoir operation model to estimate releases based on downstream water demand and available water storage. Two gauges, “Rio Grande Conveyance Channel at San Marcial” and “Rio Grande Floodway Channel at San Marcial” (USGS 08358300 and USGS 08358400), record the inflow into EB Reservoir. “Rio Grande below Elephant Butte” gauge (USGS 08361000) and “Rio Grande below Caballo” gauge (USGS 08362500) measure the releases from EB and Caballo Reservoirs. The “USGS gauge on Rio Grande at El Paso” (USGS 08364000) measures the river flow at the outlet of the study watershed. These flow measurements help set up the hydrologic model and check its performance in simulating the watershed. We analyzed the changes in the climate and water availability in the study watershed during the 1994-2013 period, which includes wet and normal years and two droughts (2003-2004 and 2011-2013). The amount of groundwater withdrawal in a conjunctive use scheme depends on different factors including the availability of river water. Farmers use groundwater to make up for river water shortage. Comparing the historical rates (1994-2013) of groundwater pumping and river water each year shows a relation between the river flow released from Caballo reservoir and groundwater pumped for irrigation. Using this relation, we estimated how much groundwater would be used under the warm-dry scenario.

A reliable model should be able to reproduce the hydrologic processes. Technically, it is not possible to

model the natural phenomena exactly by mathematical relations, but models can be calibrated and validated to make sure they can represent the watershed adequately. History matching is a common approach to demonstrate the suitability of hydrologic models for the intended use. For example, comparing simulated river flow with observations at the watershed outlet helps evaluate if the model is reliable. Calibration is a trial-and-error process in which the model parameters are changed in a controlled way and then the results are compared to the measured values in the same period and same location. The trial-and-error process will continue until the differences between the modeled and measured values are acceptable, meaning the model is considered reliable to simulate the watershed (Moriassi *et al.*, 2007; Samimi *et al.*, 2020). In the validation phase, the reliability of the calibrated model will be checked in a different time period without further tuning the model parameters. It should be emphasized that the model ideally should be calibrated and validated for all the targeted outputs. For example, if the user intends to apply the results of river flow and evapotranspiration (ET), the model should be calibrated and validated for both components. In this study, we have used a SWAT model calibrated based on river flow, ET, and groundwater recharge to assess the impacts of future climate conditions.

Results and discussion

We compared the results of the calibrated SWAT model for river flow at the watershed outlet near El Paso with measured river flow at the same location. The simulated river flow matched the measured river flow well (Figure 4). Several statistical metrics can be used to evaluate the reliability of the model. The metrics that we used are the Nash-Sutcliffe efficacy coefficient (*NSE*), correlation coefficient (*r*), and percent bias (*PBIAS*) based on recommended acceptability thresholds (Moriassi *et al.*, 2007). For the developed SWAT model, the values of *NSE* were 0.84 and 0.74 for calibration and validation phases, respectively, indicating a reliable model. The values of *r* (0.96 and 0.9), and *PBIAS* (6.2% and 0.61%) for calibration and validation further confirmed model reliability.

The model results for the average annual amount of water available for irrigation and average annual crop ET are used to analyze watershed vulnerability. Figure 5 shows the example simulation results for future average annual crop ET, over the study area, under the warm-dry climate condition and the corresponding 5-year

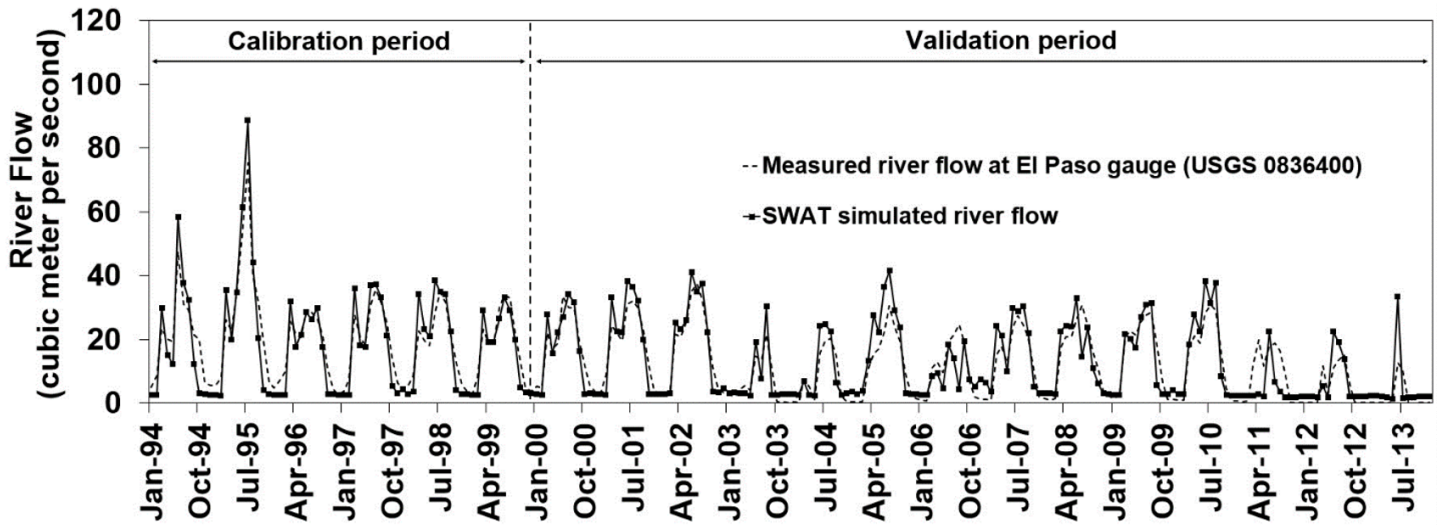


FIGURE 4: Comparing the SWAT simulated river flow and measured river flow at El Paso gauge during the calibration and validation periods.

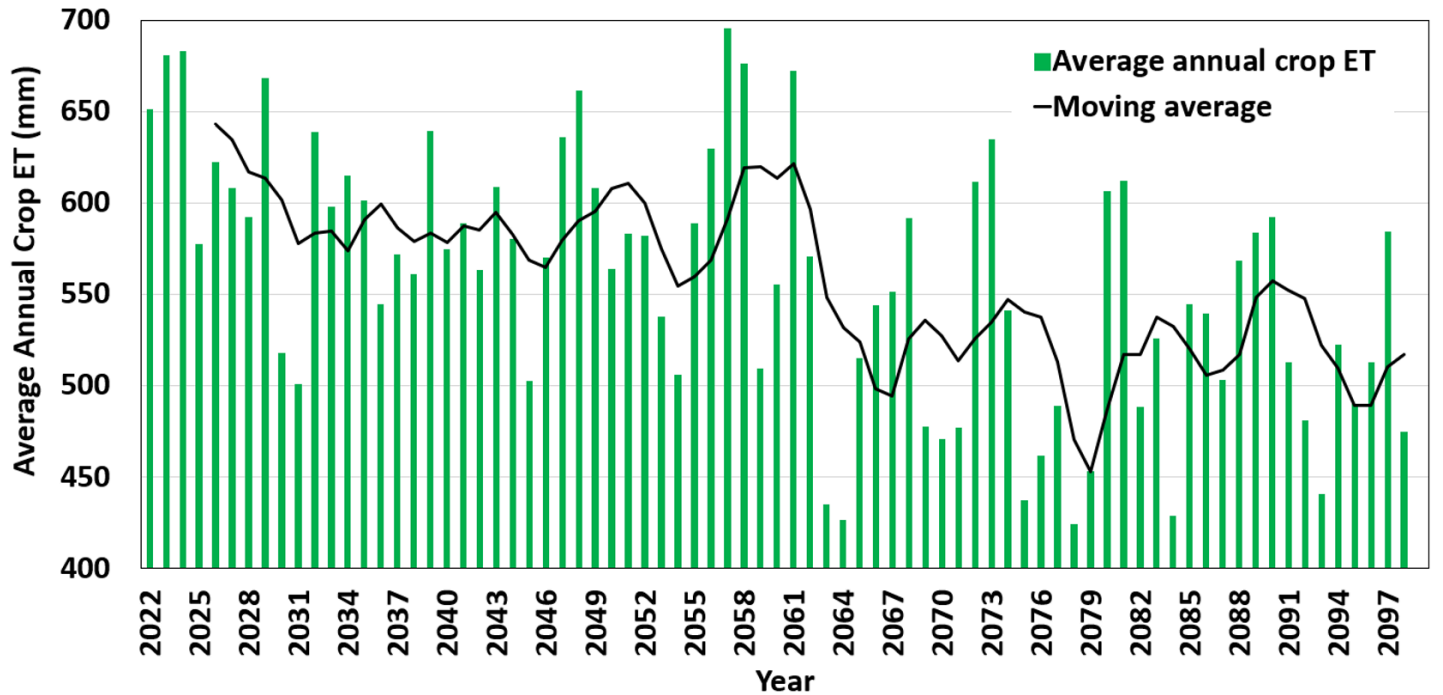


FIGURE 5: Average annual crop ET over the study area and the 5-year moving average under warm-dry scenario.

moving average. The significant decline in the moving average trend after 2060 is due to the depletion of fresh to slightly saline groundwater, which limits irrigation supply. Without groundwater resources as a backup source, crop losses are more severe. This indicates increasing vulnerability of irrigated agriculture during prolonged droughts by continuing the business-as-usual irrigation management and crop pattern.

The water shortage problems in the study area may be graver in the future. The trends in crop cultivation show that pecan orchards have been expanding, a trend that may hold into the future given the profitability

of pecans. This indicates a land use with higher water consumption per unit area than what we assumed, combined with less flexibility in water use since pecans are a perennial crop and must be watered to keep them alive, making our projection of the vulnerability of irrigated agriculture a lower-bound estimate.

Results show that the current level of agricultural activities, based on the predominance of pecans, cannot be maintained in the face of future water shortages and severe droughts. Farmers practice some water conservation measures to cope with water scarcity during droughts. But, in general, pecan culture continues

to increase while the production of less profitable annual crops like cotton or perennials like alfalfa, are decreasing. The ET of mature pecan tree is estimated about 1000-1300 mm per year in several orchards in the region (Miyamoto 1983). Figure 6 shows that even completely avoiding cultivation of alfalfa would not help to maintain all the pecan orchards in the case of extreme future water scarcity. Based on the findings presented in this figure, applying water conservation methods after possible depletion of fresh groundwater resources in the second half of the 21st century would not save enough water for pecan production during prolonged severe droughts (e.g., 2070-2079). Pecan orchards will be vulnerable unless the production of other crops is halted during severe drought periods to save water for pecan crops. Timely alteration of the crop mix to include more resilient crops and applying interventions like removing alfalfa or deficit irrigation of alfalfa would increase the

data uncertainties while model improvements are needed to address the technical limitations of SWAT in simulating crop irrigation. In particular, there is a need for more extensive field data for objective evaluation of the implications of deficit irrigation and drip irrigation for different crops in the study area.

Conclusion

Plausible climate projections and historical declining trend of river flow point to a higher risk of a dry future for the study area. Results of this study showed that the current agricultural practices would be quite vulnerable to a future warm-dry scenario with severe droughts. Long-term droughts could lead to major loss of crop production as the fresh groundwater resources are depleted under more pressure. This exacerbates the vulnerability of agriculture sector, especially the high

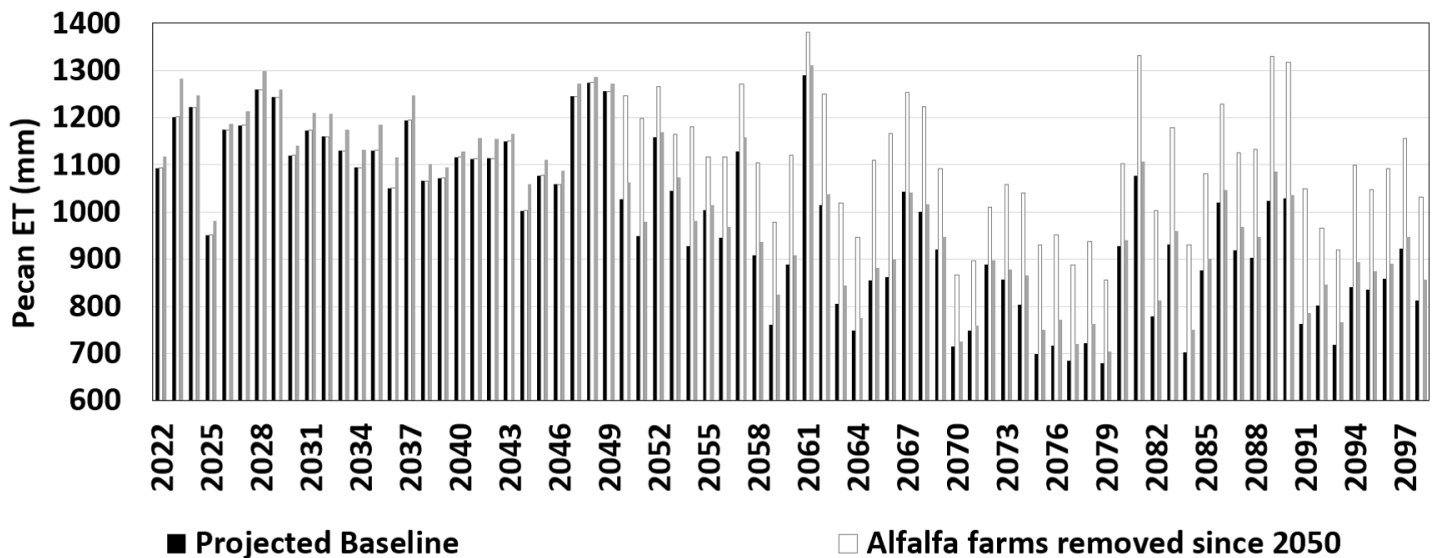


FIGURE 6: Comparing the changes in pecan ET under different water conservation practices such as removing alfalfa farms from the crop mix since 2050 (white bars) and deficit irrigation of alfalfa farms (gray bars) with business as usual (black bars).

ability of the producers to cope with future droughts. A gradual transition of crop pattern to more drought and salt tolerant crops with comparable economic value as pecan should be explored as a potential adaptation strategy. Pistachio and pomegranate are two examples of valuable crops compatible with climate condition of the region that are relatively more resistant to water stress and salinity. SWAT modeling results provide insights into water availability under different plausible future climate conditions as well as the utility of possible interventions to conserve water resources. However, detailed field studies are required to reduce

value pecan orchards in a way that common practices in the region to reduce water consumption by unregulated deficit irrigation or removing some crops during the drought period might not be adequate in the future. It is timely to plan for more aggressive water conservation measures to reduce water loss, such as using desalination to make use of brackish groundwater, cultivation of a more drought- and salt-tolerant crops, and improved irrigation methods such as drip irrigation in New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys. Detailed field studies are required on applicability of different types of deficit irrigation, cultivating pistachio and pomegranate

in the area with different irrigation methods, soil salinity changes, application of saline water for irrigation, and interaction of surface water and groundwater under different irrigation intervention scenarios to inform adaptive agricultural water management in the region. But our results show that “business as usual” is not sustainable under conditions of future prolonged drought.

References

- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. “Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development.” *Journal of American Water Resources Association*. 34(1): 73-89.
- Brutsaert, W., 2005. *Hydrology: an introduction*. Cambridge University Press. ISBN: 0521824796, 9780521824798; 605 pages.
- Hargrove, W.L. and Heyman, J.M., 2020. A comprehensive process for stakeholder identification and engagement in addressing wicked water resources problems. *Land*, 9(4), 119.
- International Boundary and Water Commission (IBWC). 1906. Convention between the United States and Mexico—Equitable distribution of the waters of the Rio Grande.
- International Boundary and Water Commission (IBWC). About the Rio Grande, retrieved April 26th from: <https://www.ibwc.gov/CRP/riogrande.htm>
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990. *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mirchi, A., Watkins Jr, D. and Madani, K., 2010. Modeling for watershed planning, management, and decision making. Chapter, 6, 1-25.
- Miyamoto, S., 1983. Consumptive water use of irrigated pecans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 108(5), 676-681.
- Miyamoto, S., Henggeler, J. and Storey, J.B., 1995. Water management in irrigated pecan orchards in the southwestern United States. *HortTechnology*, 5(3), 214-218.
- Miyamoto, S., Storey, J.B. 1995. Soil management in irrigated pecan orchards in the southwestern United States. *HortTechnology*. 219-222.
- Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, and T.L. Veith. 2007. “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- Ogden, F.L., 2021. *Hydrological Modeling*, National Water Center, *Geohydrology*, Tuscaloosa, AL. pp. 460-475. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00115-6>
- Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Soil Survey Geographic (SSURGO) Database. Available online at <https://sdmdataaccess.sc.egov.usda.gov>.
- Townsend, N.T., and D.S. Gutzler. 2020. “Adaptation of climate model projections of streamflow to account for upstream anthropogenic impairments.” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, manuscript in revision.
- U.S. Bureau of Reclamation (USBR). 2016. West-wide climate risk assessments: Hydroclimate Projections, Technical Memorandum. 86-68210-2016-01, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 58 pp.
- Ward, F.A., Pulido-Velazquez, M. 2008. Efficiency, equity, and sustainability in a water quantity–quality optimization model in the Rio Grande basin. *Ecological economics*, 66(1), 23-37.

I.2 Impacto del cambio climático en el índice de áreas verdes para un futuro cercano 2030 en Ciudad Juárez, Chihuahua

Impact of climate change on the green areas index for the near future 2030 in Ciudad Juárez, Chihuahua

Yazmín G. Hernández-García¹, Felipe A. Vázquez-Gálvez¹, Rogelio Alvarado-Hernández¹, Eli R. Pérez-Ruiz¹, Edith Flores-Tavizón¹, Marisela Soto-Padilla¹, Óscar Ibáñez-Hernández¹, María Elena Torres-Olave¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El cambio climático es un problema actual y se relaciona ampliamente con distintos efectos en el ambiente, uno de los cuales está íntimamente ligado con el abastecimiento y disponibilidad del agua. El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de cualquier comunidad y su limitación ocasiona problemas de distinta índole, que van desde la salud hasta las afectaciones sociales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha relacionado la disponibilidad de áreas verdes en las ciudades y los beneficios sociales y de salud que estos traen a la población. Desafortunadamente, el desarrollo de las áreas verdes depende en su totalidad del espacio y del abastecimiento de agua para riego. Por ello, el objetivo del estudio fue evaluar el impacto del cambio climático sobre el índice de áreas verdes (IAV) en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Para lograr tal fin, se determinó el índice de áreas verdes (IAV) por medio de imágenes satelitales Sentinel-2A y el NDVI. Además, se estimó el volumen de agua disponible para un futuro cercano 2030 y una trayectoria representativa de concentración (RCP) de 8.5. Como parte de los resultados, quedó patente que la ciudad carece de espacios de áreas verdes: existe solo 2.49 m² de espacios verdes por cada habitante, y para 2030 se estima una reducción de esta cifra hasta 2.29 m²/habitante. Ante tal situación, es de vital importancia incrementar los espacios verdes de la ciudad, sin embargo, para lograr esta meta es necesario contar con un flujo de agua destinada para tal fin. La Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) considera dos tipos de agua para riego de las áreas verdes: agua potable y agua residual tratada, sin embargo, en ambos casos el vital líquido está

destinado en su mayoría para otros usos, como lo son las necesidades básicas de la población y riego de campos agrícolas, respectivamente. Aunado a lo anterior, la principal fuente abastecimiento, el acuífero El Bolsón del Hueco, se encuentra en condiciones de sobreexplotación y, en términos generales, Chihuahua está sometido a una sequía considerada como extrema. Por todos estos factores, se proponen varias estrategias que permitan utilizar entre el 5 y el 76 % del agua disponible para riego de áreas verdes y a su vez incrementar el IAV hasta 9 m²/hab, de acuerdo con lo recomendado por la OMS (WHO, 2016).

Abstract

Climate change is a current problem and is widely related to different effects on the environment, one of which is closely linked to the supply and availability of water. Water is an essential resource for the development of any community and its limitation causes problems of different kinds, ranging from health problems to social problems. The World Health Organization (WHO) has related the availability of green areas in cities and the social and health benefits that these bring to the population. Unfortunately, the development of green areas depends entirely on space and the supply of water for irrigation. That is why the objective of the study was to evaluate the impact of climate change on the green area index (IAV) in Ciudad Juárez. To achieve this end, the green area index (IAV) was determined by means of Sentinel-2A satellite images and the NDVI. As part of the results, it was clear that the city lacks green space: there is only 2.49 m² of green space for each inhabitant, and by 2030 a reduction of this figure is estimated to 2.29 m²/inhabit. Faced with such a situation, it is vitally important to increase the green spaces of the city; however, to achieve this goal it is necessary to have a flow of water intended for this purpose. The Municipal Water and Sanitation Board (JMAS) considers two types of water for irrigation of green areas: drinking water and treated wastewater, however, in both cases the vital liquid is destined mostly for other uses, such as the basic needs of the population and irrigation of agricultural fields, respectively. In addition to the above, the main supply source, the El Bolson del Hueco aquifer, is in over-exploitation conditions and in general terms, the State of Chihuahua is subject to a drought, considered extreme. It is due to all these factors that several strategies are proposed that allow the use of between 5 and 76% of the available water for irrigation

of green areas and in turn increase the IAV up to 9 m²/inhab according to the recommendations of the WHO (WHO, 2016).

Introducción

El cambio climático es una realidad y ha sido considerado un problema ambiental de gran relevancia en los últimos años. Este se define como la variación del clima provocada de manera natural o antropogénica, que persiste durante periodos prolongados. Algunos efectos derivados de este fenómeno son: aumento en temperatura global atmosférica y oceánica, inundaciones, sequías y modificaciones en la distribución de las especies, entre otros. Los cambios globales, como la elevación del nivel del mar y la consecuencia por su acoplamiento con la atmósfera, afectan la meteorología y, por ende, los ecosistemas (García *et al.*, 2015; Burger *et al.*, 2016; Arcanjo, 2018; Rivera-Lozano *et al.*, 2019). La frontera México-Estados Unidos no está ajena a los impactos en el corto y mediano plazo (Varady, 2009).

En 1985, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) publicó una reseña donde, por primera vez, se plantearon las presiones que generaría el cambio climático en los recursos hídricos. Posteriormente, se creó el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para evaluar la experiencia científica en esta materia y generar reportes periódicos sobre posibles riesgos y opciones de mitigación y adaptación. En 2019, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indicó que el cambio climático tiene un efecto directo sobre el ciclo del agua que ocasiona fenómenos hidrometeorológicos extremos y dificulta la disponibilidad de los recursos hídricos, por lo que limita los alcances de la sustentabilidad de las ciudades. Es por esto que se ha señalado la importancia de la participación de las ciudades en la implementación de medidas de adaptación al cambio climático. Por su importancia, la mitigación debe incluir cambios importantes en la nueva infraestructura de las ciudades. El uso de infraestructura resiliente, a partir de introducir elementos de paisajismo urbano (De la Sota *et al.*, 2019), el manejo sustentable y gestión de los recursos hídricos, son algunas de las medidas válidas para asegurar la sustentabilidad de las comunidades y dar cumplimiento a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2019).

Dada la importancia de determinar el impacto que el cambio climático tendrá sobre los recursos y definir si las acciones tomadas por las ciudades serán suficientes

para cubrir las demandas de las actividades económicas y sociales, los estudios sobre el tema han aumentado en los últimos años. Nan *et al.* (2011) mencionaron que el cambio climático está afectando los recursos hídricos y concluyeron que la medición de este tipo de impactos en los recursos hídricos es complicada. Entender la complejidad del comportamiento de los procesos meteorológicos es crucial para evaluar las afectaciones. Sin embargo, la evaluaciones y procedimientos van a mejorar en un futuro. Chávez-Jiménez *et al.* (2015) concluyeron que los recursos hídricos están en estrés debido a los efectos del cambio climático y estos seguirán creciendo si no se toman medidas. Estudios recientes han permitido mejorar la modelación numérica del clima en horizontes multidecadales (Rivera-Lozano *et al.*, 2019). A partir de los modelos es posible aproximar las anomalías en relación con temperatura y precipitación. Asimismo, es viable incorporar diversos patrones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la efectividad de los acuerdos internacionales de mitigación. Es posible, por tanto, generar escenarios futuros de las presiones a la recarga de acuíferos y las contribuciones a los cuerpos de agua superficial. Esta información puede alimentarse a plataformas de integración de datos a mesoescala, como Agua Sostenible a través del Modelado Integrado (SWIM, por sus siglas en inglés). Por lo anterior, el objetivo del estudio es estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua para riego, como factor crucial para el mantenimiento de las áreas verdes en Ciudad Juárez, en base a modelos generados por la plataforma SWIM para un futuro cercano 2030.

Agua en México

A nivel mundial, se estima que cerca de cuatro mil millones de personas experimentan problemas asociados al abastecimiento del vital líquido en algún momento de su vida (González *et al.*, 2020). En 2015, cerca de 6.6 millones de personas carecían del servicio de agua potable en México (CONAGUA, 2018; Montero, 2012). En contraste, son privilegiadas aquellas comunidades, como Ciudad Juárez, que mantienen un abasto continuo a la mayor parte de la población. A pesar de que México cuenta con un volumen fluido de agua, gracias a la agua de lluvia, al agua subterránea y al agua superficial, se considera que el país dispone de bajo volumen del recurso hídrico. El uso consuntivo del agua en el país proviene del agua superficial (61 %) y del agua subterránea (39 %), y este se distribuye en riego

agrícola (76 %), en energía eléctrica (4.7 %) (excluyendo hidroelectricidad), en abastecimiento público (14.4 %) y en industria autoabastecida (4.9 %) (CONAGUA, 2018; Salazar, 2020). Dados los requerimientos hídricos, es necesario contar con el abastecimiento suficiente, ya que estos usos son motivo de preocupación dada la contribución de los sectores económicos al Producto Interno Bruto (PIB) estatal y nacional.

En 2017, en el país se estimó un consumo de 34 380 hectómetros cúbicos (hm³) por año para usos consuntivos, proveniente exclusivamente de agua almacenada en acuíferos. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene identificadas 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), las cuales albergan 653 acuíferos, y fue en 2015 que se publicó el estatus de cada uno de estos reservorios (Tabla 1). De acuerdo con estadísticas de la CONAGUA (2018), de los 653 acuíferos, 105 presentaban sobreexplotación, 18 presentaron intrusión marina y 32 salinización de suelos y agua subterráneas salobres. Las RHA de la zona norte, centro y noroeste cuentan con una tercera parte del agua renovable, cuatro quintas partes de la población y una equivalencia proporcional en el aporte regional al PIB nacional, mientras que la zona sureste presenta dos terceras partes del agua renovable del país y una quinta parte de la población que aporta una cantidad similar al PIB (CONAGUA, 2018). Ante el cambio climático, el

ciclo del agua se ve afectado y un punto de quiebre que se resiente con mayor intensidad son las precipitaciones, las cuales están íntimamente relacionadas con los periodos de sequía. Estas ocurren cuando los niveles de lluvia son significativamente menores a los niveles normales registrados, lo que ocasiona problemas en el desarrollo de las comunidades y genera impactos económicos y sociales. Se considera que este tipo de eventos ocasionan la mayor repercusión económica a las comunidades. La CONAGUA (2018) ha identificado cerca de 106 municipios vulnerables a la sequía meteorológica, hidrológica y agropecuaria (Payano-Almánzar, 2018), ubicados en la región noroeste del país. Es en el mes de mayo cuando generalmente termina el periodo de secas e inicia el de lluvias, sin embargo, estos patrones han cambiado debido a efectos asociados al cambio climático. El comportamiento de la sequía a nivel nacional se vio modificada: las regiones centro y occidente del país mostraron un incremento de las áreas con sequedad o anormalmente secas, mientras que en los estados de Chihuahua y Sonora se observó un incremento de la sequía moderada. Este tipo de sequía es asociada a eventos que ocasionan daños en los cultivos y pastos, y que, además, existe alto riesgo de incendios, de bajos niveles de agua en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, y que sugiere la restricción voluntaria del agua. Esta clasificación es el segundo tipo de sequía más

TABLA 1: Regiones hidrológicas administrativas y acuíferos en México.

Número de RHA	Número de acuíferos				Recarga media (hm ³)*	Aportación al PIB nacional 2016 (%)
	Total	Sobreexplotados	Con intrusión marina	Con salinización de suelos y aguas subterráneas salobres		
I	88	36	11	5	1658	4.26
II	62	17	5		3207	3.41
III	24	7			3076	3.08
IV	45	4			4873	6.40
V	36	1			1936	2.19
VI	102	36		8	5935	15.03
VII	65	27		18	2376	4.39
VIII	128	62			9656	19.75
IX	40	8			4108	2.29
X	22	1			4599	5.25
XI	23	0			22 718	4.06
XII	4	0	2	1	25 316	5.27
XIII	14	4			2 330	24.63
Total	653	203	18		91 788	100

Fuente: Elaborada con datos del Diario Oficial de la Federación, acuerdo de actualización de disponibilidad media anual de los 653 acuíferos del país del 20 de abril de 2015 y con datos de Estadísticas del Agua en México 2018.

grave, de acuerdo con la clasificación del Monitor de Sequía de América del Norte (MSAN), utilizada por la CONAGUA. Para 2017, México presentaba el 8.19 % de la superficie con sequía y el 19.7 % con condiciones anormales secas (CONAGUA, 2018).

Situación del agua en Ciudad Juárez

La ciudad fronteriza de Ciudad Juárez, Chihuahua, se localiza en la región Paso del Norte y colinda al norte con el municipio de Ascensión y Estados Unidos de América (EUA); al este con los EUA y el municipio de Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Ahumada y Ascensión; y al oeste con Ascensión (INEGI, s. f.). El clima de Ciudad Juárez está clasificado como clima seco desértico o muy seco templado (Bwk), con base a la clasificación de Köppen (Cervera, 2006). El rango de temperatura media anual es de 22 a 24 °C, el rango de temperatura promedio mínima anual es de 4 a 5 °C y el de temperatura promedio máxima anual es de 36 a 38 °C. El intervalo de precipitación media anual es de 300 a 400 mm (Microregiones, 2005).

En un análisis particular del uso y origen del agua, esta proviene de los escurrimientos del río Bravo, los cuales, en su mayoría, se destinan al uso agrícola, mientras que el acuífero Bolsón del Hueco abastece de agua potable a la ciudad. Este acuífero pertenece a la RHA VI y es una cuenca transfronteriza, ya que su ubicación geográfica permite compartir el recurso con el vecino país. Para dicha RHA se estimó un total de 102 acuíferos, de los cuales 36 se encuentran en condiciones de sobreexplotación, representando un 35 % del total en esta condición (CONAGUA, 2018). Según datos de la CONAGUA publicados en el Diario Oficial de la Federación (2015), la RHA VI Río Bravo tiene un déficit de 393 millones de metros cúbicos (Mm³) anuales, lo que significa una tasa de extracción mayor a la de recarga.

Un número importante de expertos identifican al Bolsón del Hueco como un acuífero sobreexplotado, lo que generará un estrés hídrico en la zona y pudiera tener una repercusión directa sobre el desempeño de actividades económico-industriales y sociales (Salas-Plata, 2006). Este es considerado un acuífero transfronterizo cuya explotación es compartida con la vecina ciudad de El Paso, Texas (Hatch, 2017). Ciudad Juárez depende en su totalidad de este reservorio, el cual funciona por medio de una batería de pozos operados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS). Actualmente, el 98.5 % de las viviendas cuentan con

suministro de agua potable dentro de su propiedad (INEGI, 2021) y los consumos oscilan en los 350 L/día/per cápita, valor superior al abasto mínimo sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (JCAS, 2021).

Estos volúmenes de extracción se verán mayormente afectados conforme la población siga aumentando. El crecimiento de las ciudades y las necesidades de infraestructura se relacionan con un incremento proporcional al incremento de la población. Según datos del censo de población y vivienda de 2020, la ciudad contaba con una población de 1 512 450 habitantes (INEGI, 2021), mientras que, de acuerdo con proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2020), se espera una población aproximada de 1 544 972 habitantes en 2030. Dicho incremento representa un aumento promedio de 0.58 % por año.

Estos resultados son contrastantes, ya que al analizar los datos obtenidos del último censo de población y vivienda a 2020 y las proyecciones previstas por el CONAPO, Ciudad Juárez está por alcanzar la población prevista a 2030 (Figura 1). Las presiones por el incremento poblacional de cualquier comunidad inducen la necesidad del diseño y adaptación de la infraestructura para satisfacer las necesidades básicas. Desde hace años, la planeación urbana y la salud pública han estado unidas y se ha relacionado la calidad de vida de las poblaciones con la superficie de áreas verdes de las ciudades (Kochtitzky *et al.*, 2006; WHO, 2016).

PLATAFORMA SWIM: MODELO HIDROECONÓMICO

Los modelos hidroeconómicos han sido utilizados a lo largo de los años. Estos contemplan el estudio de aspectos económicos y de la ingeniería enfocado en el manejo eficiente de los recursos hídricos. El objetivo primordial es el diseño de políticas públicas con el fin de dar solución a problemas hídricos (Campo, 2018). La modelación económica puede ser rastreada hasta los años 60 y 70 en las regiones áridas como Israel y el suroeste de Estados Unidos. La mayoría de los modelos suelen tener ciertos componentes básicos, como los flujos hidrológicos, el manejo del agua, las demandas hídricas, los costos de operación y las reglas de operación. Teniendo en cuenta cada uno de estos componentes, se pueden generar diferentes tipos de modelos de simulación, donde se responderá la pregunta “¿qué pasaría si...?”, o un modelo de optimización donde se manipulan las restricciones para saber qué es mejor (Haroua *et al.*, 2009).

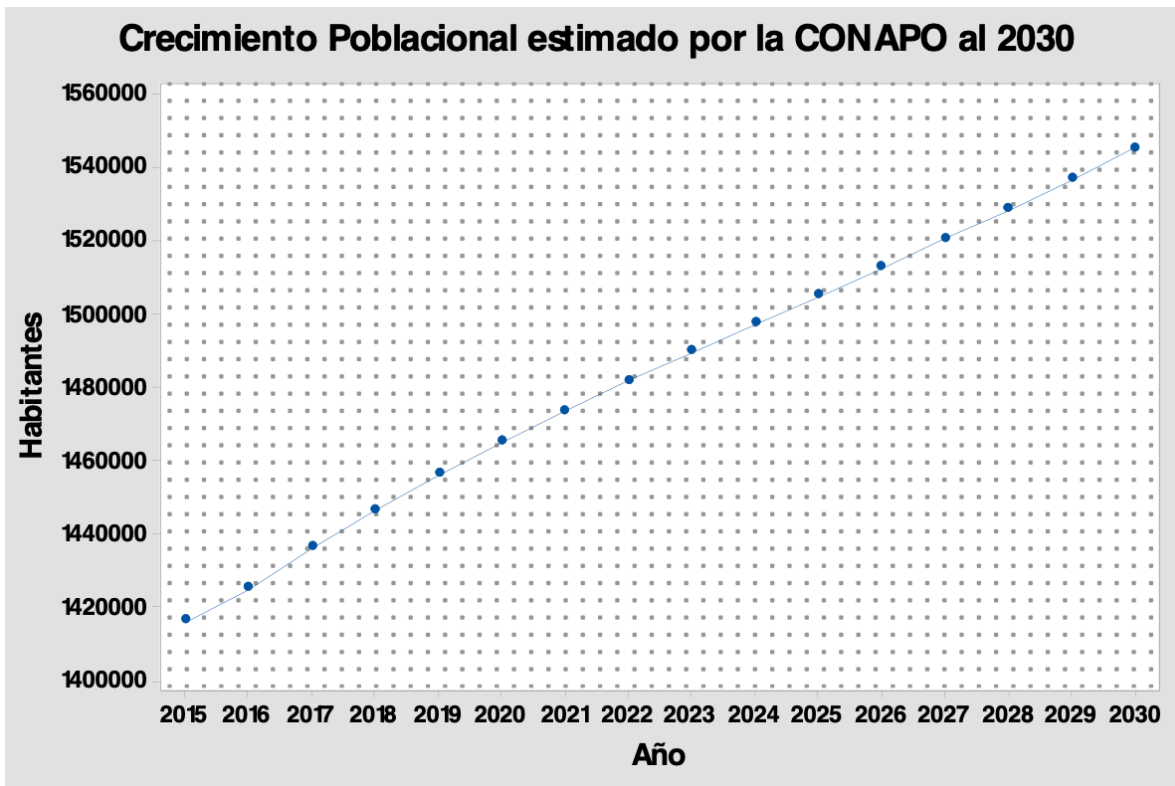


FIGURA 1: Comportamiento demográfico en Ciudad Juárez. Fuente: Elaboración propia, con datos del CONAPO (2020) e INEGI (2021).

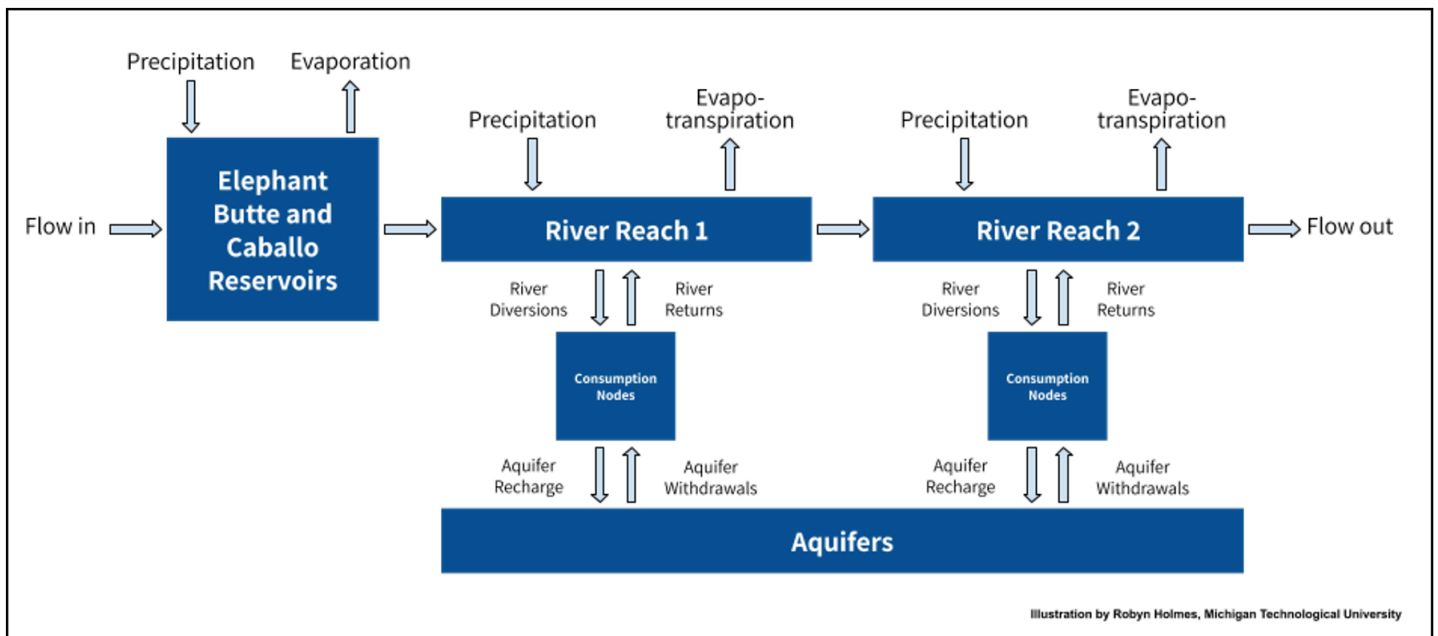


FIGURA 2: Diagrama del funcionamiento del balance de agua utilizado en el modelo SWIM. Fuente: SWIM (2019). <https://swim.cybershare.utep.edu/es/wb-intro>.

El modelo seleccionado para este proyecto es SWIM (*Sustainable Water through Integrated Modelling*), que fue elaborado específicamente para el área de estudio y cumple con los objetivos para realizar una parametrización de los consumos y del abatimiento del acuífero Bolsón del Hueco. De acuerdo con los desarrolladores, el modelo de balance de agua (Figura

2) se basa en un modelo de contabilidad hidrológica matemática para el centro de cuenca Río Grande desde las compuertas del San Marcial hasta Fort Quitman (University of Texas at El Paso, 2019).

Los resultados que arroja el modelo son los flujos en las presas, el volumen de almacenamiento superficial y subterráneo, el bombeo subterráneo, la

recargas, las entregas realizadas por el tratado México-Estados Unidos de 1906, la evaporación de depósitos superficiales, el uso total de agua y su distribución entre los principales sectores consumidores de agua (SWIM, 2019). Para fines del proyecto, los resultados que son de mayor interés son los volúmenes de almacenamiento subterráneo, ya que con estos resultados se podrá observar el comportamiento de los acuíferos con respecto a un escenario climático y así se podrá adoptar medidas respecto al uso de los recursos hídricos de la ciudad. El apartado de restricciones institucionales, donde se toma en cuenta el tratado de 2008 para las prácticas de irrigación de los distritos de El Paso, el tratado entre México y Estados Unidos es uno de los más importantes para los agricultores del lado mexicano y que dependen del agua superficial. Las entregas de agua a México se reducirán con respecto a la disminución de las entregas en las tierras estadounidenses. Los aspectos económicos, en virtud de los elementos para representar el modelo hidroeconómico, se basa en beneficios y costos económicos que están asociados con el uso, el nivel del reservorio o nivel de flujo de entrada para servicios ambientales de provisión.

Los escenarios de cambio climático que provee el modelo son cinco. El primero hace una réplica de los flujos observados hasta 2010 y 2011-2013. En este periodo se presentó una sequía y se extiende hasta el fin de la modelación. Los otros cuatro escenarios son derivados de cuatro diferentes modelos de simulación climática propuestos por el Buro de Reclamación de Estados Unidos (*United States Bureau of Reclamations*), que están basados en el CMIP5/ (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados), dos de los cuales se basan en escenarios RCP 8.5 y los otros dos en el RCP 2.6.

Las trayectorias representativas de concentración (RCP: *Representative Concentration Pathways*), se pueden usar para representar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y las concentraciones de

aerosoles, en conjunto con el cambio de uso de suelo para los años 2000 a 2100. (Jubb *et al.*, 2019). Estas trayectorias se caracterizan por su forzamiento radiativo producido para el final del siglo XXI, de 8.5 watt por metro cuadrado (W/m^2) y $2.6 W/m^2$, lo que permite asumir al primero como el escenario más adverso y el segundo como el más deseable pero menos probable ante las tendencias actuales de mitigación.

Las RCP se pueden clasificar como se muestra en la Tabla 2, en función del camino para no sobrepasar los 2 °C de calentamiento global antes de 2100.

Áreas verdes

La definición de áreas verdes es variable y depende del contexto del análisis. Estas pueden incluir desde superficies o entornos naturales hasta tipos específicos de vegetación disponible, e incluso hay autores que consideran a los espacios “azules” (elementos de agua que van desde estanques hasta zonas costeras) como parte de la vegetación. En Europa, según el Atlas Urbano, la definición más utilizada es la que incluye el análisis de espacios públicos, comúnmente utilizados para la recreación, como jardines, zoológicos, parques, áreas naturales protegidas y/o áreas verdes bordeadas por zonas urbanas, y suele excluir cuerpos de agua en esta definición (WHO, 2016). El Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez, define área verde urbana como “el suelo localizado al interior de la mancha o área urbanas periférica dentro del límite del centro de población, constituido predominantemente por superficie permeable como tierra, provista necesariamente con vegetación, que por su orden jerárquico son: árboles, arbustos, cubre pisos, y eventualmente otro tipo de superficie o edificaciones menores, de carácter público o privado, ya sea de origen natural o acondicionado y que desempeñan funciones ambientales, sociales o productivas” (RDUS-JUÁREZ, 2015).

TABLA 2: Características principales de cada RCP.

Componente de escenario	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Gases de efecto invernadero	Muy bajo	Media-baja en mitigación. Línea base muy baja	Línea base mediana. Alta mitigación	Línea base alta
Agricultura	Mediano para cultivo y pasturas	Muy baja para cultivos y pasturas	Mediana para cultivo. Muy baja para pasturas	Mediana para cultivo y pasturas
Contaminación del aire	Mediana y baja	Mediana	Mediana	Mediana-alta

Fuente: Elaboración propia, con datos de Furphy (2013).

El Plan de Desarrollo Urbano Sostenible indica que, según datos del plan de uso de suelos, el 2.08 % corresponde a áreas verdes. Estas son clasificadas en función del espacio disponible (Tabla 3), siendo los espacios clasificados como parques urbanos los que mayor espacio ocupan. Los usos y los beneficios de las áreas verdes son variados y brindan servicios ambientales, como el aporte de oxígeno, captura de contaminantes, regulación de las islas de calor urbano (ICU), reducción de ruido ambiental y generación de sonidos ambientales agradables, por mencionar algunos. Se ha señalado que estas zonas aportan servicios a la salud, como la reducción del estrés y la depresión, la prevención de enfermedades y favorecen actividades sociales que repercuten directamente en la calidad de vida. Los espacios verdes pueden promover las relaciones sociales entre la población. Es conocido que estos lugares brindan un sitio de convivencia que fomenta la reducción de afecciones asociadas al estrés y la depresión, las cuales, por el contrario, se han visto incrementadas después de periodos largos de aislamiento social y sensación de soledad entre los individuos (WHO, 2016). En el estudio de Kondo *et al.* (2020), se vinculó la disponibilidad de áreas verdes con un 3 % de reducción en la mortalidad de las poblaciones. Se ha demostrado que los niños con exposiciones alta a alérgenos y bacterias específicas durante su primer año de vida tendrán menos probabilidades de experimentar problemas respiratorios y sensibilizaciones alérgicas (WHO, 2016). La OMS indica que se requiere al menos 9 metros cuadrados de áreas verdes por habitante (m^2/hab) para garantizar el bienestar social, sin especificar el tipo de servicio que brinde el espacio. No obstante, en 2010 señaló que no existe un valor normado sobre el espacio de áreas verdes por habitante (Flores-Xolocotzi, 2017). Los registros nacionales indican que las ciudades mexicanas cuentan con cerca de $5 m^2/hab$, lo que resulta ineficiente para garantizar los beneficios sociales y ambientales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018). Flores-Xolocotzi (2017) indicó que

existen diferentes criterios para definir la superficie de las áreas verdes por habitante, las cuales se centran en el funcionamiento ambiental o social de estas. Algunas de las recomendaciones oscilan entre los $25 m^2/hab$ hasta los $40 m^2/hab$, con la finalidad de garantizar un servicio ambiental completo, mientras que otras propuestas muestran valores por debajo de los $15 m^2/hab$ para satisfacer las necesidades sociales básicas.

El Índice de Áreas Verdes (IAV), que según el INECC (Instituto de Ecología y Cambio Climático) es un indicador, se obtiene en función de los registros de superficie total de áreas verdes y la población total (Ecuación 1) (INECC, 2018).

$$IAV = \frac{\text{Superficie total de áreas verdes}}{\text{Población total}}$$

El IAV depende directamente de la población, sin embargo, esta cambia constantemente por diversos factores como la tasa de mortalidad, la natalidad, la inmigración y/o migración. A mediados del siglo XX, el crecimiento de la población en el municipio de Juárez se caracterizó por ser expansivo y disperso (IMIP, 2016), sin embargo, a finales del siglo XX y los primeros 15 años del siglo XXI cambió esta tendencia. Los cambios se vieron reflejados en variaciones en el índice de áreas verdes que, según registros, van de 4.47 a $7.8 m^2/hab$ (Tabla 4). Según datos de Romo (2007), al principio del siglo XXI la mayor parte de las áreas verdes se concentraron en el oriente de la ciudad y, desafortunadamente, dentro de la categorización de estos se encuentran terrenos baldíos, espacios sin vegetación con juegos infantiles y áreas verdes con vegetación y juegos infantiles. Lo anterior coincide con lo que indica el PDUS (2016), acerca de que el déficit más marcado en la ciudad se encuentra en las zonas norponiente, poniente, centro, sur y surponiente. Los esfuerzos para incrementar la superficie de áreas verdes en la ciudad dependen, de manera directa, de la disponibilidad de agua potable o de agua de segundo

TABLA 3: Categorización de los espacios verdes según su área.

Categoría	Rango (m^2)	Número de parques	Área (m^2)
Jardín público	De 600 a 5000 m^2	1484	2 838 413.43
Parque vecinal	De 5 001 a 10 000 m^2	193	1 334 107.41
Parque barreal	De 10 001 a 40 000 m^2	86	1 370 092.99
Parque urbano	De 40 001 en adelante	20	1 935 398.84
TOTAL		1783	7 478 012.67

Fuente: PDUS, 2016.

uso para sostener una cobertura vegetal con un estado de salud favorable. En el Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez (RDUS-JUÁREZ, 2015) se consideró una dotación de 7 litros de agua por cada m² de área verde, el cual puede ser provisto por agua potable y/o agua de riego.

Desafortunadamente, desde 1995 un volumen importante de las aguas residuales tratadas fue destinado para el riego de los campos agrícolas del Valle de Juárez, a raíz de una sequía que se ha extendido a hasta la actualidad (Montano *et al.*, 2017). Este campo agrícola ha permitido el desarrollo de cultivos como la alfalfa, zacate sudán, pistache, maíz, sorgo, trigo y algodón y posee una superficie de 24 492 hectáreas (ha) (Garza Almanza, 2000; Montano *et al.*, 2017).

El artículo 162 del RDUS-JUÁREZ (2015) considera que, en términos de forestación, se apejarán a los siguientes criterios:

1. En banquetas mayores a los 2.50 m de ancho se podrá utilizar para la plantación de árboles, una tercera parte de la sección, sin contar con el ancho de la guarnición.
2. En camellones, la plantación de árboles será sobre la totalidad de este y contendrán elementos de infraestructura verde, independientemente de sus dimensiones. Se deberá aprovechar la esorrentía de las calles e infiltrarla dentro del camellón por medio de cortes en la guarnición; en camellones extensos se realizarán diversos cortes.
3. Se debe plantar un árbol por cada vivienda que integre el proyecto habitacional, los que deberán plantarse en los lugares que determine la Dirección de Parques y Jardines, previo acuerdo con el propietario o desarrollador.
4. La vegetación deberá ser nativa de la región o adaptada a ella y resistente a la sequía.

5. Consumir el mínimo de agua, de tal forma que no se necesite riego más que el provisto por el agua pluvial y que solo en casos extremos de sequía pueda requerir agua tratada de la ciudad.
6. La vegetación deberá estar completamente establecida en un máximo de 5 años, para los cuales deberá sustentarse con agua pluvial solamente.

Evaluación de la dinámica temporal de la cubierta vegetal

Existen diversos métodos que permiten evaluar la dinámica temporal de la cubierta vegetal de las localidades, entre ellos el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI (*Normalized Difference Vegetation*). Este es una medida de la cantidad de vegetación verde viva que está presente en un área. Se deriva de la teledetección, usualmente a partir de imágenes de satélite, y se basa en estimar la proporción de luz en longitudes de onda fotosintéticamente activas que es absorbida por el suelo cubierto. Las mediciones son, en sí mismas, proporciones de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral que puede variar entre 0 y 1 (Ecuación 2) (WHO, 2016).

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)} \quad (2)$$

donde *NIR* = infrarrojo cercano y *VIS* = reflectancia roja visible.

Los valores cercanos a cero indicarán áreas con vegetación muy escasa o nula; los valores positivos elevados muestran zonas con vegetación viva y los valores negativos generalmente indican la presencia de agua, nubes o nieve. Como medida de vegetación verde viva, el NDVI es muy sensible a la época del año y las condiciones meteorológicas en el momento de

TABLA 4: Índice de áreas verdes (IAV) para Ciudad Juárez.

Fuente	Año	Índice (m ² /hab)
Plan de Desarrollo de Urbano (PDU)	2003	4.47
Romo	2007	4.93
Observatorio Urbano de Ciudad Juárez	2010	7.8
Plan de Desarrollo de Urbano Sostenible (PDUS)	2016	5.66
Plan Estratégico de Juárez A.C.	2019	6.55

las imágenes, que deben tenerse en cuenta cuando se utilicen datos de satélite para calcular el NDVI (Brito *et al.*, 2018; Bustamante, 2019).

En 2014 se realizó un estudio de la dinámica temporal de la cubierta vegetal y su relación con la precipitación en Ciudad Juárez. Se hizo uso de imágenes interpretadas del sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Media Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) en el satélite Terra. Los resultados fueron que los valores de NDVI variaban entre 0.15-0.3 y para los años considerados como húmedos hubo una variación entre 0.2-0.55 (Pérez, 2015). Estos datos permiten discriminar cuáles superficies corresponden a la vegetación natural antes de las lluvias y cuáles se mantienen verdes gracias al riego superficial. Cabe recordar que el riego de las áreas verdes en la ciudad es primariamente atribuido al agua potable extraída del acuífero y solo ciertos sectores de la ciudad se riegan con agua tratada (Arboit *et al.*, 2018).

Con respecto a los satélites existentes que se utilizan para obtener imágenes de alta resolución, se encuentran MODIS Terra, Landsat y Sentinel-2. En la Tabla 5 se muestra la resolución espacial de los satélites Landsat y Sentinel. Para este proyecto los productos de Sentinel-2A son los que más se adecúan a las necesidades del proyecto, ya que este cuenta con una resolución espacial de 10 m en la banda infrarroja y las bandas visibles, lo cual nos permitirá cuantificar el número de áreas verdes que cuentan con vegetación.

Metodología

La metodología utilizada para este proyecto se encuentra dividida en dos apartados, en el primero de los cuales se encuentra todo lo relacionado con las áreas verdes, mientras que en el segundo se habla de la parametrización de los usos del recurso hídrico de la ciudad con respecto a sus fuentes.

Determinación del índice de área verdes (IAV)

El IAV fue calculado utilizando datos sobre la distribución de áreas verdes provisto por el Instituto Municipal de Investigación y planeación (IMIP) y fue manipulado por medio del software de SIG ArcMap del conjunto ArcGIS Desktop10.2.2 (ESRI, 2014). El objetivo primario de esta manipulación fue la delimitación de las áreas verdes de Ciudad Juárez, las cuales fueron verificadas manualmente con el uso de imágenes satelitales descargadas desde el portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2020). Aunado a lo anterior, se incluyó la delimitación de seis áreas verdes que no fueron consideradas por el IMIP, pero en el análisis del NDVI mostraron valores superiores al valor promedio y que posteriormente, se comprobó que el sitio contaba con vegetación. Estas zonas incluyeron 3 campos de béisbol, 2 campos de fútbol y 1 campo de golf.

TABLA 5: Resoluciones de las bandas espectrales, de cada uno de los satélites.

Número de banda	Landsat 8		Sentinel-2	
	µm	Resolución (m)	µm	Resolución (m)
1	0.433–0.453	30	0.422–0.462	60
2	0.450–0.515	30	0.426–0.558	10
3	0.525–0.600	30	0.524–0.596	10
4	0.630–0.680	30	0.634–0.696	10
5	0.845–0.885	30	0.689–0.719	20
6	1.560–1.660	30	0.726–0.756	20
7	2.100–2.300	30	0.763–0.803	20
8	0.500–0.680	15	0.727–0.939	10
8A			0.844–0.886	20
9	1.360–1.390	30	0.925–0.965	10
10	10.6–11.2	100	1.343–1.405	60
11	11.5–12.5	100	1.523–1.705	20
12			2.027–2.377	20

Fuente: Elaboración propia, con información obtenida de las paginas oficiales de la ESA (Agencia Espacial Europea) para Sentinel-2 y de la NASA (Administración Nacional Aeronáutica y el Espacio) para LANDSAT 8.

Para determinar el estado de la vegetación en las AV del municipio, se calculó el NDVI (Arboit, 2017). Este método ofrece una alternativa para evaluar la dinámica temporal de la cubierta vegetal y se basa en la estimación de la proporción fotosintéticamente activa a longitudes de onda de luz que son absorbidas por el suelo cubierto (WHO, 2016). Para tal efecto, se utilizaron imágenes satelitales SENTINEL 2A de los días 9 de mayo y 8 de junio de 2019, en virtud de que durante estos meses la precipitación pluvial en la ciudad es baja y la vegetación se encuentra en el límite de estrés hídrico, lo que hace intuir que si hay presencia de suelo cubierto con actividad fotosintética se debe a zonas cuyos terrenos son sometidos a riego manual. La estimación del NDVI utilizó las bandas 4 (665 nanómetros nm/rojo) y la 8 (842 nm/infrarroja cercana [NIR]), ya que corresponden a las longitudes de onda de absorción de clorofila en la banda roja y la reflectancia relativamente alta de la vegetación en el NIR, lo que permite estimar el valor de la biomasa relativa (Ecuación 2).

De acuerdo con Meneses-Tovar (2011), el NDVI aplicado en comunidades vegetales, con valores por debajo de 0.1, corresponde a cuerpos de agua y a tierra desnuda, mientras que valores superiores corresponden a zonas con presencia de vegetación. Para efectos de este estudio, se consideró que valores de NDVI menores a 0.2 son indicativos de zonas con nula o baja cubierta vegetal, mientras que valores superiores a 0.2 indicarían zonas cuya presencia de vegetación es evidente y se estima que su estado de salud es considerado bueno. Posteriormente, utilizando la delimitación de áreas verdes y los criterios de clasificación de vegetación descritos anteriormente, se realizó una reclasificación de píxeles para obtener zonas con vegetación en buen estado y zonas carentes de vegetación dentro de las áreas denominadas como áreas verdes. Con la reclasificación se obtuvo el número de píxeles pertenecientes a cada una de las clasificaciones y se estimó el IAV con datos de áreas con vegetación y de acuerdo con la proyección de crecimiento poblacional de la CONAPO, (2020) para 2030.

Parametrización de los usos del recurso hídrico

ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN

Para evaluar las aportaciones de las precipitaciones en la zona de estudio se utilizaron las proyecciones de anomalías en la precipitación propuestas por Rivera-Lozano *et al.* (2019) para un futuro cercano 2030. Para esta proyección se emplearon datos de precipitación de

la estación meteorológica del aeropuerto en El Paso, Texas, para el periodo 1878-2018 (National Weather Service, s. f.). Se estimaron los promedios mensuales de precipitación históricos y fueron ajustados a las proyecciones por medio de la multiplicación de los promedios y las anomalías obtenidas. Esta información fue de gran utilidad para seleccionar el escenario con el cual se trabajó dentro de la modelación en SWIM.

MODELACIÓN EN SWIM

El modelo SWIM es un modelo elaborado específicamente para el área de estudio y cumple con los objetivos para realizar una parametrización de los consumos y del abatimiento del acuífero del Bolsón del Hueco (SWIM, 2019).

En la plataforma de SWIM se seleccionó el modelo de balance de agua, que tiene como objetivo evaluar el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la región. El modelo simula el almacenamiento superficial de agua, flujos en cuencas de agua superficial y almacenamiento en acuíferos dentro del área de estudio, que incluye porciones de Nuevo México, Texas y Chihuahua; extendiéndose desde los medidores de San Marcial en el río Bravo (al norte de la Presa del Elefante en Nuevo México) hasta el Fuerte Quitman, Texas. El modelo simula almacenamientos de agua por medio de una simple contabilidad basada en almacenamiento, al principio del periodo de simulación y los flujos de entrada y salida durante este (SWIM, 2019).

La selección del escenario desplegó una página con opciones de distintos escenarios, los cuales sirvieron de base para que, junto con los datos de anomalías de precipitación para un futuro 2030, se pudiera seleccionar el escenario de modelación más apropiado para el estudio. Del abanico de escenarios, se optó por elegir el escenario climático con estrés intermedio. Este realiza una evaluación modelada de los flujos para el periodo 2020-2070 y es derivado de altas emisiones de efecto invernadero RCP8.5.

Una vez ejecutado el escenario, se eligieron los parámetros de salida de la aplicación, que fueron pérdida acumulativa, pérdida urbana acumulativa y la recarga acumulativa, de acuerdo con datos registrados para el Bolsón del Hueco (SWIM, 2019). Los resultados de la modelación fueron utilizados para ver el impacto de cada una de las propuestas dentro de la extracción que se llevaría a cabo durante el transcurso de 2020 a 2030.

DEMANDA HÍDRICA PARA LAS ÁREAS VERDES DISPONIBLES

El gasto hídrico de las áreas verdes es un dato importante para conocer la cantidad de agua que se necesita para mantenerlas con vegetación y en buen estado. Para determinar la cantidad de agua que

actualmente se utiliza para irrigar las AV en buen estado, se contó con información de la Dirección Comercial, Normativa y Técnica de la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS, 2021). Posteriormente se realizó una comparación entre la cantidad de agua destinada al riego de áreas verdes y la cantidad de áreas verdes que

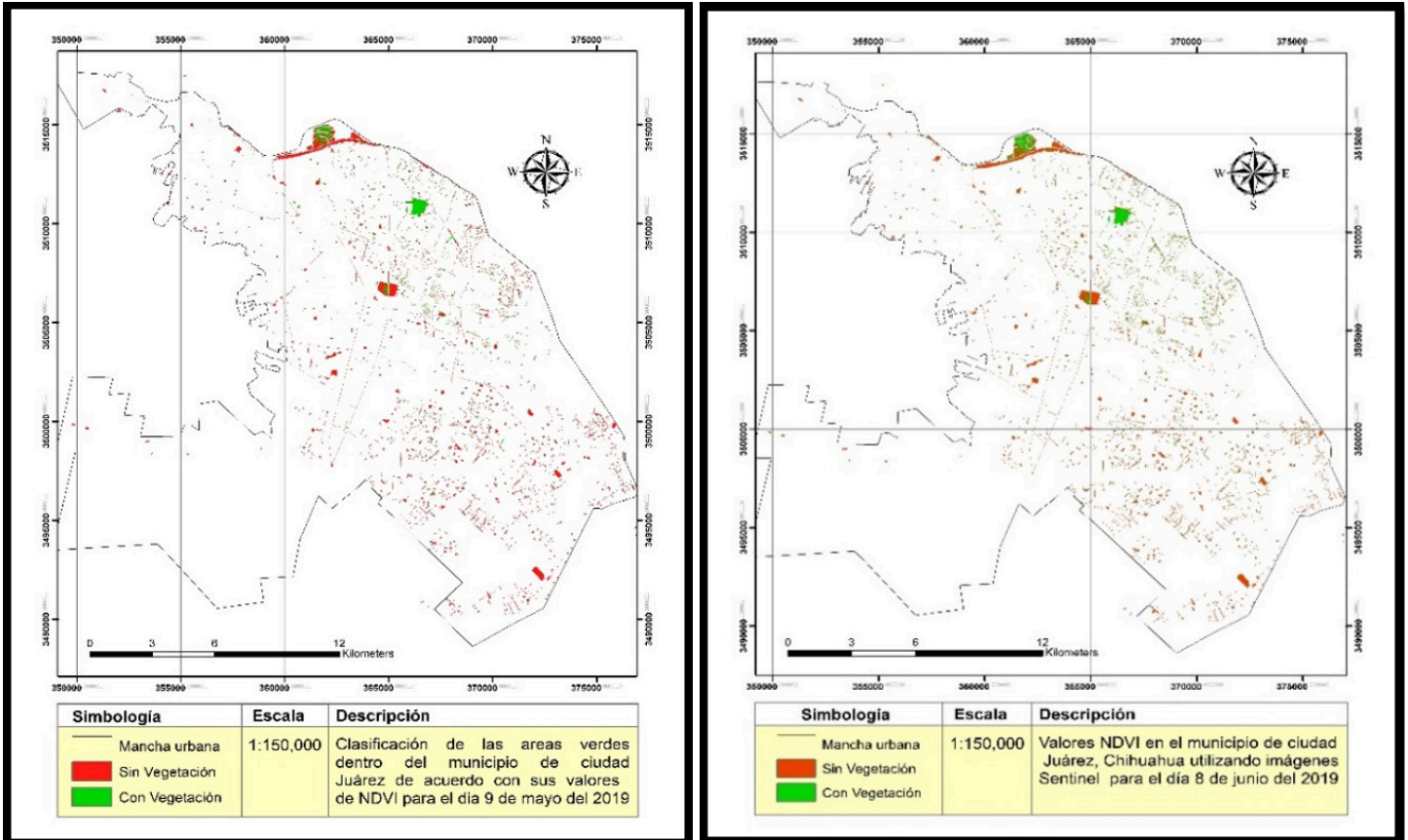


FIGURA 3: Imágenes de clasificación de áreas verdes con y sin vegetación. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 6: Distribución de zonas con y sin vegetación de acuerdo con los NDVI.

Fecha	Sin vegetación (NDVI < 0.2)	Con vegetación (NDVI > 0.2)
9 de mayo	68.66 %	31.34 %
8 de junio	68.90 %	31.10 %
Área promedio (m ²)	8 125 232.28	3 688 553.99

se encuentran en buen estado. Con esta información se realizó un aumento en las proporciones, de tal manera que estas cumplieran con las recomendaciones de la OMS (WHO, 2016).

Una vez recabada la información, se calculó un promedio de los gastos de agua, con el fin de conocer la cantidad de agua utilizada en metros cúbicos por cada metro cuadrado de AV. Para elaborar el balance, se utilizaron dos datos generales: las proyecciones de la precipitación a un futuro 2030 para el municipio de Juárez y los datos derivados de los análisis con los recibos

de pago. Con esta información se tomó en cuenta el aporte de la precipitación dentro de la cantidad de agua que se está utilizando, para poder así aprovechar este recurso.

Resultados y discusión

Determinación del índice de áreas verdes (IAV)
 La determinación del índice del área verde (IAV) se fundamentó en el análisis de los valores de NDVI de dos imágenes correspondientes al 9 de mayo y 8 de junio

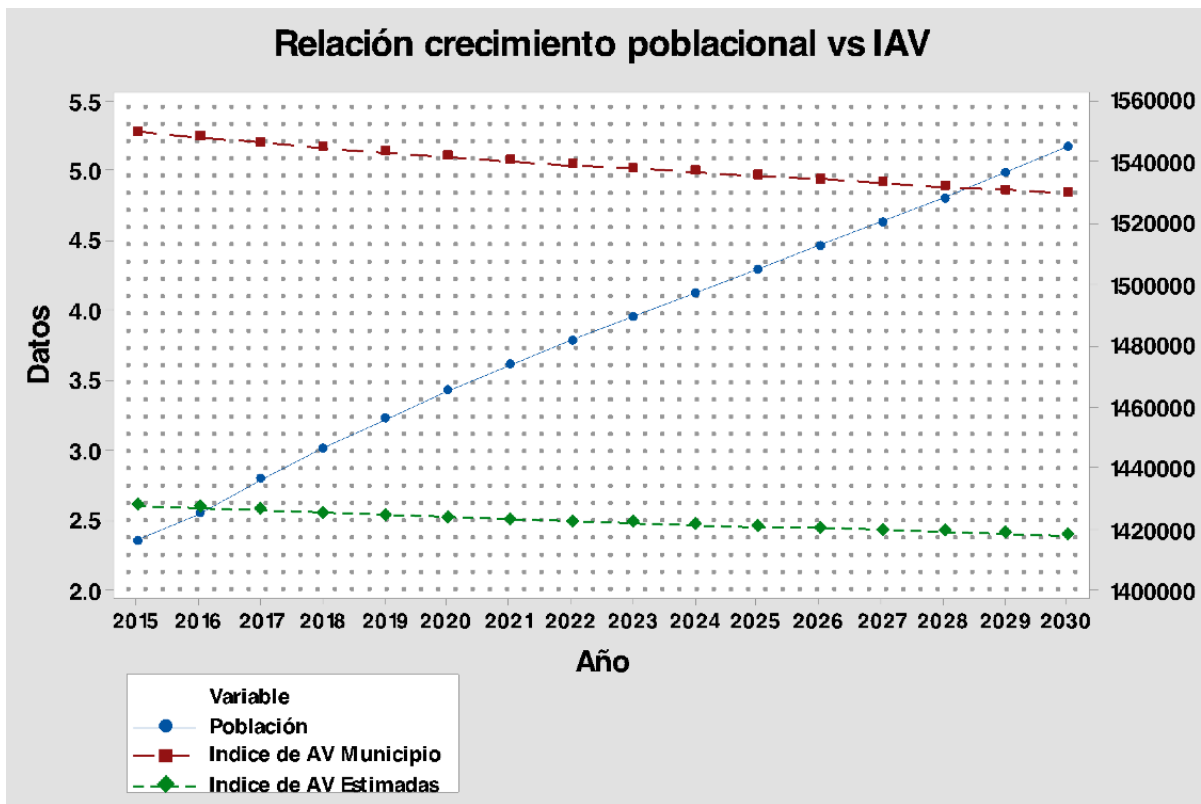


FIGURA 4: Índice de AV por habitante durante el periodo 2010-2030 en el municipio de Juárez.

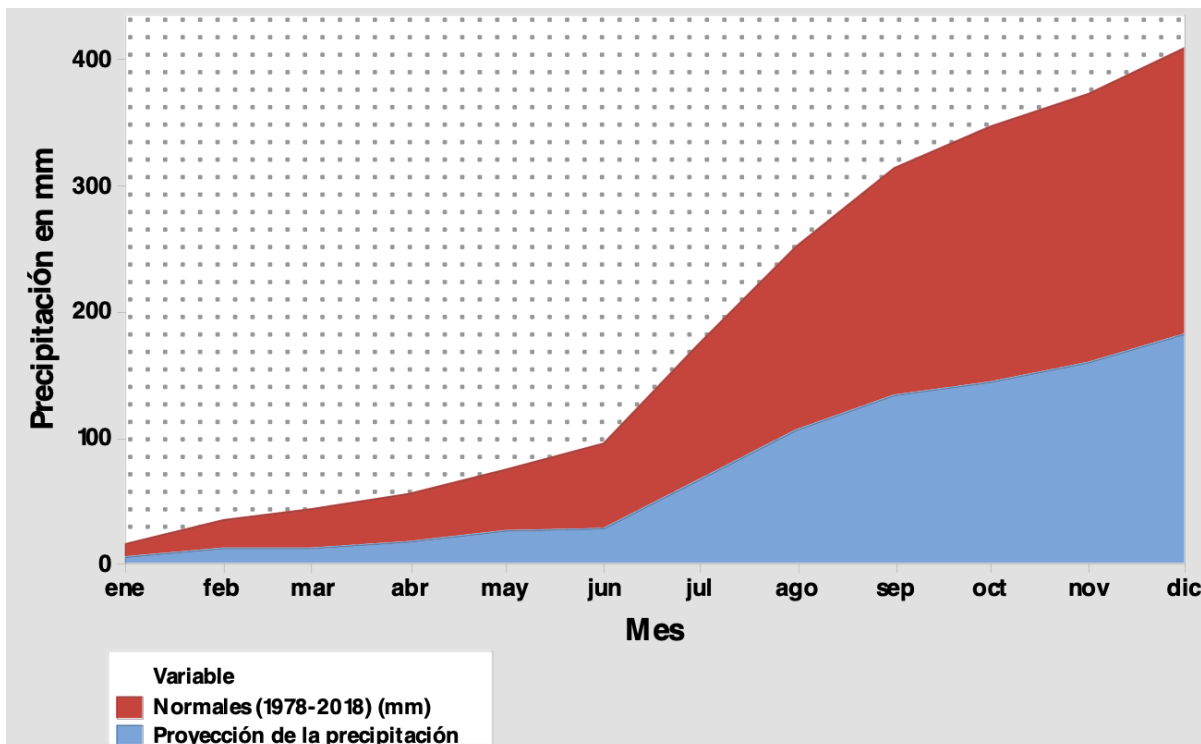


FIGURA 5: Promedio mensual de precipitación a futuro cercano 2030 para el Municipio de Ciudad Juárez. Fuente: Elaboración propia, con datos del SWIM <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

de 2019. Estos se caracterizaron por ser representativos para días con baja precipitación y la presencia de verdor fue debido a riego (figura 3). El análisis particular de la imagen del 9 de mayo de 2019 se encontró que el 68.66 % de las áreas verdes fueron clasificadas como zonas sin vegetación ($NDVI < 0.2$), mientras que el 31.34 % de

las áreas alcanzaron un $NDVI > 0.2$ y fueron clasificadas como AV con vegetación.

Estas últimas equivalen poco más de 3.7 millones de metros cuadrados de zonas con vegetación que reciben una irrigación adecuada no proveniente de precipitación pluvial. Para el 8 de junio de 2019, el 68.90 % de las AV

TABLA 7: Monitor de Sequías de México (MSM) para el periodo 2003-2021.

MSM	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2003	D1	D1	D1	D1	D1	D1	D1		D3	D3	D3	D3
2004	D3		D3	D2	D2	D1	D2	D0	D0	D0	D0	D0
2005										D0	D0	D0
2006	D0	D1	D1	D1	D1	D1	D0			D0		
2007												
2008		D0	D1	D1	D1	D3						
2009		D0	D1	D2	D1	D0	D0					
2010										D0		D1
2011	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D2	D2
2012	D1	D1	D1	D2	D1	D1	D0	D1	D1	D1	D2	D2
2013	D1	D1	D1	D2	D2	D2	D0	D0			D0	D0
2014	D0	D0	D0	D0	D0	D2	D2	D1				
2015		D0										
2016			D0	D0	D0	D0	D0				D0	D0
2017			D0		D0						D0	D0
2018	D1	D1	D0	D0	D1	D0	D0	D0	D0	D0		
2019								D1	D1	D0	D0	
2020						D0	D1	D1	D2	D2	D3	D3
2021	D4	D4	D4									

Fuente: Elaborado con datos del SMN (2021).

fueron clasificadas como AV sin vegetación y tan solo el 31.10 % fueron clasificadas como AV con vegetación, lo que equivale a poco menos de 3.7 millones de metros cuadrados con vegetación que recibe una irrigación adecuada (Tabla 6).

Una vez determinada la superficie de zonas con vegetación, se realizó el cálculo del IAV para la ciudad, indicando que, de acuerdo con el análisis de las imágenes, es en promedio de 2.52 m²/hab. Estos datos son contrastantes con los registrados por el IMIP, los cuales muestran que para 2030 los valores serán de 5.03 m²/hab. En una comparativa de los valores del IAV, ambos análisis representan una diferencia del 50.5 %, siendo sobreestimados por el IMIP. En la Figura 4 se muestran los datos comparativos entre los IAV estimados con las imágenes satelitales y los reportados por el IMIP. En ambos casos se observa que la ciudad carece de suficientes áreas verdes de calidad de acuerdo con los valores registrados por diversos autores.

El déficit estimado en comparación a la recomendación de la OMS (9 m²/hab) es de 3.93 m²/hab con respecto a los datos del IMIP y de 6.51 m²/hab con respecto a la clasificación realizada con el análisis del NDVI. El aumento de la población tiene repercusiones directas en el desarrollo de la infraestructura de las

ciudades. En términos de infraestructura de AV, para 2030 se estima que disminuirán 8.92 % con respecto a lo registrado en 2020. Para que un incremento pueda ser viable, es necesario evaluar las posibles fuentes de abastecimiento para el riego, entre ellas la precipitación, el agua del Bolsón del Hueco y el agua de segundo uso, también conocida como “línea morada”.

Parametrización de los usos del recurso hídrico

La evaluación de la aportación de agua de lluvia para riego y recarga de acuíferos implicó el análisis de las anomalías reportadas por Rivera-Lozano *et al.* (2019). En la Figura 5 se observa que el volumen acumulado para el periodo 1978-2018 fue de 235.9 mm y se estima que este valor disminuya hasta 181.7 mm para el periodo 2015-2039. Recientemente se ha establecido el efecto que tienen las modificaciones del ciclo del agua en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas terrestres (Miranda *et al.*, 2015).

Esto, aunado a los periodos de sequía que enfrenta el estado, agudiza la disponibilidad del vital líquido, la cual repercute en el desarrollo de áreas verdes en buen estado. De acuerdo con el Monitor de Sequía en México (MSM), se presentó en Ciudad Juárez sequía extrema

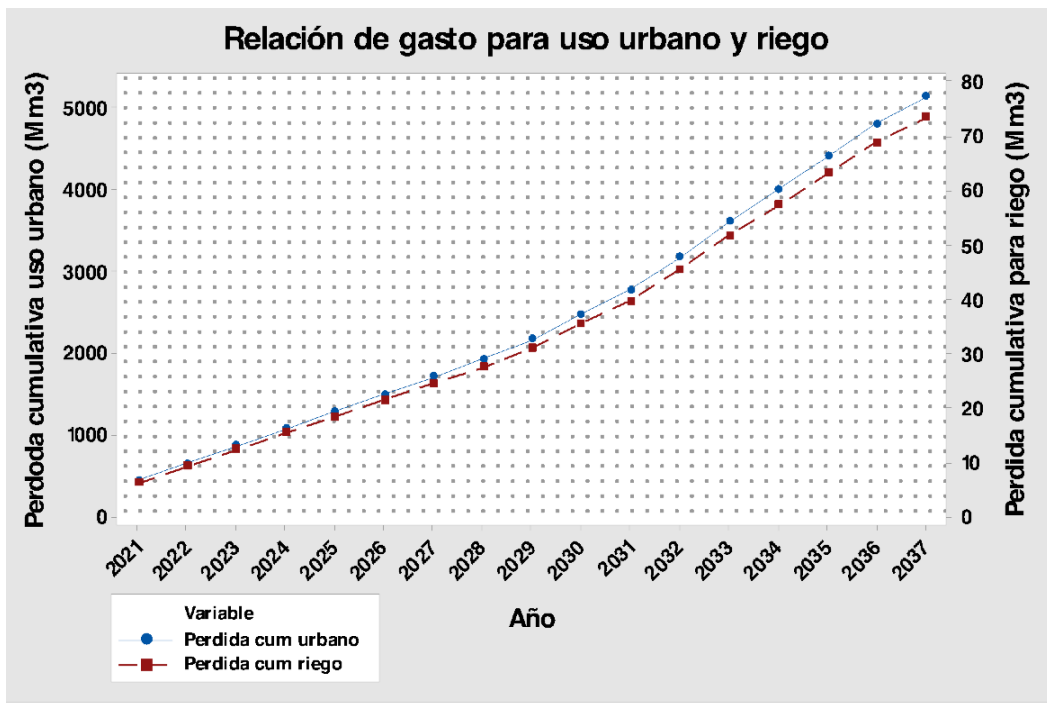


FIGURA 6: Relación de gasto para uso urbano y riego acumulativa de AV con un RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia con datos del SWIM. <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

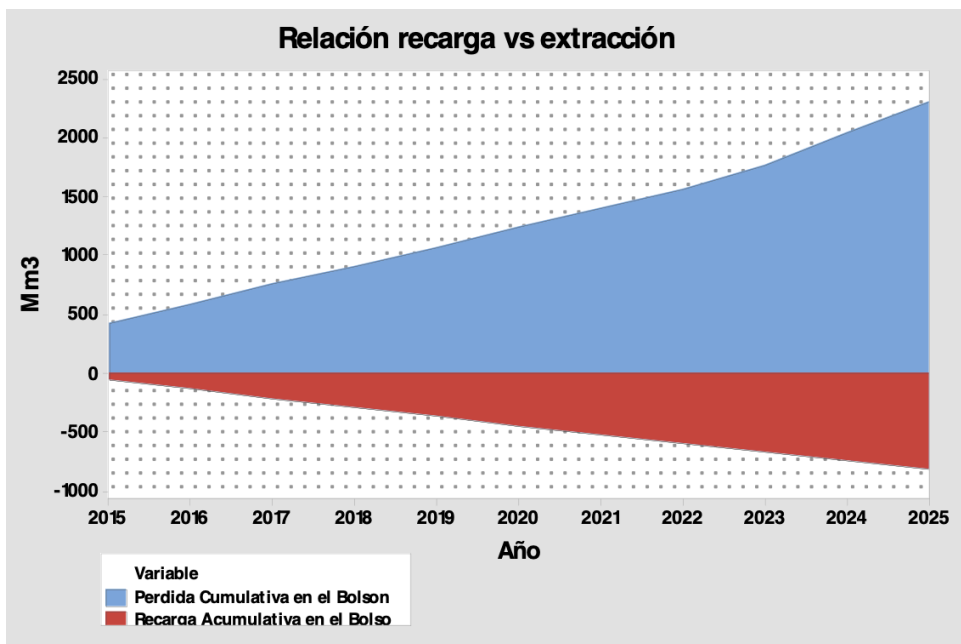


FIGURA 7: Relación entre recarga y pérdida total acumulativa del Bolsón del Hueco con un RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia con datos del SWIM. <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

(D3) SMN (2021). Este evento en dicha escala se ha presentado desde noviembre de 2020, mientras que el resto de los años ha fluctuado de anormalmente seco (D0) a sequía moderada (D1) (Tabla 7).

La disponibilidad de áreas verdes y su repercusión en el estado físico y mental de la población ha sido ampliamente estudiada. Existen evidencias documentadas que demuestran que la presencia de espacios verdes suficientes conlleva una disminución de problemas de salud, de problemas mentales e incluso disminución de hechos delictivos (WHO, 2016). Desafortunadamente, el crecimiento de estos

espacios está vinculado al volumen de agua disponible en las ciudades. En Ciudad Juárez se tienen aportes de agua para riego a partir de cuatro posibles fuentes: el Bolsón del Hueco, el agua de lluvia, el agua residual tratada y el agua del río Bravo. Estas dos últimas dos están destinadas en casi en su totalidad al riego de los campos agrícolas ubicados en el Valle de Juárez (Salas-Plata, 2006; Montano *et al.*, 2017). Este valle posee una superficie de 24 492 ha, de las cuales en promedio se riegan 11 500 ha con aguas residuales mezcladas con el agua del río Bravo y aguas subterráneas extraídas de los pozos comunales (Garza-Almanza, 2000).

Por otro lado, según datos de la JCAS (2021) actualmente existen 56 contratos de servicio de agua tratada, de los cuales 54 tienen como finalidad el riego de áreas verdes. A 2021, se estima que se inyectan a la red morada un volumen equivalente a 150 litros por segundo (lps) de agua tratada con el fin de reutilizarlo en usos urbanos, de los cuales 104 lps se utilizan en áreas verdes (JCAS, 2021). En lo referente al Bolsón del Hueco, este acuífero está catalogado como un reservorio en estado de sobreexplotación y básicamente sirve para cubrir las necesidades hídricas de la población, la industria y el riego de las áreas verdes (Salas-Plata, 2006; Cervera, 2007; Soto-Ontiveros *et al.*, 2018; Hernández-García *et al.*, 2019). Sin embargo, no existen evidencias referenciadas sobre el volumen de agua extraído del acuífero y cuánto es utilizado exclusivamente para el riego de áreas verdes. Según datos de la Dirección Comercial, Normativa y Técnica de la JCAS, se estima que cerca de 6.1 millones de m³ (Mm³) de agua se destinan para el riego de parques, jardines y camellones de la ciudad (JCAS, 2021), los cuales, según los resultados obtenidos en las imágenes, son aplicados en el riego de zonas con vegetación escasa, vegetación no nativa o en mal estado de salud.

Con la modelación en SWIM se obtuvieron las estimaciones de extracción al Bolsón del Hueco, las cuales se centraron en la pérdida acumulativa por uso urbano y riego, y recarga acumulativa. De acuerdo con los registros de extracción de agua para uso urbano para 2021 y bajo la premisa de que a partir de esta se realiza el riego de las áreas verdes, el 1.27 % del volumen se utiliza para este fin, de tal manera que para 2030 se estima una extracción de 35.38 Mm³ para riego de las áreas verdes, lo que representa un incremento del 84 % con respecto a lo utilizado para este fin en 2021 (Figura 6).

En la Figura 7 se puede observar que para 2030 se estima una extracción acumulativa mayor al 84 % con respecto a lo que se extrajo en 2020, mientras que la recarga acumulativa tendrá un déficit de 816 Mm³ para 2030, lo que representa un déficit anual promedio de 75.5 Mm³. Esto refuerza los estudios realizados por diversos investigadores, los cuales afirman que la relación de recarga-extracción del acuífero se encuentra en desequilibrio (Salas-Plata, 2006; Cervera, 2007; Soto-Ontiveros *et al.*, 2018; Hernández-García *et al.*, 2019). Como consecuencia, se derivan oportunidades de mejorar la gestión del agua a partir de que las acciones implementadas por las autoridades gubernamentales no han rendido los frutos esperados. Esto hace evidente el estrés hídrico que enfrenta la comunidad juareense, al no

contar con otra fuente de abastecimiento de agua.

Riego de las áreas verdes de Ciudad Juárez

En la ciudad existen tres tipos de parques: los urbanos, entre los que únicamente se encuentra el Parque Central Poniente y El Chamizal; los distritales, como el Parque Central Oriente, el Borunda y el Corredor Cuatro Siglos; además de los barreales, entre los que se contabilizan a todos aquellos de menor tamaño o pertenecientes a fraccionamientos y colonias. Según datos del IMIP, se estima que se cuenta con 3950 espacios destinados a ser áreas verdes, sin embargo, no todo el espacio está cubierto de vegetación (Castro, 2012).

Dichos espacios son regados con agua potable abastecida por la JMAS, sin embargo, los artículos 195 y 207 del Reglamento para los Servicios Públicos de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS, 2017) estipulan que el riego de las áreas verdes debe de realizarse preferentemente con agua residual tratada, mientras que en el artículo 60 de la Ley del Agua del Estado de Chihuahua indica que se utilizará agua residual tratada en los lugares en que exista la infraestructura y la calidad del agua se encuentre dentro de la normatividad aplicable (H. Congreso del Estado, 2021). Lo anterior evidencia un problema, ya que para el riego de parques y jardines públicos y privados se requiere del uso de agua recuperada, para lo cual se requiere de un volumen de agua fijo y la implementación de infraestructura hidráulica en la ciudad que permita esto. Hasta el momento, esta situación solo ha sido posible implementar en pequeñas zonas, como el parque Central, El Chamizal y ciertos espacios en maquiladoras (JCAS, 2017). En virtud de la imposibilidad de llevar a cabo tales acciones, la ciudad ha optado por el uso de agua extraída del acuífero para el riego de las áreas verdes, generalmente mediante técnicas incorrectas como la inundación, y que, aunado al uso de vegetación no nativa, el consumo y aprovechamiento de esta no es el óptimo (Kronológico, 2019).

Para efectos de este proyecto se evaluaron las zonas asignadas como áreas verdes y se clasificaron de acuerdo con el tipo de riego, lo cual permitió obtener zonas de riego con agua residual tratada y otras con agua potable (Figura 8). Según el análisis de los datos (Figura 9), se observó que de las zonas con riego con agua potable, el 26 % cuenta con vegetación con un estado de salud favorable, contrastando con los datos obtenidos de las zonas con riego con agua residual tratada, la cual se incrementa hasta un 51 %. Esto puede

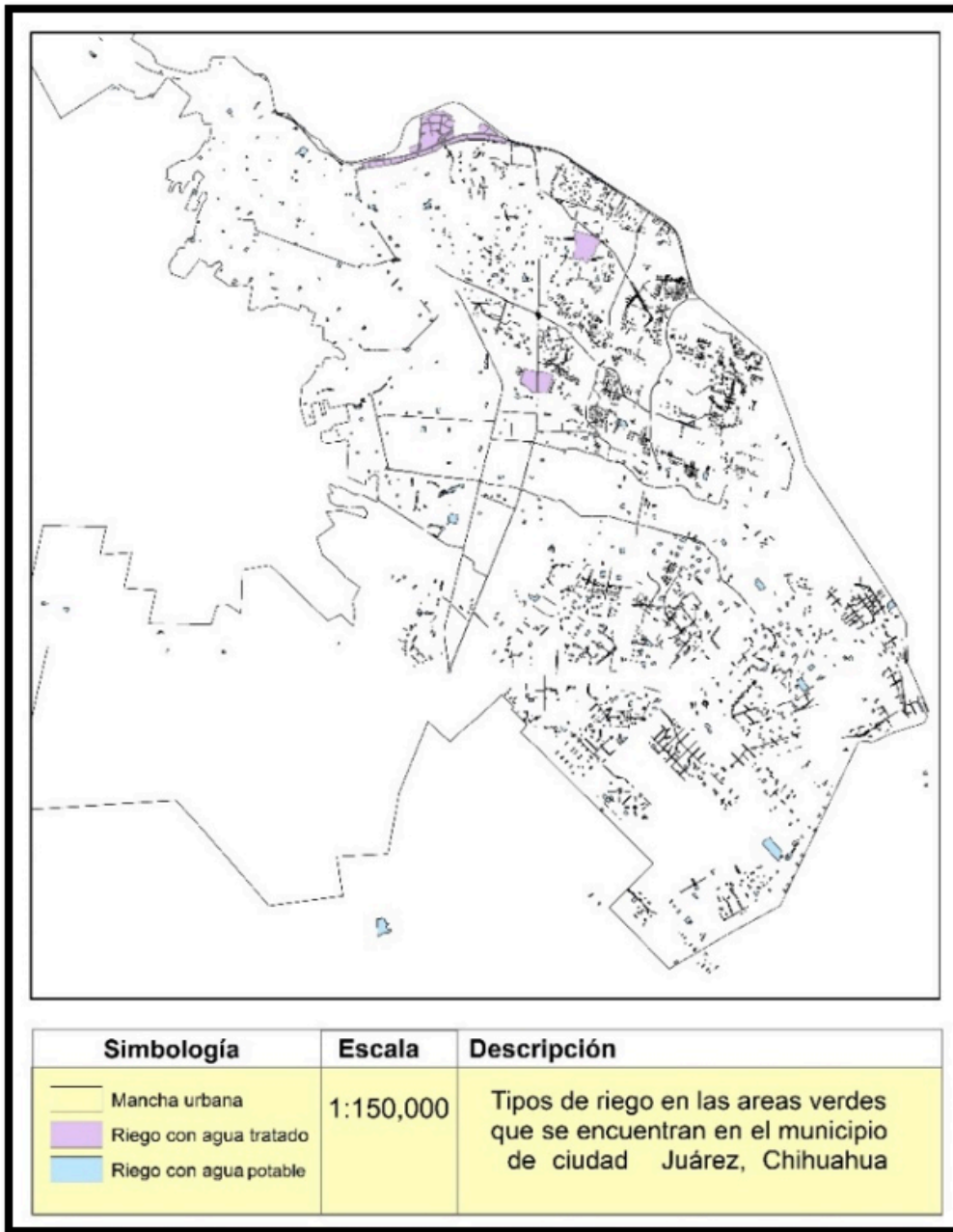


FIGURA 8: Clasificación de los tipos de riego en Ciudad Juárez. Elaborado con mapas del IMIP e información propia.

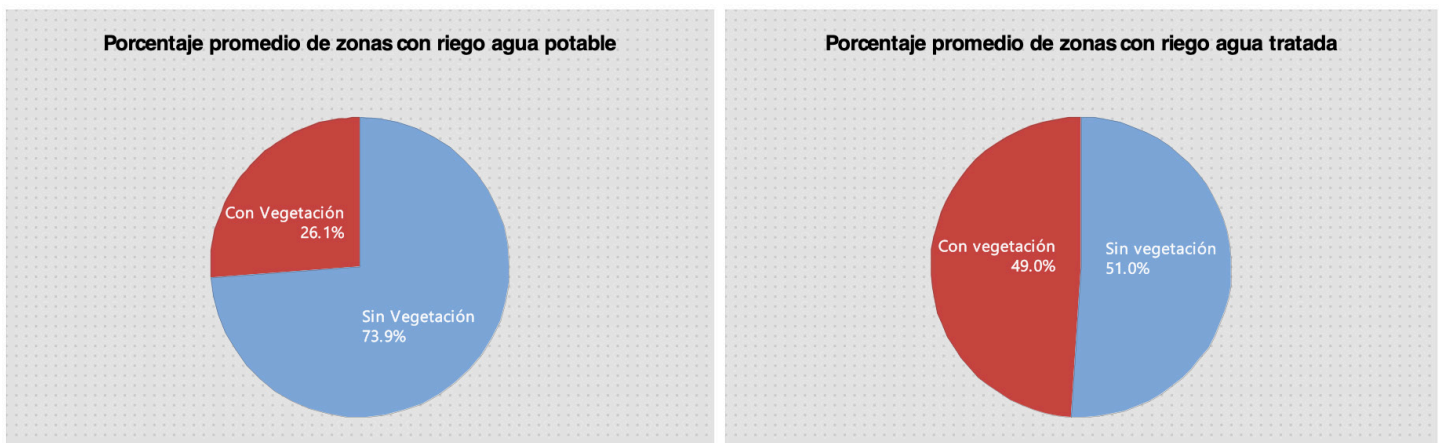


FIGURA 9: Análisis de porcentaje de zonas con riego con agua potable y riego con agua tratada.

deberse a que las zonas con riego con agua tratada son consideradas los parques públicos más grandes de la ciudad (Chamizal, Parque Central, campo de golf Club Campestre), mientras que las zonas con riego con agua potable se enfocan a pequeños parques residenciales, cuya optimización en el riego y el tipo de vegetación es dudosa.

Propuestas para la optimización del riego de áreas verdes

Ante la evidente falta de áreas verdes en la ciudad, es necesario implementar estrategias viables para el incremento de estas, las cuales de manera indirecta traerán beneficios ambientales y sociales a la comunidad. Sin embargo, para que esto sea viable es necesario considerar la disponibilidad de los recursos hídricos, el espacio disponible, el tipo de vegetación viable y la infraestructura de la ciudad. Como parte de las contribuciones de este trabajo, se realizaron varias propuestas con el fin de ofrecer opciones en las cuales se permita incrementar el IAV sin tener una afectación directa en el consumo del agua. Por lo anterior, dichas propuestas consideran mantener el consumo de 6.1 Mm³ de agua para el riego de las AV, pero utilizando alternativas que permitan tener un ahorro en el consumo y que dicho ahorro pueda ser utilizado en el incremento de las áreas verdes.

En la Figura 10 se representa el estado actual del volumen de agua para riego y el índice de áreas verdes por habitante, y además se incluye el cambio de estos dos parámetros al momento de aplicar las propuestas a un futuro 2030. En un primer escenario A se muestra el estado actual del IAV y el volumen de agua para riego (VAR) utilizado, siendo así que para 2020 se contaba con un IAV efectivo de 2.52 m²/hab y uso estimado de 6.1 Mm³ para riego. En el escenario B se indican los valores de IAV y VAR que se estimaron para 2030, los cuales disminuirán hasta 2.39 m²/hab en caso de no llevarse a cabo ningún cambio con respecto al manejo de las áreas verdes y solo tomando en cuenta el aumento de la población.

Para el escenario C se realizó una estimación por relación de proporcionalidad entre el IAV y el VAR actual para obtener la cantidad de agua requerida para obtener un IAV de 9.0 m²/hab para 2030, lo que arroja una necesidad de agua por un total de 23. Mm³ para alcanzar el IAV. El escenario D representa el impacto que puede tener la implementación de un sistema de irrigación inteligente. De acuerdo con el Consejo

de Recursos del Aire de California (2010), se puede reducir el consumo de agua para riego hasta un 26 % implementando un sistema de riego optimizado. Con esta técnica se podrá ahorrar hasta 1.5 Mm³, los cuales pudieran facilitar el incremento del IAV hasta 3.23 m²/hab, lo cual equivale a un aumento de 34.8 % en el IV actual.

Con respecto al escenario E, en este se realizó un esfuerzo para reducir las pérdidas asociadas a la mala calidad en la infraestructura. De acuerdo con Alger *et al.* (2020), actualmente en Juárez se tiene una merma del 20 % asociado a infraestructura deficiente. Si se logra optimizar un sistema de detección de fugas se lograría reducir en un estimado del 5 % la pérdida de agua por fugas (Comisión Nacional del Agua, 2007), siendo el caso de permitir el aumento del IAV hasta en 2.51 m²/hab.

Finalmente, el escenario F representa el impacto en el VAR y el IAV al cambiar de una vegetación con césped a una vegetación xerófila. Sovocool K.A. (2006) indicó que se puede llegar a ahorrar hasta un 76 % del total de agua utilizada para riego, lo que representa 4.6 Mm³. Dada esta situación, se pudiera destinar este volumen para el riego de otras AV con la misma vegetación xerófila y se incrementaría el IAV hasta 9.95 m²/hab. Cabe resaltar que recurrir a un cambio de vegetación en la región podría resultar beneficioso si se toma en cuenta que las proyecciones de precipitación en Ciudad Juárez de Rivera-Lozano *et al.* (2019) se verán reducidas en un 16.02 %, por lo que con esta medida se podría mitigar este posible impacto.

Conclusión

En este proyecto se estimaron los IAV y el gasto de agua a un futuro 2030 con el modelo SWIM, con el cual se analizó el estado actual de las áreas verdes por medio de NDVI y se compararon los resultados de dos imágenes del satélite SENTINEL-2A. Posteriormente, se realizó un análisis de los consumos de agua actuales y sus proyecciones a un futuro 2030 por el modelo SWIM. En base a los resultados obtenidos se puede concluir que la ciudad carece de espacios verdes en buen estado: de los 11,903,785 m² de áreas verdes estimadas por el IMIP, poco más del 68 % no cuentan con vegetación, mientras que el resto se encuentra en estado deficiente, trayendo consigo repercusiones sociales y ambientales, como la captura del dióxido de carbono y la mitigación de los estragos del cambio climático.

Con respecto al IAV recomendado por diversos autores, en la ciudad se estimó que en 2010 contaba con 2.68 m²/hab, en 2020 disminuyó hasta 2.49 y en 2030 sería de cerca de 2.29 m²/hab. Dichos valores están muy por debajo de los estimados por el IMIP, en virtud de que este organismo clasifica como espacios verdes todas las zonas identificadas, sin considerar la presencia de vegetación en buen estado.

El consumo de agua para riego es considerable tomando en cuenta las zonas que son susceptibles a riego. Es importante recalcar que aun cuando la JMAS considera el agua de segundo uso como el método viable para el riego de áreas verdes, esto no sucede dado el compromiso de este líquido para el riego de los campos agrícolas del Valle de Juárez. No obstante, de las pocas zonas que sí tienen este tipo de riego, el 51 % presenta valores de NDVI superiores a 0.2, lo que hace indicar que la vegetación se encuentra en mejor estado de salud. Dichos espacios son áreas grandes, que ofrecen a los juarenses espacios limitados de recreación y deporte. El resto de los espacios verdes se caracterizan por un riego provisto de agua potable y en muchos de los casos este se realiza mediante inundación (técnica de la llave abierta) y en otros tantos por sistema de aspersión.

Con la modelación en SWIM se obtuvieron las estimaciones de extracción al Bolsón del Hueco, las

cuales se centraron en la pérdida acumulativa por uso urbano y recarga acumulativa. Con este análisis se estimó que poco más del 11 % del volumen extraído del Bolsón del Hueco se utiliza para el riego de áreas verdes, de tal manera que para 2030 se estima una extracción para riego de las áreas verdes de 357.44 Mm³, lo que representa un incremento del 86 % con respecto a lo utilizado para este fin en 2020. Por lo anterior es importante buscar alternativas viables que permitan crecer el espacio verde, sin repercutir negativamente en el volumen de extracción de agua potable del acuífero.

Como fruto de este proyecto, se realizaron varias propuestas de cambio que repercutirán de manera positiva, tanto en la distribución del espacio como en el consumo de agua. Estas van desde el cambio en la infraestructura en los sistemas de riego hasta el uso de vegetación xerófila. Dichas propuestas deberán de considerarse como acciones futuras independientes o en conjunto.

Como recomendación, se sugiere la validación y evaluación de dichas propuestas. Asimismo, se recomienda realizar la implementación de mecanismos que permitan estimar el gasto promedio de agua para riego, con el fin de poder hacer ajustes al modelo, lo más apegado a la realidad. Esto facilitará en un futuro la toma de decisiones por parte del organismo operador

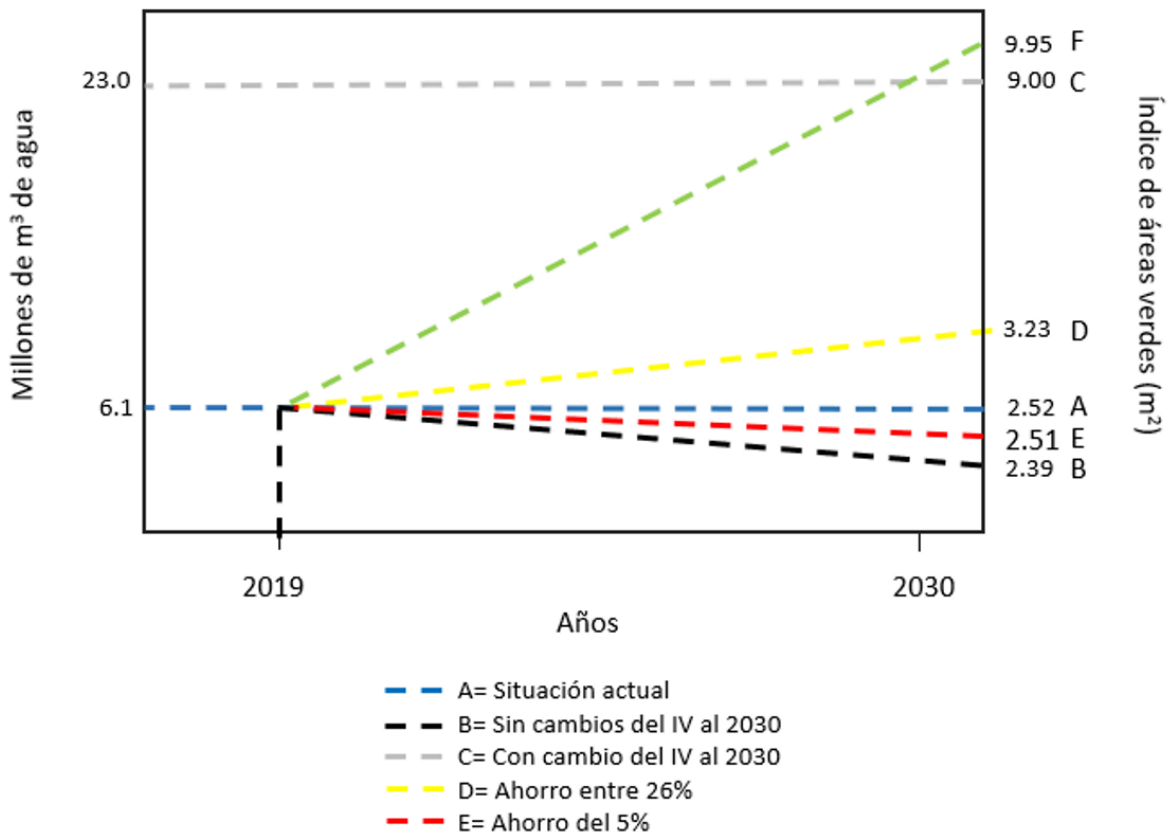


FIGURA 10: Cambios en el uso del agua al momento de aplicar diferentes propuestas. Fuente: elaboración propia.

y beneficiar de manera indirecta a la sociedad juarensis.

Adicionalmente, es claro que la administración de los acuíferos binacionales requieren de un marco de cooperación binacional mediante el cual se compartan los recursos financieros y tecnológicos en beneficio de toda la cuenca.

Agradecimientos

Financiamiento. Este material es parte de trabajo apoyado por the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, bajo el contrato 2015-68007-23130.

Este trabajo recibió apoyos de intercambio del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, bajo el convenio No. UACJ/AG/CV-4/2016.

Agradecimientos: Se reconoce el apoyo técnico de Frida Toquinto y el apoyo administrativo de Alejandro Vega y Ana Mercedes Soto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Alger, J, Mayer, A, Kumar, S & Granados-Olivas, A, (2020). Urban evaporative consumptive use for water-scarce cities in the United States and Mexico. *AWWA Wat Sci.* 2020; 1–15. DOI <https://doi.org/10.1002/aws2.1185>
- Arboit, M. E. (2017). Estimación del índice de vegetación en entornos urbanos forestados consolidados de baja densidad del área Metropolitana de Mendoza, Argentina. *Cuaderno Urbano: Espacio, cultura, Sociedad.* 23(23). 33–60. <https://bit.ly/3dN9I60>
- Arboit, M.E. & Maglione, D.S. (2018). Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. *CONICET.* <https://bit.ly/3g5Leok>
- Arcanjo, M. (2018). *Delaying Day Zero: Fighting back against water insecurity.* A Climate Institute Publication, Washington, DC. <https://cutt.ly/hgP8oah>
- Brito R. D.V. & Rojas S. F.A. (2018). Estimativa do saldo de radiação, albedo, temperatura de superfície e ndvi em diferentes usos de solo no município decampo verde/mt. XIX Encontro Nacional de Geografos. <https://bit.ly/3uZVRP4>
- Bustamante, C. A.S. (2019). La continuidad y fragmentación de los espacios verdes en el Distrito Metropolitano de Quito. DOI: <https://doi.org/10.29019/eidos.v13i1.542>
- Burger, J., Gochfeld, M, Pittfield, T, Jeitner, C. (2016). Perceptions of climate change, sea level rise, and possible consequences relate mainly to self-valuation of science knowledge. *Energy Power Eng.* 08(1). 250–262, doi: 10.4236/epe.2016.85024
- Campos-Ferreira, J.J. (2018). Modelo de equilibrio general Hidro-económico para la administración del agua en México. Trabajo de investigación para obtener el grado de maestro en Economía. <https://bit.ly/3vhSGmk>
- Castro, S. (2012). En Ciudad Juárez promueve JMAS que la industria use agua tratada. *Agua.org.mx.* <https://bit.ly/3tV1LS4>
- Cervera, L. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos,* 8(16), 9–41. <https://cutt.ly/OgP3NsB>
- Chávez-Jiménez, A.C. & D. González-Zeas. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *RIBAGUA.* (2). 3–13. <https://cutt.ly/UgP3cQc>
- Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas. (SF). Ciudades verdes y sustentables. <https://bit.ly/3xIP6cP>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. <https://cutt.ly/0g396HZ>
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México. <https://bit.ly/3xnMz1B>.
- CONAPO. (2020). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015–2030. <https://bit.ly/3sMi4in>
- Consejo de Recursos del Aire de California. (2010). *Water-Saving Strategies.* <https://cutt.ly/QgN9Ti3>
- Diario Oficial de la Federación. (2015). Acuerdo por el cual se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. <https://bit.ly/2TGcjQj>
- De la Sota, C., Ruffato-Ferreira, V. J., Ruiz-García, L., & Alvarez, S. (2019). Urban green infrastructure as a strategy of climate change mitigation. A case study in northern Spain. *Urban Forestry & Urban Greening,* 40, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.09.004>
- ESA. (SF). Multi Spectral Instrument (MSI) Overview. <https://bit.ly/32MpVIM>
- ESRI 2014. *ArcGIS Desktop: Release 10.2.2.* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Flores-Xolocotzi, R. (2017). Una reflexión teórica sobre estándares de áreas verdes empleados en la planeación urbana. *27(54),* 491–522. <http://dx.doi.org/10.22136/est002017682>
- Furphy, D. (2013). What on earth is an RCP? <https://bit.ly/3uZVRP4>

- ly/3aycYA8
- García, M. C., Piñeros, A., Bernal, F. A. & Ardila, E. (2015). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista Ingeniería*, (36), 60-64. <https://cutt.ly/CgP8y6G>
- Garza-Almanza, V. (2000). Reúso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez, (Chih., México). En el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública. *Revista de Salud Pública y Nutrición*, 1(3). <https://bit.ly/3evkSeK>
- González, F. & Arriaga, J. (2020). Crisis Climática y recursos hídricos. *Impluvium*. (10). <https://bit.ly/2RQyWvh>
- H. Congreso del Estado. (2121). Ley del Agua del Estado de Chihuahua. <https://bit.ly/3co05JM>
- Haroua, J. J., Pulido-Velázquez, M., Rosenberg, D., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R. & Howitt, R. E. (2009). Hydroeconomic models: Concepts, Design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375(3-4). 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Hatch -Kuri G. (2017). Agua subterránea y soberanía interdependiente : El caso de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la región binacional de Paso del Norte. *Norteamérica*. 12(2). 113-145. <https://doi.org/10.20999//nam.2017.b005>
- Hernández-García, Y., Velázquez-Angulo, G., & Vázquez-Gálvez, F. (2019). Indicadores de agua y saneamiento en ISO 37120. Caso de estudio: Ciudad Juárez. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (6), 65-77. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i6.109>
- IMIP. (2016). Plan de Desarrollo Urbano Sostenible Ciudad Juárez 2016. <https://cutt.ly/ZgP54r8>
- INECC. (2018). Estudio para la actualización y desarrollo de métricas de sustentabilidad urbana para la Plataforma de Conocimiento sobre Ciudades Sustentables. Coordinación General de Crecimiento verde. <https://cutt.ly/VgP4YGz>
- INEGI (2021). México en Cifras. <https://bit.ly/3gC0eMU>
- INEGI (s. f.). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Juárez, Chihuahua. <https://bit.ly/3eyaoeR>
- JCAS. (2017). Reglamento para los servicios públicos de agua y saneamiento del Estado de Chihuahua. <https://bit.ly/3gGpYrh>.
- JCAS. (2021). Comercial, Normativa y técnica de la JCAS. Comunicación personal.
- Jubb, I., Canadell, P. & Dix, M. (2019). Representative Concentration Pathways (RCPs). <https://cutt.ly/lpP5yih>
- Kochtitzky, C.S., Frumkin, H., Rodriguez, R., Dannenberg, A.L., Rayman, J., Rose, K., Gillig, R. & Kanter, T. (2006). Urban Planning and Public Health at CDC. (55). 34-38. <https://bit.ly/3nm0PUi>
- Kondo, M. C., Mueller, N., Locke, D. H., Roman, L. A., Rojas-Rueda, D., Schinasi, L. H. & Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). Health impact assessment of Philadelphia's 2025 tree canopy cover goals. *The Lancet Planetary Health*, 4(4), E149-E157. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30058-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30058-9)
- Kronológico. (2019). Reportaje: Insuficientes áreas verdes en Ciudad Juárez. <https://bit.ly/3etQIbN>
- Meneses-Tovar C.L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva* 238(62). 39-46. <https://bit.ly/3sIQ3bC>
- Microregiones. (2005). 050150001 JUÁREZ. <https://bit.ly/2TKEGEj>
- Miranda, J.D. & Pugnaire, F.I. (2015). Efecto del cambio de los patrones de precipitación sobre las comunidades vegetales semiáridas. 235-342. Disponible en <https://bit.ly/3z3ro5T>
- Montano, G. & Cervantes, E. (2017). Desarrollo histórico del Valle de Juárez. El Colegio de Chihuahua. ISBN: 978-607-8214-43-3. Primera edición. <https://bit.ly/32NbsFY>
- Montero, D. (2012). Consumo, Escasez y gobernanza del agua en América del Norte ¿Es posible una política del agua regional? *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades*. 12(2), 53-87. <https://cutt.ly/TgP83ms>
- Nan, Y., Bao-hui, M. & Chun-kun, L. (2011). Impact Analysis of Climate Change in Water Resources. *Procedia Engineering*. (24). 643-648. <https://10.1016/j.proeng.2011.11.2710>
- NASA. (SF). Landsat 8 Bands. <https://go.nasa.gov/3gGrw15>
- National Weather Service. (s. f.). El Paso Monthly Precipitation Totals. Consultado el 13 de marzo de 2021, de weather.gov: https://www.weather.gov/epz/el Paso_monthly_precip#rank
- Observatorio Urbano de Ciudad Juárez, Chihuahua. (2010). Indicador de áreas verdes. <https://cutt.ly/qgP3wn6>
- ONU. (2019). Informe de políticas de la ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. <https://cutt.ly/CgP5jCH>
- PDU. (2003). Plan de desarrollo urbano de Ciudad Juárez 2003. <https://bit.ly/3dL0aqf>
- PDUS. (2016). Plan de Desarrollo Urbano Sostenible Ciudad Juárez 2016. <https://cutt.ly/ZgP54r8>
- Pérez-Ruiz E.R. (2015). Análisis de la dinámica temporal de la cobertura vegetal y su relación con la variabilidad en la precipitación en el municipio de Juárez, Chihuahua. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México*. <https://cutt.ly/rgP3lXF>
- Payano-Almánzar, R. and Rodriguez, J. (2018) 'Meteorological, Agricultural and Hydrological Drought in the Dominican Republic: A review', *Current World Environment*, 13(1), pp. 124-143. doi: 10.12944/CWE.13.1.12.
- Plan Estratégico de Juárez, A.C. (2019). Informe Así

- Estamos Juárez 2019. <https://cutt.ly/QgP513G>
- RDUS-JUÁREZ. (2015). Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez, Chih. <https://bit.ly/3dQiHDE>
- Rivera -Lozano, L., Vázquez-Gálvez, F. and Granados-Olivas, A. (2019). ¿Aún estamos a tiempo para el 1.5°C? Voces y Visiones sobre el Reporte Especial del IPCC. 1st ed. CDMX: José Clemente Rueda Abad. 434-435. <https://cutt.ly/XgP8k6O>
- Romo L. (2007). Áreas verdes y justicia social en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Crisol Fusión de ideas*. 1(3). 9-24 <https://cutt.ly/ggP9MA1>
- Salas-Plata, J. (2006). Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Culcyt*. 3(14-15). 5-18. <https://bit.ly/32LcyCo>
- Salazar, A. A. (2020). La sequía en México, un efecto más de la crisis climática en los recursos hídricos. *Impluvium*. (10). 27-33. <https://bit.ly/3vIMyd1>
- SMN. (2021). Monitor de Sequía de México. <https://bit.ly/3dOohGA>
- Soto-Ontiveros A., Granados-Olivas A., Pinales-Munguía A., Saúl-Solís S. & Mcconnell-Hayeman J. (2018). Evolución temporal del flujo del agua subterránea en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando modelación geoespacial. *Tecnociencia*. 12(2). 103-113. <https://bit.ly/3gDb4SO>
- SWIM (2019). Sustentabilidad del Agua Mediante Modelado Integrados. Disponible en <https://bit.ly/3vXECPI>
- University of Texas at El Paso. (2019). Cybershare. Consultado en 2019, de Rio Grande Basin Water Balance Model: <https://water.cybershare.utep.edu/resources/docs/en2/models/balance/#related-publications>.
- USGS. 2020. Earth Explorer. <https://bit.ly/3pqyQnf>
- Varady, R. (2009). Institutions and societal impacts of climate in the Arizona-Sonora portion of the US Mexico border region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 6(29), 292061. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/6/9/292061>
- WHO. (2016). Urban green spaces and health. <https://bit.ly/3zbGGFW>

I.3 Cambios de coberturas y uso de suelo del río Bravo (1990-2015): temporal y espacial vs. NDVI

Changes in coverage and land use of the rio Bravo (1990-2015): temporal and spatial vs. NDVI

Luis Carlos Alatorre Cejudo¹, Gabriela Veleta Jáquez¹, Alfredo Granados Olivas¹, Hugo Luis Rojas Villalobos¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El presente trabajo muestra la utilidad de las técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de la cobertura y uso del suelo en el cauce medio de la cuenca del río Bravo en el periodo 1990-2015. Para evaluar los cambios de usos de suelo se utilizó el método de clasificación supervisada y las categorías que ocuparon mayor área fueron matorrales pastizales y áreas forestales. Las cartografías fueron evaluadas a partir del índice Kappa, las cuales se calificaron como muy buenas, y posteriormente se realizó un análisis temporal de la actividad vegetal (NDVI). El análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI mediante Mann-Kendall demostró que las tendencias negativas se presentaron en categorías de bosques y agricultura.

Abstract

This work shows the usefulness of remote sensing and GIS techniques for determining land cover and use in the middle Río Bravo watershed from 1990-2015. To evaluate the changes in land use, the supervised classification method was used and the categories that occupied the largest area were scrub, grasslands and forest areas. The cartographies were evaluated from the Kappa index, which were rated as very good, and subsequently, a temporal analysis of plant activity (NDVI) was carried out. The spatially distributed analysis of the temporal trends of the NDVI using Mann-Kendall showed that the negative trends were presented in categories of forests and agriculture.

Introducción

En los últimos años, el suelo ha sufrido muchos cambios. Algunas causas del cambio de uso de suelo, definido como la transformación de la cubierta vegetal original a otros usos, son la agricultura, la ganadería y la ampliación de infraestructuras que, a su vez, traen consecuencias importantes como la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático global.

El uso del suelo también está muy relacionado con el tema de la sustentabilidad, pues la forma en que cambia la cubierta vegetal determina la persistencia de bosques, selvas y suelos en el futuro, así como de los recursos que proporcionan, de ahí que sea fundamental estudiar en detalle los procesos de cambio de uso del suelo (Sala *et al.*, 2000).

El cambio de uso del suelo se ha convertido en un importante factor del cambio climático regional y global (Houghton *et al.*, 1999; Chase *et al.*, 2000; Claussen *et al.*, 2001; Defries *et al.*, 2002; Brovkin *et al.*, 2004), es considerado la primera causa de alteración del suelo (Lambin *et al.*, 2001; Foley *et al.*, 2005) y afecta fuertemente la capacidad de los sistemas biológicos para soportar y satisfacer las necesidades humanas (Vitousek *et al.*, 1997; Foley *et al.*, 2005). Tales cambios incrementan, a su vez, la vulnerabilidad de ecosistemas y personas frente a desastres naturales (Lambin *et al.*, 2001). La pérdida, modificación y fragmentación de hábitats ha provocado un fuerte declive de la biodiversidad a nivel mundial (Pimm y Raven 2000; Sala *et al.*, 2000).

En la actualidad, los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura de suelo y la deforestación son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Van Lynden y Oldeman, 1997).

En los últimos años, la teledetección y SIG han evolucionado, principalmente con el objetivo de determinar las características del suelo y la cubierta vegetal, así como para darle el seguimiento a los procesos geoambientales a lo largo del tiempo (Muchoney y Haack, 1994; Chuvieco, 1996; Lambin, 1996; Alatorre *et al.*, 2009). Sin embargo, en la mayoría de los casos, las técnicas de teledetección se han aplicado simplemente para determinar características de la cubierta vegetal, en gran parte debido a la limitada visibilidad de la superficie del suelo en los ambientes húmedos (Vrieling, 2006).

Mediante el uso de la teledetección, es posible obtener información de las propiedades de la vegetación (Foody *et al.*, 1996). La reflectancia del infrarrojo cercano (TM4) proporciona información adecuada de la densidad de vegetación, en especial cuando se relaciona con área foliar y biomasa en hojas verdes y actividad fotosintética (Spanner *et al.*, 1990; Baret y Guyot, 1991). En este principio se apoya la mayor parte de los denominados “índices de vegetación”, en los que se combinan la banda roja (R) e infrarroja (IR) del espectro, obteniendo así una imagen donde se muestra el estado de la vegetación (Van Lynden y Oldeman, 1997).

Existen diversos métodos para la detección de cambios, siendo los más utilizados comparación posclasificación y cambios detectados mediante álgebra de imágenes (diferencia de bandas o cociente) (Green *et al.*, 1994; Mas, 1999; Tole, 2002).

Planteamiento del problema

La pérdida de cobertura vegetal natural afecta a la biosfera; daña tanto a los elementos bióticos como a los abióticos: suelo, topografía, cuerpos de agua y rocas. Las consecuencias de los cambios de uso de suelo se dan a diversas escalas y diferentes aspectos a nivel local, lo que genera erosión del suelo, cambios en el microclima, disminución de la diversidad de especies vegetales y animales; a escala regional afecta el funcionamiento de las cuencas hidrográficas y de los asentamientos humanos; y en el ámbito global contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, al cambio climático y altera los ciclos biogeoquímicos.

Justificación

El monitoreo de las coberturas terrestres es un tema de suma importancia por las implicaciones que tienen los cambios de cobertura y uso de suelo en temas como sustentabilidad, riesgos, conservación de la biodiversidad y servicios ambientales. En general, a nivel mundial no existen suficientes estudios semidetallados sobre cambio de cobertura y uso de suelo a escala regional. La percepción remota y los sistemas de información geográfica han brindado importantes beneficios como la detección y monitoreo de los cambios en la cobertura terrestre.

Objetivos

GENERAL:

Analizar la distribución espacial de las tendencias de uso de suelo y vegetación, mediante imágenes satelitales LANDSAT en el río Bravo en el periodo de 1990 a 2015.

ESPECÍFICOS:

- * Determinar las coberturas y uso del suelo del río Bravo 1994-2015 a partir de clasificación supervisada.
- * Realizar un análisis espacio-temporal de la vegetación y cambios de usos de suelo durante el periodo 1994-2015.
- * Obtener los índices de vegetación para identificar su estado en cada uno de los usos de suelo.
- *

Antecedentes

Los cambios en la vegetación y el uso del suelo son inherentemente espaciales y dinámicos. La magnitud y el impacto son tales que se reconocen globalmente, de manera que esta dinámica se reconoce también como uno de los grandes retos en la ciencia ambiental (Aragón, 2013).

A nivel mundial se ha realizado una gran cantidad de estudios sobre la evaluación del cambio de uso de suelo, siendo un componente importante en la planeación regional para la detección de cambios, rural-urbanos, y para monitorear los cambios en la cobertura natural de los bosques (López, 2017). Fan *et al.* (2007) estudiaron los cambios en el uso del suelo en la época seca en Guangzhou, China, durante el periodo de 1998 a 2003, basado en imágenes Landsat TM/ETM de la época seca. Los resultados indicaron que esta ciudad, la más grande del sur de China, ha experimentado un dramático cambio en el uso del suelo y de la cobertura durante los últimos años, ocasionando un gran deterioro del ecosistema y causando efectos adversos en el ambiente. Hu *et al.* (2008) analizaron los patrones espaciales de la expansión urbana en el área metropolitana de la ciudad de Jilín, al noreste de China, usando fotografías aéreas de 1989, escala 1: 10 000, e imágenes SPOT 2005, escala 1: 10 000. La fotointerpretación de las imágenes indicó que el bosque se redujo en un 5.27 %, obteniendo una muy alta confiabilidad en su evaluación.

Sosa (2013), en su estudio denominado “Cambio de uso de suelo de la Sub cuenca del Río Mocal, Lempira,

utilizando SIG y teledetección, comprendido del año 1988 al 2000”, generó información relevante para tomar decisiones que contribuyen en ordenamiento territorial de la cuenca del río Mocal. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron imágenes satelitales del sensor Landsat, comprendidas entre los años 1988, 1998 y 2000, encontrando que los cambios de uso de suelo fueron evidentes en cuanto al bosque latifoliado, con un aumento en un 18 %, el bosque mixto se incrementó en un 37 % y el matorral aumentó 7 %. Por otra parte, las zonas de pastizales presentaron un aumento de más del 100 % y la agricultura se mantuvo en su rango. Rogan *et al.* (2003) realizaron un monitoreo del cambio de cobertura con árboles de clasificación usando imágenes Landsat TM de 1990 y 1996 e información antigua para una región del oeste de San Diego, California. Los autores fotointerpretaron dichas imágenes y validaron con datos de campo, donde los mapas de cambio de la cobertura del suelo fueron generados para tres niveles jerárquicos de cambio con una precisión Kappa de

87, 89 y 75 % respectivamente, obteniendo una alta precisión en los mapas de cambio de cobertura (72 a 92 %). Rosete-Vergés *et al.* (2009) realizaron un análisis de cambio de uso del suelo y vegetación en la península de Baja California, México, mediante la comparación espacial de mapas de INEGI (1998-2000) a escala 1:250 000, donde, con el uso de un SIG, se elaboró una matriz de transición y se agruparon los cambios encontrados. Los más relevantes de dichos cambios fueron que el 7.7 % del territorio de la península presentó algún cambio, la pérdida del matorral fue de 4078.7 km² (2.9 % del territorio de la península) y el crecimiento de la mancha urbana fue de 457 km² (270 % de crecimiento).

Hipótesis

Los cambios de cobertura y usos de suelo que han experimentado la cuenca del río Bravo demuestran que la relación pérdida/ganancia indica mayor reducción en el pastizal y los matorrales.

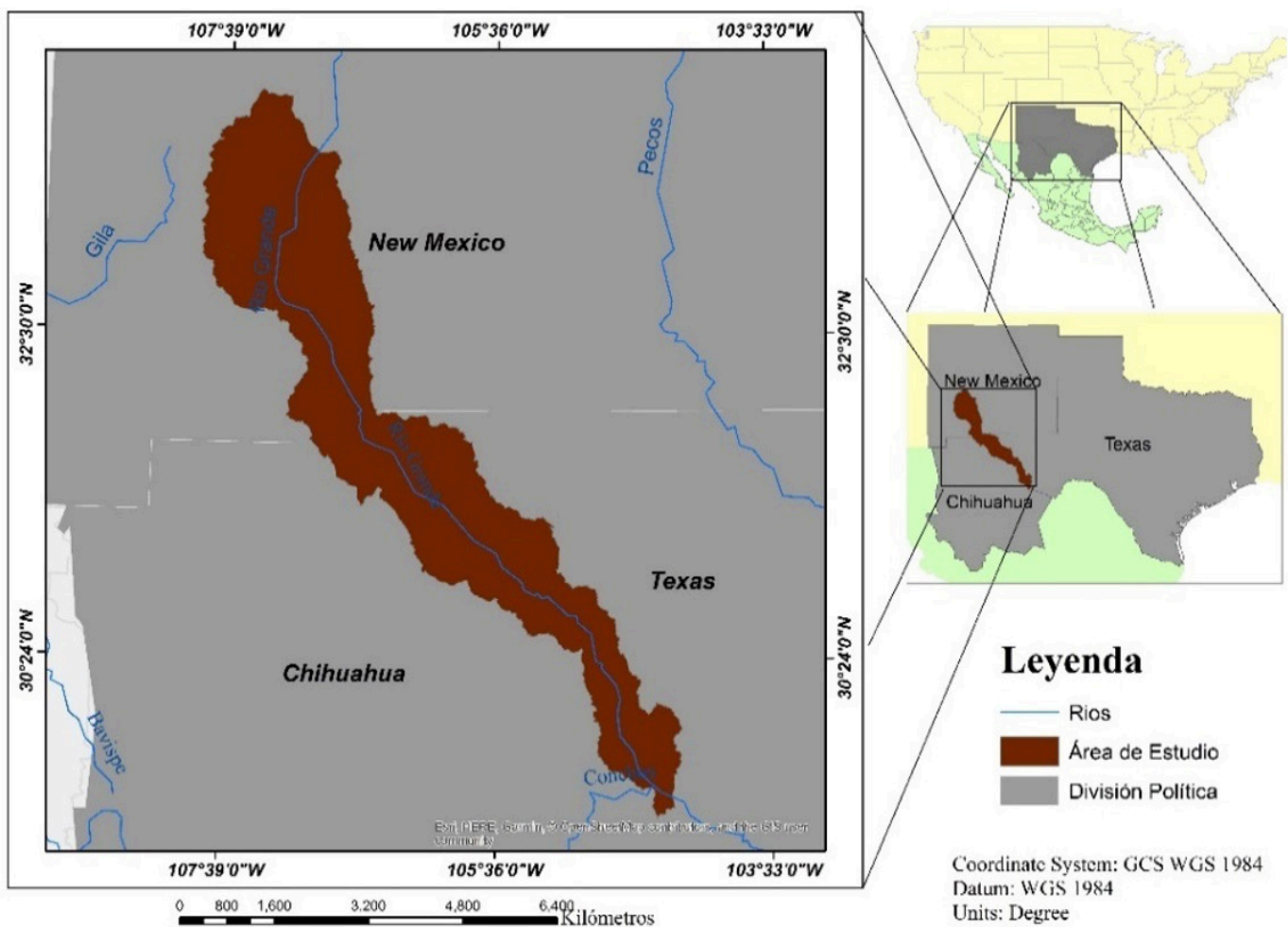


FIGURA 1: Área de estudio: desde la cabecera del río Bravo, hasta desembocadura del río Conchos (Presidio). Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende un área de 36 988.2 km². En el lado mexicano cubre el estado de Chihuahua, mientras que por el estadounidense se extiende a través del territorio de Nuevo México y Texas. Su afluente principal es el río Grande, que desciende de norte a sureste (Figura 1). La cuenca del río tiene unos 471 900 km² y drena una región que es árida en más del 30 por ciento. Cerca de la mitad de la cuenca pertenece a Estados Unidos y la otra a México (Lujan, 2005).

BASE DE DATOS

Para obtener los mapas de cobertura y uso de suelo del área de estudio desde 1990 al 2015, fue necesario hacer un mosaico de imágenes de los sensores Landsat TM+ y de Landsat 8OLI. En general los primeros ocho años fueron del Landsat TM+ y los restantes de Landsat 8OLI. Estas imágenes fueron obtenidas del servidor Glovis del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, las cuales han demostrado en las últimas décadas la utilidad para el seguimiento de los procesos de cambios de cobertura y uso de suelo en diferentes ambientes alrededor del mundo (Alatorre, 2015), además, ayudan en el monitoreo de la vegetación, diversas aplicaciones geológicas y el estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones (Buendía-Rodríguez, 2002).

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (USGS, 2018).

CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

La corrección atmosférica es un proceso que se le aplicó a las imágenes satelitales con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y que se ve reflejada en diferentes proporciones en cada una de las bandas del sensor. Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen, así como eliminar el componente intrusivo de la atmósfera (Arias *et al.*,

2014). La corrección atmosférica se realizó mediante el módulo ATMOSC, contenido en el software IDRISI Selva. En este módulo, la entrada consta de una banda de imagen sin procesar y un conjunto de parámetros de condiciones atmosféricas y de visualización. La salida en cada caso es una imagen de reflectancias proporcionales, expresada en formato de número real como un valor de 0.0 a 1.0. Para más detalles, véase a Eastman (2012).

DETERMINACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE COBERTURA Y USO DE SUELO

Para determinar las coberturas y uso de suelo se utilizó la nomenclatura de Anderson Land Cover Classification System, sistema utilizado por Servicio Geológico de Estados Unidos (Tabla 1) (Anderson *et al.*, 1976).

Después de un exhaustivo análisis, se toma la determinación de que para toda el área de estudio las categorías a identificar serían ocho: agricultura, asentamientos humanos, cuerpos de agua, humedales, bosque, pastizales, suelo desnudo y, finalmente, matorrales (Anderson *et al.*, 1976).

CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Una vez que se tuvieron las series temporales homogenizadas de las imágenes Landsat, se procedió a

TABLA 1: Nomenclatura de Anderson Land Cover Classification System (Anderson, 1976).

11	Open Water
12	Perennial Ice/Snow
21	Developed, Open Space
22	Developed, Low Intensity
23	Developed, Medium Intensity
24	Developed, High Intensity
31	Barren Land (Rock/Sand/Clay)
41	Deciduous Forest
42	Evergreen Forest
43	Mixed Forest
51	Dwarf Scrub
52	Shrub/Scrub
71	Grassland/Herbaceous
72	Sedge/Herbaceous
73	Linches
74	Moss
81	Pastura/Hay
82	Cultivated Crops
90	Woody Wetlands
95	Emergent Herbaceous Wetlands

realizar la clasificación supervisada, y como primer paso se determinaron las áreas de entrenamiento para cada una de las categorías de cobertura y uso de suelo. Se trata de áreas de las que se conoce *a priori* la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral característica de cada una de las clases (García y Mas, 2008). Estas clases deben caracterizarse en función del conjunto de variables mediante la medición de las mismas en individuos cuya pertenencia a una de las clases no presente dudas (áreas de entrenamiento) (Maussel *et al.*, 1990). La clasificación de las imágenes se realizó mediante el método de máxima verosimilitud (*maximum likelihood* o *Maxlike*). Este algoritmo considera los parámetros de clasificación previamente calculados (clasificador calibrado) para etiquetar cada píxel de la imagen en una de las clases definidas (Lira, 2010). A partir de la aplicación de este algoritmo se generaron los mapas de uso de suelo y vegetación para los años 1990-2015 (Brovkin, 2004).

VALIDACIÓN DE LOS MAPAS DE COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO

Para conocer el grado de certeza de los datos correspondientes a los mapas de uso de suelo y vegetación de 1990-2015, estos se sometieron al proceso de evaluación de la confiabilidad temática (Mas *et al.*, 2003). La validación se creó a partir del módulo de ERRMAT en IDRISI, ya que este módulo compara dos imágenes con el propósito de evaluar la precisión. Como resultado obtenemos los errores de omisión y comisión, una medida de error general, intervalos de confianza para esa cifra y un Índice de Acuerdo Kappa (KIA), para cada una de las categorías (Eastman, 2012).

ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS CATEGORÍAS: CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DE SUELO

Una vez que se obtuvieron los mapas de cobertura y uso de suelo para cada uno de los años comprendidos desde 1990-2015, se determinaron las áreas correspondientes a cada una de las categorías, analizando así su evolución temporal y espacial. Posteriormente se realizó el cálculo de los cambios de cobertura y uso de suelo, por medio de una matriz de cambios, eligiendo el año más antiguo y el más actual.

ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DEL NDVI EN CADA UNA DE LAS CATEGORÍAS

El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) es un índice de vegetación muy versátil para la evaluación de la vegetación y la dinámica de cambio de cobertura (Molly E. Brown, 2006), sus valores van de -1 a +1 y

debe ser calculado de la siguiente forma (Rouse *et al.*, 1974):

Este índice se calcula para cada uno de los años 1990-2015 a partir del software IDRISI SELVA y se obtiene el valor medio del NDVI para cada una de las categorías de vegetación, esto para ver el comportamiento a través de los años de cada una de las categorías (Torres, 2014).

DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN

$$NDVI = \frac{P_{IR} - P_R}{P_{IR} + P_R} \quad (1)$$

donde P_{IR} es la reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y P_R es la reflectividad en la región del rojo.

Para determinar los procesos de degradación en coberturas vegetales, se eligieron las categorías de bosque, pastizal, suelo desnudo y matorrales, las cuales corresponden a vegetación natural presente en el área de estudio. Para este análisis, se eligió la metodología de KENDALL, la cual calcula la tendencia monótonica en los datos recopilados a lo largo del tiempo utilizando una medida no paramétrica llamada Mann Kendall (MK). Este módulo se ejecuta para series de imágenes y series de índices.

Resultados

Mapas de cobertura vegetal y uso de suelo

Se obtuvieron mapas de cobertura vegetal y uso de suelo de los años 1990-2015, resultado de la aplicación de procesos relacionados con la corrección atmosférica, interpretación de imágenes de satélite (Landsat TM) y el método supervisado de máxima verosimilitud (Figura 2). Se realizó un análisis espacial y temporal de las categorías (Figura 3), en el que se puede observar el comportamiento a lo largo del tiempo y se destaca lo siguiente: la categoría que más área ocupa es la matorral, la cual demuestra algunos años donde su presencia disminuye (1991, 1993, 1998 y 2005), probablemente relacionado con una baja respuesta espectral a causa de periodos de sequía, donde el verdor disminuye, mientras que en 2001 y 2002 muestra un aumento.

Las categorías en segundo orden de importancia son los pastizales, que tienen una disminución en 2001 y un aumento en 1991, 1993, 1998 y 2005, así como las áreas forestales que presentan una pequeña disminución en 1996, 1997 y 2000. El suelo desnudo no muestra grandes modificaciones, siendo cuerpos de agua y asentamientos humanos las categorías que menos área ocupan y que tienen un aumento mínimo.

***Agrícola; desnudo**

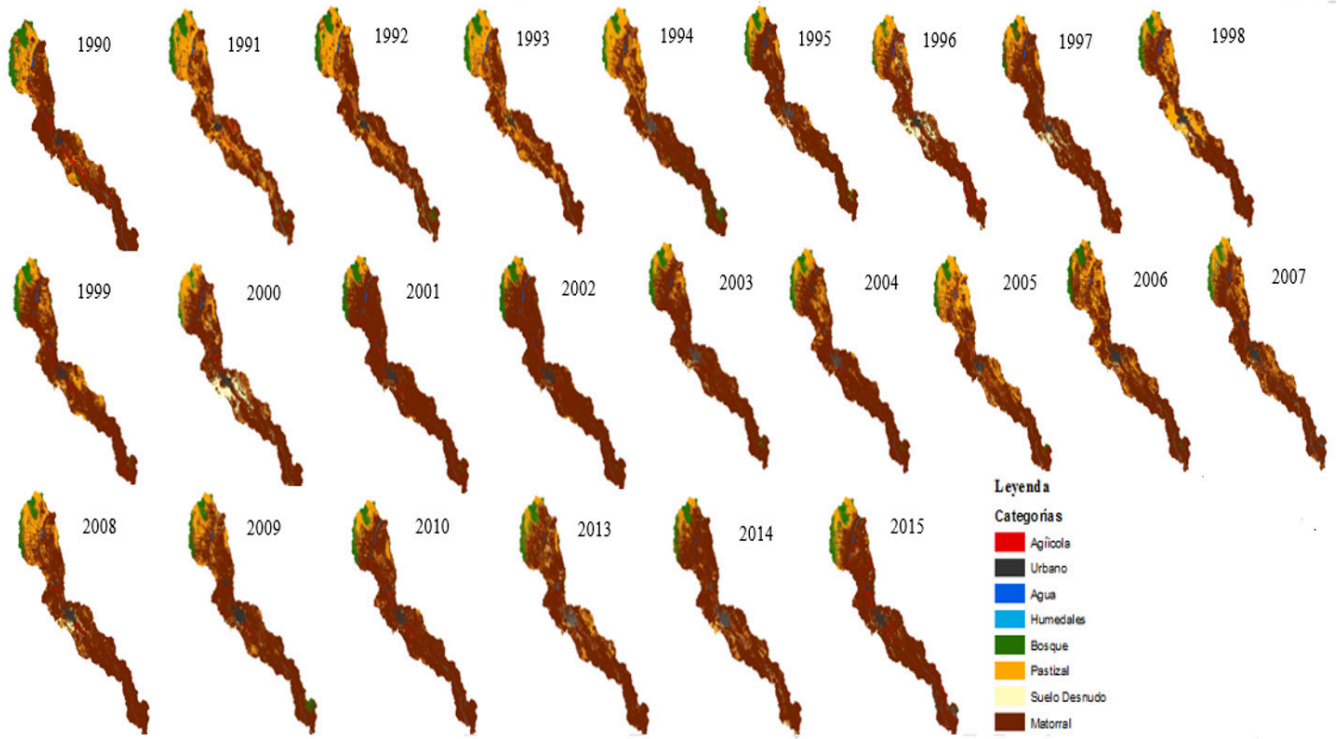


FIGURA 2: Resultado del proceso de clasificación.

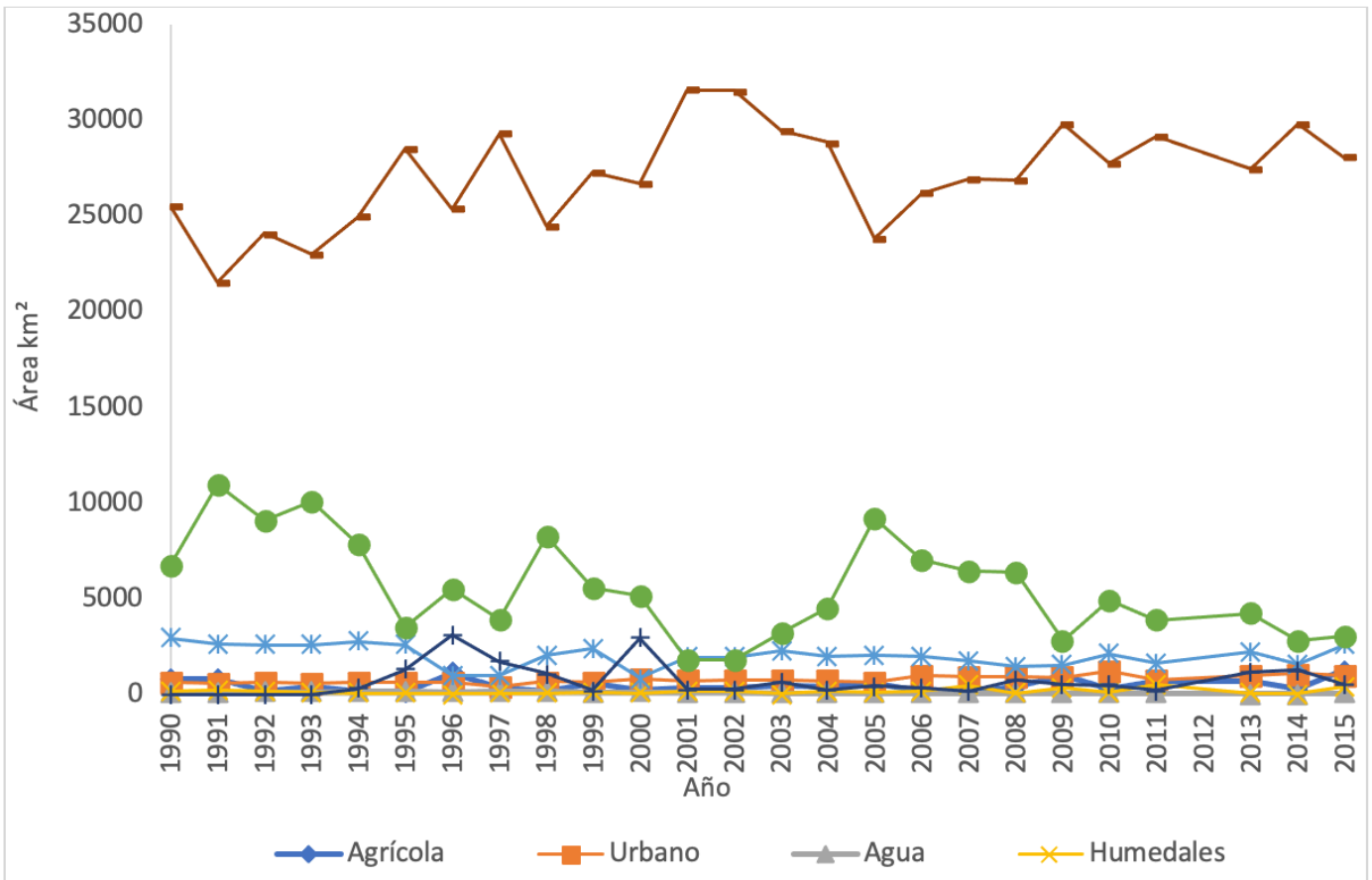


FIGURA 3: Análisis espaciales y temporal de las categorías: cambios de cobertura y uso de suelo.

VALIDACIÓN DE CARTOGRAFÍAS

A partir de las validaciones en IDRISI se obtuvo una matriz donde muestran los errores de omisión, comisión, y un Índice de Acuerdo Kappa (KIA), para cada una de las cartografías (Tabla 2), obteniendo un valor de 0.8767 que, según Landis y Koch, es considerado como muy bueno.

La Figura 4 muestra la evolución temporal del NDVI en la totalidad del área de estudio entre 1990 y 2015 y se observa que los valores más elevados pertenecen a la categoría de bosque, seguida por pastizales y matorrales que muestran un comportamiento muy similar.

años 1996, 1998 y 2000, todas las categorías muestran aumentos, mientras que para 1992, 1997, 1999, 2001, 2004 y 2006 presentan una disminución. Para los años 2013, 2014 y 2015, los pastizales, matorrales y suelo desnudo tienen un valor más alto mientras que la categoría de bosque presenta un valor más bajo. Esta variabilidad temporal mostrada puede deberse a condiciones climáticas (sequías, periodos húmedos, etc.) que alteran la respuesta espectral, principalmente el verdor de la vegetación (Gaitán *et al.*, 2015).

TABLA 2: Resultado de la Validación: Índice Kappa.

	Agrícola	Urbano	Agua	Humedales	Bosque	Pastizal	Suelo desnudo	Matorral	Error comisión
Agrícola	1	0	0	0	0	0	0	0.002212389	0.0244
Urbano	0	1	0	0	0	0	0	0	0.0294
Agua	0	0	0.928571	0	0	0	0	0	0
Humedales	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Bosque	0	0	0	0	0.958333	0	0	0.006637168	0.0612
Pastizal	0	0	0	0	0	0.989691	0.035714286	0.084070796	0.2941
Suelo desnudo	0	0	0	0	0	0	0.875	0.017699115	0.1404
Matorral	0	0	0.071429	0	0.041667	0.010309	0.071428571	0.889380531	0.0195
Total	40	33	14	26	48	97	56	452	
Error omisión	0	0	0.0714	0	0.0417	0.0103	0.125	0.1106	0.0796
								Índice Kappa	0.8767

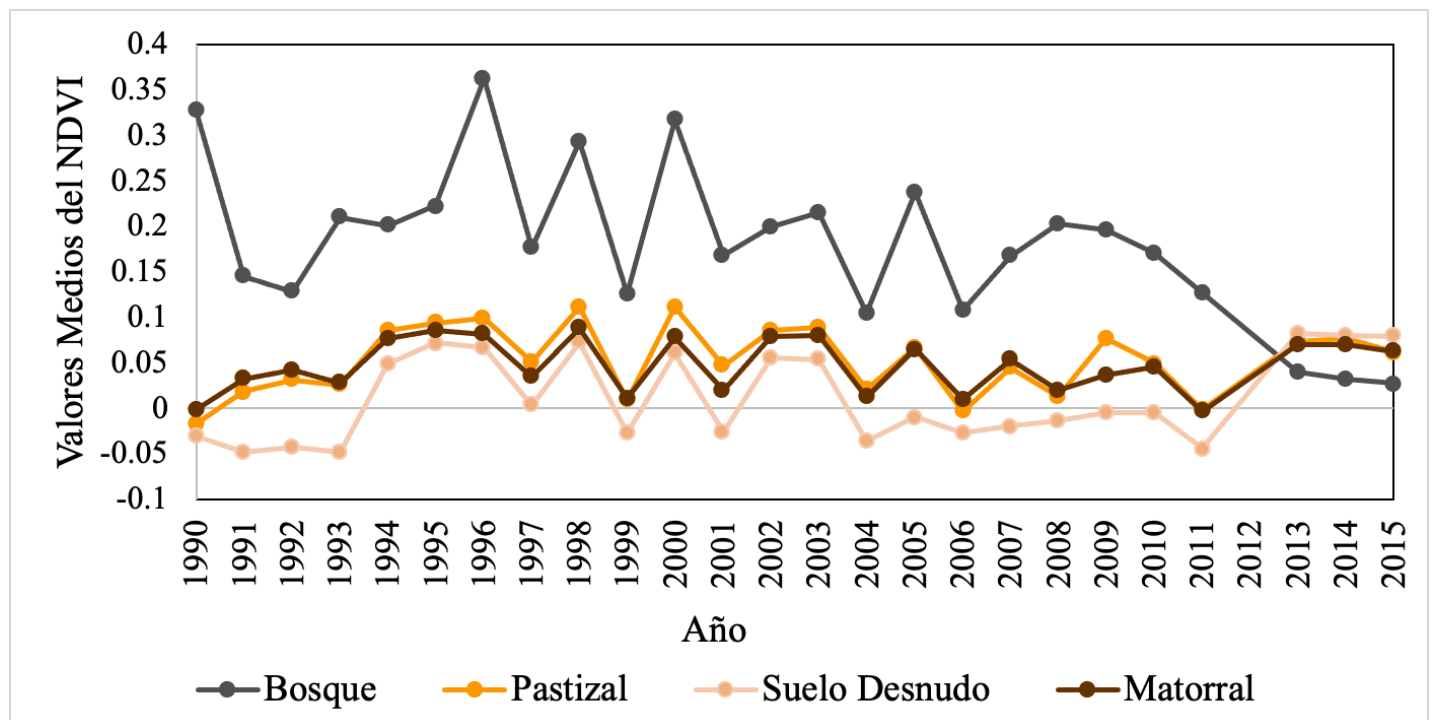


FIGURA 4: Análisis temporal y espacial del NDVI para las categorías de bosque, pastizal, suelo desnudo y matorral.

DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE LAS COBERTURAS VEGETALES

El análisis Mann-Kendall, realizado a partir de la serie temporal del NDVI (1990 al 2015), permitió observar de mejor manera las tendencias de la vegetación (Figura

5), donde los valores inferiores a -0.002 , tendrán tendencia negativa, los mayores a 0.002 , positiva, y los que se encuentran entre -0.002 y 0.002 se mantienen estables (Alatorre *et al.*, 2015).

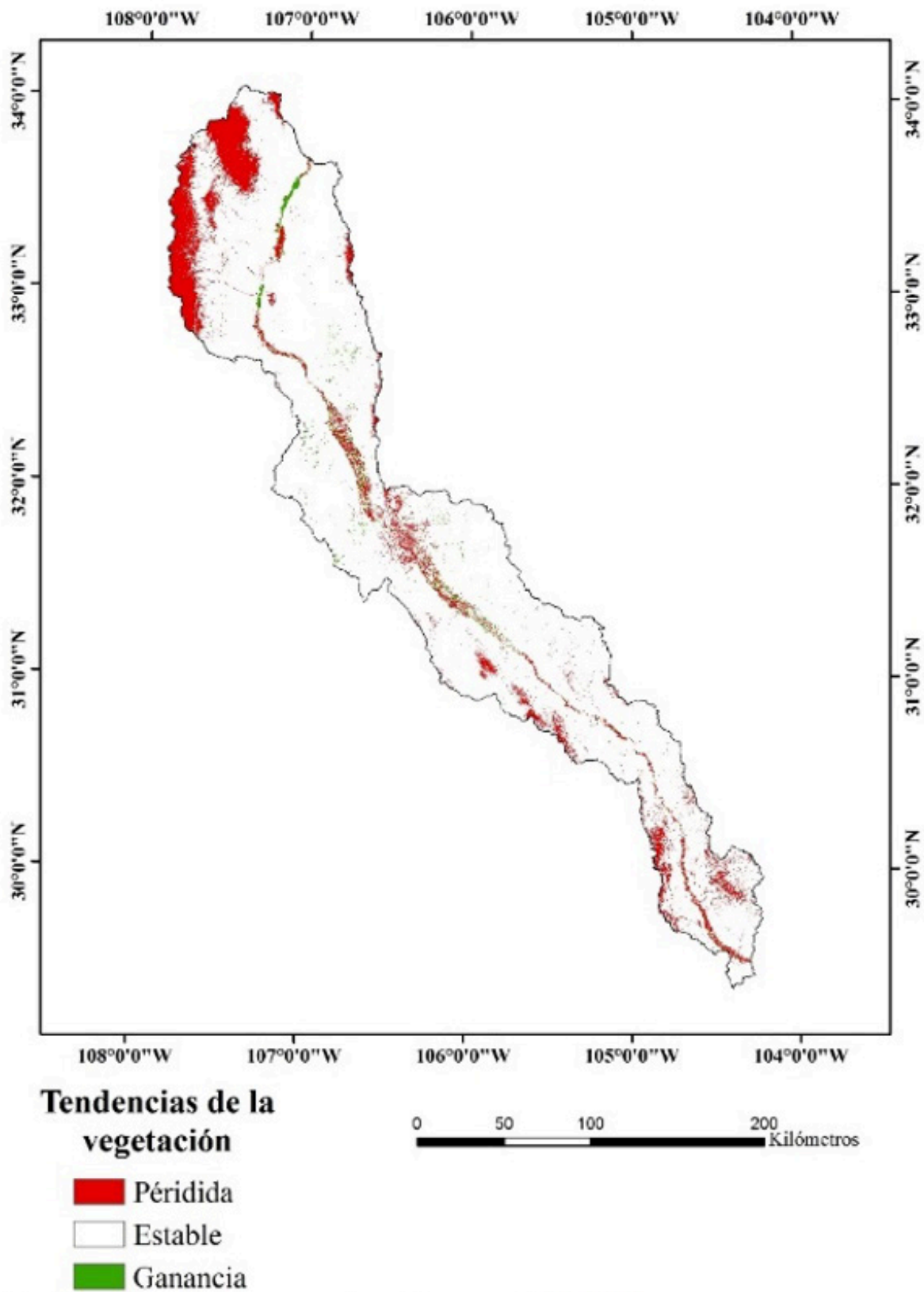


FIGURA 5: Tendencias positivas y negativas de la vegetación. *Pérdida

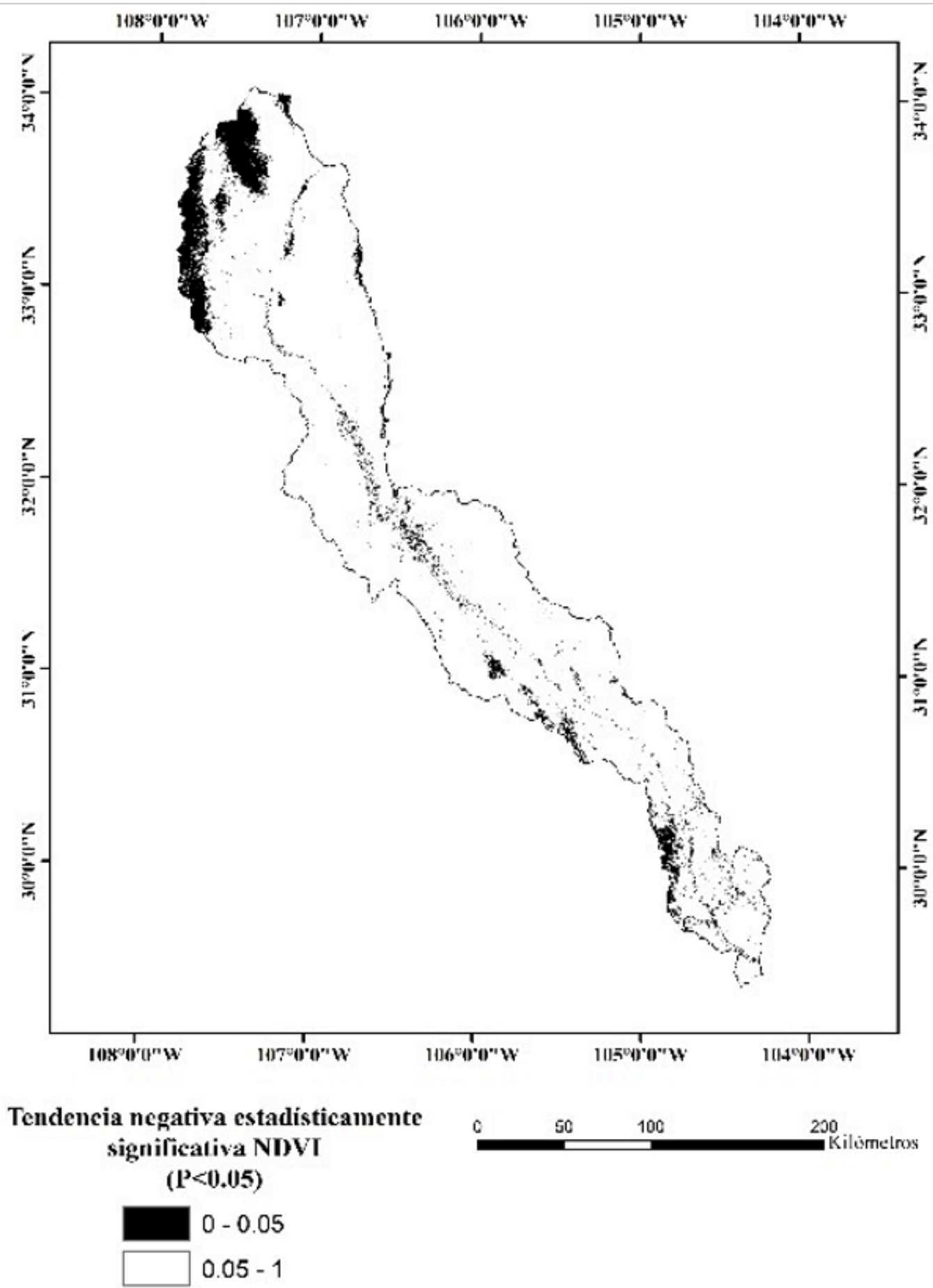


FIGURA 6: Tendencias negativas estadísticamente significativas (P < 0.05).

En la Figura 6 se muestran las tendencias negativas que son estadísticamente significativas con valores que van de 0 a 0.05, mientras que los valores de 0.05 a 1 no son estadísticamente significativos. La distribución espacial muestra el área en su mayoría estable, mientras que en una porción menor se encuentran las zonas con

tendencia positiva o ganancia (Maldonado *et al.*, 2015), sin embargo, la clase de interés es aquella que presenta tendencia negativa o pérdida en la vegetación, ya que es una gran porción del área afectada y coincide con lo generado en la cartografía de cobertura y uso de suelo para las áreas de bosque y agricultura (Figura 7).

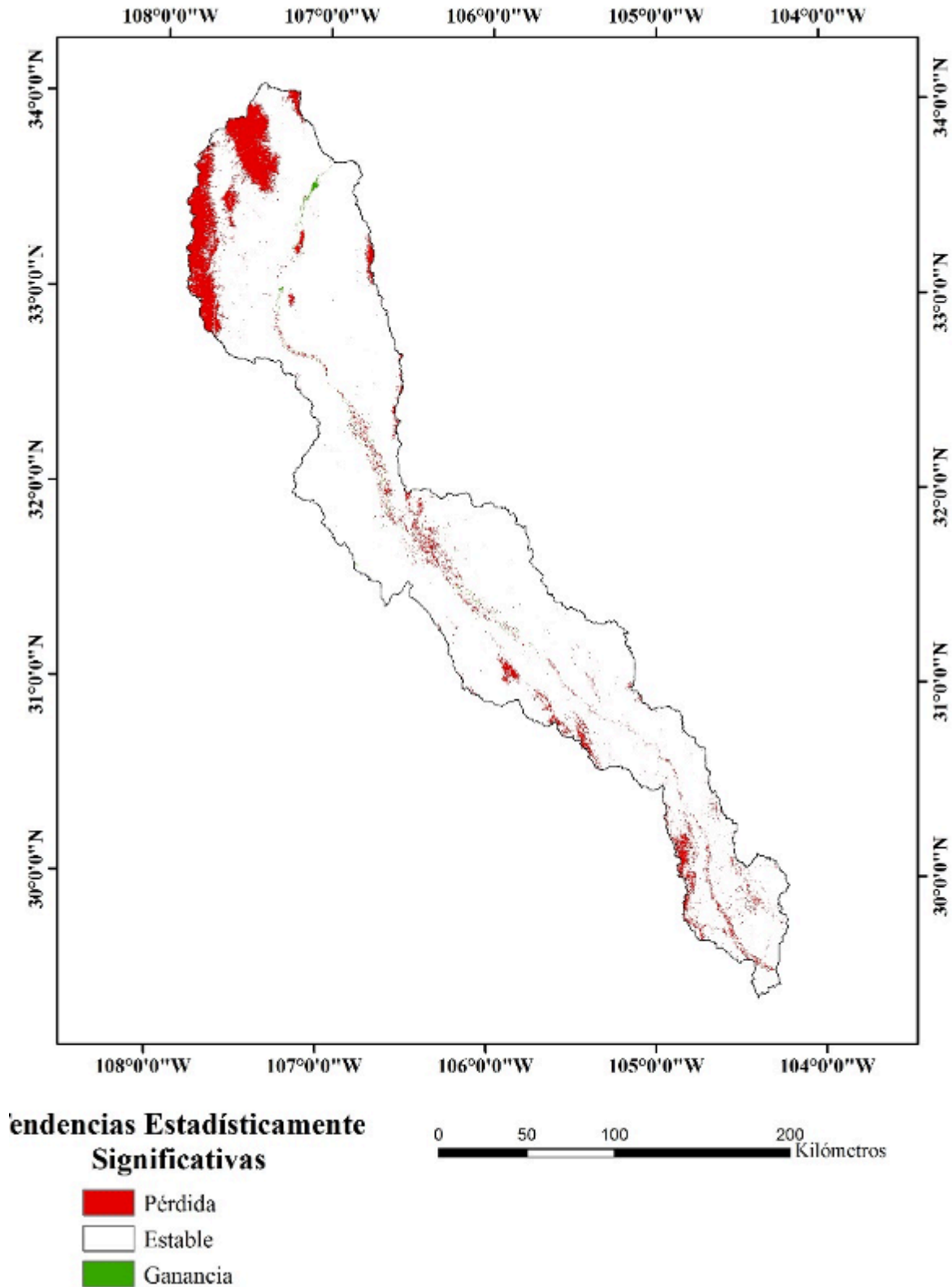


FIGURA 7: Tendencias estadísticamente significativas

Discusión

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de los distintos procesos de cambio que existen en determinado territorio (Flamenco *et al.*, 2011). Varios investigadores utilizan distintas metodologías, métodos y técnicas para abordar los estudios de cambio de cobertura y uso de suelo (Rosete, 2014). Su ejecución estará sujeta a las necesidades o a las características de la investigación para el cumplimiento y logro de los objetivos establecidos (Ballesteros, 2013). Para este estudio se utilizaron técnicas de clasificación supervisada mediante el método de máxima verosimilitud a partir de un conjunto *a priori* de categorías (cubiertas). Respecto a ello, muchos autores afirman que es una metodología muy eficaz al momento de obtener los resultados y en ese sentido se obtuvo una cartografía de las distintas coberturas y usos de suelo, que indica que las categorías de mayor importancia en la región son matorral, pastizales, y áreas forestales.

De acuerdo con Mas *et al.* (2003), los mapas de cobertura y uso del suelo son uno de los insumos más importantes, ya que a partir de estos los especialistas en el área y sobre todo las autoridades responsables en la temática determinan, establecen e implementan políticas públicas, razón por la cual deben ser verificados previo a la toma de decisiones. Esto es posible mediante el proceso de evaluación de la confiabilidad temática.

Por esta razón, las cartografías de los años 1990-2015 se validaron favorablemente mediante la aplicación del método de muestreo aleatorio estratificado (Mas *et al.*, 2003). Se obtuvo una matriz que muestra los errores de omisión, comisión y un Índice de Acuerdo Kappa (KIA) para cada una de las cartografías, obteniendo un valor de 0.8767 que, según Landis y Koch, es considerada como muy buena, por lo cual las cartografías son muy confiables y útiles para futuros trabajos.

Para la determinación de los procesos de degradación de las coberturas vegetales se crearon índices espectrales y a pesar de que muchos autores recomiendan utilizar otro tipo de índices espectrales, como el SAVI o MSAVI, en este estudio se seleccionó el NDVI, ya que es el que mejor se ajusta visualmente al territorio y además permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como la evolución de su estado a lo largo del tiempo.

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa

de los parámetros biofísicos de la vegetación (Murillo *et al.*, 2013). Además, permite la comparabilidad entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera (Meneses *et al.*, 2011).

Finalmente, estos resultados muestran algunos cambios en la dinámica de la vegetación observados en otras partes del mundo. Por ejemplo, en los Pirineos españoles occidentales Serrano *et al.* (2004) encontraron una tendencia temporal positiva en los valores de NDVI para bosques y áreas con buena cobertura vegetal debido a patrones de abandono de la tierra y procesos de revegetación natural (Lasanta *et al.*, 2007; Hill *et al.*, 2008). Por otra parte, en los Pirineos españoles centrales, Alatorre *et al.* (2011) estudiaron la dinámica de la vegetación en áreas con buena cobertura vegetal y los resultados mostraron una tendencia positiva de los valores medios de NDVI. Por ello, los resultados encontrados en el presente estudio muestran la vulnerabilidad ambiental que tienen las áreas forestales ante posibles impactos de cambio climático, sobreexplotación de territorio y recursos hídricos.

Conclusiones

El presente trabajo muestra la utilidad de las técnicas de teledetección y SIG en escalas de cuenca y regional (áreas de estudio entre los 10 y los 10 000 km²). La utilización de técnicas de clasificación supervisada mediante el método de máxima verosimilitud a partir de un conjunto *a priori* de categorías (cubiertas), ha permitido obtener una cartografía de las distintas categorías seleccionadas. En general se demuestra que las categorías de mayor importancia en la región son matorral, pastizales y áreas forestales, y la variabilidad temporal mostrada puede deberse a condiciones climáticas (sequías, periodos húmedos, etc.) que alteran la respuesta espectral, principalmente el verdor de la vegetación. El análisis de Mann-Kendall indica dónde hay tendencias positivas y negativas de las cuales las que son estadísticamente significativas se encuentran en las categorías de bosque y agricultura.

Referencias

- Alatorre, L.C. y Beguería, S. (2009). Identification of active erosion and erosion risk areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees. *Catena*, 76: 182–190. ISSN: 0341-8162
- Alatorre, L.C., Sánchez, E., Amado, J.P., Wiebe, L.C.,

- Torres, M.E., Rojas, H.L., Bravo, L.C., López, E. (2015). Analysis of the temporal and spatial evolution of recovery and degradation processes in vegetated areas using a time series of Landsat TM images (1986-2011): central region of Chihuahua, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 5 (2), 162-180. ISSN Print: 2163-0429; ISSN Online: 2163-0437
- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. (2011). Evolution of Vegetation Activity on Vegetated, Eroded, and Erosion Risk Areas in the Central Spanish Pyrenees, Using Multitemporal Landsat Imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 309-319.
- Anderson, J.R. (1976). A land use and land cover classification for use with remote sensor data, U.S. Geological Survey Professional Paper 964, Washington, U.S. Government Printing Office
- Aragón, L. M. (2013).
- Arias *et al.*, H. A. R. M. Z. C. V. B., (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes aster, rapideye, spot 2 y landsat 8 con el módulo flash del software envi. *Revista Geográfica de América Central*, pp. 39-59.
- Bernabe V., Riesco J.A., Giménez M.C. y García J.L. (2014). Using remote sensing for monitoring of gully erosion progress in Jarama river basin. Guadalajara, Spain. In *Proceedings of Brasov Symposium*.
- Brovkin V., Sitch S., Von Bloh W., Claussen M., Bauer E., (2004). Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years. *Glob. Change Biol.* 10: 1253-1266.
- Buendía-Rodríguez, E. (2002). Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del Valle de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y*, 8(1), pp. 13-19.
- Chase T.N., Pielke R.A., Kittel T.G.F., Neman I R.R. y Running S.W. (2000). Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Clim. Dynam.* 16: 93-105.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones RIALP, S.A. Madrid, España, Segunda edición, 451 pp.
- Claussen M, Brovkin V. y Ganopolski I. (2001). Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophys. Res. Lett.* 28: 1011-1014.
- Defries R.S., Bounoua L. y Collatz G.J. (2002). Human modification of the landscape and Surface climate in the next fifty years. *Glob. Change Biol.* 8: 438-458.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*.
- Foley JA, Defries R., Asner G.P., Barford G.C., Bonan G. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Foody. G. M. y Hill. R. A. (1996). *Classification of* (eds.), tropical forests classes from Landsat TM data, *Int. J. Remote Sens.*, 17 2353-2367.
- Franco, S., H. Regil, C. González y G. Nava. (2006). Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000 (parte b). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (61):38-57.
- García, J., J. Gutiérrez, J. Juan y M. Balderas. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía* (55-56):63-73
- Green, K., D. Kempka y L. Lackey. (1994). Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60: 331-337.
- Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., & Sommer, S. (2008). *Mediterranea Desertification and Land Degradation. Mapping Related Land Use Change Syndromes Based on Satellite Observations. Global and Planetary Change*, 64, 146-157.
- Houghton R., J.L. Hackler y Lawrence K. (1999). The US carbon Budget Contributions from land use change. *Science* 285: 574-578.
- José Manuel Camacho-Sanabria¹, José Isabel Juan Pérez, Noel Bonfilio Pineda Jaimes, Edel Gilberto Cadena Vargas, Luis Carlos Bravo Peña y Marcela Sánchez López. 2015. Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. vol. 21, núm. 1 : 93-112
- Lambin E.F., Turner B.L., Geist H.J., Agbola S.B., Angelsen A. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change*, 11: 261-269.
- Lambin, E.F. (1996). Change Detection at Multiple Temporal Scales: Seasonal and Annual Variations in Landscape Variables. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(8): 931-938.
- Lasanta, T., & Vicente-Serrano, S. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo Aragonés en los últimos 50 años. *Pirineos*, 162, 125-154.
- Matson PA, Parton W.J., Power A.G. y Swift M.J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 277: 504-509.
- Muchoney, D., Haack, B. (1994). Change Detection for Monitoring Forest Defoliation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(10): 1243-1251.
- Pimm S.L. y Raven P. (2000). Biodiversity – Extinction by numbers. *Nature* 403: 843-845.
- Van Lynden, G.W.J. y L.R. Oldeman. (1997). The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. *International Soil Reference and*

- Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Vicente-Serrano, S. M., Lasanta, T., & Romo, A. (2004). Analysis of the Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: The Role of Human Management. *Environmental Management*, 34, 802-818.
- Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J. y Melillo J.M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.
- Sala O.E., Chapin F.S., Armesto J.J., Berlow E., Bloomfield J. (2000). Biodiversity – Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770- 1774.

I.4 Análisis de evolución piezométrica del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) en la cuenca baja del río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua

Piezometric evolution analysis of the Palomas-Guadalupe Victoria Aquifer (0812) in the Lower Basin of the Casas Grandes River, Ascensión, Chihuahua

Carlo Iván Romero Gameros¹, Alfredo Granados Olivas¹, Oscar Fidencio Ibáñez Hernández¹, Manuel Herrera Mercado¹, Alex Mayer², William Hargrove², Joseph M. Heyman²

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ² Universidad de Texas en El Paso

Resumen

México es un país cuyo territorio tiene vastas regiones con climas áridos y semiáridos, donde el agua subterránea satisface la gran mayoría de los requerimientos hídricos de las poblaciones, tanto para actividades de riego como para actividades domésticas e industriales. La explotación desordenada del agua subterránea, aunada a las condiciones climatológicas de la zona, conlleva al descenso de los niveles estáticos en los acuíferos, así como a distintas problemáticas en el ámbito ambiental, económico, administrativo y social. La aplicación de nueva tecnología, como la piezometría digital, facilita el estudio de prevalencia de los acuíferos y la generación de estudios geohidrológicos. Este estudio se centra en el análisis de la evolución temporal del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria, en la cuenca baja del río Casas Grandes, a partir de la instalación de piezometría digital y el uso de nuevas tecnologías para el monitoreo de la infraestructura hidroagrícola del área. El estudio denota la importancia del uso de nuevas tecnologías debido a la generación de bases de datos de gran calidad, dando acceso a la ampliación del estudio de la evolución piezométrica del acuífero, así como la aplicación de una gestión integral de recurso en el área.

Abstract

Mexico is a country whose territory has vast regions with arid and semi-arid climates where groundwater satisfies the vast majority of the water requirements of the populations, both for irrigation activities and for domestic and industrial activities. The disorderly

exploitation of groundwater, together with the climatic conditions of the area, leads to a decrease in the static levels in the aquifers, as well as different problems in the environmental, economic, administrative and social fields. The application of new technologies, such as digital piezometry, facilitates the study of the prevalence of aquifers and the generation of geohydrological studies. This study focuses on the analysis of the temporal evolution of the Palomas-Guadalupe Victoria aquifer in the Lower Casas Grandes River Basin from the installation of digital piezometry and the use of new technologies for monitoring the hydro-agricultural infrastructure of the area. The study denotes the importance of the use of new technologies due to the generation of high-quality databases giving access to the extension of the study of the piezometric evolution of the aquifer, as well as the application of a comprehensive resource management in the area.

Introducción

La sobreexplotación mundial del agua subterránea, junto con el cambio climático, ha conducido al agotamiento gradual de los acuíferos y a la degradación de la calidad del agua en ellos a partir del decremento en la cantidad de precipitación y las temperaturas crecientes (Salameh *et al.*, 2019). El agua subterránea comprende el 30.1 % del agua dulce total en el mundo y desempeña un papel esencial en el mantenimiento de la humedad del suelo, el caudal de los ríos y las zonas húmedas, además de ser un recurso vital sobre todo en las regiones áridas, semiáridas e islas y puede ser el único tipo de agua dulce disponible (USGS, 2017; UNESCO, 1992).

Existen 653 acuíferos definidos en México, de los cuales 123 se catalogan como sobreexplotados, siendo el norte y centro del país las zonas afectadas. El estado de Chihuahua cuenta con 30 de 61 acuíferos sin disponibilidad que son afectados principalmente por el alto crecimiento demográfico, la agricultura, el aumento de la temperatura ambiente, la complejidad geológica del estado y la sequía (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2016; CONAGUA, 2010).

El acuífero Palomas-Guadalupe Victoria se encuentra ubicado en la región hidrológica 34, dentro de las Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes) (RH-34), localizado al norte del estado de Chihuahua, y es el suministro principal de agua potable para la población en la cuenca baja del río Casas Grandes (CBRCG), además de ser utilizado primordialmente para irrigación de cultivos (Figura 1) (INEGI, 2003). Debido a que el

acuífero Palomas-Guadalupe Victoria está ubicado en una región con alto estrés hídrico, así como con una gran complejidad hidrogeológica, está clasificado como un acuífero en sobreexplotación con un déficit real de 2 802 073 m³ anuales, en donde la probabilidad de formación de abatimientos es mayor debido a la extracción continua que se le demanda (Romero-Gameros, 2018; CONAGUA, 2020). Este presenta lluvias repartidas durante todo el año, con un promedio de 175.8 mm mayormente presente durante los meses de julio y agosto (Servicio Meteorológico Nacional, 2010; CONAGUA, 2020). El acuífero presenta una composición principal de rocas ígneas intrusivas expuestas de composición variante, tales como basaltos, andesitas y riolitas, y está clasificado como heterogéneo y anisótropo, libre en su gran mayoría, con condiciones de semiconfinamiento por medio granular en la parte superior, constituido por conglomerados y limos-arenas del Holoceno, y por un medio fracturado subyacente compuesto por basaltos fracturados afines al Campo Volcánico Palomas, generado durante el Plioceno-Pleistoceno. Las zonas más bajas topográficamente presentan depósitos sedimentarios cuaternarios, compuestos por limos, arenas y gravas, con presencia de arcillas (CONAGUA, 2020; Servicio Geológico Mexicano, 2003).

Actualmente, la disponibilidad de agua subterránea en el estado de Chihuahua está comprometida y ha entrado en crisis debido a factores antropogénicos y naturales (Reyes Cortés *et al.*, 2009), por lo cual el análisis de registros continuos de niveles piezométricos es de suma importancia, ya que permite deducir la evolución del acuífero y predecir los niveles futuros de este conforme a las recargas y extracciones. Además, el monitoreo del nivel piezométrico a lo largo del tiempo permite estudiar las características del acuífero y su respuesta frente a las precipitaciones (Custodio & Llamas, 1996). Por lo tanto, la actualización de información por medio de piezometría digital u otros métodos es esencial para la generación de una representación actual del comportamiento del acuífero, fomentando la creación de planes de gestión y sustentabilidad hídrica con respecto al uso del recurso en la cuenca. En este sentido, en la presente investigación se instaló y aplicó la piezometría digital dentro de la cuenca baja del río Casas Grandes, corroborada por un sondeo a partir de videocámara en los pozos con el fin de generar un esquema de evolución continua del acuífero, así como el conocimiento general de la infraestructura hidroagrícola para futuras investigaciones.

Materiales y métodos

La revisión estructural de los pozos se llevó a cabo utilizando el equipo manual Crank Well-Vu System, que consta de un cable con longitud de 150 m, dos videocámaras de alta resolución, una de ellas de tipo Fisheye para una visualización de 180 grados, y un monitor para la visualización del video capturado a tiempo real (Figura 2). Este se utilizó con el fin de realizar una revisión de los estratos y litologías observadas dentro del pozo, así como su diseño, además de corroborar los niveles estáticos y las características generales del pozo. Para la ejecución del análisis, se montó una estructura metálica perteneciente al equipo sobre el ademe del pozo, cuya función es el soporte de la cámara y la sonda. Justo después se enroscó la videocámara en el cable de 150 m y fue acomodado dentro del soporte a través de las poleas que son parte del apoyo metálico, permitiendo el descenso de la videocámara y el cable sin alterarlos o estropearlos (Figura 3). Una vez montada la estructura, el monitor se conectó a una fuente de poder

y este fue acoplado al cable portador de la videocámara, de tal manera que al conectar el monitor al cable y a la fuente de poder se encendió el equipo, capturando datos principales dentro del monitor, como el nombre del pozo y la fecha (Figura 4). El cable fue descendido lentamente mientras se observaron en el monitor el nivel estático, las características del pozo por debajo del nivel, la profundidad total de la infraestructura y, de ser visible, las características litológicas del pozo, capturando y registrando los datos en una memoria externa para el uso posterior. Una vez ejecutada la revisión estructural por videocámara de los pozos, se procedió al análisis de evolución temporal que fue realizado partir de la instalación de un piezómetro digital del tipo Baro Diver, diseñado para monitorear a tiempo real la presión atmosférica, la medición de niveles someros de agua y la captura de la presión hidrostática equivalente del agua sobre el diafragma del sensor para el cálculo de la profundidad total del agua, con un periodo de vida de 10 años (VanEssen, 2020); tres piezómetros digitales del tipo Cera-Diver diseñados para acuíferos con

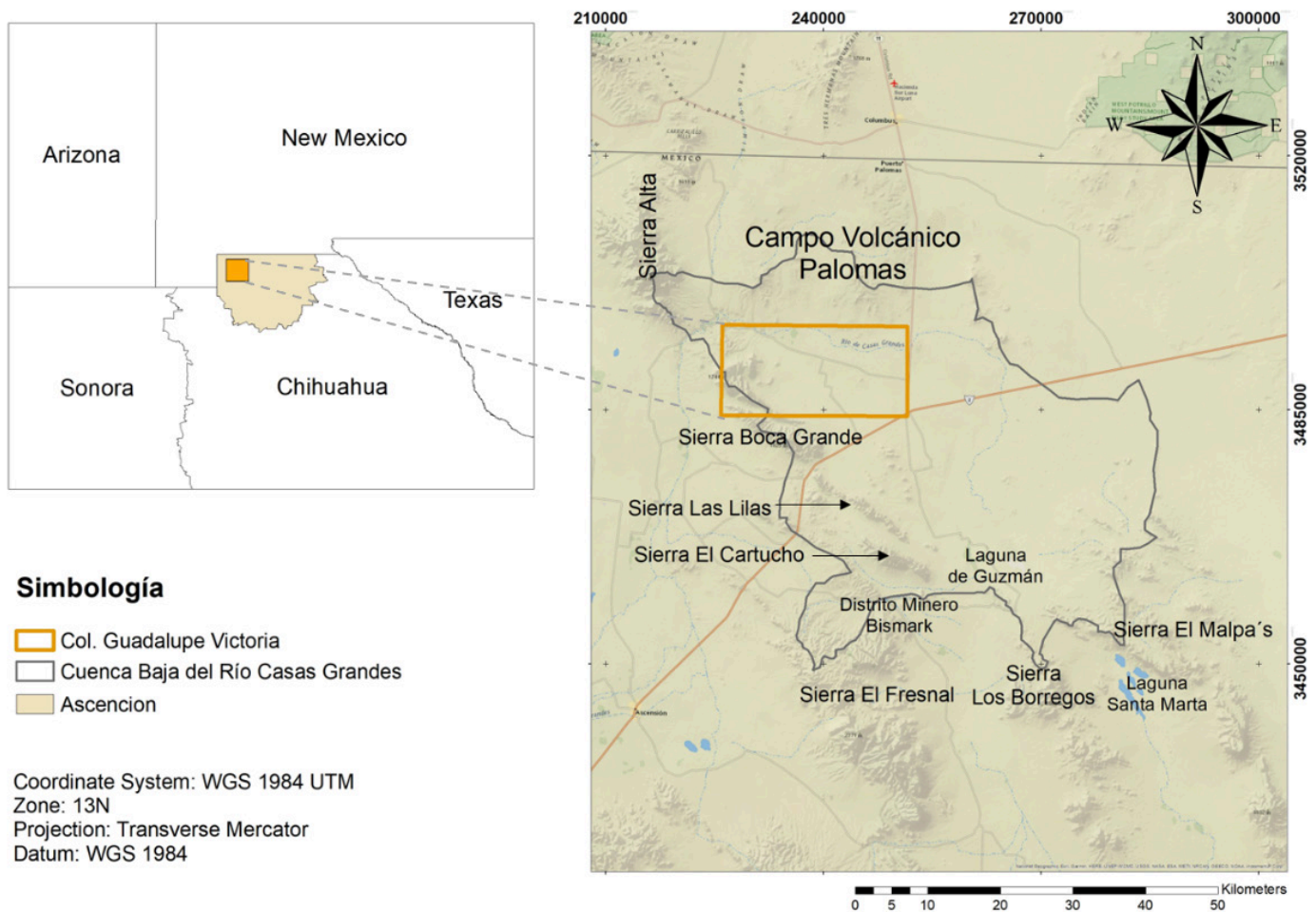


FIGURA 1: Ubicación de la cuenca baja del río Casas Grandes.



propiedades salinas o ambientes agresivos de calidad química del agua subterránea, con una capacidad de almacenaje superior a las 48 000 lecturas, y uno del tipo CTD-Diver, con especificaciones similares al Cera-Diver, añadiendo un sensor para el análisis de conductividad eléctrica del agua (Figura 5) (VanEssen, 2020).

FIGURA 2: Equipo Manual Crank Well-Vu System (Well Vu, 2019).



FIGURA 3: Ensamble del soporte metálico en el ademe del pozo y conexión del monitor.



FIGURA 4: Conexión del equipo a la fuente de poder y montaje final.



FIGURA 5: Piezómetros digitales: a) Baro-Diver, b) Cera-Diver y c) CTD-Diver (VanEssen, 2020).

Previo a su instalación, se seleccionaron cinco pozos de monitoreo a lo largo de la cuenca, considerando el permiso por parte del propietario del pozo, su accesibilidad, la existencia de un nivel sobre el espejo del agua menor a los 50 metros debido al cable disponible para su instalación y que el pozo no contara con infraestructura de bombeo. Los piezómetros fueron calibrados con datos de niveles estáticos referentes a cada pozo, obtenidos por medio de la revisión estructural realizada anteriormente, tomando en cuenta una temporalidad de registro automatizado tres días, la

longitud del cable utilizado, la presión barométrica y la fecha de inicio programada para captura. Con respecto al piezómetro Baro-Diver, se realizó la calibración para la captura durante 12 horas. La instalación de los piezómetros digitales requirió la elaboración de puentes estabilizadores (Figura 6), diseñados con respecto a las medidas del ademe del pozo, utilizados como soporte tanto del cable de acero como del piezómetro digital, situados y reforzados en la infraestructura del pozo (Figura 7), evitando su alteración por las condiciones meteorológicas del área de estudio.

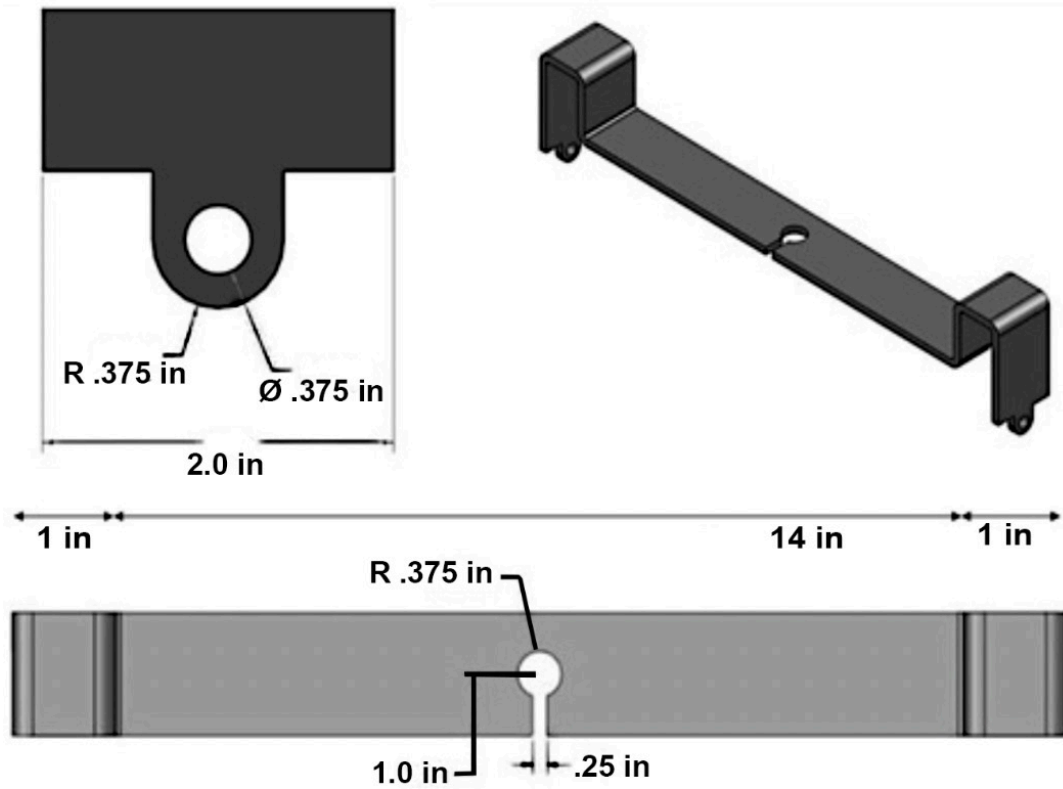


FIGURA 6: Puentes estabilizadores (Martínez, 2010).



FIGURA 7: Instalación de piezómetros digitales sobre la infraestructura del pozo (Romero-Gameros, 2018).

Colección de datos

Los datos obtenidos se compensaron barométricamente con el fin de obtener los niveles estáticos a partir de una interpolación lineal para los valores de presión atmosférica capturada por el piezómetro Baro-Diver. Restando las mediciones de presión atmosférica de la medición de la presión absoluta, son compensadas las variaciones de presiones. La compensación barométrica fue realizada a través del software Diver Office, utilizando datos del piezómetro Baro-Diver instalado, la cual se calcula a partir de la Ecuación (1):

$$WC = 9806.65 \left(\frac{P_{diver} - P_{baro}}{\rho * g} \right) \quad (1)$$

donde WC es la carga de la columna de agua sobre el piezómetro, P_{diver} el dato de presión obtenido del piezómetro, P_{baro} el dato de presión proporcionado por el barómetro, ρ la densidad del agua (1000 kg/m^3) y g la fuerza de aceleración debido a la gravedad. A su vez, el sistema realiza el cálculo del nivel piezométrico a través de la Ecuación (2):

$$VL = TOC - CL + WC \quad (2)$$

siendo TOC la altura sobre el nivel del mar obtenido con GPS en metros, CL la longitud del cable utilizado en la instalación del piezómetro digital y WL el cálculo del nivel piezométrico del pozo. Por consiguiente, el nivel estático se obtiene a través de la sustitución de (1) en (2), dando la Ecuación (3):

$$WL = TOC - CL + 9806.65(P_{diver} - P_{baro}(\rho * g)) \quad (3)$$

Resultados y discusión

A continuación se exponen los datos más significativos del estudio, que fueron obtenidos en los pozos Rancho El Milagro, L. Arras y La Antena, a partir de la instalación de piezometría digital y la revisión estructural por videocámara.

La revisión estructural por videocámara del pozo Rancho El Milagro registró un nivel estático a los 67.2 m, con una profundidad total del ademe de 86.4 m. Dentro de este se observaron, a lo largo de la infraestructura del pozo, obstrucciones en las ranuras del ademe a partir de los 12 m, con presencia de múltiples cascadas a los

18, 18.5, 38.5 y 39 m respectivamente. Además, se visualizaron notorias incrustaciones de sales a lo largo del ademe por debajo del nivel estático hasta el final del este. A su vez, se diferenciaron diversos cambios en la litología del pozo, teniendo roca volcánica fracturada a partir del final del ademe hasta los 75.5 m, precedido de roca caliza compactada hasta los 76 m. De los 76 a los 79 m se observó nuevamente roca volcánica, seguida de roca compactada de material fino hasta los 79.3 m, y el resto fue adjudicado a material volcánico hasta llegar al final del pozo (Figura 8).

Los datos obtenidos por el barómetro instalado en el pozo Rancho El Milagro (Figura 9) denotan una fluctuación de presiones entre 886 a 911 cmH_2O aproximadamente, lo que representa la carga ejercida por la columna de agua sobre el piezómetro. Dichos datos fueron utilizados para la compensación barométrica del resto de los piezómetros. Con respecto a las temperaturas capturadas, se demuestran fluctuaciones entre los 0 y 28 °C durante el periodo de toma de datos, denotando una variación notoria conforme a las estaciones del año, donde las temperaturas menores corresponden a la temporada invernal.

El peso ejercido por la presión barométrica es aproximadamente igual a 10 metros de la columna de agua, la cual no es estable en el tiempo, pero exhibe variaciones de hasta 1 metro de columna de agua. Si los datos obtenidos por los piezómetros digitales no son compensados barométricamente, existe la posibilidad de una estática de error de 10 metros y una dinámica de error de 1 metro. De ahí la gran importancia de la instalación del piezómetro Baro-Diver dentro del área de estudio para la compensación barométrica en el resto de los piezómetros instalados y evitar errores considerables dentro del estudio.

El nivel estático capturado a partir del análisis estructural realizado en el pozo La Antena fue de 21.3 m de profundidad, donde se visualizó la presencia de incrustaciones de sales en el ranurado a partir de los 10 metros de profundidad con presencia de cascadas a los 12.7 y 14 m. A partir de los 25 m de profundidad, se observaron incrustaciones de sales a lo largo de toda la infraestructura; de los 33 a los 39 m y de los 42 a los 46 m se observó la presencia de raíces. La profundidad del ademe finalizó a los 58.6 m, precedido de un conglomerado con poca permeabilidad o impermeable y roca caliza cambiando a un material similar a la arenisca consolidada de los 99.2 hasta los 101.5 m, donde se aprecia un cambio de litología similar a roca volcánica justo al final de la perforación (Figura 10).

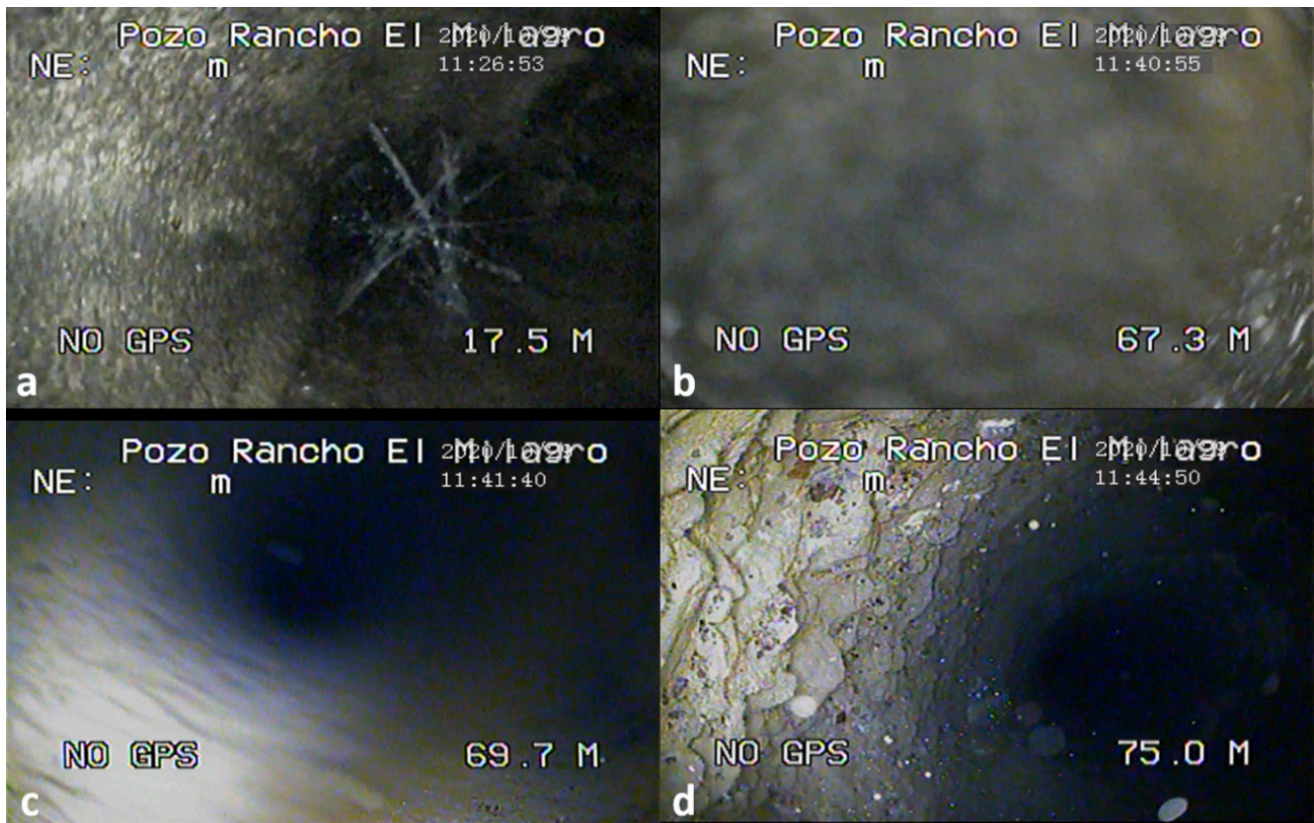


FIGURA 8: Resultados obtenidos a partir de la revisión estructural en el pozo Rancho el Milagro, donde se demuestra a) la presencia de múltiples cascadas; b) la profundidad del nivel estático en el pozo; c) las grandes incrustaciones de sales alrededor de la infraestructura del pozo y d) la visualización de los estratos de rocas a partir del final del ademe.

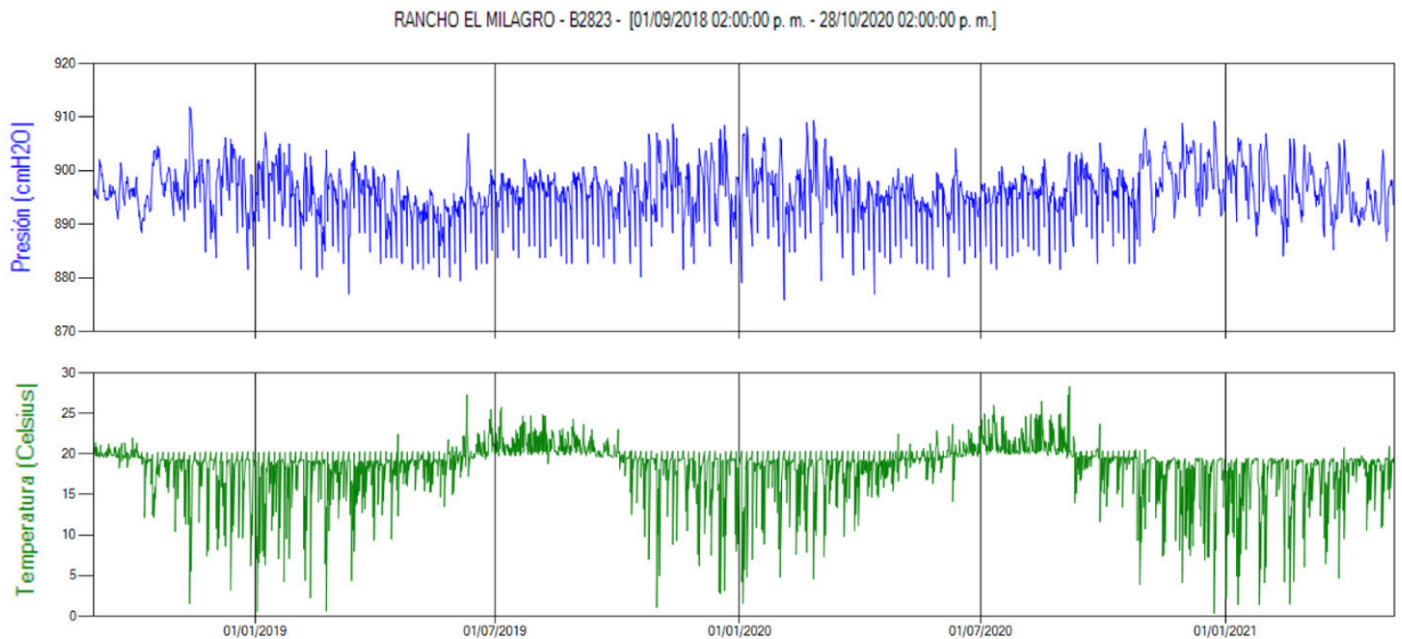


FIGURA 9: Evolución temporal de presión y temperatura capturadas por el Baro-Diver de agosto de 2018 a mayo de 2021.

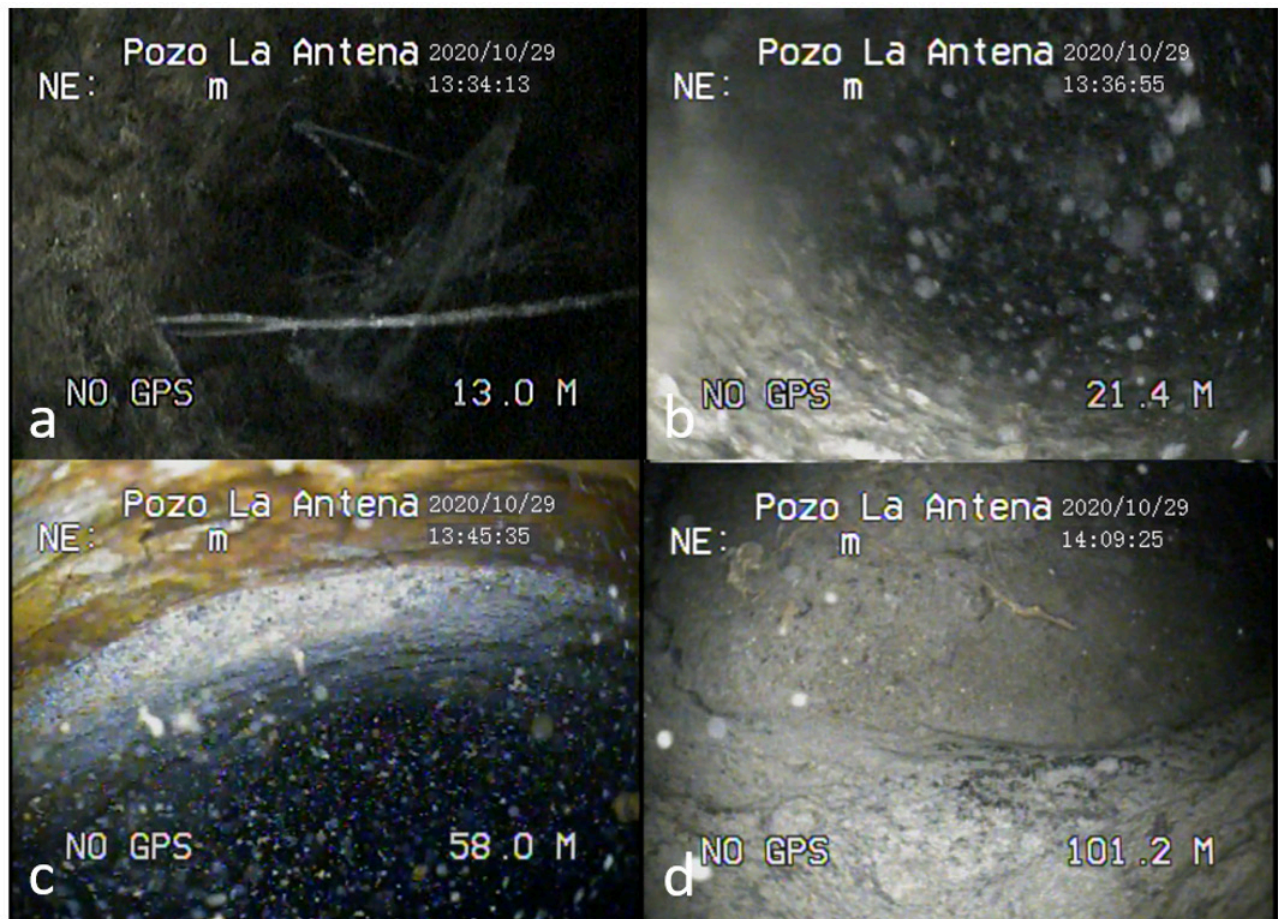


FIGURA 10: Resultados obtenidos a partir de la revisión estructural en el pozo La Antena, donde se demuestra a) la presencia de múltiples cascadas; b) la profundidad del nivel estático en el pozo; c) el final del ademe en la perforación precedido de un material rocoso blanquizco y d) la visualización de los estratos de rocas al final de la perforación.

Una vez compensados barométricamente los datos obtenidos por el piezómetro CTD-Diver en el pozo La Antena, se observó una fluctuación del nivel estático entre los 21.36 y 20.24 m de profundidad, lo que denota una ligera recuperación del nivel del pozo durante la temporada invernal de 2020 de aproximadamente 1 m, precedido de un notorio declive en el nivel estático a partir del inicio de la temporada de riego en marzo de 2021. Cabe señalar que el pozo La Antena cuenta con una gran estabilidad en su nivel estático a través del tiempo, incluso con la presencia de un pozo en operación constante a 200 m de distancia, ya que no demuestra un abatimiento general, lo que corrobora la complejidad estratigráfica presente en el área de estudio. A su vez, la temperatura del agua en el pozo demuestra un ligero aumento de finales de 2020 a mediados de 2021 de 0.2 °C, concurriendo con el cambio de estación. La conductividad eléctrica capturada demostró un incremento de 2.68 a 2.97 mS/cm de octubre de 2020 a mayo de 2021, indicando una ligera alteración en la calidad química del agua en el pozo que puede ser

producto del inicio de la temporada de riego en el área, lo que implica un alto estrés hídrico para el acuífero.

Dada la revisión estructural del pozo L. Arras (Figura 12), se registró un nivel estático a los 7.4 m y un fondo del pozo a los 54.4 m de profundidad. Este representa al pozo analizado menormente abatido, incluso con la presencia de un pozo de bombeo activo a siete metros de distancia. Se visualizó en gran medida alta turbidez en el agua del pozo, así como alta presencia de materia orgánica, lo cual impidió ligeramente la visualización de la estructura del pozo en su totalidad.

Los datos obtenidos en el pozo L. Arras por el piezómetro Cera-Diver (Figura 13) registraron una fluctuación del nivel estático entre los 7.56 y 6.92 m de profundidad, denotando una recuperación de 0.5 m durante la toma de datos. Es importante la recuperación del pozo debido a la presencia de un pozo de bombeo activo a 7 m de distancia, el cual no demuestra una influencia dentro del nivel del pozo analizado. La variación de temperatura del agua en el pozo demuestra una estabilidad relativa, ya que solo varió aproximadamente 0.1 °C a lo largo de la toma de datos.

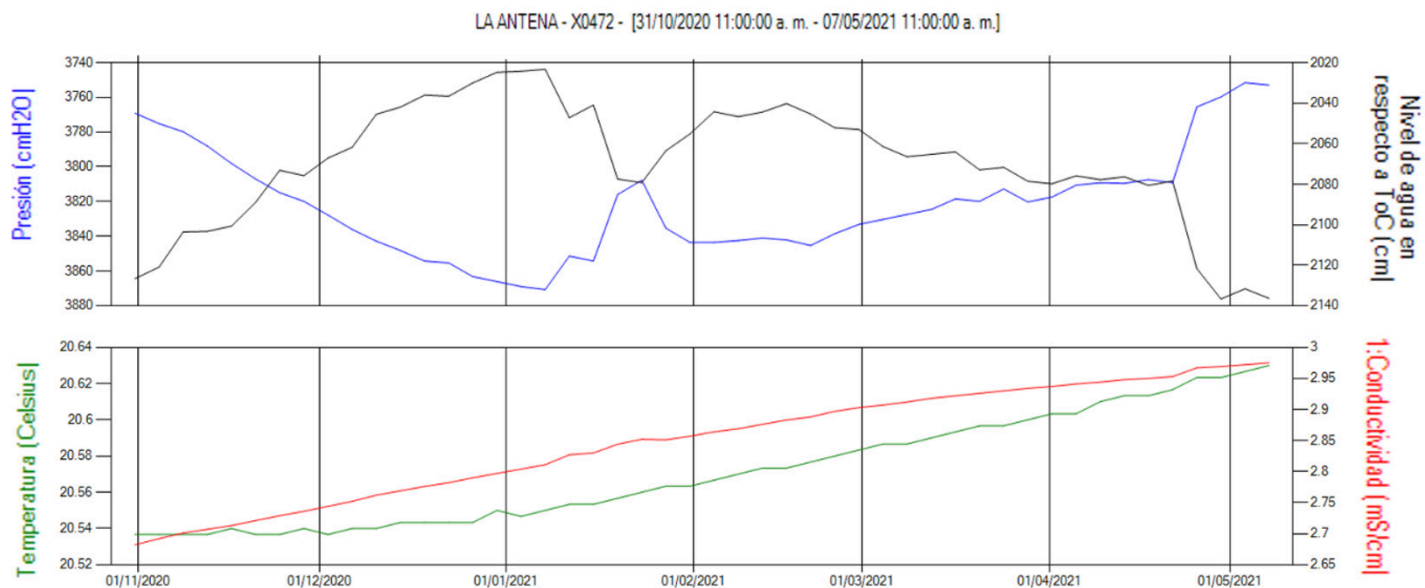


FIGURA 11: Evolución de presión, temperatura, conductividad eléctrica y nivel estático en el pozo La Antena, capturada por piezometría digital de octubre

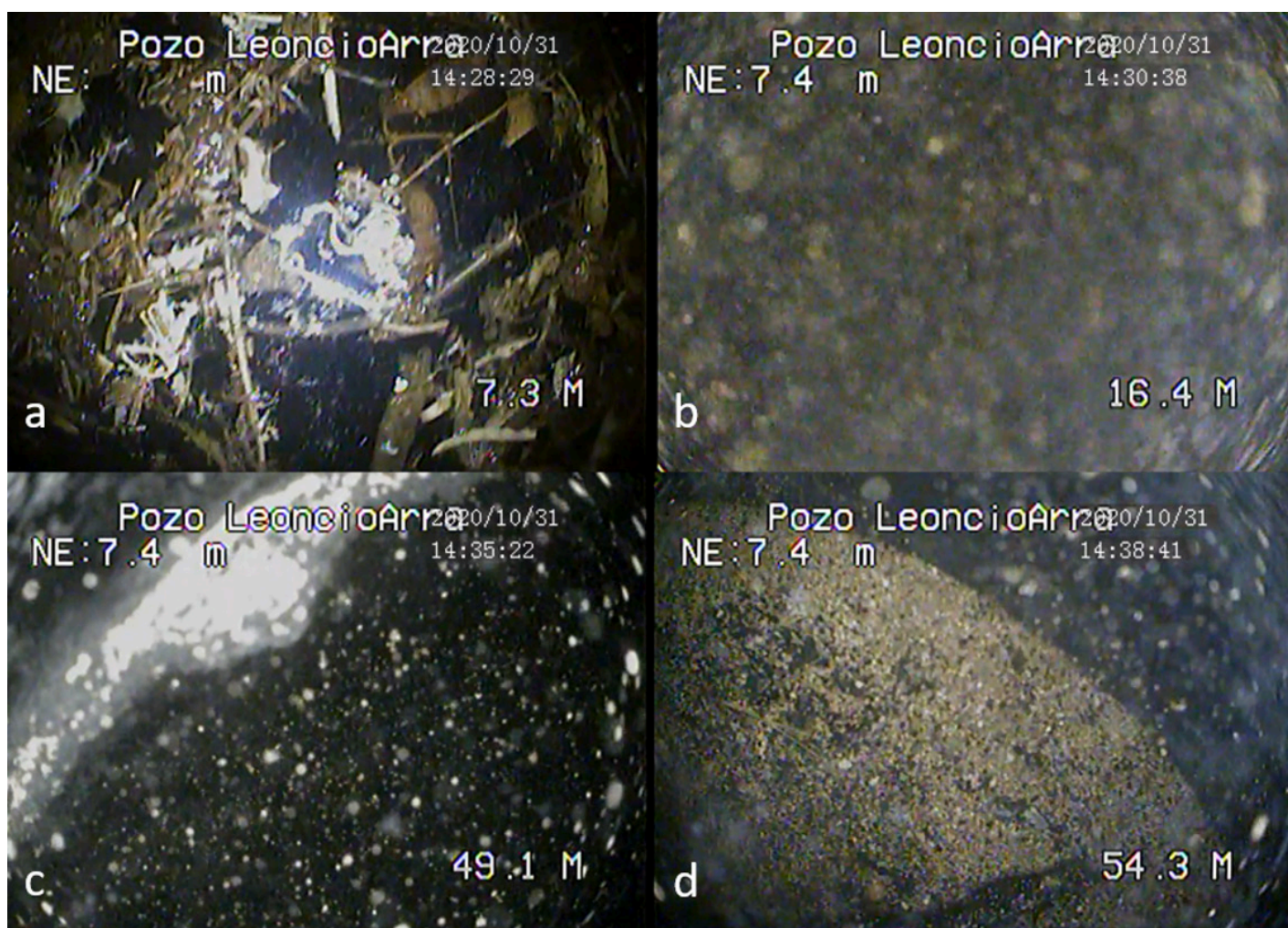


FIGURA 12: Resultados obtenidos a partir de la revisión estructural en el pozo L. Arras, donde se demuestra a) la profundidad del nivel estático; b) y c) una alta turbidez en el agua, así como la presencia de materia orgánica y d) el fondo del pozo de bombeo.

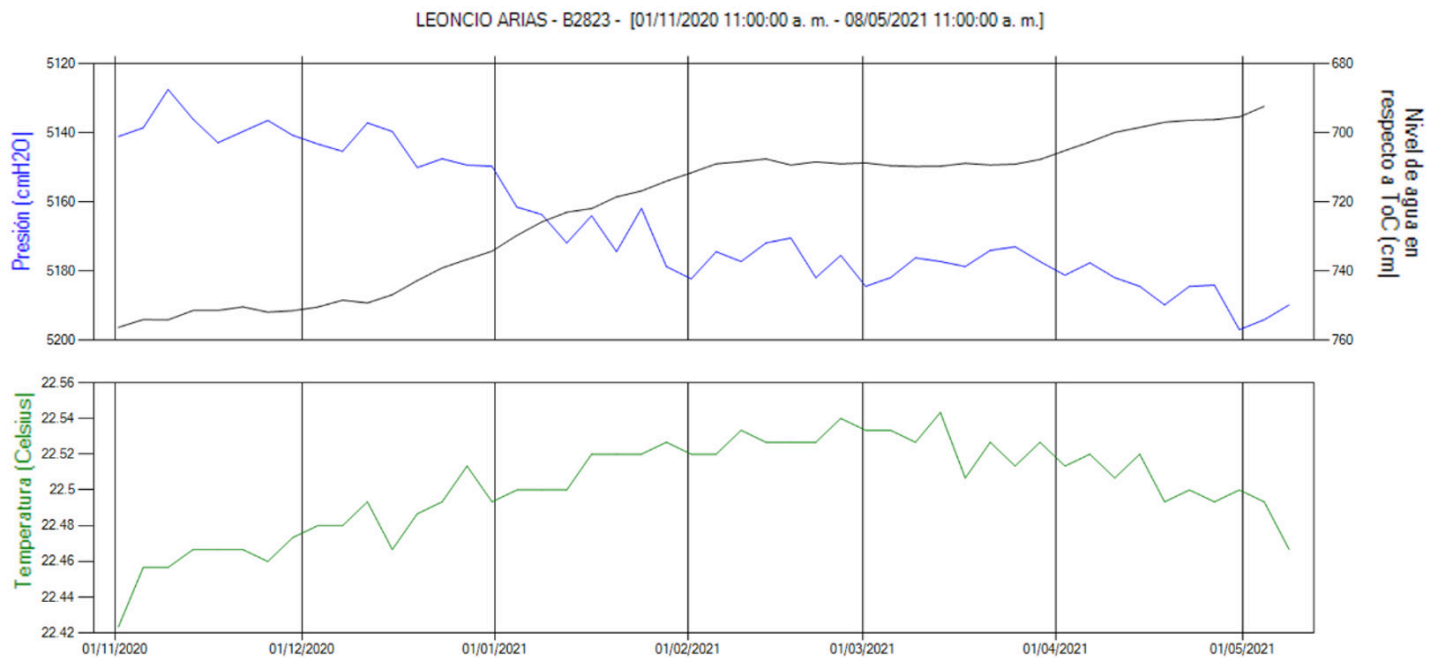


FIGURA 13: Evolución de presión, temperatura y nivel estático en el pozo L. Arras, capturada por piezometría digital de octubre 2020 a mayo 2021.

Conclusiones

El presente estudio documentó la revisión estructural por videocámara y la evolución temporal de los niveles piezométricos del acuífero Palomas-Guadalupe en la cuenca baja del río Casas Grandes a partir de la instalación de piezometría digital y el uso de nuevas tecnologías, demostrando la importancia que estas representan debido a la facilidad de obtención de datos en tiempo real y a la generación de nuevas bases de datos de mayor confiabilidad y con mayor cantidad de información gracias a la programación de los equipos por parte del usuario. Por otra parte, se recalca la posibilidad del estudio constante del comportamiento y reacción de los acuíferos ante el alto estrés hídrico a grandes escalas de tiempo, sin la necesidad de visitar el área de estudio frecuentemente.

Dentro de la revisión estructural por videocámara en los pozos se denotó la importancia del uso de nuevas tecnologías para visualizar las características generales del pozo, recalcando la facilidad de uso del equipo y la alta confiabilidad para la medición de los niveles estáticos. En general, los pozos analizados contaron con una gran cantidad de incrustaciones de sales alrededor de su infraestructura, impidiendo en varios casos el flujo de agua en los estratos inferiores. Además, se observaron distintos cambios en la litología de los pozos, corroborando la complejidad geológica en la zona.

Los datos obtenidos a partir de la instalación de piezometría dieron a conocer la recuperación relativa de los pozos La Antena y L. Arras, con un incremento de 1 y 0.5 m respectivamente, en su nivel con respecto a la toma de datos. Por otra parte, las temperaturas capturadas dentro de los pozos demostraron un ligero incremento entre 0.5-1 °C, coincidiendo con el cambio de temporada. La conductividad eléctrica capturada dentro del pozo La Antena registró un incremento de los 2.68 a los 2.97 mS/cm, revelando la alteración de la calidad química del agua en el pozo, lo cual puede ser influenciado debido al alto estrés hídrico en la zona, así como a la presencia de un pozo en operación constante aledaño. Sin embargo, la gran estabilidad de los niveles estáticos implica que la composición litológica de los pozos influye directamente al no presentar abatimientos considerables, o bien, la cercanía de una falla geológica al pozo.

La metodología incluyó un monitoreo consistente de la evolución temporal de los niveles estáticos dentro de la cuenca, permitiendo analizar el comportamiento del acuífero, así como los abatimientos generados dentro de este. No obstante, dado a la gran extensión del acuífero y al impacto de la composición geológica de la zona, es necesaria la ampliación tanto del monitoreo como de la instalación de piezómetros digitales con el fin de establecer una red de monitoreo continuo dando a conocer la respuesta y prevalencia del acuífero, así como

la generación de bases de datos con mayor relevancia para estudios futuros.

Dado que la agricultura es la actividad económica principal dentro de la cuenca, el uso intensivo del agua subterránea en la zona conlleva al abatimiento de los pozos, la alteración de la calidad química del agua, así como a la pérdida total del nivel dentro de los pozos, afectando directamente a la población. Por lo tanto, el seguimiento del análisis de evolución piezométrica es de suma importancia para la prevalencia del acuífero, que además permite conocer la condición actual y la respuesta ante las condiciones climatológicas extremas del área.

Referencias

- CONAGUA. (2010). El agua en México: cauces y encauces. Tlalpan (Distrito Federal): Academia Mexicana de Ciencias.
- CONAGUA (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero (0812) Palomas-Guadalupe Victoria, Estado de Chihuahua. Diario Oficial de la Federación.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1996). Hidrología Subterránea. Omega.
- Gobierno del Estado de Chihuahua (2019). Plan Estatal Hídrico 2040 del Estado de Chihuahua, Chihuahua.
- Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T. & Núñez-López, D. (2016). Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. El científico frente a la sociedad, Mayo-Agosto, X(2), pp. 58-61.
- INEGI. (2003). Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua.
- Martínez, P. (2010). Piezometría Digital en la Cuenca Baja del Río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua, México (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez).
- Reyes-Cortés, I., Reyes-Cortés, M. & Ruiz Cisneros, H. (2009). Problemática del agua en Chihuahua: Una propuesta. CULCyT, Marzo-Abril, 6(1), pp. 35-41.
- Romero-Gameros, C. (2018). Estudio de la evolución temporal de los niveles piezométricos en el Acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) de la Cuenca Baja del Río Casas Grandes, Ascensión, Chih. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez).
- Salameh, Elias., Abdallat, Ghaida & Van der Valk, Michael. (2019). Planning Considerations of Managed Aquifer Recharge (MAR) Projects in Jordan. *Water*, 11(182), pp. 1-18.
- Servicio Meteorológico Nacional (2010). Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>
- UNESCO. (1992). Agua Subterránea. Medio Ambiente y Desarrollo, pp. 1-16.
- USGS. (2017). Recuperado de: <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>
- VanEssen. (2020). Recuperado de: <https://www.vanessen.com/shop/?category-filter=data-loggers>.
- Well Vu. (2019). Recuperado de: <https://www.wellvu.com/manual-systems>

II

Geopolítica y la colaboración binacional para la sustentabilidad hídrica

Geopolitics and Binational Collaboration for Water Sustainability

II.1 Transboundary Scientific Collaboration in Water Security Research: A Case Study on the U.S.-Mexico Border in the Paso del Norte Region a

Colaboración científica transfronteriza en investigación sobre seguridad hídrica: un estudio de caso sobre la frontera México-Estados Unidos en la región Paso del Norte

Alex Mayer¹, Josiah Heyman¹, Alfredo Granados-Olivas², Deana Pennington¹, William Hargrove¹, Luis A. Garnica Chavira¹, Stanley Mubako³, Sergio Saúl-Solis², Luis Alatorre-Cejudo², Hugo Rojas-Villalobos², Adán Pinales-Munguía⁴

¹University of Texas at El Paso, ²Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ³California State Water Resources Control Board, ⁴Universidad Autónoma de Chihuahua

Abstract

The Rio Grande/Rio Bravo River Basin in the United States (U.S.) and Mexico is one of the most threatened basins in the world (Hoekstra *et al.* 2012). Surface waters are declining due to diminishing snowpack in the headwaters in Colorado in the U.S. (Mote *et al.* 2018) combined with increasing demands for water-intensive crops (Booker *et al.* 2005) and growing urban populations (MacDonald 2010). The region has recently suffered persistent drought; 2000-2018 has been the driest 19-year period since the late 1500s (Williams *et al.* 2020). Climate projections indicate the region will be prone to more frequent and severe droughts, with declining surface water availability (MacDonald 2010; Townsend and Gutzler 2020). In addition, freshwater aquifer levels are declining and saline waters are intruding (Sheng 2013). These changes threaten both U.S. and Mexican regional economies, water and food security, and aquatic biodiversity (Hoekstra *et al.* 2012). While a unified view of the entire basin water system is needed, it is largely missing. In view of these issues, it is imperative that scientists collaborate to better understand the situation and assess plausible paths forward. This requires crossing national and state political boundaries, in addition to integrating knowledge across social, biophysical, economic, and engineering disciplines. Such transboundary-transdisciplinary scientific collaborations are exceedingly complex and challenging

(Cundill *et al.* 2018; Mathieu *et al.* 2019; Steger *et al.* 2021). This article reports on a six-year collaborative scientific research effort, funded by the US Department of Agriculture (USDA), that involved researchers from multiple disciplines from the U.S. and Mexico aimed at improving the sustainability of water resources in the challenging Rio Grande/Rio Bravo Basin.

Resumen

La cuenca del río Grande/río Bravo en Estados Unidos y México es una de las cuencas más amenazadas del mundo (Hoekstra *et al.* 2012). Las aguas superficiales están disminuyendo debido a la disminución de la capa de nieve en las cabeceras de Colorado en los EE. UU. (Mote *et al.* 2018), combinada con la creciente demanda de cultivos intensivos en demanda de agua (Booker *et al.* 2005) y el crecimiento de las poblaciones urbanas (MacDonald 2010). La región ha sufrido recientemente una sequía persistente; 2000-2018 ha sido el periodo de 19 años más seco desde finales del siglo XVI (Williams *et al.* 2020). Las proyecciones climáticas indican que la región será propensa a sequías más frecuentes y severas, con una menor disponibilidad de agua superficial (MacDonald 2010; Townsend y Gutzler 2020). Además, los niveles de los acuíferos de agua dulce están disminuyendo y las aguas salinas se están infiltrando (Sheng 2013). Estos cambios amenazan las economías regionales de Estados Unidos y México, la seguridad hídrica y alimentaria y la biodiversidad acuática (Hoekstra *et al.* 2012). Si bien se necesita una vista unificada de todo el sistema de agua de la cuenca, este líquido falta en gran medida. En vista de estos problemas, es imperativo que los científicos colaboren para comprender mejor la situación y evaluar los caminos plausibles a seguir. Esto requiere cruzar las fronteras políticas nacionales y estatales, además de integrar el conocimiento en las disciplinas sociales, biofísicas, económicas y de ingeniería. Estas colaboraciones científicas transfronterizas y transdisciplinarias son sumamente complejas y desafiantes (Cundill *et al.* 2018; Mathieu *et al.* 2019; Steger *et al.* 2021). Este artículo informa sobre un esfuerzo de investigación científica colaborativa de seis años, financiado por el Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA), que involucró a investigadores de múltiples disciplinas de EE. UU. y México con el objetivo de mejorar la sostenibilidad de los recursos hídricos en la desafiante cuenca río Grande/río Bravo.

Introduction

The Rio Grande/Rio Bravo River Basin in the United States (U.S.) and Mexico is one of the most threatened basins in the world (Hoekstra *et al.* 2012). Surface waters are declining due to diminishing snowpack in the headwaters in Colorado in the U.S. (Mote *et al.* 2018) combined with increasing demands for water-intensive crops (Booker *et al.* 2005) and growing urban populations (MacDonald 2010). The region has recently suffered persistent drought; 2000–2018 has been the driest 19-year period since the late 1500s (Williams *et al.* 2020). Climate projections indicate the region will be prone to more frequent and severe droughts, with declining surface water availability (MacDonald 2010; Townsend and Gutzler 2020). In addition, freshwater aquifer levels are declining and saline waters are intruding (Sheng 2013). These changes threaten both U.S. and Mexican regional economies, water and food security, and aquatic biodiversity (Hoekstra *et al.* 2012). While a unified view of the entire basin water system is needed, it is largely missing.

In view of these issues, it is imperative that scientists collaborate to better understand the situation and assess plausible paths forward. This requires crossing national and state political boundaries, in addition to integrating knowledge across social, biophysical, economic, and engineering disciplines. Such transboundary-transdisciplinary scientific collaborations are exceedingly complex and challenging (Cundill *et al.* 2018; Mathieu *et al.* 2019; Steger *et al.* 2021). This article reports on a six-year collaborative scientific research effort, funded by the US Department of Agriculture (USDA), that involved researchers from multiple disciplines from the U.S. and Mexico aimed at improving the sustainability of water resources in the challenging Rio Grande/Rio Bravo Basin.

Water Supplies and Use in the Transboundary Paso Del Norte

Water management along the border between Mexico and the U.S., and especially at the Paso del Norte

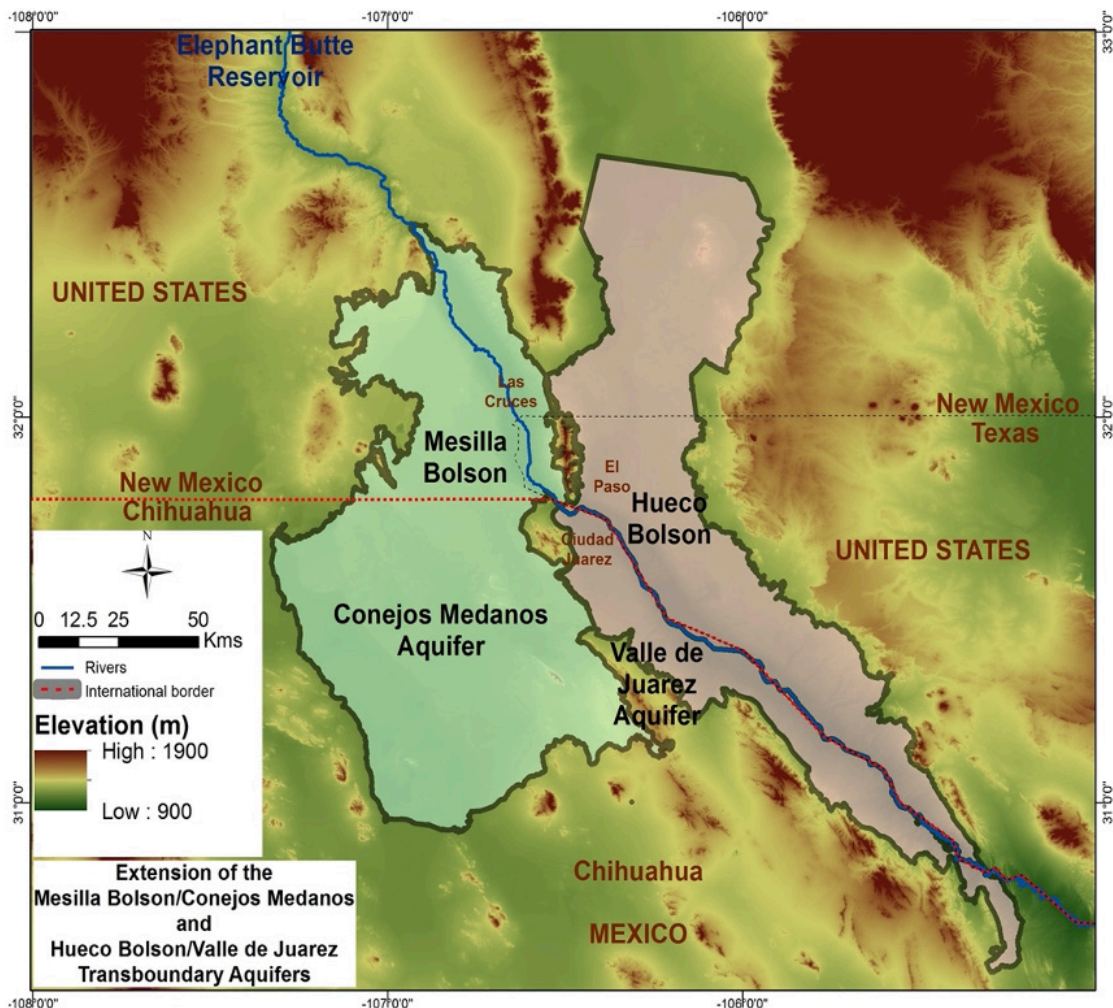


FIGURA 1: Project site map. Inset map indicates location of area along the U.S.-Mexico border.

(PdN) located along the Chihuahua-Texas-New Mexico border (Figure 1), has been a continuous challenge for decision makers within the two countries and internationally. Among the most important users are domestic, industrial, environmental, and most importantly, agricultural demands which interact and compete for limited water resources at regional scales in which a watershed approach has a major importance for sustainable water management.

The research area (see Figure 1) encompasses two large transboundary aquifers (Hueco Bolson/Valle de Juárez and Mesilla Bolson/Conejos Médanos) and the Rio Bravo del Norte/Rio Grande between the states of Texas and New Mexico (U.S.) and the state of Chihuahua (Mexico). Elephant Butte Reservoir stores river water that is delivered in amounts following compacts between Colorado, New Mexico above the reservoir, and Texas-New Mexico-Mexico below the reservoir. The amounts delivered to users depend on snowmelt and rainfall runoff in the headwaters in Colorado and northern New Mexico. When river supplies are reduced in those source areas due to interannual variability and climate change, surface water deliveries are reduced, causing a “river drought.” The international treaty provides a fixed amount to Mexico (74 million cubic meters per year) for farm irrigation (Distrito de Riego 009) except during conditions of extraordinary drought. In this case, the remainder is divided by compact between irrigation districts in New Mexico and Texas (Elephant Butte Irrigation District in New Mexico and El Paso Water Improvement District #1 in Texas).

Surface water is thus strictly measured and allocated by formal institutions. All surface water is dedicated to irrigated agriculture, except for the municipal utility of El Paso (El Paso Water), which acquired agricultural water via leasing agricultural water rights from small landholders. The urban utilities of Ciudad Juárez and Las Cruces derive all their water supplies from groundwater; El Paso Water’s sources are more diversified, but the majority comes either from the two regional aquifers or from the river. In the region as a whole, approximately 75% of water demand is from agriculture and approximately half of all water demand is met from groundwater. When there is *river drought*, or when agricultural demand exceeds surface supplies (increasingly so, due to climate change), agricultural water is obtained conjunctively from groundwater sources.

The Mesilla Bolson/Conejos Médanos and the Hueco Bolson/Valle de Juarez are recognized as

transboundary aquifers but there is no groundwater governance across borders, either between U.S. and Mexico or Texas and New Mexico. Historically, the U.S. side has extracted larger amounts of groundwater compared to Mexico, especially during severe drought years when urban and agriculture groundwater demand increases considerably; however, faster population growth on the Mexico side has shifted the trend over the last 15 years. To cope with increasing demand, increasing levels of groundwater salinity and limited alternative sources of water, El Paso Water has developed long distance importation options, direct potable reuse, and groundwater desalination, whereas Ciudad Juarez has opted to develop infrastructure for inter-basin water transfers from the Conejos Médanos Aquifer. There are no environmental flows in this segment of the river, and the few riparian habitats are irrigated using agricultural surface water rights. Both aquifers are considered to be overexploited under current conditions and expected agricultural demand increase (increase in water-intensive pecans) and population growth (30% projected for 20 years) has put aquifer sustainability at serious risk as a major water source and the main variability buffer within the overall regional conjunctive use system.

Transboundary Water Research Challenges

For the transboundary hydrological region, it is not only important to understand and calculate real time availability of water resources but also to be able to predict future availability given the stressors of population growth and climate change. Both efforts require substantial investments in data collection and modeling of water availability in space and time. Nonetheless, data at the border between Mexico and the U.S. sometimes are limited, are not harmonized and are lacking quality control standards. Where data are available, scales, definitions, classifications, units, language, and other parameters are not necessarily the same across the border, making it difficult to compare and use the data. This lack of comparable data on both sides of the border leads to what is known as the “white map” syndrome in which maps at the border are blank on one side or another as if nothing existed on the other side of the border (Figure 2). This lack of a unified, binational geodatabase generates uncertainty for decision making on a transboundary scale (both, between states in each country and internationally).

Nation-states, or in some cases, subnational units (states, etc.) typically establish the main legal and institutional frameworks for water extraction and use. This tends to shape science in a pattern termed “methodological nationalism,” which is the tendency to take human political units as the units of data collection, presentation, and analysis (Jeffrey and Schakel 2013, Moore *et al.* 2018). For example, Mexican data and planning documents come from Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Texas from the Texas Water Development Board (TWDB), and New Mexico from the Office of the State Engineer (NMOSE). None of their documents reference groundwater data from the other jurisdictions, (white map syndrome). Conceptualizations (models, data sets) limited by methodological nationalism fail to capture fundamental dynamics. In the case described here, both major aquifers (Hueco Bolson/Valle de Juárez aquifer; Mesilla Bolson/Conejos Médanos aquifer) are divided by the international border, and within the United States, the Mesilla is divided between Texas and New Mexico. Yet within these aquifers, water moves freely across these jurisdictions.

While the river is visible and its relevant parameters more easily and better measured than the groundwater due to being governed by treaties and interstate compact, this level of understanding is not sufficient to understand water supply and demand dynamics and futures. So-called hydroschizophrenia (Llamas and Martínez-Santos 2005) is the scientific and policy absolute separation between surface and subsurface water. In fact, surface and subsurface water are connected hydrologically by discharge and recharge and anthropogenically by conjunctive water use. One cannot understand the regional water system, including the two transboundary aquifers, by isolating the river, as in existing practice; our goal is an integrated basin water understanding that overcomes methodological nationalism and hydroschizophrenia.

Other barriers to comprehending transboundary waters are simpler to characterize, but no less obstructive. These include use of metric versus English units (for example, scientists habitually think in millions of cubic meters or acre-feet to measure water volume), many other data classification and representation disparities (an example being Mexico and the U.S. using different soil classifications), and simply the use of Spanish versus English. Not all scientists have visas to cross the border, and not all scientists and stakeholders are allowed to or want to cross the border. Even waiting

in line to return to the U.S. is a non-trivial source of division. Professional relationships exist between U.S. scientists and Mexican scientists, who have known each other for years, and respect each other, but of course, the broader context of relations between the two nations is strained by a number of issues related to safety, politics, and historical tensions of various kinds.

While water agencies have rules to apply and roles to play in a transboundary scenario such as the one at the PdN region, such regulations have a long history of binational collaboration, there are still important issues to resolve, inland and internationally, to generate trust and to ease a holistic collaboration environment. For example, in Mexico, even though water issues are ruled by a single law (Ley de Aguas Nacionales - <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan.htm>), stakeholders, mostly from the agriculture sector, have a skewed understanding in which water is their own “property.” However, the law establishes that water users have “concessions” that have a limited time of application (generally, ten years or more) and, after this time, they have to update their status every time the concession ends.

Recent disputes in the Rio Bravo/Rio Grande basin occurred in the Delicias Irrigation District 005, which is irrigated by one of the most important dams controlling surface water in Chihuahua, the La Boquilla Dam. The dam was the site of serious conflicts between parties (federal government, state government of Chihuahua and farmers) where local farmers organized and protested against opening the gates of the dam to comply with Cycle 35 of the 1944 International Water Treaty between Mexico and the U.S. This action brought a tense scenario between both countries, which was resolved by their diplomatic water institutions (CILA-IBWC), while using available water from storage volumes at the international dams located along the main stem of the Rio Bravo/Rio Grande, the Amistad and Falcon Dams. Critical and dangerous diplomatic events such as the La Boquilla Dam incident should be prevented in the near future; however, drought and other expected climate change events might stress water demands at the region, putting at risk any effort to comply with international agreements or even to satisfy water demands for different users in the watershed level.

One area of opportunity to ease challenges the binational region face regarding sustainable water management is the one offered by the philosophical approach of making science-based decisions before any other political interest; that is, to have a scientific

understanding about the issues before making any decisions that could affect a political controversy. Scientific cooperation is relevant in a transboundary environment (both local and internationally); therefore, universities and research centers/agencies should have on their agendas a priority in regard to water governance issues since challenging scenarios in which water is becoming critical for human sustainable development will become relevant in the near future.

Our binational group began with and reinforced mutual trust necessary to develop shared scientific and policy understandings across the border. We worked on addressing relevant issues with regard to agriculture in a transboundary watershed with challenges to water availability for irrigated agriculture and other users. This project developed a holistic approach towards data exchange and modeling of both surface and groundwater in which diverse stakeholders played a major role in in addressing challenging questions from a binational perspective.

Modes of Collaboration

Project Management

In addition to the data challenges to international collaboration described earlier, historically there have been administrative and logistical challenges to full collaboration of Mexican institutions and scientists within U.S. institutions and scientists in U.S.-funded research projects. Many federal agencies have not always allowed subcontracting directly with Mexican institutions as full partners in research. As a result, Mexican scientists have often participated in U.S.-funded research projects as consultants or as individuals, rather than through their institution. We sought to “break new ground” by getting agreement from the USDA to subcontract with UACJ as a full partner. As a result, the Mexican scientists participated as full and equal partners in our project.

We also sought to make our work truly interdisciplinary from the beginning of the project, in deciding the tasks, performing the tasks, interpreting the results, and publishing the results. To support this goal, we organized and maintained interdisciplinary working groups to address different modeling tasks. They included: a) developing, testing, and implementing a hydroeconomic optimization model (the Bucket Model); b) testing, validating, and implementing a geospatially specific simulation model that could be used at a field scale or larger (SWATmf); c) models to

simulate salt fate and transport/salinization at the field scale; d) remote sensing approaches to land transition/land use change; e) climate projection formulation coupled with hydrologic models to evaluate climate scenarios; and f) an online user interface modeling system (SWIM). Participation in these teams included engineers, hydrologists, economists, social scientists, computer scientists, agronomists, climate scientists, and geographers. To facilitate team sharing, a project web portal was developed and is available at <https://water.cybershare.utep.edu>. Teams met in person on an as needed basis, generally two to three times per year. Affiliated students were also invited to team meetings. This approach resulted in fewer “siloes” projects and greater interdisciplinary integration across the project as a whole.

The Mexican team included several water experts from both UACJ and UACH (two of the most important state universities in Chihuahua). Individual team members were assigned special tasks according to their specialty. Experts were integrated into research topics related to geospatial analysis (RS-GIS), meteorology, soils, groundwater modeling, surface water modeling, computer sciences, and other earth sciences related areas. For each group leader, undergraduate and graduate students were assigned to help during the process. The integration of students into the project had two very important objectives consistent with the USDA grant requirements. First, students received research training and experience in data gathering/management and the QA/QC process for data management; and second, as one of the main objectives of the project, students were assigned to faculty mentors in order to prepare the “next generation” of hydro-scientists that could soon tackle future risks in water management and watershed sustainability. Students were assigned different modeling tasks while being supervised by their faculty mentor. Several of these graduate and undergraduate students also took advantage of being exposed to this binational research project and developed their own research topics for their theses, related to water issues within the main objectives of the project.

The online presence of the project was put forward as a single project website available in both English and Spanish (<https://water.cybershare.utep.edu>). The site provides public access to information regarding products and findings of the binational effort. Other online products such as regional interactive maps and online modeling tools required close collaboration between data collectors, GIS experts, scientific

modelers, computer scientists and software engineers. Additionally, an online project workspace was created to facilitate private sharing of data and files among all registered project members. The resources that can be uploaded can come in the form of files or website hyperlinks with metadata annotations. Each set of resources is referenced in the system as a collection. All members of the binational team get automated email notifications every time a new collection is added.

Spatial Data

A major role for the development of the project was to acquire spatial data to support hydrologic modeling efforts and studies of current and historical land use-land cover (LULC). While most of the spatial data for the U.S. is relatively straightforward to obtain from federal and state agency websites, the process of obtaining data from Mexican agencies involves making official requests. Letters of understanding were distributed among the water agencies in Mexico, to access groundwater well data (location, yields, well design, depth, uses, quality), as well as data for surface water. Additionally, data was also accessed throughout web pages from the different water agencies (i.e., CONAGUA-REPDA for agricultural groundwater data and IBWC/CILA for irrigation surface water). Groundwater for urban uses was acquired from the JCAS-JMAS data and was accessed throughout different means (official letters or personal communications with key personnel responsible for data management at these agencies). QA/QC checks were performed in order to prevent duplication of data and to ensure that the data sets were complete.

The PdN is a transboundary typical region that is not completely represented in single nation spatial data (Mubako *et al.*, 2018). At the watershed scale, it has been demonstrated that land use and land cover change (LULC) change is one of the dominant driving factors of hydrological change that can lead to decrease of water yield and the increase of soil water content (Hu *et al.*, 2021). The study by Mubako *et al.* (2018) sought to quantify long-term land use change in the PdN region to inform water resource research and public policy using the popular National Land Cover Database (NLCD) produced by the Multi-Resolution Land Characteristics (MRLC) consortium (MRLC, Online). This is the main source of comprehensive and consistent land-cover data in the United States, but as demonstrated in Figure 2, it stops at the U.S.-Mexico border, consistent with the “white map” syndrome

mentioned earlier in this paper. Yet, the enhanced main Landsat 8 imagery of the El Paso-Ciudad Juárez metro region on the right of Figure 2 clearly shows that different land cover types do not respect the U.S.-Mexico national border: green agricultural ecosystems appear seamless. The NLCD land cover products are readily available for download and mapping for the years 2001, 2003, 2006, 2008, 2011, 2013 and 2016, at 30 m spatial resolution. Eight LULC categories were selected to evaluate and harmonize between the two countries the spatial distribution classification definitions at the study area where the scrubland category was the largest, followed in descending order by grassland, forest, bare soil, urban, agriculture, wetlands, and water bodies.

An alternative LULC dataset to partly overcome the “white map” challenge for such a transboundary region is the annual European Space Agency Copernicus Climate Change Service (ESA CCCS, 2020) LULC classification gridded maps. This dataset has a long record of successive and consistent annual time series maps using 37 land cover classes from 1992 to 2019, based on the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) Land Cover Classification System (Di Gregorio and Jansen, 2005). However, a major drawback of the ESA dataset is the much coarser spatial resolution of 300 m (lower left in Figure 2), compared to the finer spatial resolution of 30 m for the USGS NLCD that is only available for one riparian country (upper left in Figure 2).

To deal with these discrepancies emanating from differences between the spatial data products, project team members working on either side of the border resolved to download, process and classify the 30m spatial resolution Landsat images from the U.S. Geological Survey for LULC work. This decision however did not provide total immunity from LULC classification uncertainty- different graduate student teams working on the project from either side of the border classified Landsat data using different software such as ERDAS Imagine and ArcGIS Desktop, depending on which software was accessible in their geospatial labs, and their level of proficiency with LULC classification algorithms.

Hydrologic Models

Hydrologic models were a critical part of the project. These models provided for interpretation of historical and current surface and groundwater dynamics; predictions of the impacts of climate and

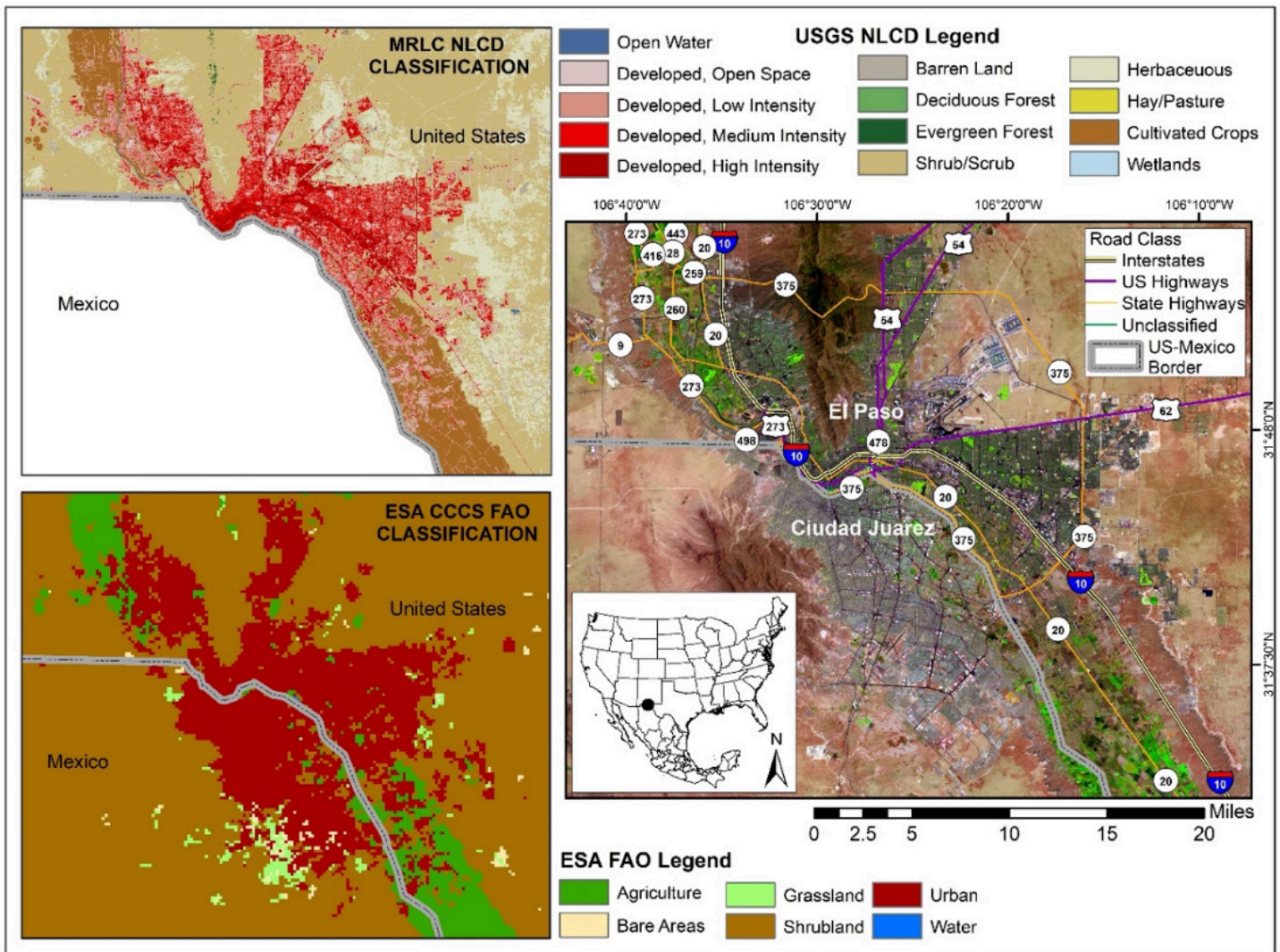


FIGURA 2: Land cover classification at the border using MRLC NLCD and ESA CCCS data.

water demand changes; and a common platform for exploring stakeholder concerns with regard to future water availability. Hydrologic model development steps included defining model requirements; model conceptualization; and collection of data for model inputs, calibration, and validation. These steps were completed through individual and group proposals and discussion at regular project meetings so that models were developed and implemented under an incremental approach.

We worked with a unified, basin scale modeling approach that overcame typical barriers. Two aggregate, coarse scale models, the water budget and hydroeconomic models are fully transboundary, entailing data sharing and cooperation between scientists of the two sides. These models also contain dynamic hydrological and anthropogenic linkages between surface and subsurface water and are integrated across three sectors, agriculture,

urban, and environmental services. The models calculate various aspects of future water resources based on various climate, policy, management, and technology scenarios.

The unified modeling also included several large-scale distributed models, one for the Mesilla Bolson/Conejos Médanos and the other for the Hueco Bolson/Valle de Juárez aquifer. These models addressed the impact of agricultural cultivation practices on groundwater, again requiring collaboration between Mexican and U.S. scholars. For the specifics on surface water modeling, the Soil, Water Assessment Tool (SWAT) surface water modeling package and MODFLOW groundwater modeling package and were used for both Mexico and the U.S. areas.

The two aggregate models are available under a unified web-based platform referenced as SWIM (Sustainable Water through Integrated Modeling).

The interface enables the creation, execution, and result visualization of customized modeling scenarios with either of the two models. The SWIM platform was developed in collaboration with a computer scientist and a software engineer, both bilingual Mexican Nationals. Hence, the interface is available in Spanish and English, and in Metric and English units. Considerable collaborative effort was required to generate labels for the interface that were accurate scientifically and would be meaningful to users in either country. These were extensively tested through usability workshops in both countries, and in presentations in both languages. Although the original models and SWIM platform were developed in English, to date the majority of users have been in Mexico using the Spanish/metric version. More on SWIM and its development process can be found in this book in the chapter by Garnica *et al.* and in Vargas-Acosta *et al.* (2018).

Stakeholder Interactions

A notable feature of the project was stakeholder consultations that included participants from both countries and were held on both sides of the border. At the beginning of the project, major decisions were made about activities by triangulating stakeholder interests and scientist judgments. Importantly, these included two large stakeholder meetings in Mexico, one with the agricultural sector and one with the urban, municipal, and industrial sector. Both were well attended, with over twenty diverse participants in each, and opinions were expressed honestly and freely. Detailed transcripts were taken and coded for main themes.

Likewise, a regional economic stakeholder meeting was held at the beginning of the project, with participation from both sides of the border at one meeting, notably the maquiladora sector (held in the United States). We found out that most maquiladoras do not use much water, or must further purify it, but their vast workforce uses the municipal water supply of Ciudad Juárez, which is at stake in regional water futures. Then, in the course of the project, we held four information/question sessions in Juárez, with very engaged participation. Interest in water futures in Mexico was substantial and offers a promising base on which to build towards the future.

Mexican stakeholders were selected based on their leadership on water issues and accordingly with their community influence. Such participants included officials responsible for water issues such as personnel

from the JCAS, JMAS, CONAGUA (Irrigation District 009 Valle de Juárez), IBWC/CILA, among others. Furthermore, throughout all the process on the project (2015–2020), continuous collaboration in-between project coordinators (universities) and the water agencies grew towards a more trusting environment in which several workshops were developed and a more detailed understanding about the project outcomes were explained giving a thorough understanding about the goals of the project. Additionally, representatives from the social sector (i.e., NGO's) were also included on the stakeholder meetings having a very intense and democratic participation in which participants felt the empowerment about the main concerns they had about water issues from their own perspective, which were taken into consideration to develop the ongoing modeling process.

One important exercise was the simulated diplomatic endeavor taken while addressing groundwater management from a binational perspective. The approach of “serious games” was to have a broad spectrum of selected stakeholders to participate in the workshop. The main idea was to allow all participants to have relevant input towards a binational agreement on holistic groundwater management to extend the life of fresh water in the Hueco Bolson/Valle Juárez and Conejos-Médanos/Mesilla aquifers, which are shared by both nations in the PdN region. The results of this interesting approach to reach a simulated understanding regarding water management showed that under an informal setting, stakeholders (including representatives of the water agencies) reached a common ground in which they agreed that stress on the available groundwater resources in the region was increasing and that the security of future freshwater resources was doubtful. Furthermore, they acknowledged that a “business-as-usual” approach to water uses was not sustainable for the region and that the binational approach should be taken into action on mitigating and addressing the issue of over pumping the fresh water from the binational aquifers. They also agreed on the main idea that a continuous collaboration at the border regions should be a priority between the two nations while evaluating the potential for complementary freshwater resources for the region, while considering different water technologies and different approaches to enhance water management at the region. They concluded that this could only be done by a joint collaboration between both regions at the transboundary watershed.

Discussion

Collaboration between institutions was one of the main factors that helped in achieving a successful project. The integration of different expertise of binational pairs was key for covering a wide spectrum of topics accordingly with the established objectives on the project. In addition to digital geodatabase exchange and statistical information on water issues from both sides of the border, the project developed a solid binational collaboration between colleagues, which helped on consolidating ongoing efforts to strengthen the holistic approach to pursue a sustainable binational watershed. Some of the most important outcomes related to student participation in annual binational symposiums throughout all years of the project (2015-2020), where student from both nations had the opportunity to present their research findings and have an exchange of experiences. Additionally, several peer review papers were published by colleagues and students while the project was developing which gave the participants the opportunity to expand their productivity and the chance to interact with other collaborators (Alger *et al.*, 2020; Hargrove *et al.*, 2020; Sotos Ontiveros *et al.*, 2019; Granados *et al.*, 2019). Project publications are listed at <https://water.cybershare.utep.edu/publications/es?type=prarticle>.

Studies of transboundary/transdisciplinary science teams have identified key elements that lead to successful collaborative projects. Among others, these include assessing the context and history surrounding the problem; identifying concerns of the different groups involved; and co-designing and co-producing research goals (Steger *et al.* 2021). Activities that focus on learning each other's perspectives are critical throughout the project, but especially early as the research is defined (Pennington 2011; Pennington *et al.* 2021). Our binational group engaged extensively in these forms of interactions. Beyond the collaborative work itself, Cundill *et al.* (2018) found that outcomes are strongly influenced by relational elements such as interpersonal trust and mutual respect. The group discussed multiple times how fortunate we were to have assembled such a friendly, respectful, and pleasant team to work with. Lastly, leadership is critical in participatory modeling projects (Hämäläinen *et al.* 2020), but leadership needs to be less top-down and more collective with individuals from multiple organizations and sectors leading various efforts (Care *et al.* 2021). Although overall project leaders were well defined, individuals

within subgroups led and managed their own efforts. This approach enabled the team to have a great deal of flexibility and adaptability, long known to be key to team science (Stokols *et al.* 2008).

During development of the project, shared leadership and joint planning were necessary to maintain sustained engagement of all participants and steady progress on tasks, leading to our success. Frequent communications were also very relevant to our success due to the complex nature of the project. Another important accomplishment that worked for our project was the stakeholder invitees that attended our meetings and events. Their role was outstanding since they collaborated openly and participated on our training workshops during the project development. They also made an important contribution while "calibrating" our inputs into the modeling process since most of them knew their territories and gave us a real sense of the turf where the study was designed. Some of the most important contributions made on the Mexican side of the project was the administration process and management control of the treaty surface water that are delivered every year to Mexico accordingly with the 1906 international water treaty. They explained how the system runs and the allotments they were entitled to accordingly with their own irrigation calendars which were mostly controlled by the Mexican water agency CONAGUA for the irrigation district 009 Valle de Juarez.

One important area of opportunity for future endeavors in this type of research project is to educate stakeholders using simplified information from scientific models that can show important results, which can correlate to real life hydrologic events such as groundwater evolution, flood risk analysis, or even a real time map with evolution of ETP and its corresponding crop. Furthermore, our project worked on a hands-on workshop under the SWIM platform that showed stakeholders the evolution of water availability accordingly with water management policies. This exercise demonstrated how the participants used water data available from the model while applying known scenarios and using their own interpretation based on their own reality. This exercise could be improved as more contextual metadata is loaded on the platform and users share more information as inputs SWIM.

Conclusions

We were successful in integrating a binational research team of experts to address a shared goal of achieving water security in the PdN transboundary region. We developed and applied transboundary databases and simulation models. These assets were shared with stakeholders on both sides of the border. Our success can be explained by taking an approach, from the beginning of the project that emphasized equal value in scientific contributions and recognized equal validity in water challenges on both sides of the border. Our interactions not only enhanced our technical understanding of water security issues, but also opened our minds on how to overcome the potential for mistrust between the two nations, given current and historical conflicts over water in the region and the temptations to slide into methodological nationalism. The PdN, and more broadly, the U.S.-Mexico border region, is an important test case for hydrodiplomacy, defined as science diplomacy applied to transboundary waters (Wilder *et al.*, 2019).

In the future, there are several potential obstacles could obstruct U.S.-Mexico hydrodiplomacy, including the physical challenges posed by climate change and variability, but also sociopolitical challenges such as uneven economic development, rapid population growth, and confrontational rhetoric and policies (Wilder *et al.*, 2019). We need to move beyond knowledge exchange among scientists, who can step away from conventional institutions due to their protected role in universities. We need regular exchanges (forums) with diverse stakeholders, supported by scientists; and these forums need to bring people together across the two nations. Achieving sustainable water resource management of transboundary waters will only result from binational cooperation at every level: scientific, governmental, educational, and societal. As we move forward in the 21st century, one in which the availability of adequate water resources is certain to be severely constrained, we need to accept this challenge of binational cooperation in serious and innovative ways.

Acknowledgements

This material is based upon work supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

References

- Alger, J., Mayer, A., Kumar, S., Granados-Olivas, A. (2020). Urban evaporative consumptive use for water-scarce cities in the United States and Mexico. *AWWA Water Science*, 2(5), <https://doi.org/10.1002/aws2.1185>.
- Booker, J. F., Michelsen, A. M., and Ward, F. A. (2005). Economic impact of alternative policy responses to prolonged and severe drought in the Rio Grande Basin. *Water Resources Research*, 41(2). <https://doi.org/10.1029/2004WR003486>
- Care, O., Bernstein, M. J., Chapman, M., Diaz Reviriego, I., Dressler, G., Felipe-Lucia, M. R., Friis, C., Graham, S., Hänke, H., Haider, L. J., Hernández-Morcillo, M., Hoffmann, H., Kernecker, M., Nicol, P., Piñeiro, C., Pitt, H., Schill, C., Seufert, V., Shu, K., ... Zaehring, J. G. (2021). Creating leadership collectives for sustainability transformations. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00909-y>
- Cundill, G., Harvey, B., Tebboth, M., Cochrane, L., Currie-Alder, B., Vincent, K., Lawn, J., Nicholls, Robert. J., Scodanibbio, L., Prakash, A., New, M., Wester, P., Leone, M., Morchain, D., Ludi, E., DeMaria-Kinney, J., Khan, A., & Landry, M.-E. (2018). Large-Scale Transdisciplinary Collaboration for Adaptation Research: Challenges and Insights. *Global Challenges*, 1700132. <https://doi.org/10.1002/gch2.201700132>
- ESA CCCS (2020). Product User Guide and Specification ICDR Land Cover 2016 to 2019. Available online: https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-land-cover/D3.3.12-v1.3_PUGS_ICDR_LC_v2.1.x_PRODUCTS_v1.3.pdf (accessed on 28 May 2021).
- Granados Olivas, A., Alatorre Cejudo, L.A., Heyman, J.M., Soto Ontiveros, A., Pinales Munguia, A., Saul Solis, S., Rojas Villalobos, H.L., Vázquez Galvez, A., Torres Olave, M.E., Bravo Peña, L.C., Ibañez, O., Hargrove, W.L., Mayer, A., Sheng, Z. (2019). Las oportunidades para la sustentabilidad hídrica en las Cuencas de Chihuahua: Estrategias para compensar las demandas socioeconómicas y ambientales ante los retos del cambio climático (Agua-Energía-Alimentación). Book chapter in: "Problemáticas del agua y medidas sustentables en dos estados desérticos de México: Chihuahua y Sonora". Sección: A) Identificación y descripción de problemáticas sociales, ambientales y/o económicas relacionadas al agua. El Colegio de Chihuahua y El Instituto Tecnológico de Sonora, Primera Versión Digital 2019. ISBN: 978-607-609-205-7
- Di Gregorio, A.D., and Jansen, L.J.M. (2005). Land cover classification system: classification concepts and user manual. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Hämäläinen, R. P., Miliszewska, I., & Voinov, A. (2020).

- Leadership in participatory modelling – Is there a need for it? *Environmental Modelling & Software*, 133, 104834. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104834>
- Hargrove, W.L., Z. Sheng, A. Granados, J.M. Heyman, S.T. Mubako, (2020). Impacts of Urbanization and Intensification of Agriculture on Transboundary Aquifers: A Case Study. *Journal of the American Water Resources Association*. American Water Resources Association Volume 56, Issue 5, October 2020. Online ISSN:1752-1688. Pag 1-16; doi.org/10.1111/1752-1688.12889, URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/toc/17521688/2020/56/5>.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE*, 7(2), e32688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032688>
- Hu, J., Wu, Y., Wang, L., Sun, P., Zhao, F., Jin, Z. and Lian, Y. (2021). Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 593, 125741.
- Jeffery, C., and Schakel, A.H. (2013) Insights: methods and data beyond methodological nationalism, *Regional Studies*, 47(3): 402-404.
- Llamas, MR., and Martínez-Santos, P. (2005). Intensive groundwater use: Silent revolution and potential source of social conflicts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5): 337–341.
- MacDonald, G. M. (2010). Water, climate change, and sustainability in the southwest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21256–21262. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909651107>
- Mathieu, J. E., Gallagher, P. T., Domingo, M. A., and Klock, E. A. (2019). Embracing complexity: Reviewing the past decade of team effectiveness research. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior*, 6(1), 17–46. <https://doi.org/10.1146/annurev-orgpsych-012218-015106>
- Moore S.A., Rosenfeld H., Nost E., Vincent K, and Roth R.E. 2018. Undermining methodological nationalism: Cosmopolitan analysis and visualization of the North American hazardous waste trade. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 20(8):1558-1579.
- Mote, P. W., Li, S., Lettenmaier, D. P., Xiao, M., and Engel, R. (2018). Dramatic declines in snowpack in the western U.S.. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
- Mubako, S., Belhaj, O., Heyman, J., Hargrove, W., & Reyes, C. (2018). Monitoring of land use/land-cover changes in the arid transboundary middle Rio grande basin using remote sensing. *Remote Sensing*, 10(12), 2005. Multi-Resolution Land Characteristics (MRLC) Consortium. Available online: <https://www.mrlc.gov/> (accessed on 28 May 2021).
- Pennington, D. D. (2011). Collaborative, cross-disciplinary learning and co-emergent innovation in informatics teams. *International Journal of Earth System Informatics*, 4(2), 55–68. URL: <http://www.springerlink.com/content/81156061q1754t00/>
- Pennington, D., Vincent, S., Gosselin, D., and Thompson, K. (2021). Learning across disciplines in socio-environmental problem solving. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 3, 17894. <https://doi.org/10.18174/sesmo.2021a17895>
- Sheng, Z. (2013). Impacts of groundwater pumping and climate variability on groundwater availability in the Rio Grande Basin. *Ecosphere*, 4(1), art5. <https://doi.org/10.1890/ES12-00270.1>
- Soto Ontiveros, A., Granados Olivas, A., Pinales Munguia, A., Saul Solis, A. Heyman, J.M. (2018). Evolución temporal del flujo del agua subterránea en ciudad Juárez, chihuahua aplicando modelación geoespacial. *Tecnociencia Chihuahua*, 12(2): 103-113. DOI: <http://tecnociencia.uach.mx/v10n1.php>
- Steger, C., Klein, J. A., Reid, R. S., Lavorel, S., Tucker, C., Hopping, K. A., Marchant, R., Teel, T., Cuni-Sanchez, A., Dorji, T., Greenwood, G., Huber, R., Kassam, K.-A., Kreuer, D., Nolin, A., Russell, A., Sharp, J. L., Šmid Hribar, M., Thorn, J. P. R., Waiswa, D. (2021). Science with society: Evidence-based guidance for best practices in environmental transdisciplinary work. *Global Environmental Change*, 68, 102240. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102240>
- Stokols, D., Misra, S., Moser, R. P., Hall, K. L., & Taylor, B. K. (2008). The ecology of team science: Understanding contextual influences on transdisciplinary collaboration. *American Journal of Preventative Medicine*, 35(2S), S96–S115. URL
- Townsend, N. T., & Gutzler, D. S. (2020). Adaptation of climate model projections of streamflow to account for upstream anthropogenic impairments. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(4), 586–598. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12851>
- U.S. Geological Survey. USGS Global Visualization Viewer (GloVis). Available online: <https://www.usgs.gov/software/usgs-global-visualization-viewer-glovis> (accessed on 25 May 2021).
- Vargas-Acosta, R. A., Chavira, L. G., Villanueva-Rosales, N., and Pennington, D. (2018). Towards SWIM narratives for sustainable water management. *Proceedings of the Second Workshop on Enabling Open Semantic Science Co-Located with 17th International Semantic Web Conference*, 2184, 8.
- Wilder, M.O., Varady, R.G., Mumme, S.P., Gerlak, A.K., Pablos, N.P. and Scott, C.A. (2019). US–Mexico

Hydrodiplomacy: Foundations, Change, and Future Challenges. *Science & Diplomacy*, <http://www.sciencediplomacy.org>.

Williams, A. P., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Abatzoglou, J. T., Bolles, K., Baek, S. H., Badger, A. M., & Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, 368(6488), 314–318. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9600>

II.2 Gobernanza en la cuenca transfronteriza del río Bravo y el tratado de 1944. Análisis de la situación en el río Conchos: datos, hidrometría y estrategias

Governance in the transboundary watershed of the Rio Grande and the 1944 Treaty. Analysis of the situation in the Conchos River: data, hydrometry and strategies

Alfredo Granados-Olivas¹, Alex Mayer², Luis Carlos Alatorre-Cejudo¹, Josiah Heyman², William Hargrove², Adán Pinales-Munguía³, Sergio Saúl-Solis¹, Maryam Samimi⁴, Ari Mirchi⁴, Sora Ahn⁵, Zhuping Sheng⁵, Zohrab Samani⁶, Luis A. Garnica Chavira², Hugo Rojas-Villalobos¹, Adrián Vázquez-Gálvez¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ²University of Texas at El Paso, ³Universidad Autónoma de Chihuahua, ⁴Oklahoma State University, ⁵Texas A&M University, ⁶New Mexico State University

Resumen

La gobernanza del agua en cuencas transfronterizas siempre ha sido un reto para los tomadores de decisiones y los gobiernos responsables en administrar los recursos naturales existentes en estas. El caso particular que nos ocupa en este reporte se centra en la revisión de la situación que prevaleció en 2020 con el conflicto de la disponibilidad de agua en las presas del estado de Chihuahua, su administración, las condiciones climáticas en la región, y el problema de la gobernanza del agua en la cuenca del río Conchos. Este análisis se sustenta en la información oficial de diversas fuentes, seleccionadas con el tema de la solución de los desacuerdos existentes entre los diferentes usuarios del agua en la cuenca, así como entre las autoridades diplomáticas y los cuerpos técnicos responsables del manejo del agua entre México y Estados Unidos.

Abstract

The governance of water in transboundary basins has always been a challenge for decision makers and governments responsible for managing the natural resources existing in them. The particular case that concerns us in this report focuses on the review of the situation that prevailed in 2020 with the conflict of water availability in the dams of the state of Chihuahua,

its administration, the climatic conditions in the region, and the water governance problem in the Río Conchos basin. This analysis is based on official information from various sources, selected on the subject of solving existing disagreements between the different water users in the basin, as well as between the diplomatic authorities and the technical bodies responsible for water management in Mexico and the United States.

Introducción

La gobernanza del agua en cuencas transfronterizas siempre ha sido un reto para los tomadores de decisiones y los gobiernos responsables de administrar los recursos naturales existentes en estas. El caso particular en este reporte se centra en la revisión de la situación que prevaleció en 2020 con el conflicto de la disponibilidad de agua en las presas del estado de Chihuahua, su administración, las condiciones climáticas en la región y el problema de la gobernanza del agua en la cuenca del río Conchos. Este análisis se sustenta en la información oficial de diversas fuentes que fueron consideradas al momento de la redacción del presente documento para dirimir las diferencias existentes entre los diversos usuarios del agua en la cuenca, así como entre las autoridades diplomáticas y los cuerpos técnicos responsables del manejo del agua entre México y Estados Unidos.

Procedimiento: los datos y el posicionamiento oficial binacional

Se parte del principio en el que se establece, por parte de los responsables diplomáticos del agua en ambos países, la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) en México y la International Boundary and Water Commission (IBWC) en Estados Unidos, que en lo que refiere al ciclo 35 (2015-2020) se visualizaba un rezago de entrega de agua por parte de México, la que, de alguna manera, debería ser transferida a Estados Unidos el 24 de octubre de 2020 (Figura 1). Para cumplir con el compromiso del tratado de 1944 signado por ambos países, este volumen pendiente de agua alcanzaba aproximadamente 380 millones de metros cúbicos (Mm^3) en ese momento, cantidad que correspondía a la parte proporcional del volumen total acordado en el tratado, que era cercano a los 2158 Mm^3 y que se debió entregar en el transcurso de los cinco años, lo que correspondería al quinquenio identificado como ciclo 35, en donde al 19 de septiembre de 2020 solo se había enviado cerca de 1857 Mm^3 (aproximadamente 86 %). Por tanto, para que México cumpliera su

compromiso diplomático conforme al mencionado tratado se debería remitir cerca de 302 Mm^3 antes del 24 de octubre, lo que obligaba a entregar por semana aproximadamente 59 Mm^3 antes del vencimiento de la fecha señalada. En este sentido, se conocía que solo después de esta fecha límite para la entrega del volumen especificado en el tratado, se consideraría a México como *endeudado* de cualquier remanente que faltara para cumplir con el total de volumen acordado en el ciclo 35, de tal manera que ambos países reconocen e identifican la importancia de cumplir con estos volúmenes en su entrega-recepción y han manifestado su ocupación al respecto de la identificación de posibles soluciones viables que pudieran ser benéficas para ambos países (Harkins, 2020).

Por otro lado, la Comisión de Operación y Vigilancia del Consejo de Cuenca Río Bravo (COVI-CCRB), organismo con representación amplia de todos los actores y usuarios del agua que se asientan en la extensión territorial de dicha cuenca, celebró diversas reuniones de planeación y evaluación referente a la problemática de la disponibilidad de agua, de tal forma que en su acuerdo VI COVI 2019.X.04:008, con fecha del 4 de octubre de 2019, manifestaron el arreglo de promover reuniones de trabajo para abordar exclusivamente el tema de la entrega de agua de la cuenca para cumplir con el Tratado de Aguas Internacionales del 1944 para el cierre del ciclo 35. Derivado de este acuerdo, se realizaron una serie de sesiones de trabajo con diversas fechas de encuentros en donde se discutió y se presentaron los análisis de los posibles escenarios para el cierre de este ciclo 35 (CCRB, 2019). Las reuniones de planeación de este organismo continuaron durante el tiempo del conflicto sin llegar a acuerdos firmes y con un conflicto social agravado en la cuenca.

Más aún, el posicionamiento oficial de las autoridades en materia de la diplomacia para la administración binacional del agua en la cuenca del río Bravo estableció que en lo que refiere al Tratado del Aguas de 1944, si un ciclo termina en deuda, pues se termina en deuda y punto, pero que *México no puede terminar dos ciclos consecutivos* con esta posible deuda de entrega de agua. La sección americana de este organismo diplomático estableció que en lo que refiere a este acuerdo con respecto a los posibles adeudos “las autoridades federales mexicanas lo entienden, pero algunos funcionarios estatales y locales mexicanos pueden no hacerlo” (Harkins, 2020).

Por otro lado, la posición de la sección mexicana de este organismo manifestó también por medio de otros actores responsables de la aplicación de dicho tratado que, conforme a acuerdos adicionales establecidos por ambos



RÍO BRAVO
VOLÚMENES DE AGUA ASIGNADOS A ESTADOS UNIDOS
DE LOS AFLUENTES AFORADOS EN EL CICLO 35
CONFORME AL TRATADO DE AGUAS DE 1944

5 DE SEPTIEMBRE DE 2020

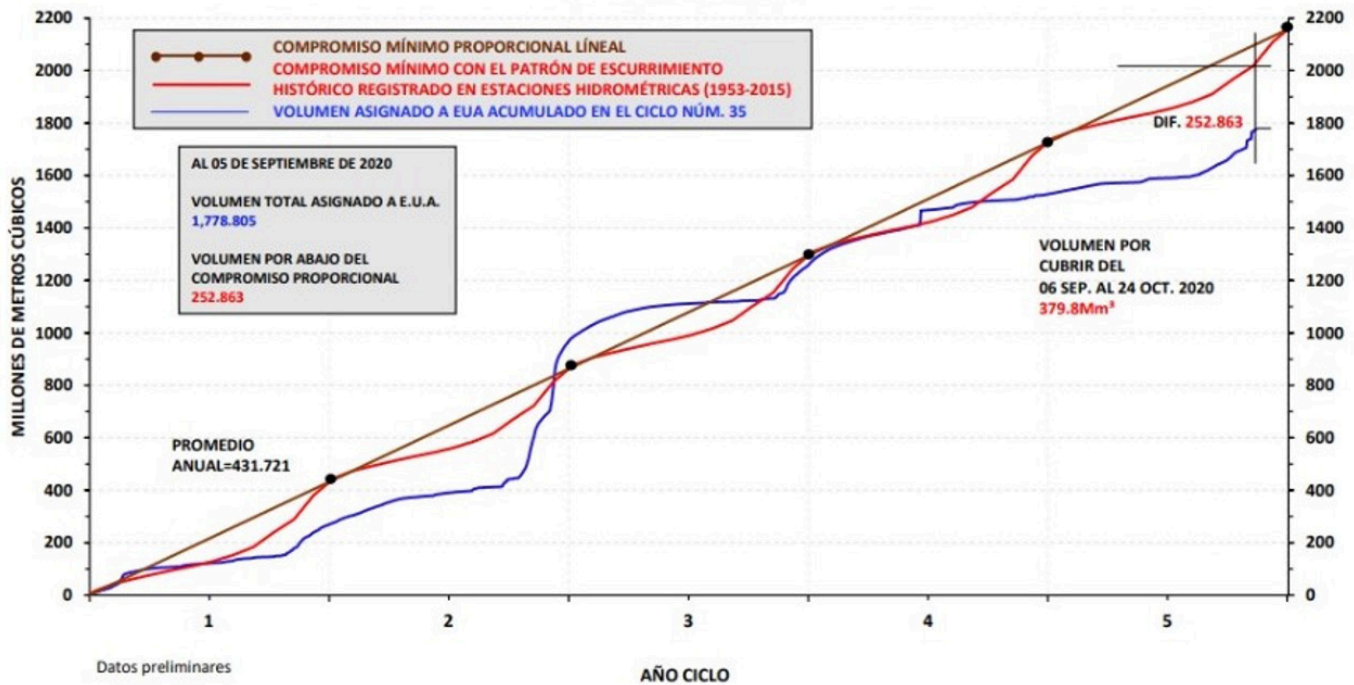


FIGURA 1: Volúmen de agua asignado a Estados Unidos en el Ciclo 35 conforme al tratado de aguas de 1944.

países bajo el marco del mismo tratado de 1944, como lo es lo que refiere al Acta 234, se plantean alternativas que le dan a ambos países la holgura y seguridad para el cumplimiento del acuerdo. Por ejemplo, esta Acta 234 firmada por ambos países reglamenta la forma de cubrir faltantes de ciclos anteriores y el corriente en donde se plantea el caso de lo que se pudiera presentar como *sequía extraordinaria* en la cuenca. Sin embargo, a la fecha, está todavía en la agenda de estos organismos diplomáticos (CILA-IBWC) el precisar y estar de acuerdo en la definición de este término y no es posible invocarlo unilateralmente por parte de cualquiera de los dos países, por lo que se requiere una puntual definición de dicho término (Liévano, 2020). Más aún, se identifica en esta Acta 234 el hecho de que las entregas de agua comprometidas bajo este tratado de 1944 solo se pueden excusar con una “sequía extraordinaria” reconocida por ambos países o por algún “daño o perjuicio o accidente” en la infraestructura hidráulica en el sistema. De igual forma, especifica esta Acta 234 que en el caso de que haya faltante en el ciclo anterior por cualquier razón, los países están obligados a pagar en principio por derecho el faltante en el siguiente ciclo y posteriormente continuar con el conteo del ciclo presente (Luevano, 2020).

Por otro lado, la posición oficial por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en torno

al problema de las entregas comprometidas de agua al tratado de 1944, se centran en el discurso del derecho humano al agua y lo pone como una preponderancia lo que está establecido por ley, convirtiendo en una prioridad de Estado el uso doméstico comprometido de los volúmenes de agua en las presas de México y en el presente escenario, los volúmenes disponibles en el caso de las presas internacionales están asignados para las 13 ciudades que se localizan aguas abajo de dichas presas internacionales (Jiménez, 2020). De igual forma, expone la autoridad del agua en México que, conforme a estudios técnicos internos de la paraestatal (Oribe Alva, 1945), Chihuahua está obligado a aportar aproximadamente el 54.1 % del total comprometido en cada ciclo, lo que a partir de 1994 se ha reducido esta entrega de parte de las presas que se localizan en el territorio estatal de Chihuahua, entregando solo alrededor del 38 % lo que ha sido por debajo del valor de referencia del cumplimiento del tratado. Según la CONAGUA, esto se debe al incremento de las áreas agrícolas en el Distrito 005 Delicias y el Distrito 090 Bajo Río Conchos-Ojinaga, estableciéndose diversos cultivos predominantemente lo referente a huertas de nogal. El resto del porcentaje (45.9 %) se debiera aportar por los otros cinco tributarios aforados que abonan a dichas entregas entre los estados de Coahuila,

Nuevo León y Tamaulipas. Por otro lado, manifiesta la paraestatal CONAGUA que en relación a las diversas alternativas de solución al conflicto que se presentó en Chihuahua por los volúmenes por entregar al tratado por parte de este estado, como se ha mencionado en el párrafo anterior, la alternativa de utilizar agua propiedad de México y que está almacenada en las presas internacionales de La Amistad y Anzaldúas, no es posible porque aunque existe volumen disponible para cumplir con los adeudos del ciclo 35, esta agua está asignada para los usos domésticos que demandan 13 ciudades que se localizan aguas abajo de estas obras de almacenamiento de agua (Jiménez, 2020). Sin embargo, como fue conocido, el problema de las entregas de agua al tratado internacional en el ciclo 35 se resolvió usando precisamente las aguas de las presas internacionales, decisión que fue tomada por la CILA como autoridad diplomática responsable del tratado.

En su momento, Estados Unidos aplicó una gran presión diplomática para que se cumpliera el acuerdo del tratado, sin embargo es reconocido por ambas partes que “no hay consecuencias explícitas escritas en el Tratado del Agua de 1944 u otros acuerdos internacionales entre Estados Unidos y México en el caso de que México terminara el ciclo con endeudamiento”, sin embargo se reconoció por parte de la sección americana del IBWC que México había declarado su intención por terminar el ciclo sin adeudos y que había hecho esfuerzos por lograr los acuerdos establecidos en materia de aguas binacionales (Harkins, 2020).

Hidrología e hidrometría en la Cuenca Río Bravo y el caso de la Sección Mexicana

Para entender el origen de la problemática en materia de agua superficial y los compromisos de entregas entre los dos países, es importante conocer la extensión territorial y dimensiones de la cuenca transfronteriza del río Bravo (Figura 2). Con un área aproximada de 550 000 km², divide casi por la mitad entre los dos países, se encuentra una gran diversidad de retos ambientales, sociales y económicos que se reflejan en las políticas de administración del recurso agua entre los dos países. Como se puede observar en la Figura 2, la cuenca tiene diversos tributarios a este cauce principal del río Bravo-río Grande, en el cual se asientan importantes ciudades, tanto al interior del territorio de cada país, así como muchas ciudades a lo largo de la frontera de las cuales muchas de ellas se consideran *ciudades hermanas* que coinciden en su entorno transfronterizo con una interacción importante desde la perspectiva, económica, social y ambiental. La manera en que está

planteado el esquema de administración del recurso agua entre los dos países está sustentado en los acuerdos y debates que se desarrollaron para formular el contenido del tratado de 1944, cuya filosofía se basa en el mutuo respeto, resaltando la visión fijada por nuestro país desde la época de la Reforma y cuyo tratado internacional inicia definiendo su proceder con la siguiente frase: “Hoy mejor que nunca puede comprenderse el profundo sentido de la frase inmortal del Benemérito de las Américas, Benito Juárez: *El respeto al derecho ajeno es la paz*; pues esta será de hoy en adelante la única ruta posible del progreso y la civilización”. Siguiendo este principio, se ha establecido a través del tiempo un seguimiento de este Tratado Internacional de Agua de 1944, generando un esquema de colaboración entre ambos países. No ha sido el presente el único caso complejo del manejo de agua en la cuenca binacional. Ya han habido entre ambos países acuerdos en tiempos difíciles de la administración del recurso y se ha salido adelante en esos pasados escenarios aún más complejos que en el escenario presente. Algunos de estos pasados eventos se han resuelto favorablemente para México sin afectación a Estados Unidos y la mayoría de ellos han sido por efecto del fenómeno recurrente de sequía que sufre el territorio, simplemente por la naturaleza de su ubicación geográfica establecida en el rango de latitud en donde se encuentran los principales desiertos del mundo. Actualmente, el territorio binacional ha tenido un destacado desarrollo y crecimiento, incrementando los diferentes usos de agua y sus respectivas demandas, destacando principalmente el caso de los usos agropecuarios y usos domésticos en ambos lados de la cuenca. En el caso de los usos agrícolas, se conoce que en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo-río Grande un total de 92 266 ha de cultivos como el nogal, alfalfa, maíz, algodón entre otros, lo que conduce a concesiones de agua cercanas a 1198 Mm³ (98.8 %), mientras que para los usos domésticos solo se destinan 15 Mm³ (1.2 %). En lo que refiere a la hidrometría utilizada por las agencias responsables de la contabilidad del agua en la sección mexicana de la cuenca transfronteriza, se tiene una red de obras hidráulicas desplegadas a lo largo de los principales tributarios al cauce del río Bravo (Figura 3). Existen un total de 19 obras hidráulicas definidas como puntos de control (presas), de las cuales 13 se consideran como presas principales. De estas 13, tres están asentadas en el cauce principal del río Bravo y las tres tienen el carácter de internacional: La Amistad, Falcón y Anzaldúas. En el caso particular de la tercera, ubicada en el último tramo del río Bravo, tiene la función de almacenaje de agua también para ambos países.



FIGURA 2: Extensión territorial de la cuenca transfronteriza río Bravo-río Grande, localizada entre México y Estados Unidos.

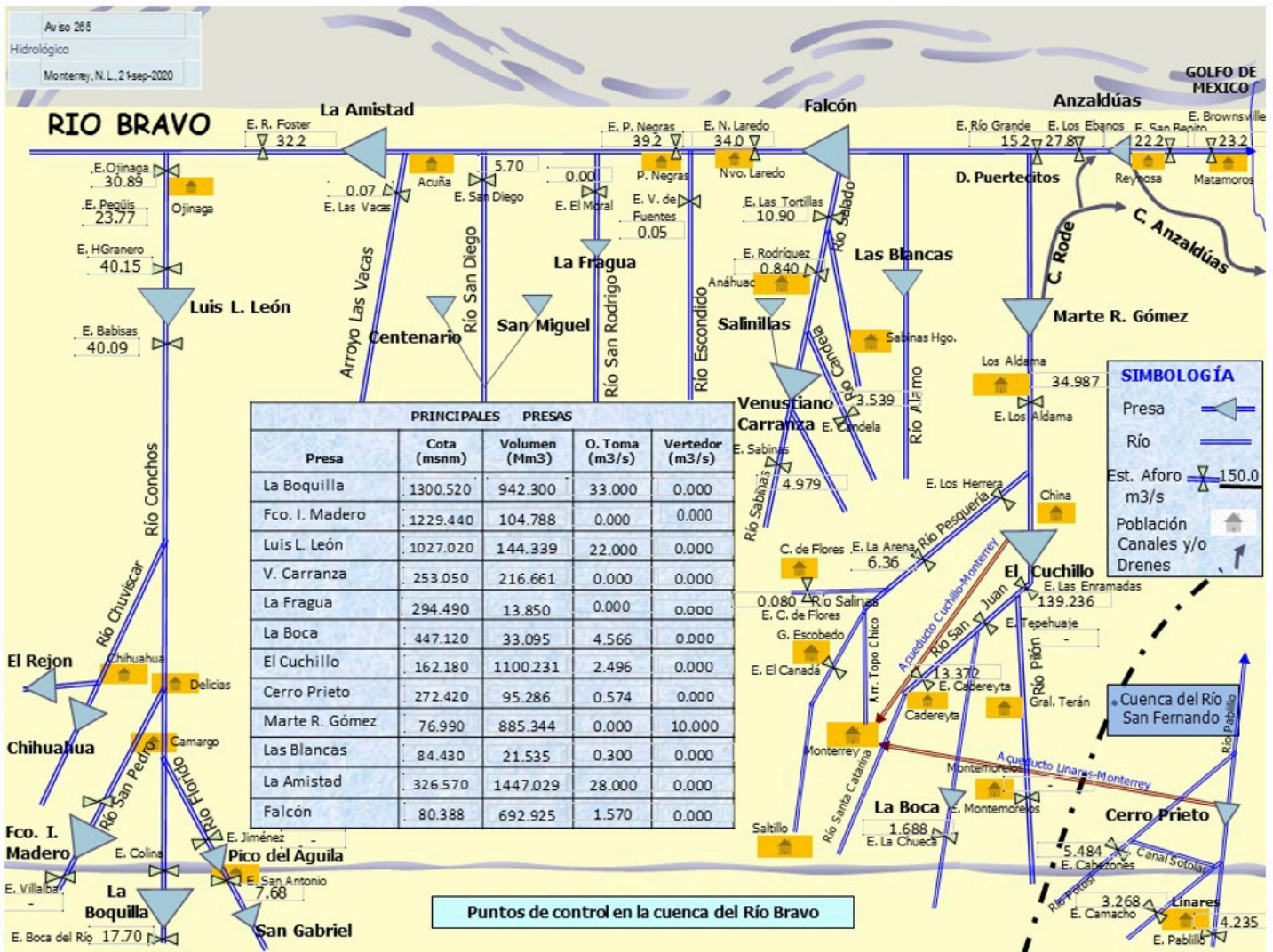


FIGURA 3: Hidrometría en puntos de control (presas) en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo.

De igual forma, se pueden observar en la tabla anexa de la misma Figura 3, los datos técnicos y volúmenes disponibles y aforos al 21 de septiembre de 2020, de lo que se define como las principales presas de México en la cuenca del río Bravo. La primera columna indica el nombre de la presa; en la segunda columna se registra la cota de elevación de la lámina del almacenamiento en el vaso de la presa a la fecha establecida en el gráfico; en la tercer columna se registra el volumen de almacenamiento existente en la presa a la fecha del informe; en la cuarta columna se registra la obra de toma para el desfogue de la presa para la generación de electricidad y el flujo que a la fecha del gráfico se estaba liberando de la misma y, finalmente, en la última columna se muestra el aforo que se registró a la fecha del gráfico en el caso del manejo de vertedores. Es importante destacar que estos dos últimos parámetros: obra de toma y vertedor de excedencias, se registran en algunas de las presas

solo en lo referente a la obra de toma, mientras que en otras presas solo se registra vertedor de excedencias (por ejemplo, la presa Marte R. Gómez) debido al tipo de infraestructura hidráulica que se maneja en cada una de ellas, en donde, por lo general, en las presas que tienen infraestructura hidroeléctrica se cuenta también con vertedores de excedencias como factor de seguridad. Por otro lado, se destaca de la simbología en este gráfico las diversas estaciones de aforo en donde sus valores indican el volumen medido en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Es importante esta observación para el presente análisis y diagnóstico, ubicar la distribución geográfica de lo que se identifica como poblaciones ubicadas a lo largo del diagrama esquemático de la misma Figura 3, principalmente las que se encuentran aguas abajo de las presas internacionales debido a que estas están jugando un papel importante para evaluar una de las posibles estrategias de solución que se

consideraron para la problemática diplomática por las entregas de agua según el tratado de 1944. En este sentido, la CONAGUA estableció como prioridad el *derecho humano al agua* para las poblaciones, lo que tiene prelación por encima de los otros usos, incluyendo el agrícola. Esto se había establecido en el pleno de las reuniones de las mesas de trabajo que se estaban desarrollando dentro del CCRB, quedando claro que esta acción se visualizaba como de estrategia nacional en el manejo del agua en las presas tanto nacionales como las de índole internacional, las cuales juegan un papel preponderante para cumplir con esta encomienda establecida en la Ley Nacional de Agua de México y firmada ante organismos internacionales como las Naciones Unidas.

Diagnóstico

Hidrología e hidrometría en Chihuahua y el caso del río Conchos

En el caso particular del territorio de Chihuahua, se cuenta con 7 de las 13 presas principales en la cuenca del río Conchos para la administración de las entregas de agua al tratado en la sección mexicana y para el manejo de los distritos de riego existentes en la misma (Figura 4). Sin embargo, se registran también en el caso de las Cuencas Cerradas del Norte (Región Hidrológica 34) dos presas más en territorio estatal: Las Lajas, que recibe sus aportaciones del río del Carmen; la presa El Tintero, con aportaciones del río Sacramento; y una más, la presa Abraham González, que drena por medio del río Papigochi hacia el poniente al estado de Sonora, beneficiando las zonas principalmente agrícolas de este estado.

Adicionalmente, existen cinco ríos importantes que nacen en la Sierra Madre Occidental en la Sierra de Chihuahua en la región suroeste: río Oteros, río Fuerte, río Urique, río Verde, y finalmente, el río Los Loera, los cuales vierten sus escorrentías hacia el estado de Sinaloa con importantes volúmenes que finalmente benefician igualmente a otro estado, principalmente en sus territorios agropecuarios.

Se puede identificar también en la Figura 4 los porcentajes de disponibilidad en ese tiempo en cada una de las presas, según los datos de aforo proporcionados por parte de la CONAGUA, destacando que la mayoría de las presas se encontraban por debajo del 50 % de su capacidad de almacenamiento, llegando algunas de ellas a tener volúmenes por debajo del 20 %, lo que establece baja o nula disponibilidad por ubicarse por debajo de

la “línea muerta” de las presas, significando esto que no era posible extraer más agua de estos almacenes simplemente por las condiciones hidráulicas del sistema en donde no fluía el agua por efectos de la gravedad (por ejemplo, el caso de la presa El Tintero contaba en ese tiempo con solo el 19 %).

Sin, embargo, en lo que corresponde a la cuenca del río Conchos, que es parte de la Región Hidrológica 24 (río Bravo), se muestra que los volúmenes de almacenamiento varían desde valores por debajo del 30 % hasta almacenamientos por encima del 50 %, según datos del reporte de hidrometría y climatología de la CONAGUA (2020). Como se puede observar en las tablas de la Figura 4, los valores de las capacidades de almacenamiento de estas obras de contención eran relativamente bajos, lo que cobraba una relevante importancia debido a las grandes dimensiones de dichas obras de embalse y el diseño de sus estructuras de bocatoma o vertedores de excedencia, aparentando contar con volúmenes disponibles suficientes como para desfogar y cumplir con las entregas de agua al tratado. Más aún, el efecto de la reducción del volumen disponible en razón de la **cantidad de azolve existente** en estas obras, que a través del tiempo han acumulado grandes cantidades de sedimentos, es una realidad en todas las presas del estado, por lo que la reducción de agua disponible en las presas es relevante (Figura 5). Por ejemplo, en esta misma Figura 5 se puede apreciar un diagrama esquemático de una sección de obra de bocatoma con valores al tiempo del conflicto para el caso de la presa de La Boquilla, reflejando los datos de volúmenes de almacenamiento y sus cotas de elevación de los niveles de la presa.

Por otro lado, se comparaban los valores conforme a ambas posturas (CONAGUA y Gobierno del Estado de Chihuahua) y al no coincidir se generó una controversia para el encuentro de soluciones a la problemática. Por ejemplo, se destacaban dos datos que se identifican como generadores de la actual controversia en donde, según la CONAGUA, el dato de almacenamiento al 24 de septiembre de 2020 era de 937.30 Mm³, mientras que el almacenamiento real, según el Gobierno del Estado de Chihuahua, es de 729.91 Mm³, lo que hace un diferencial de 201.39 Mm³, esto sin considerar la evaporación del vaso en la lámina de almacenamiento aguas arriba de la presa La Boquilla, evaporación que pudiera ser considerable alcanzando hasta 200 Mm³ (Ríos, 2020). Sin embargo, la postura estatal oficial al respecto del dato de evaporación era más acercado a un valor de hasta 100 Mm³ del volumen útil almacenado,

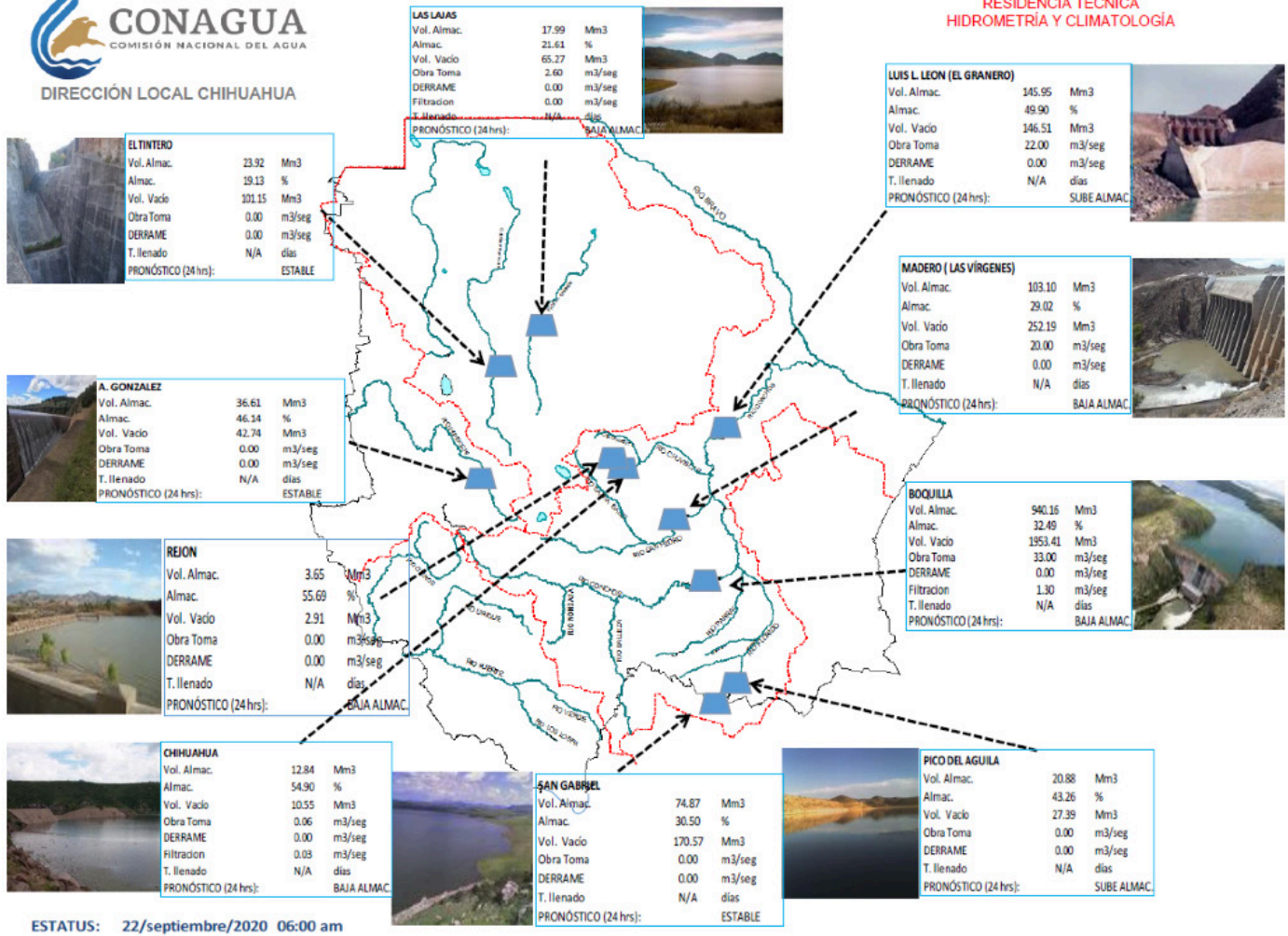


FIGURA 4: Hidrometría en el estado de Chihuahua y volúmenes de almacenamiento en presas. Fuente: CONAGUA, 2020.

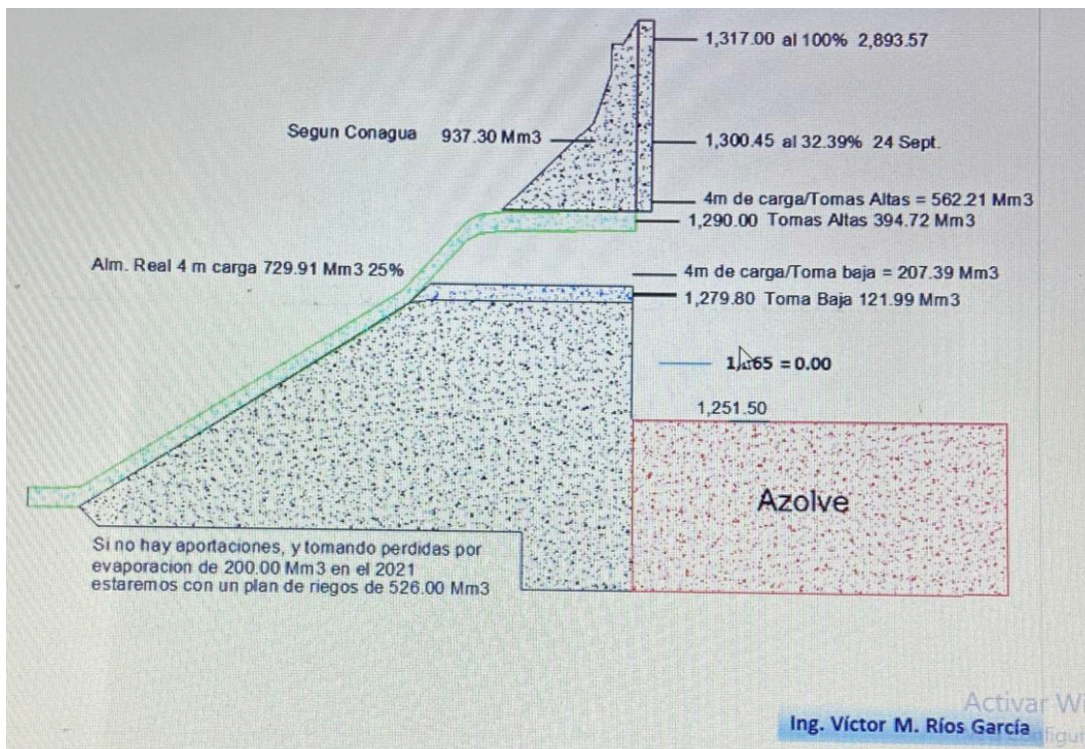


FIGURA 5: Diagrama esquemático de sección transversal de la presa La Boquilla con cotas de volúmenes actuales de almacenamiento (Ríos, 2020).

lo que correspondería aproximadamente al 10 % de la disponibilidad actual (Corral, 2020). Este diferencial de volumen en almacenamiento en la presa, sin considerar este dato de evaporación de los vasos de almacenamiento, el cual pudiera ser una sobreestimación, correspondería solo el porcentaje de evaporación directa de la presa a un valor aproximado del 69 % del volumen adeudado a la fecha del cierre del ciclo 35. Esto es, solo por efectos de la evaporación de las presas, se pudiera estar perdiendo hasta un 69 % del volumen almacenado en las mismas.

Por otro lado, las grandes obras de presas del estado, como La Boquilla, Francisco I. Madero (Las Vírgenes) y la Luis. L. León (El Granero), se encontraban con 32.5 %, 29 % y casi 50 % respectivamente y en su momento continuaban desfogando los volúmenes que permiten las obras hidráulicas con las que cuenta cada presa, en particular la presa de El Granero aporta directamente al río Bravo aproximadamente 22 m³/s y estaba abonando a la problemática del momento (Figura 4). Se conoce que estas entregas que se estaban realizando habían afectado la disponibilidad en el estado, dejando poco volumen actual en donde, a la fecha, se conoce que se encuentran próximas a quedar prácticamente vacías. Más aún, es importante destacar que bajo las circunstancias actuales en donde se está requiriendo de volumen para las entregas del tratado, se presenta hidráulicamente inconveniente el trasvase de volúmenes dado que se conoce de las posibles grandes pérdidas por efecto de la conducción, en donde la infiltración, la evapotranspiración y el robo de agua a lo largo de los cauces que conducen las entregas al río Bravo. Estas pérdidas pueden llegar a ser considerables, por ejemplo, mover agua desde las presas del río Conchos hasta la Presa Internacional Falcón, pudiera representar **pérdidas por trasvase hasta del 83 %**, lo que demuestra la inconveniencia de realizar el movimiento de agua que se discutía en su momento para cumplir con el Tratado Internacional de 1944 (López-Pérez, 2020). Estos datos hidrométricos son importantes pues es en donde se centraba la discusión en su momento al respecto de cumplir con los volúmenes por entregar a Estados Unidos con respecto al tratado de 1944. En este punto, es importante destacar que, hidráulicamente, el único punto por donde se puede realizar el desfogue para realizar los pagos potenciales de este tratado es solamente la presa Luis L. León (El Granero) y la capacidad de descarga es de solo 22 m³/s, lo que estaría limitado para cumplir con la totalidad del volumen por entregar al 24 de octubre 2020, tiempo de vencimiento del tratado en su ciclo 35. Independientemente de

que se desfogara la presa La Boquilla aguas arriba, la cual solo tiene capacidad de verter 33 m³/s, aún así no sería posible cumplir con el volumen pendiente por entregar para resolver el adeudo del tratado incluso con todas las presas aguas arriba desfogando, dado que como se ha especificado, las entregas oficiales se hacen en la contabilidad de la estación de aforo localizado en Ojinaga, las cuales contabilizan solo las aguas que provienen de la presa El Granero (Figura 4).

Discusión

Apuntes sobre el marco jurídico en torno al tema del agua

En principio, para evaluar el entorno al tema del agua se requiere un amplio análisis del marco jurídico normativo del agua vigente en México, esgrimiendo los diversos artículos que tiene la Constitución y que son de relevancia preponderante para la integración de la base formal legislativa apoyada en las diversas leyes que atienden la normatividad en torno al agua. Dentro de este marco jurídico, se deberá resaltar la importancia de los compromisos contraídos, destacando el derecho humano al agua y el cuidado del medio ambiente (artículo 4 constitucional). De igual forma, se deberá documentar lo referente a la propiedad de la tierra y el agua y su transmisión del dominio de ellas a los particulares (artículo 27); y, finalmente, se deberá atender al respecto de la responsabilidad legal en referencia al tema del agua desde la perspectiva de la organización de un gobierno republicano y su organización político-administrativa al nivel municipal y el cómo los municipios son responsables de las funciones y servicios públicos relacionados al agua, llegando así a derramar la protección de la ley a nivel usuario (Athié y López, 2021).

Conforme a la Constitución de México, el agua es un patrimonio del estado y es considerado un asunto de seguridad nacional pasando por el derecho humano del “acceso al agua potable”. Más aun, **se hace saber** que cada entidad federativa tiene la responsabilidad de la tipificación de las aguas estatales en base a estudios y criterios técnicos que las permitan definir perfectamente para que a su vez sean incorporadas a la legislación estatal, buscando la sustentabilidad hídrica. Esto en sí, es de relevante importancia pues permite la base jurídica para la ordenanza del agua, en donde las autoridades del gobierno estatal, los legisladores locales, académicos y productores agropecuarios deberán presentar propuestas idóneas para enriquecer la ley estatal del

agua, la cual adolece de precisiones para determinar a quién corresponden las aguas “no nacionales” que fluyen en el estado (Athié y López, 2021).

Propuestas de soluciones para el conflicto del agua en Chihuahua

En referencia a las soluciones viables a los futuros conflictos del agua en Chihuahua, varios especialistas en la temática han realizado ejercicios interesantes en torno a las alternativas para dirimir las diferencias en este tema. Por ejemplo, López-Pérez (2020) hace la recomendación de recobrar la unidad de los actores de la parte mexicana del conflicto a través del Consejo de Cuenca Río Bravo (<https://www.cuencariobravo.org/>) para generar y consensuar opciones de solución en relación a los cierres de los siguientes ciclos (actualmente está corriendo el ciclo 36 y según su calendario, ya tiene retraso en su entrega) y, de igual forma, se deberá prestar especial atención al tema de la sequía pronosticada para el periodo 2020-2021, lo que implica realizar acciones de prevención utilizando el Programa Nacional Contra la Sequía (<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contrala-sequia-pronacose-programas-de-medidas-preventivas-y-de-mitigacion-a-la-sequia-pmpms-para-ciudades>), en donde se plantean estrategias básicas en torno a este evento hidrometeorológico. Por otro lado, y en consideración de que los ríos tributarios sigan entregando agua como hasta ahora hacia los compromisos del tratado, se deberá conciliar la información de las partes, en donde, paralelamente, se deberá negociar con EUA (específicamente, el Departamento de Estado) para acordar un plan de entregas con un plazo máximo de 12 meses, asegurando solventar los déficits que se presenten y considerando una variación de $\pm 10\%$ del volumen prorrateado del primer año. Para esto, las posibles fuentes en los tiempos correctos serán: a) agua del Bajo San Juan, de los no aforados, y el agua que se recupere en la cuenca de ilegales, entre otras alternativas viables (López-Pérez, 2020). López-Pérez (2020) hace la sugerencia de no entregar agua de las presas internacionales debido a tres razones básicas: a) sería una suspensión provisional otorgada en favor de los usuarios DR025 y DR026; b) deberá ser un acuerdo interno de la CONAGUA el que las presas tengan una reserva de agua para consumo humano de al menos un año, por lo que habría que recuperar esa reserva al utilizarla para el pago del tratado; y finalmente, c) actualmente el agua que se encuentra almacenada en

las presas no alcanza y con el pronóstico de año seco se podría utilizar como complemento a las necesidades que se presenten.

En lo que respecta a las decisiones técnicas, se deberá contar con un grupo reducido de expertos que realmente hayan vivido el cumplimiento del tratado para proponer al Consejo y a CONAGUA opciones para tres temas principales: a) cierre de los ciclos futuros; b) acciones inmediatas para el próximo ciclo hidrológico-agrícola; y c) la creación de un plan de largo plazo para evitar caer en futuros incumplimientos al tratado. Esto pudiera ofrecer sustentabilidad en la administración para todos los usos, incluyendo el medio ambiente.

Expertos en este tema argumentan que no se puede seguir apostando a la presencia de huracanes y frentes fríos húmedos para cumplir el tratado de 1944 o, en general, para las diversas demandas por agua de los sectores productivos en el estado, en donde de igual manera no se puede seguir usando y administrando el agua en la cuenca del río Bravo con métodos y tecnologías de principios del siglo pasado (López-Pérez, 2020). Incluso, se sugirió reducir el volumen a utilizar durante el ciclo 2020-2021 en toda la cuenca del río Bravo, para lo cual se deberá compensar a los productores por el volumen que dejarían de recibir, considerando para tal fin los cultivos típicos en cada región en base a rendimientos promedio y al precio por tonelada. Las autoridades involucradas, como la CONAGUA, SADER y SER, deben proveer de los recursos económicos o en especie necesarios para la compensación de las áreas de cultivo que dejaran de trabajarse. Para esto, en los estados se deberá de gestionar la coordinación entre el CCRB, la SADER y los usuarios para establecer los esquemas de participación para llevar a cabo la compensación.

Para no volver a incurrir en estas crisis por el agua en el Bravo, se deberá mejorar la gestión de los recursos hídricos a través del uso de tecnología de monitoreo de última generación del ciclo (demanda y oferta), aunado a otras acciones de gestión integrada de cuencas hidrológicas, tal como lo sería el separar la operación del sistema hasta Ojinaga y de ahí hacia aguas abajo hacer otra estrategia de administración dado que la cuenca en particular es demasiado grande. Por otro lado, se deberá integrar el caudal ambiental para ayudar a asegurar abasto doméstico y recarga de acuíferos, lo que es una de las partes más importantes del ciclo hidrológico y de las potenciales fuentes de suministro de agua para la cuenca y sus diversos usos. Se deberá también concluir el desarrollo de reglas de asignación, probarlas y ajustarlas en un convenio de concertación y coordinación y

eventualmente convertirlo a reglamento conforme a la LAN (reducción del uso del agua), en donde, a su vez, se deberán incorporar tecnologías de alta eficiencia hídrica en el riego y las cadenas productivas desde la parcela hasta la agroindustria. Se deberá crear nuevas fuentes de agua a través de proyectos de desalación de agua subterránea salobre pegado a obras de recarga de acuíferos/bancos de agua, en lugar de invertir en grandes presas, realizando un programa de microcaptación en las cabeceras de las cuencas y actualizar e implementar los planes de ordenamiento territoriales del estado en las cuencas para restablecer los equilibrios ecosistémicos necesarios para un ciclo hidrológico saludable y decretar protección de zonas de recarga (López-Pérez, 2020).

La necesidad de una Secretaría del Agua para Chihuahua

El tema del agua impacta en todos los ámbitos; en consecuencia, debe tener una alta prioridad y debe visualizarse como un eje transversal en el nuevo gobierno. En esta propuesta se integra la justificación y las razones más relevantes para establecer la Secretaría del Agua dentro de la estructura de gobierno. Instalar esta nueva dependencia permitirá fijar un importante precedente al poner a consideración de la sociedad, de la comunidad científica, de la académica, de los productores agropecuarios, de los tomadores de decisiones y del público en general esta propuesta. Lograr integrar una estrategia como la propuesta en este documento es por demás pertinente y de gran relevancia para nuestro país, pues se presenta como un cambio de paradigma respecto al agua, sentando un precedente único en México al mandar el mensaje correcto en donde se manifieste que el nuevo gobierno tiene un interés particular por el caso del agua.

En este sentido, y para prevenir el incremento de conflictos sociales por el agua, se requieren acciones de gobernanza en donde se rompan los paradigmas de la gobernanza tradicionalista, que enfoca sus acciones a objetivos abstractos, y provocar las condiciones adecuadas para generar una “gobernanza innovadora”, la cual se deberá centrar en mejorar la calidad de vida de la gente, en donde se consideren acciones particulares, y prevenir afectaciones de bienes particulares, de pérdida de la libertad o, peor aún, de pérdida de vidas humanas. Este tipo de “gobernanza innovadora” se logra con la colaboración de todos los actores participantes en los conflictos o retos para la sustentabilidad hídrica y se deberán buscar estrategias para llegar a los consensos y pavimentar los caminos para un diálogo circular, en

donde todos los actores en conjunto logren encontrar soluciones para la gente y la de los intereses políticos particulares.

Para lograr este objetivo de establecer la Secretaría del Agua, en principio se requiere un amplio análisis del marco jurídico normativo del agua que esté vigente en el país, esgrimiendo los diversos artículos que tiene la Constitución y que son de relevancia preponderante para la integración de la base formal legislativa apoyada en las diversas leyes que atienden la normatividad entorno al agua. Dentro de este marco jurídico, se deberá revisar la importancia de los compromisos contraídos, destacando el derecho humano al agua y el cuidado del medio ambiente (Artículo 4 Constitucional); de igual forma, se deberá documentar lo referente a la propiedad de la tierra y el agua y su transmisión del dominio de dichos derechos de acceso al agua a los particulares (Artículo 27 Constitucional); y finalmente, **se deberá revisar** al respecto de la responsabilidad legal en referencia al tema del agua desde la perspectiva de la organización de un gobierno republicano y su organización político-administrativa al nivel municipal y entender cómo los municipios son responsables de las funciones y servicios públicos relacionados al agua, llegando así a derramar la protección de la ley a nivel usuario (Artículo 115 Constitucional). Se deberá resaltar que, conforme a la Constitución de México, el agua es un patrimonio del estado y es considerado un asunto de seguridad nacional, pasando por el derecho humano del “acceso al agua potable”. Más aún, se deberá revisar el hecho de que cada entidad federativa tiene la responsabilidad de la “tipificación de las aguas estatales” en base a estudios y criterios técnicos que permitan definirlas perfectamente para que, a su vez, sean incorporadas a la legislación estatal buscando siempre la sustentabilidad hídrica.

Esto en sí es de relevante importancia, pues permite la base jurídica para la ordenanza del agua, en donde las autoridades del gobierno estatal, los legisladores locales, académicos y productores agropecuarios presenten propuestas idóneas para enriquecer la Ley Estatal del Agua, la cual actualmente adolece de precisiones para determinar a quién corresponden las aguas “no nacionales” que fluyen en el estado.

En este sentido, la propuesta Secretaría del Agua establecerá las bases para la gobernanza del agua en Chihuahua, en donde se manejaría la información centralizada en todos los temas relacionados a la administración del recurso agua. Para esto, contaría la Secretaría del Agua con un “Consejo Honorario”, integrado por diversas representaciones pertinentes al

tema del agua, y sería nombrado “Consejo Estatal para la Alta Gobernanza del Agua” (CEAGA). Dentro del Consejo participarían la representación de prestigiosas instituciones académicas del estado, en donde se establecería el liderazgo de la coordinación del “Centro de Información Geográfica del Agua” (CIGA); de igual forma habrá representación de las diversas instancias de gobierno, las cuales revisarán las mejoras y propuestas de innovación para el establecimiento del marco jurídico de la Secretaría del Agua; y, por último, pero por demás importante en la estructura del consejo, estaría la representación de la sociedad a través de las Organizaciones No Gubernamentales (ONG).

Como se ha comentado ya en párrafos anteriores, el tema del agua se deberá visualizar necesariamente como una estrategia transversal para lograr la eficiencia administrativa del recurso, buscando evitar los conflictos entre actores y la duplicidad de funciones entre las diferentes oficinas de gobierno. En este sentido, se plantea la “fusión administrativa” de actuales oficinas de gobierno estatal, de tal forma que se propone sean integradas a la Secretaría del Agua las siguientes dependencias: Secretaría de Desarrollo Rural (SDR), Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y, finalmente, la descentralizada Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS). En este último caso, se deberá integrar a este proceso de fusión las diversas Juntas Municipales de Agua y Saneamiento (JMAS) y Juntas Rurales de Agua y Saneamiento (JRAS), buscando lograr que, a través del periodo de gobierno estatal correspondiente, se logre finalmente la plena función administrativa de las JMAS en el estado, tal como lo establece el Artículo 115 Constitucional, reconociendo la madurez administrativa de la descentralizada JCAS y sus diversas dependencias (JMAS y JRAS) a nivel municipal.

Se buscará en todo momento, durante el ejercicio de gobierno, lograr cuencas hidrológicamente sustentables. Se **manejarán** 26 programas transversales principales realizables en el periodo del nuevo gobierno, en donde los principales retos planteados en los diversos diagnósticos de la situación actual del agua en el estado en lo referente a el agua en las presas y el tema de los acuíferos. Como contexto precedente a la problemática local de las aguas estatales, se identifica que se requiere de una coordinación entre agencias federales y locales, así como dentro y entre los países, que permita enfrentar los desafíos de las aguas superficiales (tratado de 1944 y el conflicto social del agua) y la sobreexplotación de las aguas subterráneas desde una perspectiva

transfronteriza. Se destaca principalmente el tema binacional en función de que los recursos de agua transfronterizos entre los dos países (México-Estados Unidos) en su gran parte no requieren de una continua caracterización y monitoreo en tiempo real. De tal forma que la Secretaría del Agua se **centrará** en resolver tres cuestionamientos básicos: ¿cuánta agua hay?, ¿en dónde está?, para llegar finalmente a encontrar soluciones para responder a ¿cómo la vamos a administrar? En este sentido, durante la gestión del nuevo gobierno se **buscará** lograr las siguientes tres metas: 1) garantizar el abasto para todos los usos (tanto en cantidad como en calidad); 2) lograr el balance hídrico en las cuencas para alcanzar la sustentabilidad hídrica en el estado y, finalmente, 3) en acuerdo de gobernanza del agua, lograr cumplir los compromisos con los diversos usuarios de las cuencas.

En este sentido, se **profundizará** más en estas metas y objetivos al plantear a nivel federal iniciativas, leyes o decretos importantes para la resolución de los retos correspondientes al tema de la sustentabilidad hídrica en el estado, reflexionando sobre los costos y efectos que esas medidas producen para poder ser instrumentadas y cumplidas con apoyos y financiamientos federales. Los principales temas que se plantean en este escrito profundizan al respecto de todas las temáticas que se abordaron a lo largo del texto, haciendo énfasis en diversos aspectos que reforzaron en gran medida la filosofía que **regirá** en la Secretaría del Agua para la atención de estos grandes retos que tiene el estado para lograr la sustentabilidad hídrica, en donde “prevalecerá la objetividad de la ciencia, antes que el interés de lo político”.

Conclusiones

Se ha realizado una revisión detallada del conflicto por el agua que se presentó al cierre del ciclo 35 y en donde el estado de Chihuahua tuvo un rol importante para la solución del conflicto internacional por el agua en una cuenca transfronteriza, la Cuenca del Río Bravo (RH24). Se presentaron datos hidrométricos y de volúmenes disponibles en las presas al momento del desarrollo de las negociaciones. Se revisaron los principales conceptos que maneja el Tratado Internacional de Agua de 1944 y su actualidad en la resolución de los conflictos por el agua que se presentaron al cierre del ciclo 35. Se realizó un bosquejo de las principales leyes que rigen la administración eficiente del agua y se plantea la necesidad de un trabajo integral para

resolver lo referente a la Ley Estatal del Agua y para la estrategia jurídica para la creación de una Secretaría del Agua para Chihuahua. Se plantearon propuestas para la atención de la diversa y compleja problemática del agua en Chihuahua en donde se hace un listado de acciones inmediatas y a mediano plazo para lograr la prevención de los riesgos de conflictos sociales por el agua y para el empoderamiento social con orden e información científicamente validada en los temas referentes al agua en el estado de Chihuahua.

Referencias

- Athié Flores, Kamel y López Ortiz, Melchor, 2020. Aguas nacionales y los acuíferos de Chihuahua / Kamel Athié Flores, Melchor López Ortiz. -México: Universidad Autónoma de Chihuahua, 2020. 232p. ISBN: 978-607-536-058-4
- Corral, J., 2020. Comparecencia del Gobernador Constitucional del Estado de Chihuahua ante el Congreso del Estado, para el posicionamiento técnico-político ante el problema de entrega del agua para el Cumplimiento del Tratado de 1944. Canal de la LXVI Legislatura del Congreso del Estado de Chihuahua, 08 de octubre de 2020.
- CONAGUA, 2020. Hidrometría y Climatología Chihuahua. Subdirección de Asistencia Técnica y Operativa. Residencia Técnica. Documento interno de la Dirección Local Chihuahua, Comisión Nacional del Agua, 2020.
- Consejo de Cuenca Río Bravo (CCRB), 2019. Breve Cronología de Reuniones Sobre el Tratado de Aguas de 1944 Ciclo 35. Documento interno del CCRB, 2019.
- Granados Olivas, Alfredo; Luis Carlos Alatorre Cejudo; Josiah M. Heyman; Arturo Soto Ontiveros; Adán Pinales Munguía; Sergio Saúl Solís; Hugo Luis Rojas Villalobos, Adrián Vázquez Gálvez, María Elena Torres Olave; Luis Carlos Bravo Peña; Oscar Ibáñez; William L. Hargrove; Alex Meyer y Shuping Sheng, 2020. Las oportunidades para la sustentabilidad hídrica en las Cuencas de Chihuahua: Estrategias para compensar las demandas socioeconómicas y ambientales ante los retos del cambio climático (Agua-Energía-Alimentación). Publicado en: Problemáticas del agua y medidas sustentables en estados desérticos de México, caso Chihuahua
- Harkins, J., 2020. Commentary: Fact vs. Fiction on Rio Grande Deliveries. Texas Water Resources Institute Texas Water Journal. Volume 11, Number 1, September 28, 2020. ISSN: 2160-5319. Pages 130-132.
- Jiménez Cisneros, B., 2020. Comunicado de Prensa No. 802-20. Participación de la titular de Conagua en reunión con Senadores en torno al Tratado de Aguas de 1944. CONAGUA. Lugar: Ciudad de México, Fecha: 01 de octubre de 2020.
- López-Pérez, M., 2020. ¿Porqué, qué y cómo resolver cumplimiento del Tratado de 1944 y que sigue? Conferencia Magistral en panel "Aguas Transfronterizas entre México y Estados Unidos. Tema: La Hidropolítica para los consensos, manejo y prevención de conflictos"; organizado por el Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación, AC (COMEII). 1 de octubre de 2020.
- Luevano Grano, J.J., 2020. Documento interno del Consejo de Cuenca Río Bravo. Posicionamiento del Secretario de la Sección Mexicana de CILA en la Sesión de trabajo del CCRB del día 30 sept 2020.
- Oribe-Alva, A., 1945. Informe Técnico Sobre el Tratado Internacional de Aguas Celebrado entre México y los Estados Unidos con fecha 3 de febrero de 1944. Ingeniería Hidráulica en México. 1965. Reproducción de los artículos publicados en el Núm. 3 Vol. XXVI Jul., Ago., Sept., 1945 de la Revista Irrigación en México. Órgano Oficial de la extinta Comisión Nacional de Irrigación.
- Ríos García, V.M., 2020. Minuta de Trabajo del 07 octubre 2020, con la finalidad de dar SEGUIMIENTO A LA PROBLEMÁTICA SOBRE EL CUMPLIMIENTO DEL TRATADO DE 1944. Secretaria de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Chihuahua.

II.3 Advancing Transboundary Groundwater Resiliency Research through Systems Science

Fomento de la investigación sobre la resiliencia de las aguas subterráneas transfronterizas a través de la ciencia de sistemas

Ashley E. P. Atkins¹ and Alexander G. Fernald¹

¹New Mexico Water Resources Research Institute, New Mexico State University

Abstract

Groundwater on the border between the United States (U.S.) and Mexico is critical for economic activity, community vitality, and ecosystem health. The New Mexico Water Resources Research Institute (NM WRRI) maintains a long history working with researchers in the U.S. and Mexico to assess transboundary groundwater. The significant impact of humans on the water cycle has necessitated a new coupled human and hydrologic approach to understanding water on the border, supported by innovative system models to simulate and plan for management impacts on transboundary water. This piece describes the evolution of the work carried out by NM WRRI and the scientific approaches used to address transboundary groundwater resources from a systems perspective

Resumen

El agua subterránea en la frontera entre Estados Unidos (EE. UU.) y México es fundamental para la actividad económica, la vitalidad de la comunidad y la salud del ecosistema. El Instituto de Investigación de Recursos Hídricos de Nuevo México (NM WRRI) mantiene una larga trayectoria trabajando con investigadores en Estados Unidos y México para evaluar las aguas subterráneas transfronterizas. El impacto significativo de los seres humanos en el ciclo del agua ha necesitado una nueva conexión humana y enfoque hidrológico para comprender el agua en la frontera, respaldado por modelos de sistemas innovadores para simular y planificar los impactos de la gestión en el agua transfronteriza. Esta pieza describe la evolución del trabajo realizado por NM WRRI y los enfoques científicos utilizados para abordar los recursos hídricos subterráneos transfronterizos desde una perspectiva de sistemas.

Introduction

Overview

Groundwater on the border between the United States (U.S.) and Mexico is critical for economic activity, community vitality, and ecosystem health. The New Mexico Water Resources Research Institute (NM WRRI) maintains a long history working with researchers in the U.S. and Mexico to assess transboundary groundwater. The significant impact of humans on the water cycle has necessitated a new coupled human and hydrologic approach to understanding water on the border, supported by innovative system models to simulate and plan for management impacts on transboundary water. This piece describes the evolution of the work carried out by NM WRRI and the scientific approaches used to address transboundary groundwater resources from a systems perspective.

Problem

Research to improve groundwater management along the U.S.-Mexico border is a unique and sometimes daunting challenge because of the international complexity layered on top of hydrologic and societal interactions within and between the countries. The mission of the NM WRRI is to conduct research that improves water management in New Mexico, the southwestern region, and the nation. This paper describes an approach being implemented by NM WRRI to address groundwater research through systems science complemented by data science and rigorous modeling of coupled human and hydrologic sciences. We give the theoretical underpinnings of this approach and the previous and ongoing efforts to implement the approach for improved transboundary groundwater research.

Background

Freshwater is an essential resource; as has been said in New Mexico for centuries, “el agua es vida” (water is life). Approximately one percent of the water on Earth is accessible freshwater; surface water makes up less than one percent of this total, and over ninety-nine percent is stored underground in aquifers. Surface water has historically received more attention in the realms of research and management than groundwater (Famiglietti 2014).

Growing demand for increasingly pressured surface water resources has, in part, resulted in a heightened global dependency on groundwater (Lall, Josset, and Russo 2020; Scanlon *et al.* 2012). Transboundary aquifers are important global sources of freshwater (Wada and Heinrich 2013). Recognition of the importance of better understanding and managing groundwater has risen alongside its use (Vaux 2011). Making significant progress towards these advancements has been challenging, given the complex nature of characteristically invisible aquifers and the unknown extent of their interactions with interconnected natural and human systems (Megdal 2018; Taylor *et al.* 2013).

Particularly challenging complexities are present for transboundary aquifer systems that lie beneath one or more country (Choudhury, Islam, and Susskind 2018). There are approximately 600 transboundary aquifers in the world, and they are present in nearly every country (Eckstein and Eckstein 2003; IGRAC 2015). Along the U.S.-Mexico border, 36 identified possible transboundary aquifers exist (Sanchez and Eckstein 2017). In addition to serving as critical water resources for the North American Southwest, many of these transboundary aquifers have interdependent connections with major surface water systems like the Rio Grande-Río Bravo (J. Hawley, Kennedy, and Creel 2001; Sheng 2013). Aquifer systems around the world have similarly vital exchanges with surface water systems (Acero Triana *et al.* 2020; Condon and Maxwell 2019). While the rivers shared internationally between the U.S. and Mexico are subject to agreements that govern their use, no similar management exists for transboundary aquifers (Wilder *et al.* 2020). This reality is not unique to this region; there are only two examples of formal transboundary aquifer agreements in the world (de los Cobos 2018; Jägerskog 2013; Sindico, Hirata, and Manganelli 2018). In the U.S., groundwater is regulated by states, and in Mexico, groundwater is centrally regulated. Groundwater management on the U.S.-Mexico border exhibits a history of increasing extraction in excess of recharge, which has led to imbalances between supply and demand. The U.S. and Mexico, as described in more detail later in this chapter, do maintain a unique program to jointly assess four of their shared aquifers and increase understanding about the characteristics of these resources (Tapia-Villaseñor and Megdal 2021).

Methodology

Theoretical Discussion

Conventional approaches to hydrologic research can fail to capture the impact of human systems on water resources and – in turn – how these interactions affect the human systems that rely on them. These relationships are especially complex for transboundary water resources, which are shared between countries with different social-related structures and realities (Blair and Buytaert 2016). The concept of water research that accounts for human and natural components has been around for decades. Recognizing the need for research that captures the complex relationships between hydrologic and social systems, Malin Falkenmark (Falkenmark 1977; 1979) called for the establishment of hydrosociology. Since that time, understanding for the importance of holistic water resources research and management has grown (Vogel *et al.* 2015). The Harvard Water Program created the water resources systems analysis (WRSA) approach to understanding water infrastructure decision-making and later progressed to incorporate hydrologic and social components through hydroeconomics (Brown *et al.* 2015). In 1992, Integrated Water Resource Management (IWRM) was introduced on a global platform to prioritize holistic water management (Giordano and Shah 2014). Peter Gleick (2002) categorized the global shift in water management priorities from an infrastructure focused, “hard path” approach to a “soft path” approach that accounted for the needs of end users. The concept of socio-hydrology, defined in 2012, revitalized research attention towards coupled natural and human water systems (Sivapalan, Savenije, and Blöschl 2012). While decades have passed since the establishment of hydrosociology, WRSA, and IWRM – and there has been a recent resurgence of interest in their fundamental concepts within a contemporary context – the inherent difficulties associated with integrated water research and management have made it difficult to actualize.

The multi-dimensional nature of water along the U.S.-Mexico border cannot be wholly studied within the existing parameters of any one research field or methodology (Ingram, Laney, and Gillilan 1995; Blatter and Ingram 2001). The intrinsic differences between the quantitative foundations of natural sciences and the qualitative foundations of social sciences present challenges for all interdisciplinary research, including water resources research (Lach 2014). The social sciences are not “a full-fledged part of empirical phenomena”

and, thus, differ fundamentally from the natural sciences (Levy 1950). This presents challenges for water research that intends to incorporate both natural and social science approaches. Modeling has been long recognized for its ability to provide an integrative framework for interdisciplinary research (Rossini and Porter 1979). Models are simplified representations of actual systems. These simplifications allow for the isolation of critical system components, to better understand their behaviors in ways that are not possible when examining the system in its entirety. The beneficial characteristics of modeling have been identified by a growing body of research that aims to include components of both natural and human dimensions of water.

Predominant approaches to natural and human system water model development, rooted in a strong understanding of hydrologic systems, have emerged (Troy, Pavao-Zuckerman, and Evans 2015). Hydrologic components tend to be well-developed and act as a foundation in these models. Social factors are often added to fit within the existing hydrologic structures (Loucks 2015). Multidisciplinary water research teams face traditional compatibility challenges when utilizing modeling to culminate their disciplinary specific findings (Blair and Buytaert 2016). Social science research contributes important perspectives to water research (Lund 2015). However, findings from the social sciences – which are not generally empirically validated – have difficulty producing information in ways that best facilitate hydrologic analysis. In response, these models frequently incorporate social system components exogenously and in ways that do not reflect the breadth of qualitative knowledge. Models that generalize overarching hydrologic and social components can provide a mechanism to isolate and understand potential system interconnections that are not specific to a real-world system (Di Baldassarre *et al.* 2013). However, these approaches often lack empirical validation and risk oversimplification (Hall 2019). Initial human and natural water modeling efforts have paved the way for the development of modeling methodologies and applications that can move understanding of water system complexities even further.

While modeling is not a panacea to the integrative problems that have historically plagued interdisciplinary research, it does provide a promising path forward for water resources. Applications of systems science modeling within water science research have been overwhelmingly dominated by system dynamics (SD) methodology; there are at least 169 peer-reviewed system

dynamics articles that focus on water resources (Phan, Bertone, and Stewart 2021). SD utilizes fundamental structures that mirror the core behaviors of hydrologic systems. Stocks, flows, and converters are the primary components of SD. In a transboundary groundwater system, a stock could represent the measured quantity of freshwater in an aquifer. Model inflows increase the stock of freshwater in the aquifer. Recharge could represent a model inflow. Model outflows contrastingly decrease the stock of freshwater in the aquifer. Water pumped from an aquifer could represent a model outflow. Converters are not connected directly to stocks, but they impact stocks through their relationship to other converters and flows that are connected to stocks. Endogenous parts of a model are determined within the model itself. Exogenous aspects are external to the model and are not impacted by its internal behaviors. The similarities between SD and water systems make it a natural methodological fit for representing hydrologic systems (Mashaly and Fernald 2020; Phan, Bertone, and Stewart 2021).

SD has been recognized for its potential to advance understanding of transboundary water systems (Mashaly and Fernald 2020; Sehlke and Jacobson 2005). Some research has used SD to understand interconnected components of transboundary surface water systems (Duran-Encalada *et al.* 2017; Sehlke and Jacobson 2005; Shao *et al.* 2020; Tayia 2019; Yuan *et al.* 2020). This methodology, however, has been scarcely applied to scenarios for transboundary aquifers or hydrologic components that incorporate interdependent transboundary groundwater and surface water systems (Page *et al.* 2019). Utilizing SD to study transboundary water systems requires a recognition of not just its strengths but also its shortcomings. Fundamental problems exist that limit the level of understanding that can currently be achieved through SD. The existing body of SD research for water resources – regardless of the topic of focus with the field – is that human system components are overwhelmingly incorporated in exogenous, rather than endogenous ways. Integrating human system components exogenously limits the ability to account for the intricacies of human behavior within complex systems. These constraints exist in all scientific disciplines that model issues affected by human decisions. Endogenously incorporating key components of human behavior into transboundary water systems models is an essential next step for producing meaningful research that will allow potential decisions to be evaluated dynamically within the collective human

and natural system (Page *et al.* 2019). The innovative exploration of systems science methodologies, that complement and build on the base established through SD research, provides promise for understanding the complex implications of human decision-making for

2019; Maxwell, Langarudi, and Fernald 2019; Page *et al.* 2019). Early work with Sandia National Labs provided linkages between hydrology, economics, ecology and sociology (Fernald *et al.*, 2010). The coupled human and natural systems of traditional communities using

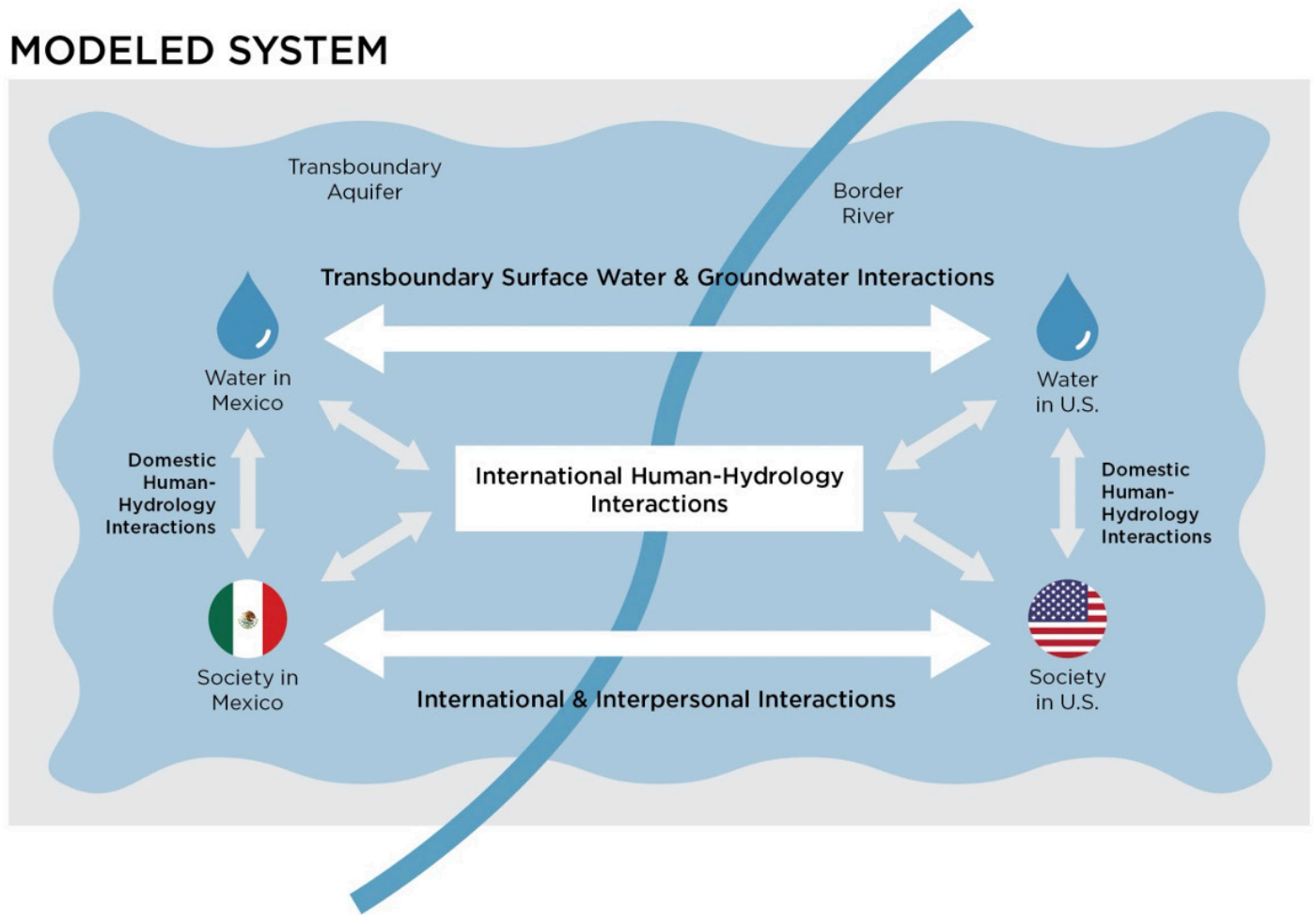


FIGURE 1: Depiction of key interconnections in a modeled transboundary hydrologic and social system. Creative design by Sam Fernald and Ashley Atkins. Graphic design by Tarran Jackson, Marketing and Creative Services, New Mexico State University.

transboundary groundwater systems. The human and natural interactions with and across border societies and hydrologic systems provide an important framework for future transboundary groundwater research (Fig. 1).

Results

Advancing Border Water Research

NM WRRI has actively been at the forefront of improving coupled human and natural systems approaches to water research (Fernald, Baker, and Guldan 2007; Fernald *et al.* 2012; 2015; Langarudi *et al.*

ancient acequia irrigation systems were an entry point into the world where humans had an impact on the water cycle that in turn was a key driver in their society (Fernald Alexander G. *et al.* 2010) This recognition of the human component necessitated modeling that incorporated societal elements for both understanding and management (Turner *et al.* 2016), and the conceptualization and data collection required close interaction with the citizen water managers through community hydrology (Guldan *et al.* 2013). Creating new knowledge about the balanced human and natural processes led to a trove of clues to water sustainability

that were unique to New Mexico communities but held the key to more widely applicable approaches for other NM WRRI projects.

Early work by NM WRRI alongside partners from the U.S. and Mexico to advance transboundary groundwater research led to the U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act (TAAP). In 2000, NM WRRI produced a report on “Trans-international Boundary Aquifers in Southwestern New Mexico” with funding from the U.S. Environmental Protection Agency and support of the U.S. International Boundary and Water Commission IBWC (J. W. Hawley *et al.* 2000). This work, as well as the ongoing interest in the aquifers of the New Mexico-Texas-Mexico border region, inspired a trip to the area by U.S. Senator for New Mexico Jeff Bingaman. He realized the critical importance of transboundary groundwater resource and championed TAAP that was signed into law in 2006 (Bingaman 2006). TAAP identified four priority aquifers along the U.S.-Mexico border for binationally coordinated assessment: the Santa Cruz and San Pedro Aquifers, the Mesilla Basin/Conejos Médanos, and the Hueco Bolson. Because of complications with the Colorado River and the All-American Canal, California opted out of TAAP. After an initial three years of funding, the TAAP program was unfunded starting in 2011. Following Senator Bingaman’s retirement, U.S. Senator for New Mexico Tom Udall took up the cause in 2016. As Ranking Member on the U.S. Senate Appropriations Subcommittee on Interior, Environment, and Related Agencies, Senator Udall added TAAP to the Federal budget. With Senator Udall’s retirement in 2020, NM WRRI and the water resources research institutes from Arizona and Texas began efforts to continue congressional funding of TAAP.

The New Mexico Water Resources Research Institute has focused its TAAP research efforts primarily on the Mesilla Basin, which lies predominantly within the state of New Mexico on the U.S. side of the border. The aquifer, referred to in Mexico as the Conejos Médanos, extends into the Mexican state of Chihuahua. The Mesilla Basin supplies water for Las Cruces – the second most populous city in New Mexico – and agriculture, industry, and surrounding communities in the region. In Chihuahua, the majority of water extracted the Conejos Médanos is piped to nearby Ciudad Juárez. In addition to serving as a vital supply for human populations and industries in this region, the aquifer also has a key role in supporting natural systems. The Mesilla Basin/Conejos Médanos has interconnections

with the Rio Grande that are essential to sustaining both water systems. Through TAAP, NM WRRI has pursued and supported the advancement of research and relationship-building efforts for binationally coordinated assessments of the Mesilla Basin/Conejos Médanos. Assessments serve as an essential foundation for understanding our shared resources (Megdal 2018). New knowledge is needed, because these initial efforts alone will not result in the implementation of binationally coordinated groundwater research that can inform management decisions to meet the needs of all end users.

Groundwater resiliency is fundamental for the health of communities, economies, and ecosystems. Recognizing this reality and the urgent need for new knowledge, NM WRRI established an energized project that aims to produce research in support of transboundary groundwater resiliency. The approach of this project hypothesizes that identifying key data and system drivers are essential to understanding why transboundary groundwater depletion occurs and how it can be reversed. In the coming years, this project will connect networks within water, social, data, and systems science to catalyze tangible and transformative change for transboundary groundwater systems. The work of these networks will determine how advancements in systems science can be leveraged to further transboundary groundwater resiliency research and how advancements in water, social, and data science can strengthen the outcomes produced through systems science analytical approaches. This project will complement existing local and global networks to produce improved research that can inform U.S.-Mexico transboundary groundwater management.

Conclusion

Transboundary aquifers have an important role in the future of New Mexico, the Rio Grande, and populations and systems around the world that rely on internationally shared groundwater resources. Understanding these largely understudied aquifers is critical to managing them in resilient ways that can meet the needs of all end users during times of increased water scarcity. The complexity of transboundary aquifers makes it difficult to comprehend their dynamics without the use of systems science tools that can keep track of the vast interconnections that impact these resources. Humans are a major driver for transboundary aquifers. Endogenously incorporating

human system components into transboundary water models is essential to studying the potential impacts of decisions on these resources. Systems science research, through the application of SD, has paved the way for future work that can more comprehensively understand the complexities of transboundary aquifers and provide decision-makers with critical information about the potential impacts of their actions. These research efforts are time-sensitive for New Mexicans due to realities of overextraction of the Mesilla Basin/Conejos Médanos in the face of diminishing surface water supplies, as well as populations around the world experiencing similar uncertainties.

References

- Acero Triana, Juan S., Maria L. Chu, Jorge A. Guzman, Daniel N. Moriasi, and Jean L. Steiner. 2020. "Evaluating the Risks of Groundwater Extraction in an Agricultural Landscape under Different Climate Projections." *Water* 12 (2): 400. <https://doi.org/10.3390/w12020400>.
- Bingaman, Jeff. 2006. United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act. 42 U.S.C. 10303.
- Blair, P., and W. Buytaert. 2016. "Socio-Hydrological Modelling: A Review Asking 'Why, What and How?'" *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (1): 443–78. <https://doi.org/10.5194/hess-20-443-2016>.
- Blatter, Joachim, and Helen M. Ingram. 2001. "Reflections on Water New Approaches to Transboundary Conflicts and Cooperation." */z-wcorg/*. 2001. <https://doi.org/10.7551/mitpress/5844.001.0001>.
- Brown, Casey M., Jay R. Lund, Ximing Cai, Patrick M. Reed, Edith A. Zagona, Avi Ostfeld, Jim Hall, Gregory W. Characklis, Winston Yu, and Levi Brekke. 2015. "The Future of Water Resources Systems Analysis: Toward a Scientific Framework for Sustainable Water Management." *Water Resources Research* 51 (8): 6110–24. <https://doi.org/10.1002/2015WR017114>.
- Choudhury, Enamul, Shafiqul Islam, and Lawrence Susskind, eds. 2018. *Complexity of Transboundary Water Conflicts: Enabling Conditions for Negotiating Contingent Resolutions*. Anthem Press. <https://www.cambridge.org/core/books/complexity-of-transboundary-water-conflicts/655B9581E59A35F2E20E3E7547FFB6B7>.
- Cobos, Gabriel de los. 2018. "The Genevese Transboundary Aquifer (Switzerland-France): The Secret of 40 Years of Successful Management." *Journal of Hydrology: Regional Studies, Special Issue on International Shared Aquifer Resources Assessment and Management*, 20 (December): 116–27. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.003>.
- Condon, Laura E., and Reed M. Maxwell. 2019. "Simulating the Sensitivity of Evapotranspiration and Streamflow to Large-Scale Groundwater Depletion." *Science Advances* 5 (6): eaav4574. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav4574>.
- Di Baldassarre, G., A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, J. L. Salinas, and G. Blöschl. 2013. "Socio-Hydrology: Conceptualising Human-Flood Interactions." *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (8): 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>.
- Duran-Encalada, J. A., A. Paucar-Caceres, E. R. Bandala, and G. H. Wright. 2017. "The Impact of Global Climate Change on Water Quantity and Quality: A System Dynamics Approach to the US-Mexican Transborder Region." *European Journal of Operational Research* 256 (2): 567–81. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>.
- Eckstein, Gabriel, and Yoram Eckstein. 2003. "A Hydrogeological Approach to Transboundary Ground Water Resources and International Law." *American University International Law Review* 19 (2): 201–58.
- Falkenmark, Malin. 1977. "Water and Mankind—A Complex System of Mutual Interaction." *Ambio* 6 (1): 3–9.
- Falkenmark, Malin. 1979. "Main Problems of Water Use and Transfer of Technology." *GeoJournal* 3 (5): 435–43.
- Famiglietti, J. S. 2014. "The Global Groundwater Crisis." *Nature Climate Change* 4 (October): 945–48. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>.
- Fernald, Alexander G., Terrell T. Baker, and Steven J. Guldan. 2007. "Hydrologic, Riparian, and Agroecosystem Functions of Traditional Acequia Irrigation Systems." *Journal of Sustainable Agriculture* 30 (2): 147–71.
- Fernald Alexander G., Cevik S. Yeliz, Ochoa Carlos G., Tidwell Vincent C., King J. Phillip, and Guldan Steven J. 2010. "River Hydrograph Retransmission Functions of Irrigated Valley Surface Water-Groundwater Interactions." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136 (12): 823–35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000265](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000265).
- Fernald, Alexander G., S. Guldan, K. Boykin, A. Cibils, M. Gonzales, B. Hurd, S. Lopez, *et al.* 2015. "Linked Hydrologic and Social Systems That Support Resilience of Traditional Irrigation Communities." *Hydrology and Earth System Sciences; Katlenburg-Lindau* 19 (1): 293. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-19-293-2015>.
- Fernald, Alexander G., Vincent Tidwell, José Rivera, Sylvia Rodríguez, Steven Guldan, Caitriana Steele, Carlos Ochoa, *et al.* 2012. "Modeling Sustainability of Water, Environment, Livelihood, and Culture in Traditional Irrigation Communities and Their Linked Watersheds." *Sustainability* 4 (11): 2998–3022. <https://doi.org/10.3390/su4112998>.

- Giordano, Mark, and Tushaar Shah. 2014. "From IWRM Back to Integrated Water Resources Management." *International Journal of Water Resources Development* 30 (3): 364–76. <https://doi.org/10.1080/07900627.2013.851521>.
- Gleick, Peter H. 2002. "Water Management: Soft Water Paths." *Nature* 418 (6896): 373–373. <https://doi.org/10.1038/418373a>.
- Guldan, Steven J., Alexander G. Fernald, Carlos G. Ochoa, and Vincent C. Tidwell. 2013. "Collaborative Community Hydrology Research in Northern New Mexico." *Journal of Contemporary Water Research & Education* 152 (1): 49–54. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2013.03167.x>.
- Hall, Jim W. 2019. "Socio-Hydrology in Perspective—Circa 2018." *Water Resources Research* 55 (3): 1776–77. <https://doi.org/10.1029/2019WR024870>.
- Hawley, J. W., B. J. Hibbs, J. F. Kennedy, B.J. Creel, M.D. Remmenga, M. Johnson, M.M. Lee, and P. Dinterman. 2000. "Trans-International Boundary Aquifers in Southwest New Mexico." Technical Completion Report X-996350-01-03. New Mexico Water Resources Research Institute.
- Hawley, John, John Kennedy, and Bobby Creel. 2001. "The Mesilla Basin Aquifer System of New Mexico, West Texas, and Chihuahua— An Overview of Its Hydrogeologic Framework and Related Aspects of Groundwater Flow and Chemistry." In *Aquifers of West Texas: Texas Water Development Board Special Conference Proceeding Volume*, edited by S. Angle and R. Mace, 76–99.
- IGRAC. 2015. "Transboundary Aquifers of the World." Delft, Netherlands: UNESCO International Hydrologic Programme.
- Ingram, Helen M., Nancy R. Laney, and David M. Gillilan. 1995. *Divided Waters: Bridging the U.S.-Mexico Border*. Tucson: University of Arizona Press.
- Jägerskog, Anders. 2013. "Transboundary Water Management – Why It Is Important and Why It Needs to Be Developed." In *Free Flow: Reaching Water Security Through Cooperation*, 49–52. UNESCO Publishing, a.
- Lach, Denise. 2014. "Challenges of Interdisciplinary Research: Reconciling Qualitative and Quantitative Methods for Understanding Human–Landscape Systems." *Environmental Management* 53 (1): 88–93. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0115-8>.
- Lall, Upmanu, Laureline Josset, and Tess Russo. 2020. "A Snapshot of the World's Groundwater Challenges." *Annual Review of Environment and Resources* 45 (1): 171–94. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>.
- Langarudi, Saeed P., Connie M. Maxwell, Yining Bai, Austin Hanson, and Alexander G. Fernald. 2019. "Does Socioeconomic Feedback Matter for Water Models?" *Ecological Economics* 159 (May): 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.009>.
- Levy, Marion J. 1950. "Some Basic Methodological Difficulties in Social Science." *Philosophy of Science* 17 (4): 287–301.
- Loucks, Daniel P. 2015. "Debates—Perspectives on Socio-Hydrology: Simulating Hydrologic-Human Interactions." *Water Resources Research* 51 (6): 4789–94. <https://doi.org/10.1002/2015WR017002>.
- Lund, Jay R. 2015. "Integrating Social and Physical Sciences in Water Management." *Water Resources Research* 51 (8): 5905–18. <https://doi.org/10.1002/2015WR017125>.
- Mashaly, Ahmed F., and Alexander G. Fernald. 2020. "Identifying Capabilities and Potentials of System Dynamics in Hydrology and Water Resources as a Promising Modeling Approach for Water Management." *Water* 12 (5): 1432. <https://doi.org/10.3390/w12051432>.
- Maxwell, Connie M., Saeed P. Langarudi, and Alexander G. Fernald. 2019. "Simulating a Watershed-Scale Strategy to Mitigate Drought, Flooding, and Sediment Transport in Drylands." *Systems* 7 (4): 53. <https://doi.org/10.3390/systems7040053>.
- Megdal, Sharon B. 2018. "Invisible Water: The Importance of Good Groundwater Governance and Management." *Npj Clean Water* 1 (1): 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0015-9>.
- Page, Ashley, Saeed P. Langarudi, Sue Forster-Cox, and Alexander Fernald. 2019. "A Dynamic Hydro-Socio-Technical Policy Analysis of Transboundary Desalination Development." *Journal of Environmental Accounting and Management* 7 (1): 87–114. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2019.3.007>.
- Phan, Thuc D., Edoardo Bertone, and Rodney A. Stewart. 2021. "Critical Review of System Dynamics Modelling Applications for Water Resources Planning and Management." *Cleaner Environmental Systems* 2 (June): 100031. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>.
- Rossini, Frederick A., and Alan L. Porter. 1979. "Frameworks for Integrating Interdisciplinary Research." *Research Policy* 8 (1): 70–79. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(79\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0048-7333(79)90030-1).
- Sanchez, Rosario, and Gabriel Eckstein. 2017. "Aquifers Shared Between Mexico and the United States: Management Perspectives and Their Transboundary Nature." *Groundwater* 55 (4): 495–505. <https://doi.org/10.1111/gwat.12533>.
- Scanlon, Bridget R., Claudia C. Faunt, Laurent Longuevergne, Robert C. Reedy, William M. Alley, Virginia L. McGuire, and Peter B. McMahon. 2012. "Groundwater Depletion and Sustainability

- of Irrigation in the US High Plains and Central Valley.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (24): 9320–25. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200311109>.
- Sehlke, Gerald, and Jake Jacobson. 2005. “System Dynamics Modeling of Transboundary Systems: The Bear River Basin Model.” *Groundwater* 43 (5): 722–30. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00065.x>.
- Shao, Zhiying, Fengping Wu, Fang Li, Yue Zhao, and Xia Xu. 2020. “System Dynamics Model for Evaluating Socio-Economic Impacts of Different Water Diversion Quantity from Transboundary River Basins—A Case Study of Xinjiang.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (23): 9091. <https://doi.org/10.3390/ijerph17239091>.
- Sheng, Zhuping. 2013. “Impacts of Groundwater Pumping and Climate Variability on Groundwater Availability in the Rio Grande Basin.” *Ecosphere* 4 (1): 1–25. <https://doi.org/10.1890/ES12-00270.1>.
- Sindico, Francesco, Ricardo Hirata, and Alberto Manganeli. 2018. “The Guarani Aquifer System: From a Beacon of Hope to a Question Mark in the Governance of Transboundary Aquifers.” *Journal of Hydrology: Regional Studies, Special Issue on International Shared Aquifer Resources Assessment and Management*, 20 (December): 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>.
- Sivapalan, Murugesu, Hubert H. G. Savenije, and Günter Blöschl. 2012. “Socio-Hydrology: A New Science of People and Water.” *Hydrological Processes* 26 (8): 1270–76. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>.
- Tapia-Villaseñor, Elia M., and Sharon B. Megdal. 2021. “The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration.” *Water* 13 (4): 530. <https://doi.org/10.3390/w13040530>.
- Tayia, Ahmed. 2019. “Transboundary Water Conflict Resolution Mechanisms: Substitutes or Complements.” *Water* 11 (7): 1337. <https://doi.org/10.3390/w11071337>.
- Taylor, Richard G., Bridget Scanlon, Petra Döll, Matt Rodell, Rens van Beek, Yoshihide Wada, Laurent Longuevergne, *et al.* 2013. “Ground Water and Climate Change.” *Nature Climate Change* 3 (4): 322–29. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>.
- Troy, Tara J., Mitchell Pavao-Zuckerman, and Tom P. Evans. 2015. “Debates—Perspectives on Socio-Hydrology: Socio-Hydrologic Modeling: Tradeoffs, Hypothesis Testing, and Validation.” *Water Resources Research* 51 (6): 4806–14. <https://doi.org/10.1002/2015WR017046>.
- Turner, Benjamin L., Vincent Tidwell, Alexander Fernald, José A. Rivera, Sylvia Rodriguez, Steven Guldan, Carlos Ochoa, Brian Hurd, Kenneth Boykin, and Andres Cibils. 2016. “Modeling Acequia Irrigation Systems Using System Dynamics: Model Development, Evaluation, and Sensitivity Analyses to Investigate Effects of Socio-Economic and Biophysical Feedbacks.” *Sustainability* 8 (10): 1019. <https://doi.org/10.3390/su8101019>.
- Vaux, Henry. 2011. “Groundwater under Stress: The Importance of Management.” *Environmental Earth Sciences* 62 (1): 19–23. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0490-x>.
- Vogel, Richard M., Upmanu Lall, Ximing Cai, Balaji Rajagopalan, Peter K. Weiskel, Richard P. Hooper, and Nicholas C. Matalas. 2015. “Hydrology: The Interdisciplinary Science of Water.” *Water Resources Research* 51 (6): 4409–30. <https://doi.org/10.1002/2015WR017049>.
- Wada, Yoshihide, and Lena Heinrich. 2013. “Assessment of Transboundary Aquifers of the World—Vulnerability Arising from Human Water Use.” *Environmental Research Letters* 8 (2): 024003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024003>.
- Wilder, Margaret O., Robert G. Varady, Andrea K. Gerlak, Stephen P. Mumme, Karl W. Flessa, Adriana A. Zuniga-Teran, Christopher A. Scott, Nicolás Pineda Pablos, and Sharon B. Megdal. 2020. “Hydrodiplomacy and Adaptive Governance at the U.S.-Mexico Border: 75 Years of Tradition and Innovation in Transboundary Water Management.” *Environmental Science & Policy* 112 (October): 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.013>.
- Yuan, Liang, Weijun He, Dagmawi Mulugeta Degefu, Zaiyi Liao, Xia Wu, Min An, Zhaofang Zhang, and Thomas Stephen Ramsey. 2020. “Transboundary Water Sharing Problem; a Theoretical Analysis Using Evolutionary Game and System Dynamics.” *Journal of Hydrology* 582 (March): 124521. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124521>.

III

Modelación hidrológica (aguas superficiales y subterráneas)

Hydrological Modeling (Surface and Groundwater)

III.1 Simulación del flujo del agua subterránea de la porción mexicana del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco

Simulation of groundwater flow in the Mexican portion of the Valle de Juárez - Bolsón del Hueco aquifer.

Adán Pinales Munguía¹, Arturo Soto Ontiveros², Alfredo Granados Olivas², Sergio Saúl Solís², Humberto Silva Hidalgo¹, María Socorro Espino Valdés¹, Rodrigo De La Garza Aguilar¹

¹ Universidad Autónoma de Chihuahua, ² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Resumen

El acuífero Valle de Juárez/Bolsón del Hueco compartido entre México y Estados Unidos, como muchos transfronterizos en el mundo, ve alterada su dirección de flujo subterráneo principal por la distribución espacial y temporal del bombeo en ambos lados de la frontera. En condiciones naturales, el flujo subterráneo era similar al superficial, hacia el río Bravo desde las zonas topográficamente más elevadas en ambos países. En México, el acuífero presenta un déficit de 76.73 hm³/año en términos de la NOM-011-CONAGUA-2015, por lo que es prioridad desarrollar herramientas numéricas para el análisis de escenarios. El alcance de este estudio fue construir un modelo matemático del acuífero Valle de Juárez/Bolsón del Hueco y simular el flujo subterráneo en México. Se definió una malla de 211 filas y 189 columnas, con 8 capas, incorporando 625 pozos de extracción y 417 puntos de observación y definiendo 29 zonas de asignación de conductividad hidráulica, 15 de coeficiente de almacenamiento y 98 de recarga. Para la calibración del modelo se determinó el periodo de 1969 a 2013 y se mantuvo la condición de 2013 hasta 2020 (actual). Se simularon seis escenarios de 2020 a 2070 bajo diversas condiciones de extracción (actual e incrementos) y de recarga natural (actual y disminución). En todos los casos se confirma que la dirección principal de flujo persiste de sureste a noreste, desde las sierras/lomeríos hacia el río Bravo, a excepción de la ubicación de Ciudad Juárez (norte), que presenta un cono de abatimiento, induciendo flujo de las zonas adyacentes. Se obtuvo un abatimiento máximo de 129.0 m cuando el bombeo se incrementa un 10 % (escenario

3) y un abatimiento medio de 16.0 m cuando la recarga disminuye un 30 % (escenario 6).

Abstract

The Valle de Juarez/Hueco Bolson aquifer shared between Mexico and the United States, as many transboundary areas in the world, has its groundwater flow directions altered due the spatial and temporal distribution of pumping on both sides of the border. Under natural conditions, the groundwater flow pattern was similar to the surface runoff, from topographic higher areas in both countries to the Río Grande main course. In Mexico, the aquifer has a deficit of 76.73 hm³ / year in terms of NOM-011-CONAGUA-2015, so it is a priority to develop numerical tools for scenario analysis. The scope of this study was to build the Valle de Juarez/Hueco Bolson aquifer mathematical model and simulate the groundwater flow behavior in Mexico side. 211 lines and 189 columns mesh with 8 layers was defined; 625 abstractions wells and 417 observation wells were included; also, were assigned 29 areas for hydraulic conductivity, 15 for storage coefficient and 98 for recharge. Period from year 1969 to 2013 was used for model calibration, and then 2013-year condition was preserved until 2020 (current). Six scenarios were simulated from 2020 to 2070, considering various pumping conditions (current and increments) and natural recharge (current and decrements). In all cases, it is confirmed that main flow direction persists from southeast to northeast, from mountains/hills to the Río Bravo, except for the Ciudad Juarez location (north) which presents a groundwater depression cone, inducing flow from adjacent areas. A maximum groundwater decline of 129 m was obtained when pumping was increased 10 % (scenario 3) and 16.0 m mean decline when recharge decreases 30% (scenario 6).

Introducción

La modelación de fenómenos físicos se puede realizar mediante modelos físicos o matemáticos, en estado estacionario o en transitorio (Anderson *et al.* 2015). Los fenómenos en estado estacionario solo requieren pocas mediciones en el tiempo, sin embargo, los fenómenos transitorios requieren de mediciones frecuentes y sistemáticas, hasta que el fenómeno cambie a un estado estacionario o se detenga.

Los acuíferos de la República mexicana se pueden encontrar en una de estas dos condiciones. En el caso particular del acuífero Valle de Juárez/Bolsón del

Hueco, este se encuentra en estado transitorio, por lo que es necesario recabar datos de manera periódica y sistemática. Esta información, posteriormente se puede utilizar para realizar diversos análisis y estudios, tales como de hidrogeología, disponibilidad, modelación de flujo, modelación de flujo y transporte advectivo, dispersivo, e incluso reacciones químicas (Schlumberger, 2006).

La modelación del flujo del agua subterránea constituye una herramienta que permite entender a mayor detalle el comportamiento de los principales componentes que integran un acuífero, es decir, medio ambiente, ser humano, agua y material geológico, los cuales interactúan de manera matemática para generar un comportamiento o predicción a corto, mediano o largo plazo, que pueden ser usados para tomar decisiones acerca de cómo administrar o gestionar de mejor manera un acuífero (Sanz-Lobón *et al.* 2015; Cerón *et al.* 2021).

Por su parte, el agua es uno de los compuestos más abundantes en la corteza terrestre, sin embargo, la mayor cantidad no es apta para uso y consumo humanos. Por ello, el ser humano ha recurrido al aprovechamiento del agua superficial producto de la precipitación pluvial, a los manantiales y, por supuesto, al aprovechamiento del agua subterránea.

En México, la Ley de Aguas Nacionales establece que la reglamentación de acuíferos, en cuanto a la explotación, aprovechamiento o uso de las aguas nacionales del subsuelo, así como el control de las extracciones, incluyendo las localizadas en las zonas de libre alumbramiento del agua subterránea, le compete al Ejecutivo Federal (DOF, 1992).

Así también, la Ley de Aguas Nacionales señala que, para el otorgamiento de concesión o asignación del líquido, deberá tomarse en cuenta la disponibilidad media anual, la cual deberá publicar la Comisión Nacional del Agua al menos cada tres años (DOF, 1992).

Es por ello que el 17 de septiembre de 2020 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea de 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos (DOF, 2020). De estos 653 acuíferos, 378 cuentan con disponibilidad del agua subterránea que representa el 57.9 %; 275 tienen un déficit, que representa el 42.1 %, y el volumen total medio anual de los acuíferos que cuentan con disponibilidad en México es de 17 963.51 hm³/año y en los que presentan déficit es de -9610.85 hm³/año (Figura 1).

En cuanto a la recarga total y la descarga natural comprometida, así como la extracción o volumen concesionado (descarga total) de agua subterránea de la República mexicana reportada por la Comisión Nacional del Agua en el DOF en septiembre de 2020, es de 92 404 y 84 051.33 hm³/año, respectivamente, lo que representa una diferencia positiva de disponibilidad en el país de 8352.67 hm³/año, que corresponde a tan solo el 9.04 % de la recarga total anual.

Por lo que respecta al estado de Chihuahua, la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal Chihuahua, administra 61 acuíferos, de los cuales 19 cuentan con disponibilidad del agua subterránea, que representa el 31.1 %, y 42 acuíferos tienen un déficit en su disponibilidad, que representa el 68.9 % (Figura 2). Así también, el volumen total disponible medio anual del estado de Chihuahua es de 344.69 hm³/año y el déficit es de -3,656.95 hm³/año, que representa el 20 % de la disponibilidad y el 38.05 % del déficit de la República mexicana (DOF, 2020).

En cuanto a la recarga, se puede tener la natural por lluvia, por retorno de riego y lineal a través de corrientes de agua y cuerpos de agua, donde la recarga total es la suma de ellas. Con respecto a la descarga se pueden presentar la natural comprometida y la extracción o volumen concesionado (descarga total) del agua subterránea. La recarga y la descarga totales para los 61 acuíferos localizados en el estado de Chihuahua es de 3899.70 y 7211.96 hm³/año, respectivamente, lo que representa una diferencia negativa en el estado de Chihuahua de -3312.26 hm³/año, que corresponde al 84.94 % adicional al total de la recarga de agua subterránea.

El acuífero Valle de Juárez o Bolsón del Hueco forma parte de los que presentan un déficit de la disponibilidad en el estado de Chihuahua, la cual es de -76.73 hm³/año, que corresponde al 2.1 % del déficit del estado. Presenta una recarga media anual de 125.9 hm³/año, no cuenta con descarga natural comprometida, el volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas es de 193.311522 hm³/año, el volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente es de 3.06182 hm³/año y finalmente, el volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA es de 0.257 hm³/año (DOF, 2020).

Lo anterior muestra que, tanto a nivel nacional como estatal, algunos acuíferos tienen déficit, por lo que una manera de conocer el comportamiento del acuífero a

futuro y de contribuir a una mejor administración de este es a través de la construcción, operación y actualización frecuente de un modelo de flujo del agua subterránea. Considerando lo anterior, el objetivo de este artículo fue construir un modelo matemático y simular el flujo del agua subterránea del acuífero Valle de Juárez/Bolsón del Huevo para conocer el comportamiento de los niveles de agua al año 2070 para seis escenarios hipotéticos. Esta

modelación de la porción mexicana del acuífero Bolsón del Huevo queda enmarcada dentro del proyecto de investigación denominado “Sustainable water resources for irrigated agriculture in a desert river basin facing climate change and urban growth: from characterization to solutions”, financiado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

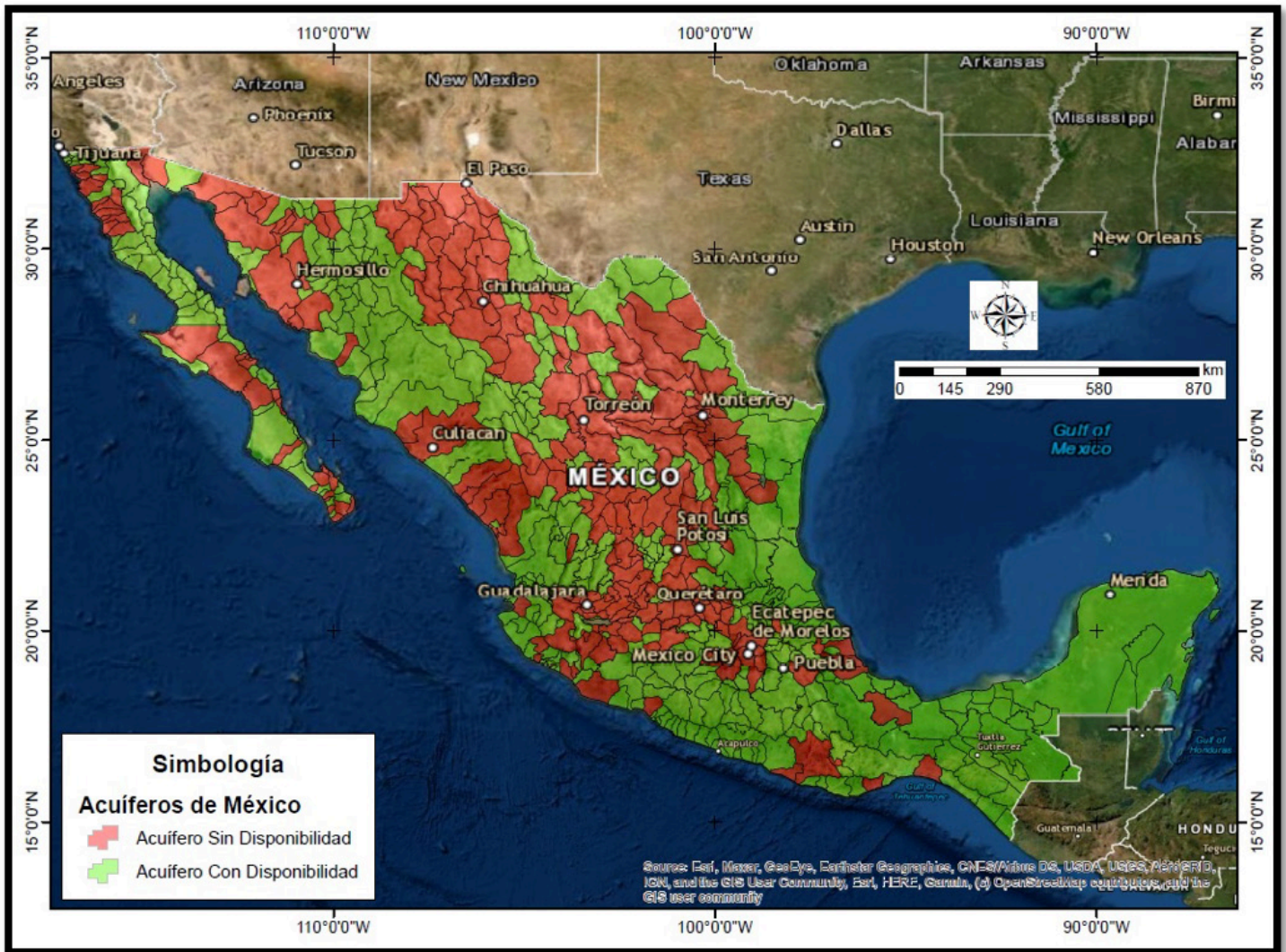


FIGURA 1: Distribución de los 653 acuíferos con o sin disponibilidad en la República mexicana (DOF, 2020).

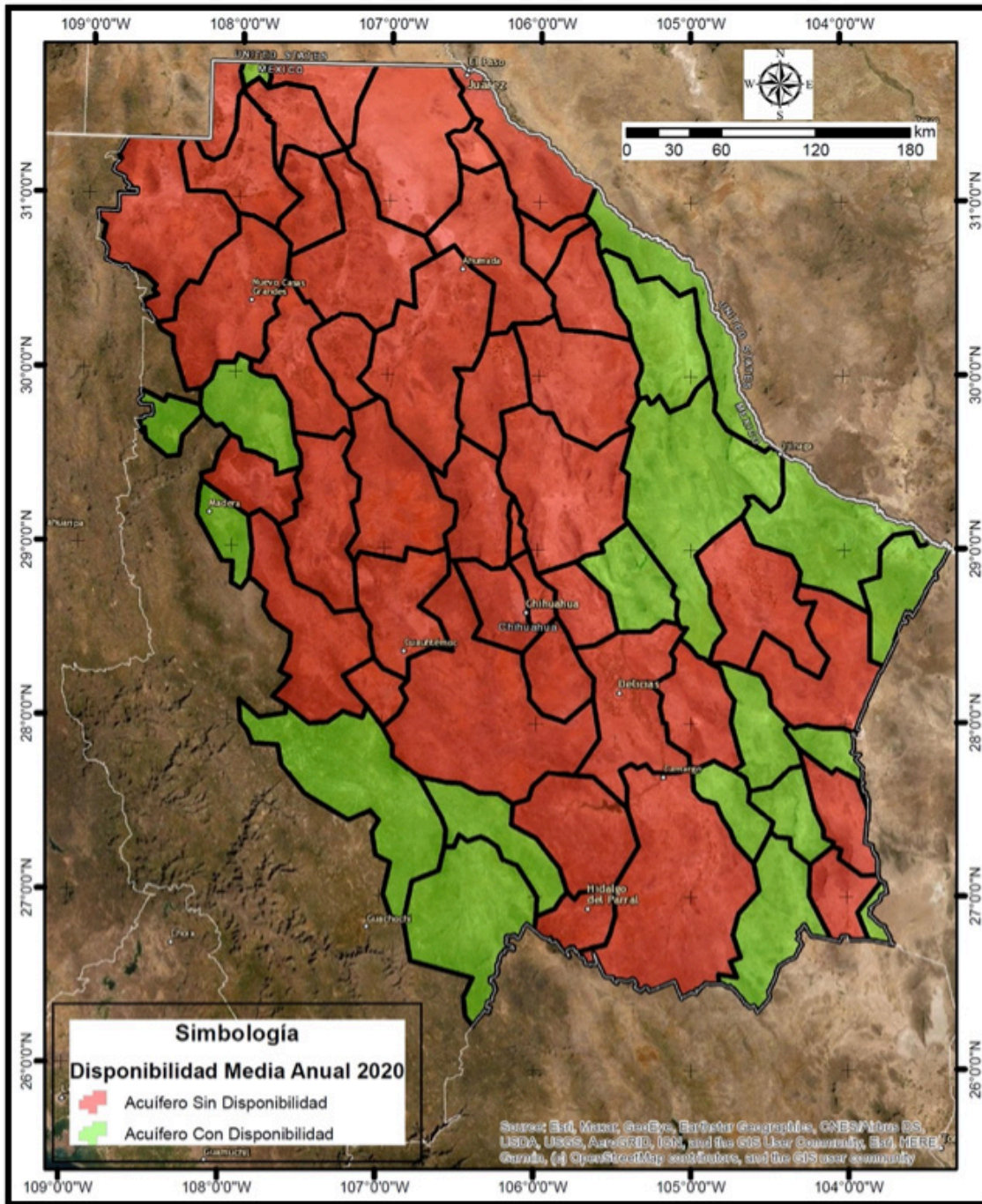


FIGURA 2: Distribución de los 61 acuíferos con o sin disponibilidad dentro del estado de Chihuahua (DOF, 2020).

Materiales y métodos

Para la construcción de un modelo matemático es necesario contar con información del área de estudio y aplicar un protocolo de modelación (Anderson y Woessner, 1992). Cuando se decide construir el modelo, el primer paso es definir el modelo conceptual (Matteoda *et al.* 2011; Betancur y Palacio, 2009). Luego, se deberá seleccionar el código de computadora, diseñar la malla, zonificar las propiedades hidráulicas, especificar los esfuerzos hidrogeológicos (bombeo y recarga, entre

otros) y asignar las condiciones iniciales y de frontera y, finalmente, considerar la calibración y verificación del modelo (Reilly y Harbaugh, 2004; Shishaye, 2020; Arfan, *et al.* 2020; De Caro, *et al.* 2020).

En forma general se puede establecer que el dominio del modelo puede cubrir varios cientos de kilómetros cuadrados. Sin embargo, la información hidrogeológica, el medio poroso y fracturado con los que se cuenta en la mayoría de las veces, es mínima y está sujeta a un alto grado de incertidumbre que se adquiere en las mediciones de campo e interpretaciones, así como al

error de extrapolación a todo el dominio del modelo. Por ello, se puede considerar que todos los elementos del modelo contienen un cierto nivel de error (Cui *et al.* 2021; Shishaye *et al.* 2020, Lykkegaard *et al.* 2021; Khatibi y Nadiri, 2021).

También es cierto que, debido a las dimensiones del modelo, estos errores se propagan tanto en el espacio como en el tiempo, pudiendo pasar de un elemento a otro debido a que todos ellos se encuentran interrelacionados a través de la ecuación general de flujo del agua subterránea –Ecuación (1)–, la cual se puede resolver a través de métodos numéricos (McDonald y Harbaugh, 1988; Ping-Cheng *et al.* 2021).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde: K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados x , y y z , los cuales se alinean con el eje principal de conductividad hidráulica (Lt^{-1}); h es la carga hidráulica simulada (L); W es el flujo volumétrico por unidad de volumen y representa una fuente (pozo de inyección) o sumidero (pozo de extracción), en (t^{-1}); S_s es el almacenamiento específico del material poroso (L^{-1}); y t es el tiempo (t).

El modelo se construyó en estado transitorio para el periodo de calibración, iniciando de 1 de enero de 1969 y terminando el 30 de diciembre de 2013 (44 años de simulación). El área del modelo comprende la delimitación total del acuífero Valle de Juárez (CONAGUA, 2020).

Para la construcción del modelo de flujo del agua subterránea se utilizó el código MODFLOW, integrado en el paquete Visual Modflow. Una vez construido y calibrado el modelo de flujo se plantearon seis escenarios de modelación o predicción. Estos escenarios plantean el incremento de la extracción del agua subterránea y/o el decremento de la recarga, cada uno de los cuales se describen a continuación (Hoang Phan *et al.* 2021; Sileshi *et al.* 2021):

- Escenario 1. Determinar el abatimiento que se tendría desde 2020 a 2070 si el bombeo se mantiene constante durante este periodo.
- Escenario 2. Determinar el abatimiento que se tendría de 2020 a 2070 si el bombeo se aumenta un 5 % cada diez años, iniciando el periodo comprendido entre los años 2020 y 2030 y hasta

llegar a 25 % en el periodo comprendido entre 2060 y 2070.

- Escenario 3. Determinar el abatimiento que se tendría de 2020 a 2070 si el bombeo se aumenta un 10 % cada diez años, iniciando el periodo comprendido entre 2020 y 2030 y hasta llegar a 50 % en el periodo comprendido entre 2060 y 2070.
- Escenario 4. Determinar el abatimiento que se tendría de 2020 a 2070 cuando se presenta una reducción del 30 % de la recarga del agua subterránea, si el bombeo se mantiene constante en el periodo comprendido de 2020 a 2070.
- Escenario 5. Determinar el abatimiento que se tendría de 2020 a 2070 cuando se presenta una reducción del 30 % de la recarga del agua subterránea y si el bombeo se aumenta un 5 % cada diez años, iniciando el periodo comprendido de 2020 a 2030 y hasta llegar a 25 % en el periodo comprendido de 2060 a 2070.
- Escenario 6. Determinar el abatimiento que se tendría de 2020 a 2070, cuando se presenta una reducción del 30 % de la recarga del agua subterránea y el bombeo se aumenta un 10 % cada diez años, iniciando el periodo comprendido de 2020 a 2030 y hasta llegar a 50 % en el periodo comprendido de 2060 a 2070.

Resultados y discusión

Estructura, propiedades hidráulicas y esfuerzos hidrogeológicos del modelo

Se construyó el modelo de flujo del acuífero Valle de Juárez o Bolón del Hueco, el cual se localiza en la porción norte de la República mexicana entre las coordenadas UTM wgs86, zona 13, en la longitud oeste 346,000 a 440,500 y de latitud norte 3'412,500 a 3'518,000. Su área es de 3386 km².

La malla del modelo en planta consta de 211 renglones, 189 columnas y 8 capas (Figuras 3). Cuenta con 625 pozos de extracción de agua subterránea y 417 pozos de observación (Figuras 4 y 5).

En cuanto a las propiedades hidráulicas y fronteras, el modelo cuenta con 29 zonas de conductividad hidráulica, 15 zonas de almacenamiento y 98 zonas de recarga (Figuras 6, 7 y 8). La zonificación de la recarga se obtuvo de la simulación del modelo SWAT (Soil and Water Analysis Tool) y se agregaron las áreas correspondientes a la agricultura, localidades urbanas y

rurales (Abd-Elmaboud *et al.* 2021; Persaud *et al.* 2020; Sileshi *et al.* 2021).

El diseño de la malla en diferencias finitas incluye toda el área del acuífero tanto en planta como en perfil. Los pozos de bombeo y de observación se encuentran localizados en la zona urbana de Ciudad Juárez, en la margen izquierda del río Bravo y algunos pozos se localizan en el pie de monte de la sierra San Ignacio, localizada al sur del acuífero. La distribución de la

conductividad hidráulica en 27 zonas distribuidas en el acuífero presenta un valor promedio de 1.030 m/d, con un valor máximo de 5.16 m/d y un valor mínimo de 0.00049 m/d, así también se encuentran dos zonas con valores mayores a los 5.16 m/d. El valor promedio del almacenamiento específico y del rendimiento específico son de 8.65×10^{-7} 1/m y 0.15, respectivamente. La recarga varía en función del tiempo, presentando valores promedio desde 17 y hasta 95 mm/año.

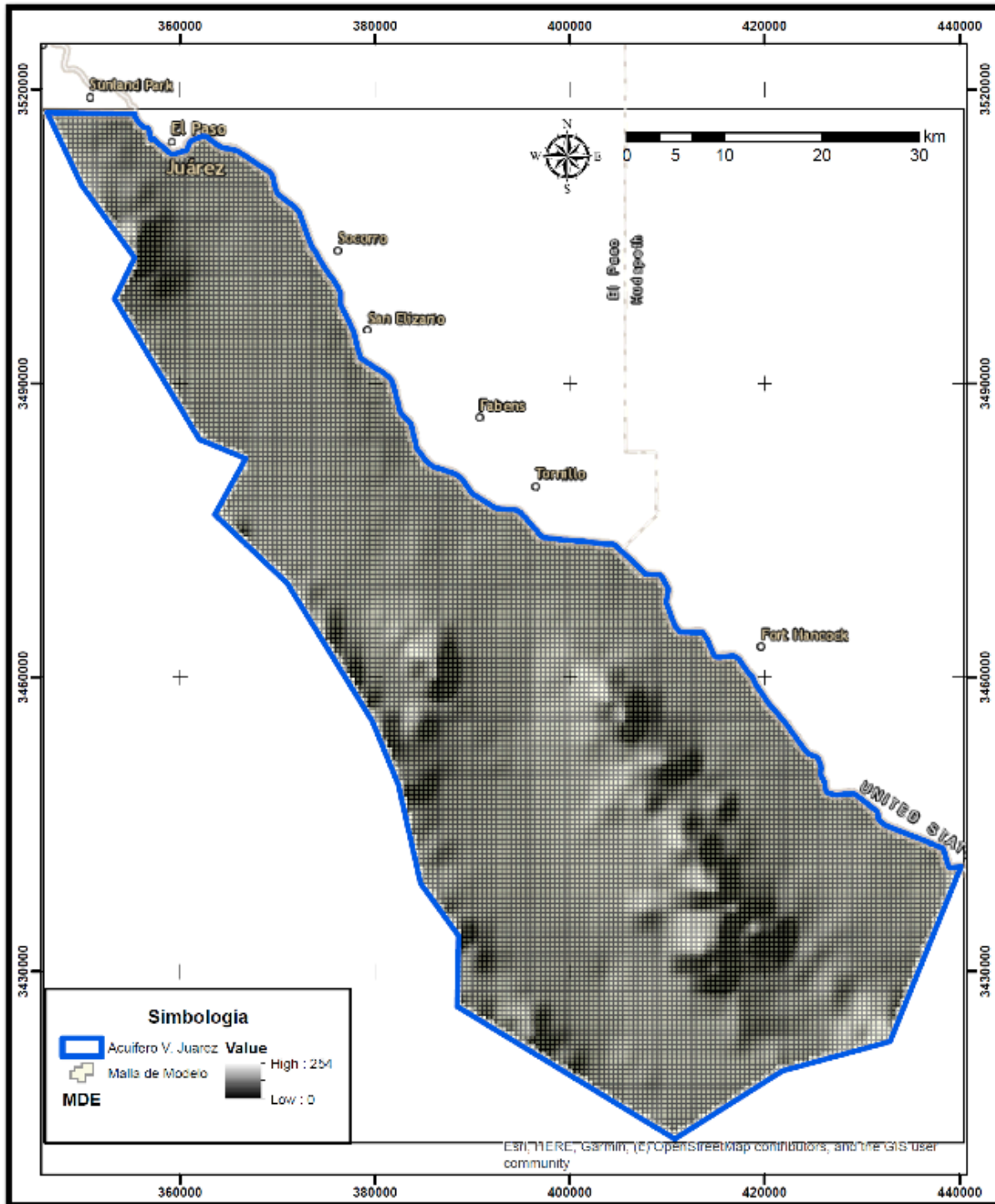


FIGURA 3: Malla en planta del modelo de flujo del acuífero Valle de Juárez.

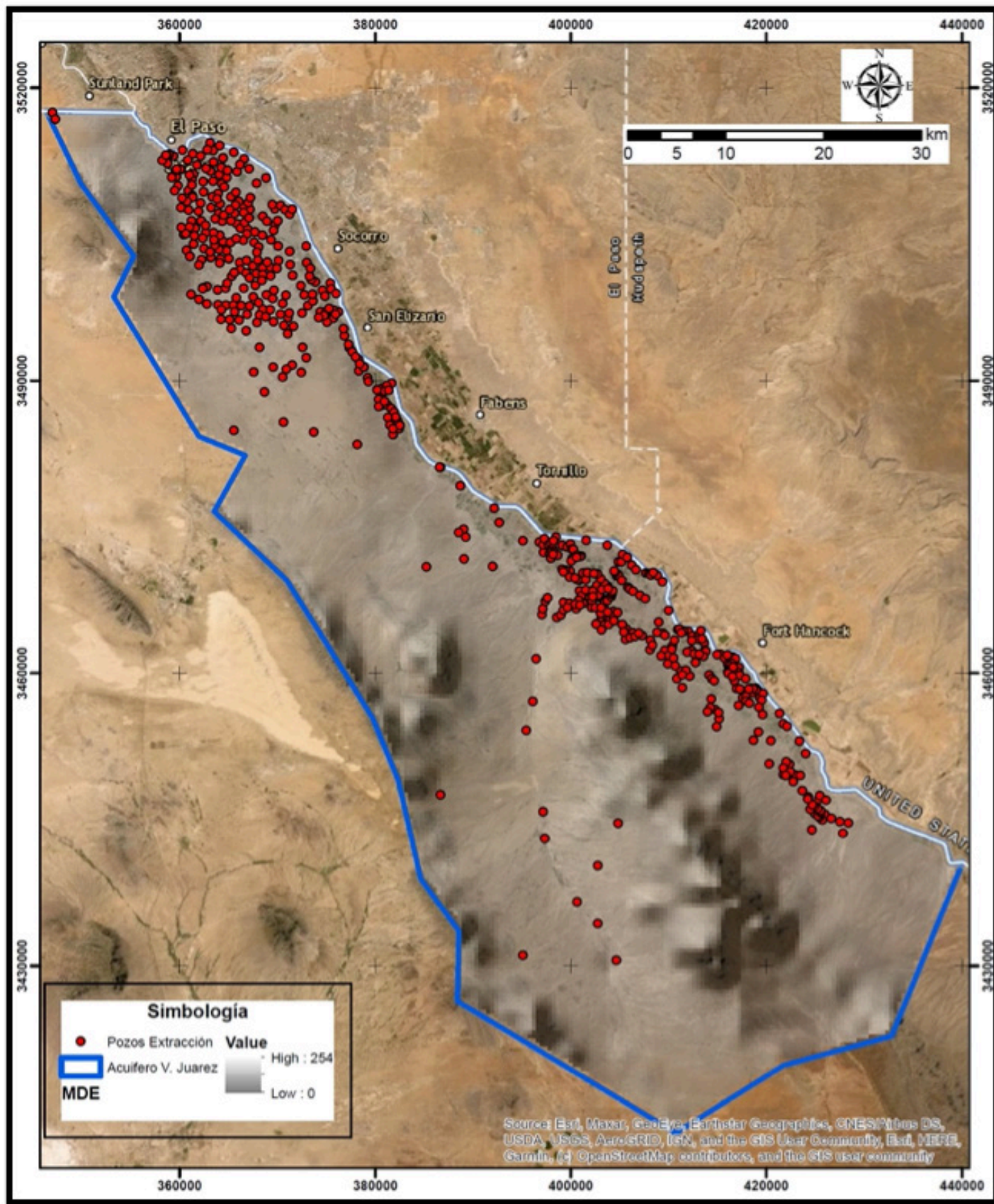


FIGURA 4: Localización de los pozos de extracción del agua subterránea.

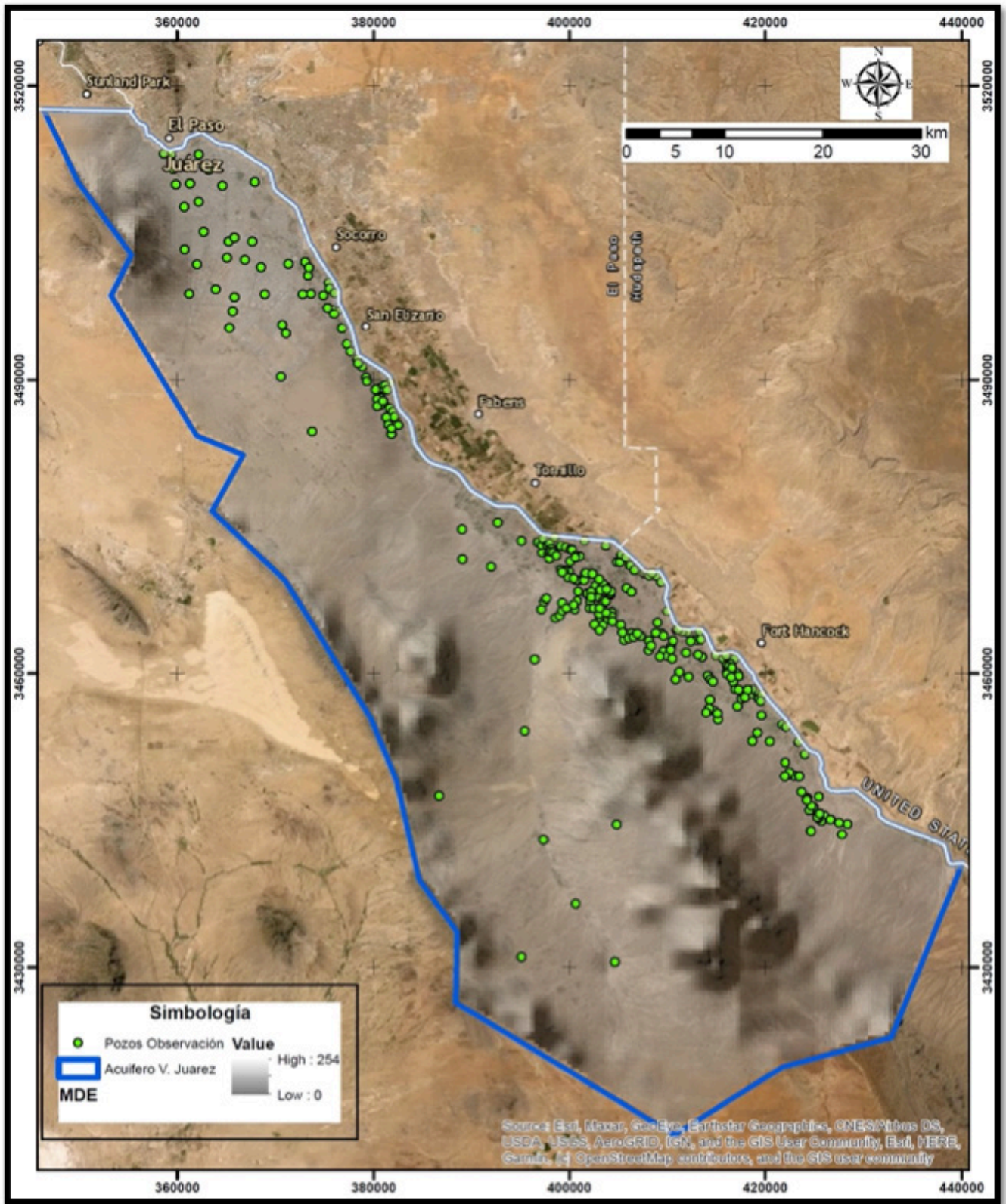


FIGURA 5: Localización de pozos de observación.

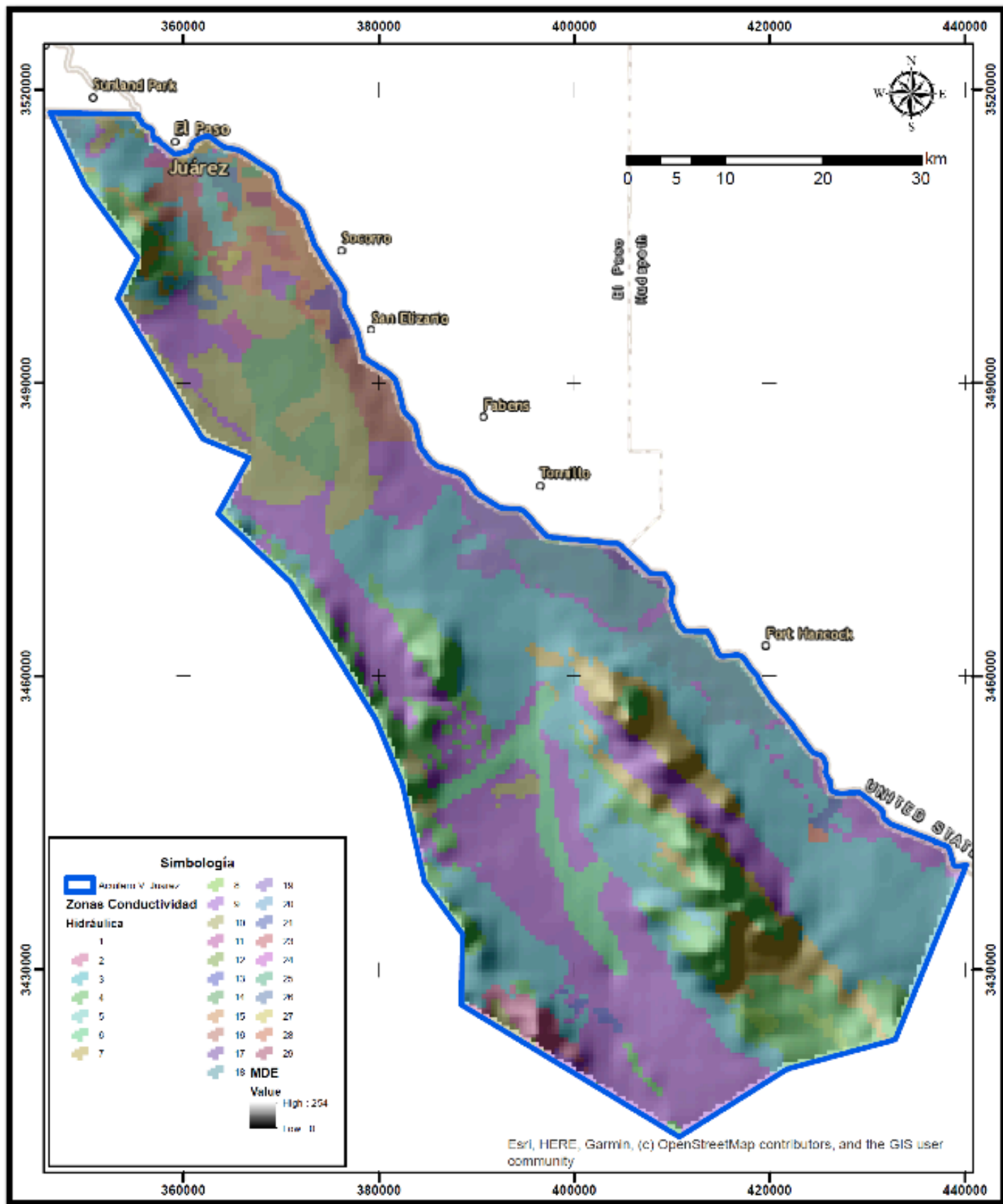


FIGURA 6: Distribución de la conductividad hidráulica del acuífero.

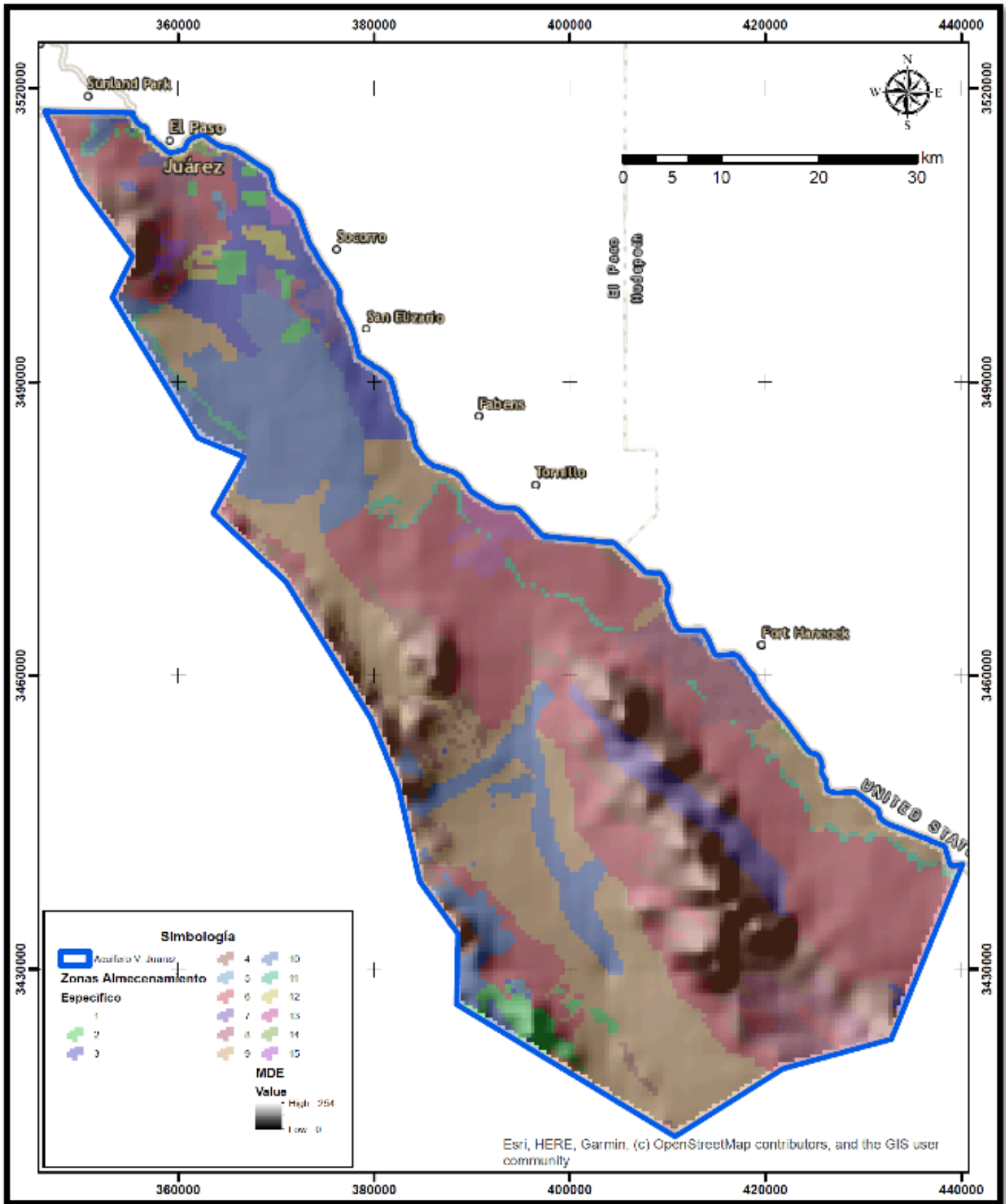


FIGURA 7: Distribución del almacenamiento y rendimiento específico.

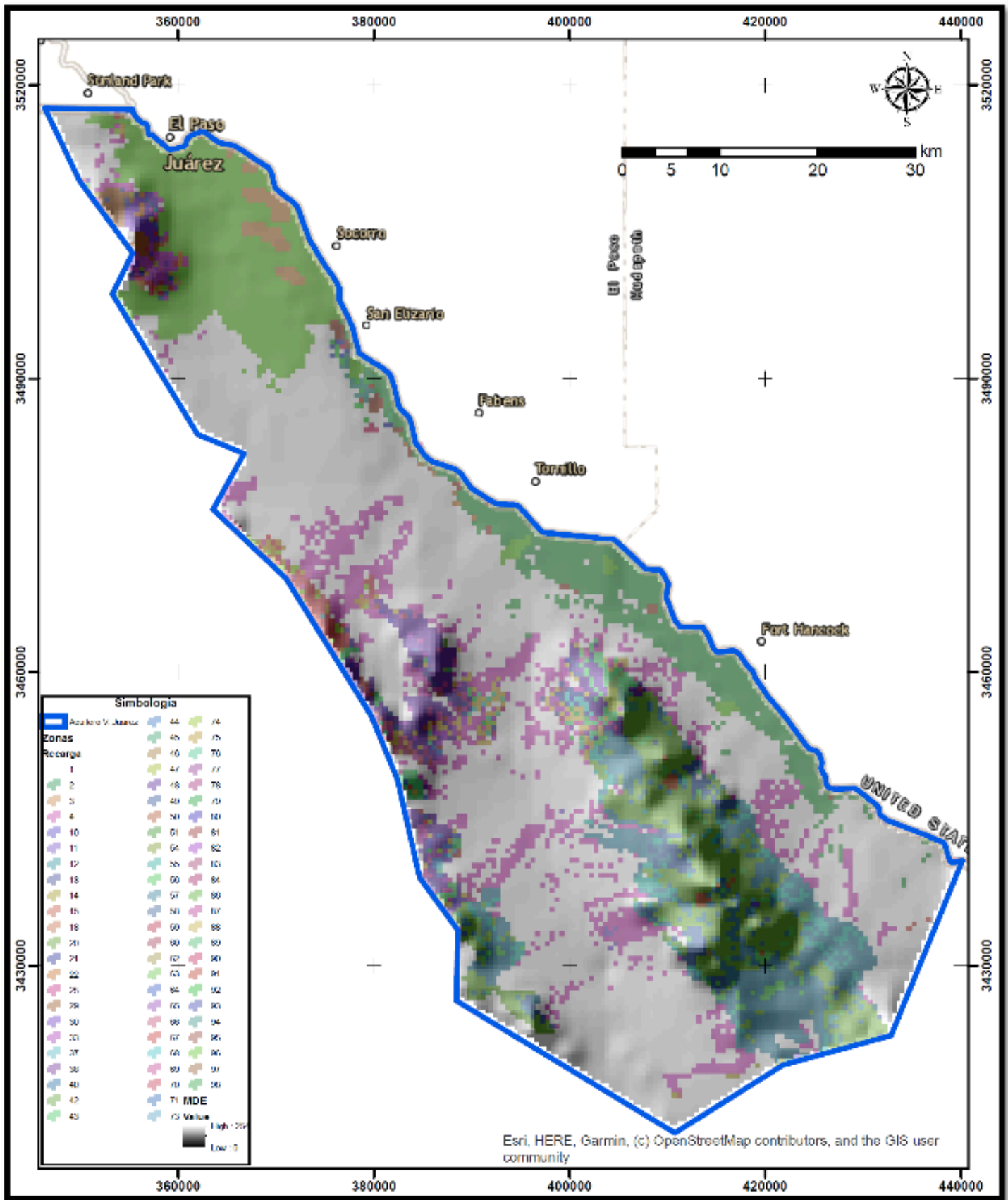


FIGURA 8: Distribución de la recarga obtenida con el modelo SWAT principalmente.

Los resultados de la simulación de cada uno de los escenarios se presentan a continuación.

Escenarios predictivos hasta 2070

- Simulación del escenario 1. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para el año 2070 se muestran en la Figura 9. El abatimiento máximo es de 60.3 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 6.1 m.
- Simulación del escenario 2. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para 2070 se muestran en la Figura 10. El abatimiento máximo es del orden de 126.8 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 10.2 m.
- Simulación del escenario 3. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para 2070 se muestran en la Figura 11. El abatimiento máximo es de 129.0 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 14.2 m.
- Simulación del escenario 4. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para 2070 se muestran en la Figura 12. El abatimiento máximo es de 74.4 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 8.4 m.
- Simulación del escenario 5. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para 2070 se muestran en la Figura 13. El abatimiento máximo es de 102.7 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 12.5 m.
- Simulación del escenario 6. Los resultados de la simulación del flujo del agua subterránea para el año 2070, se muestran en la Figura 14. El abatimiento máximo es de 111.4 m y el abatimiento promedio, considerando 306 aprovechamientos distribuidos en el acuífero, es de 16.0 m.

La simulación del flujo del agua subterránea del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, en seis escenarios, presenta dos comportamientos diferenciales. El primero en la porción norte por la zona urbana de Ciudad Juárez y sus alrededores y el segundo en el resto del acuífero. En la zona norte se muestra un cono de abatimiento que propicia un flujo desde la sierra Juárez hacia el este y desde el río Bravo hacia el oeste para converger en

el cono de abatimiento provocado principalmente por la extracción de agua para uso potable. Por su parte, en el resto del acuífero el flujo del agua subterránea muestra una dirección preferente de suroeste a noreste, hacia el río Bravo. Es importante destacar que no se observa modificaciones del flujo del agua subterránea en la mayor parte del acuífero, con excepción de la zona norte y los diferentes escenarios lo que muestran es una variación principalmente en la zona urbana de Ciudad Juárez.

Los abatimientos máximos simulados de 2020 a 2070 en el acuífero Valle de Juárez/Bolsón de Hueco, para los seis escenarios, se encuentran concentrados principalmente en la zona urbana de Ciudad Juárez y van desde 60.3 a 129.0 m, con una pérdida de la capacidad de extracción de los pozos distribuidos en el acuífero. En cuanto al abatimiento medio de 306 pozos de observación distribuidos en el acuífero, este se encuentra entre 6.11 y 16.0 m, que representa o sería equivalente a un descenso horizontal del agua subterránea en estas zonas de los pozos de observación.

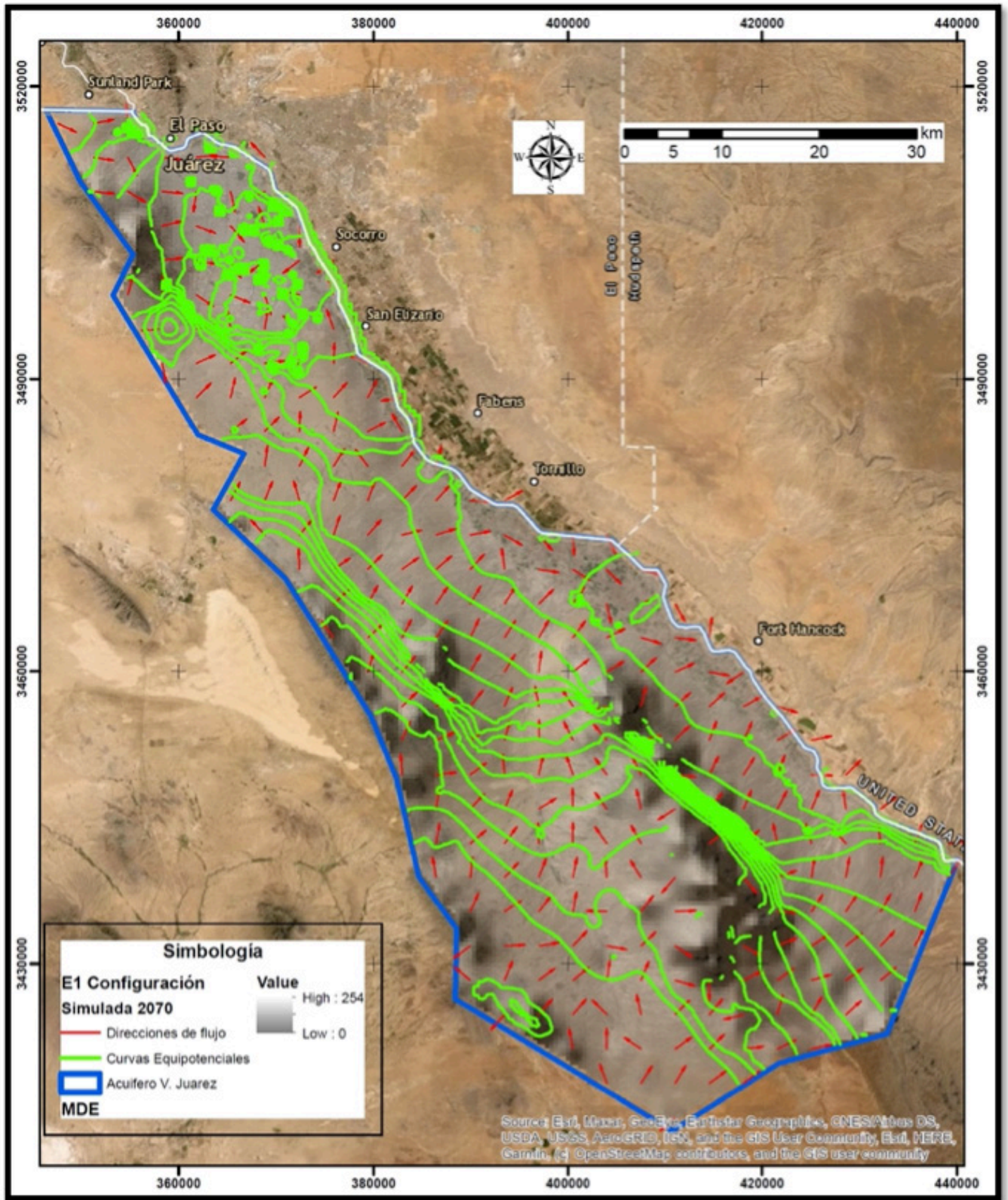


FIGURA 9: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo para el año 2070 (escenario 1).

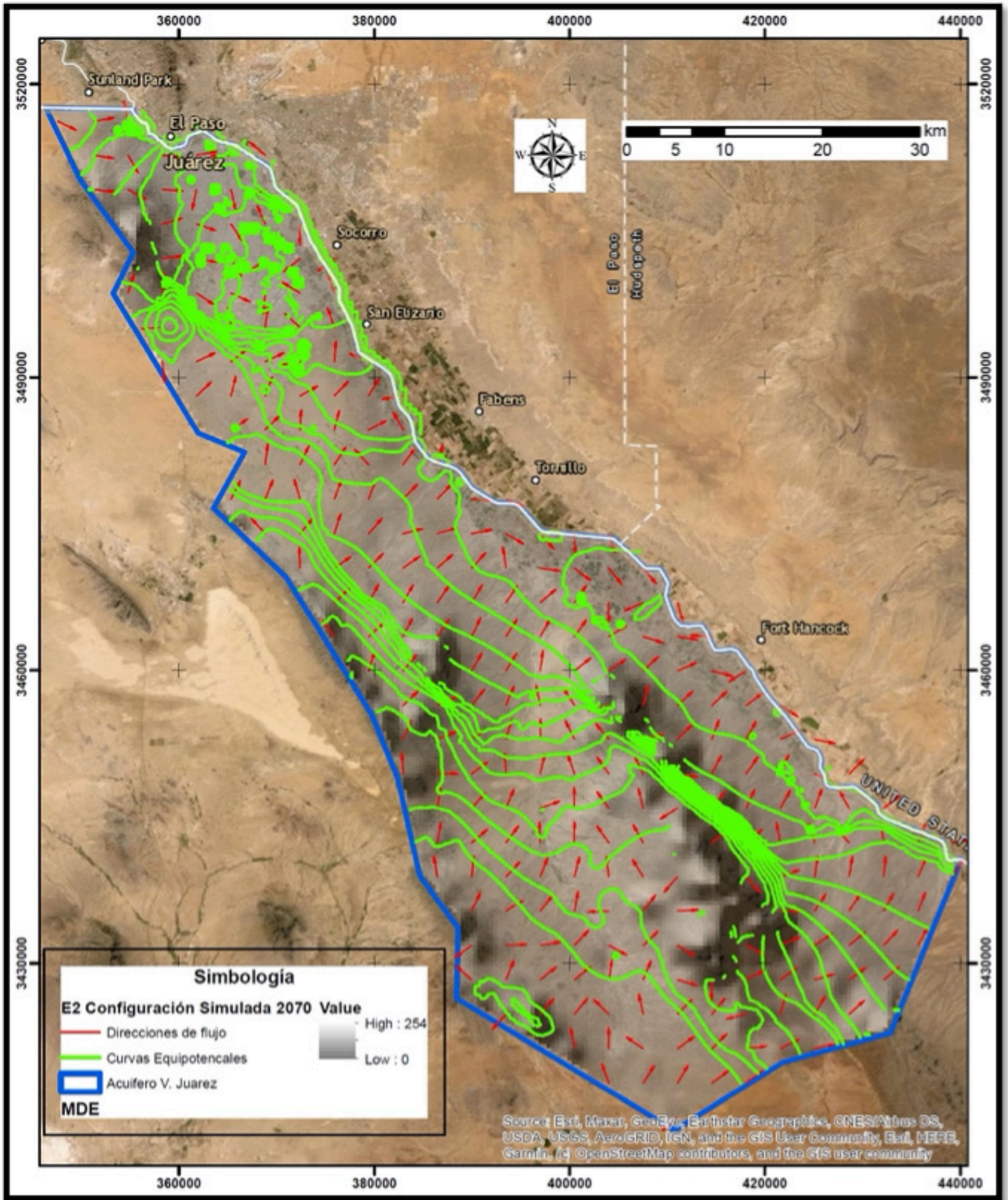


FIGURA 10: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez–Bolsón del Huevo para el año 2070 (escenario 2).

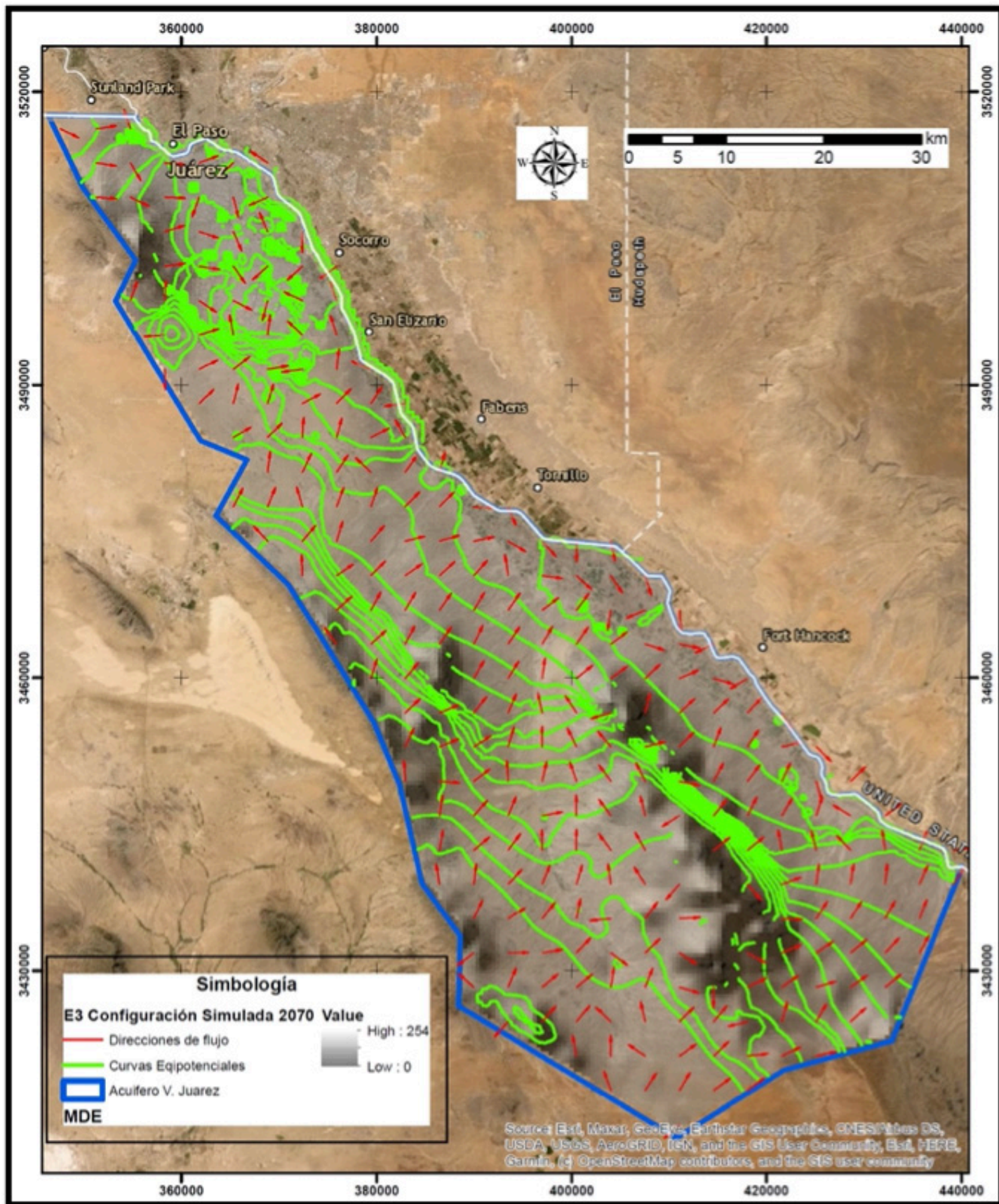


FIGURA 11: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo para el año 2070 (escenario 3).

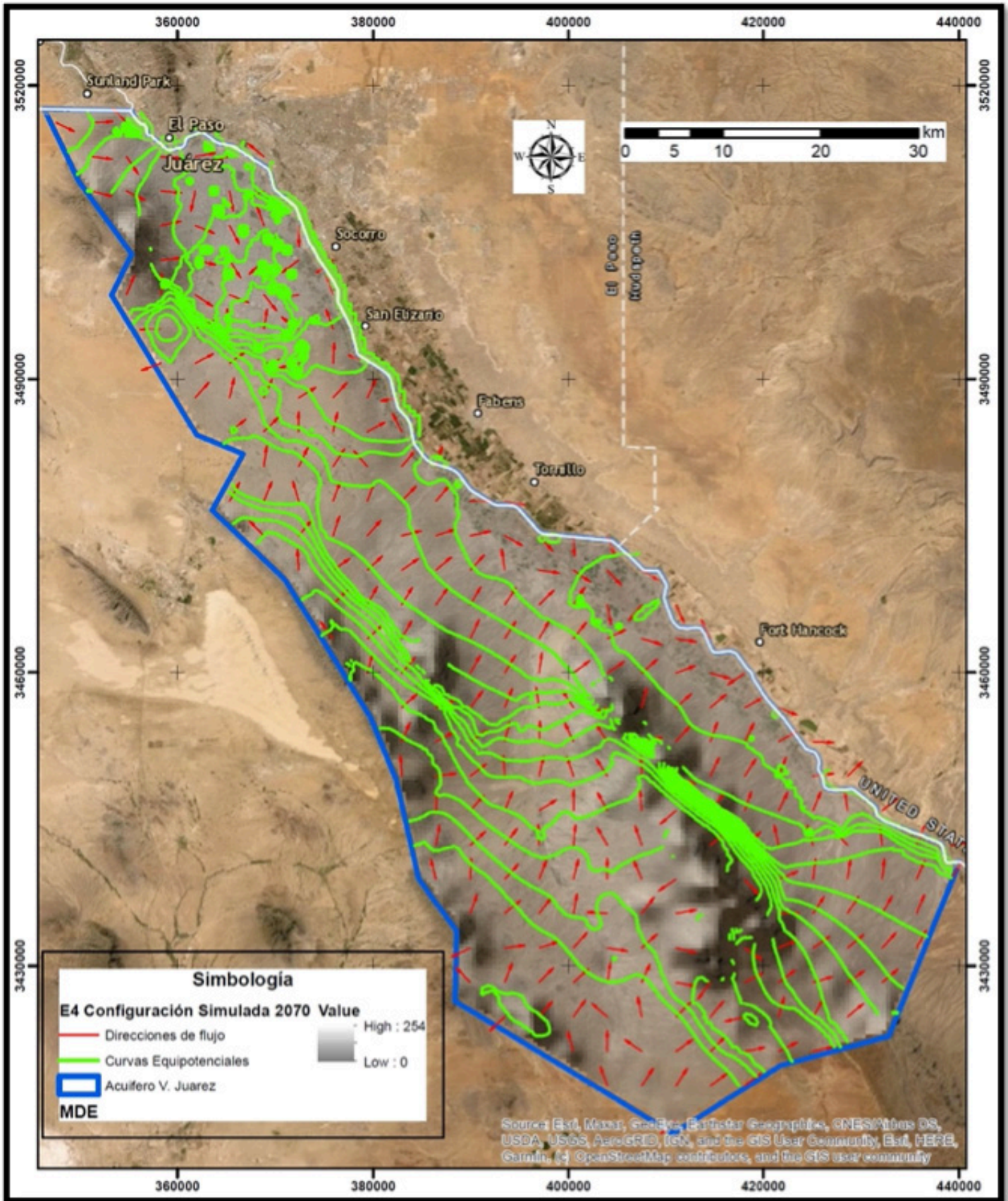


FIGURA 12: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo para el año 2070 (escenario 4).

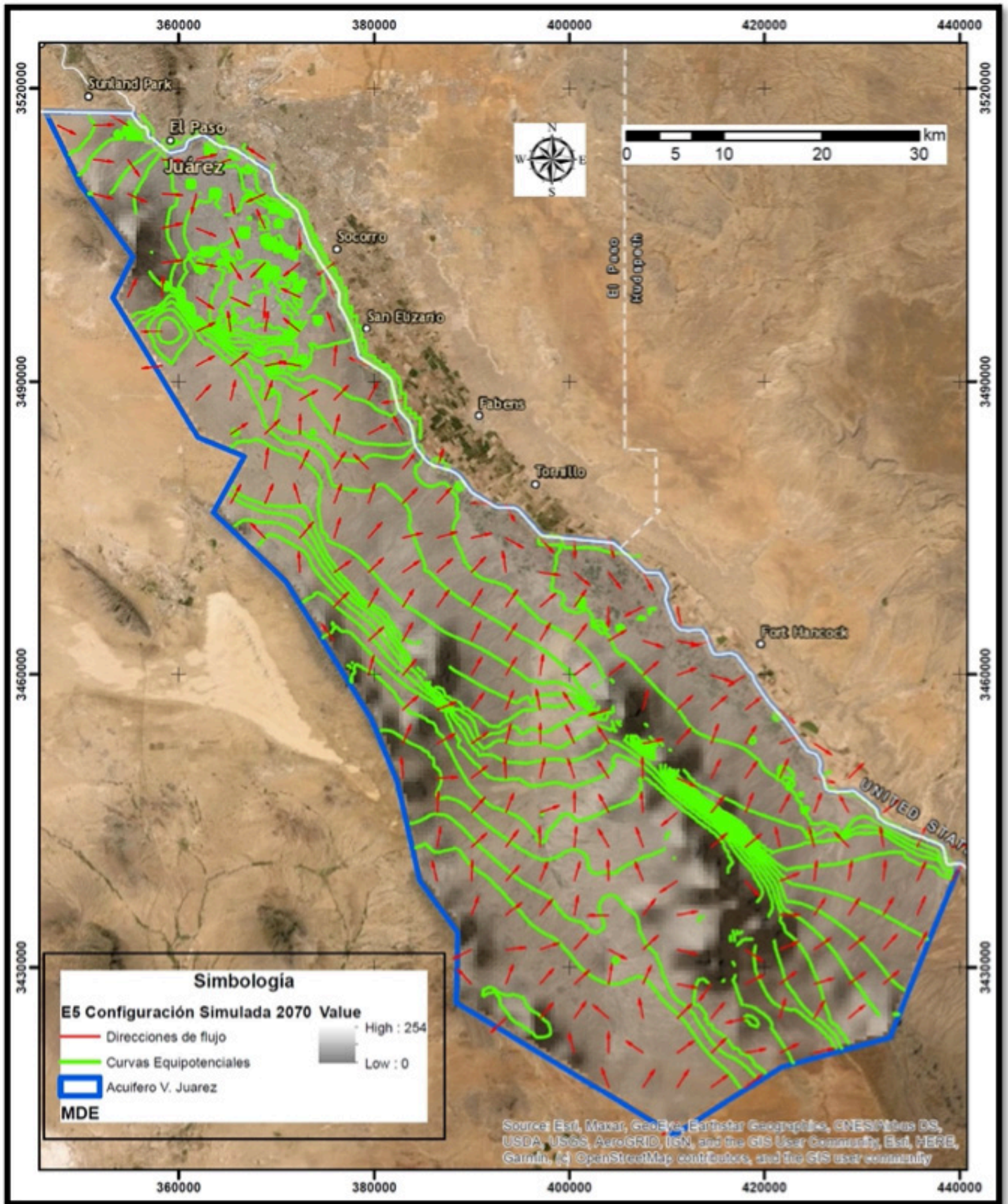


FIGURA 13: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Huevo para el año 2070 (escenario 5).

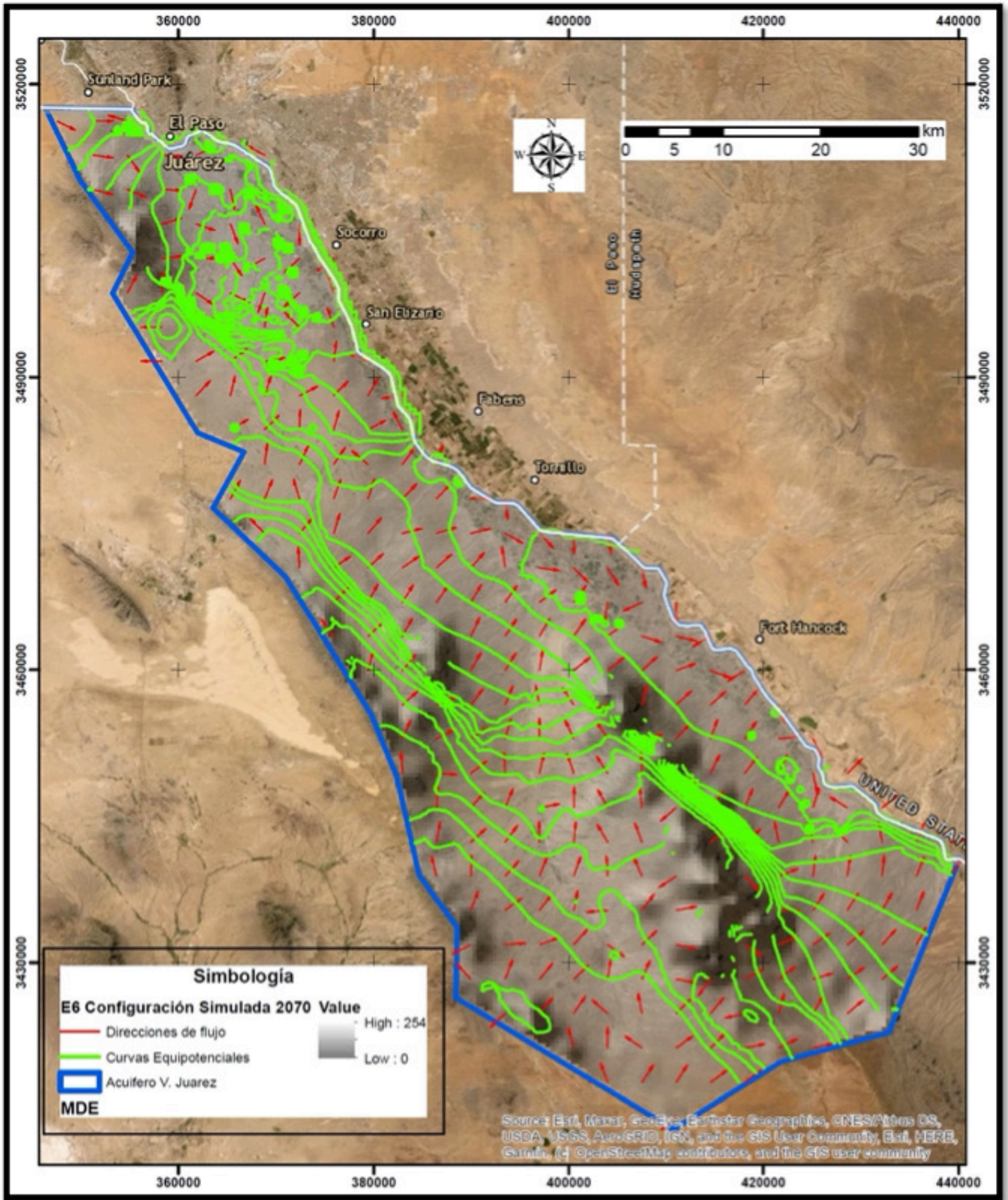


FIGURA 14: Elevación del nivel estático y direcciones de flujo del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco para el año 2070 (escenario 6).

Conclusiones y recomendaciones

En la simulación del flujo del agua subterránea para cada uno de los escenarios se observa una zona crítica, que es la porción norte del acuífero donde se encuentra la zona urbana de Ciudad Juárez y otra localizada hacia el centro y sur del acuífero con pocos cambios, incluso hasta 2070, siempre y cuando no se incrementen considerablemente las extracciones del agua subterránea en el futuro. Los escenarios 3 y 6 presentan una condición del acuífero más desfavorable, ya que el abatimiento máximo es de 129 m en el escenario 3 y un abatimiento medio de 16.0 m en el escenario 6. Es evidente que algunos pozos comienzan a reducir el bombeo en el modelo de flujo, lo cual puede también suceder físicamente al ir aumentando el abatimiento en una zona del acuífero. Esta modelación también muestra que el flujo del agua subterránea de la mayor parte del acuífero en la frontera con el río Bravo presenta una dirección de suroeste a noreste, es decir, podría ir de México hacia Estados Unidos. Por lo anterior, se recomienda contar con información piezométrica, hidrométrica, geológica y geofísica, entre otras, de la parte de Estados Unidos con el propósito de modelar por lo menos una granja adicional en la margen derecha del río Bravo y disminuir la incertidumbre en la dirección del flujo del agua subterránea entre ambos países.

Agradecimientos

Agradecemos al Departamento de Agricultura de Estados Unidos por el apoyo financiero proporcionado para llevar a cabo el proyecto titulado “*Sustainable water resources for irrigated agriculture in a desert river basin facing climate change and urban growth: from characterization to solutions*”.

Referencias

Abd-Elmaboud, M.E., H.A. Abdel-Gawad, K.S. El-Alfy, M.M. Ezzeldin. (2021). Estimation of groundwater recharge using simulation-optimization model and cascade forward ANN at East Nile Delta aquifer, Egypt. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Volume 34. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100784>.

Anderson, M.P., and Woessner, W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic, San Diego, California.

Arfan A., Z. Zhang, W. Zhang, A. Dilawar. (2020). Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study

from an agro-urban region of Pakistan. *Geoscience Frontiers* Volume 11, pp. 1805–1819. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.013>

Betancur, T., y Palacio, C. (2009). La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño). *Dyna*, 76(160),39-49. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49612068028>.

Cerón, L.M., J.D. Sarria, J.S. Torres y J. Soto-Paz. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica*. Vol. 32(1), 47-56. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000100047>.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020) ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. *Diario Oficial de la Federación*, pp: 33-48, jueves 17 de septiembre de 2020. CDM, Méx.

Cui, T., J. Sreekanth, T. Pickett, D. Rassam, M. Gilfedder, D. Barrett. (2021). Impact of model parameterization on predictive uncertainty of regional groundwater models in the context of environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*. Vol. 90. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106620>.

De Caro M., R. Perico, G.B. Crosta, P. Frattini, G. Volpi. (2020). A regional-scale conceptual and numerical groundwater flow model in fluvio-glacial sediments for the Milan Metropolitan area (Northern Italy). *Journal of Hydrology: Regional Studies* Volume 29. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100683>.

Diario Oficial de la Federación (DOF) (2020). Ley De Aguas Nacionales, 6 de enero de 2020. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México. Última reforma: 6 de enero de 2020.

Hoang Phan H. Y., B.T. Pham, T.V. Phong, D.H. Ha, R. Costache, H. Van Le, H. D. Nguyen, M. Amiri, N. V. Tao, Indra P. (2021). Locally weighted learning based hybrid intelligence models for groundwater potential mapping and modeling: A case study at Gia Lai province, Vietnam. *Geoscience Frontiers*. Vol. 12, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101154>.

Lykkegaard M.B., T.J. Dodwell, D. Moxey. (2021). Accelerating uncertainty quantification of groundwater flow modelling using a deep neural network proxy. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* Volume 383. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.113895>.

Matteoda, E. M., Blarasin, M., Vives, L., Cabrera, A. y Felizzia, J. (2011). Modelación numérica del flujo de agua subterránea del acuífero freático sedimentario de la cuenca del arroyo El Barreal, Córdoba. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. Vol. 27, pp. 25 – 34.

- Mary P. Anderson, William W. Woessner and Randall J. Hunt. (2015). *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Second Edition. Academic Press.
- McDonald M.G. y Harbaugh A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States. Geological Survey. United States Government. Virginia, EUA 586 pp.
- Persaud, E., J. Levison, S. MacRitchie, S.J. Berg, A.R. Erler, B. Parker, E. Sudicky. (2020). Integrated modelling to assess climate change impacts on groundwater and surface water in the Great Lakes Basin using diverse climate forcing. *Journal of Hydrology*. Volume 584. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124682>.
- Ping-Cheng H., L. Pin-Chen, (2021). Analytical modeling of groundwater flow of vertically multilayered soil stratification in response to temporally varied rainfall recharge. *Applied Mathematical Modelling* Vol. 96, pp. 584–597. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.
- Rahman Khatibi y Ata Allah Nadiri. (2021). Inclusive Multiple Models (IMM) for predicting groundwater levels and treating heterogeneity. *Geoscience Frontiers* Volume 12. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.07.011>.
- Reilly, T.E. and Harbaugh, A.W. (2004). Guidelines for evaluating ground-water flow models. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. Vol. 2004-5038, 30 pp.
- Sanz-Lobón, Germán; Martínez-Alegría, Roberto; Taboada, Javier; Albuquerque, Teresa; Antunes, Margarida y Montequi, Isabel (2015). Balance y modelización del acuífero karstico de los Montes Torozos (Valladolid, España). *Dyna*, Vol. 82, núm.191, pp.203-208 [Consultado: 7 de Junio de 2021]. ISSN: 0012-7353. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49639089025>.
- Schlumberger, Water Services. (2006). *Visual Modflow Professional, A Professional for 3D Groundwater Flow and Contaminant Transport modeling*. Waterloo Hydrogeologic Inc. Waterloo, Ontario, Canada.
- Shishaye, H.A., D.R. Tait, K.M. Befus, D.T. Maher, M.J. Reading. (2020). New insights into the hydrogeology and groundwater flow in the Great Barrier Reef catchment, Australia, revealed through 3D modelling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. Volume 30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100708>.
- Sileshi M., B. Birhanu, T. Ayenew y G. Taye. (2021). Three-dimensional groundwater flow modeling to assess the impacts of the increase in abstraction and recharge reduction on the groundwater, groundwater availability and groundwater-surface waters interaction: A case of the rib catchment in the Lake Tana sub-basin of the Upper Blue Nile River, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* Volume 35. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100831>.

III.2 New Conceptual Models of Groundwater Flow and Salinity in the Eastern Hueco Bolson Aquifer

Nuevos modelos conceptuales de flujo y salinidad de aguas subterráneas en el acuífero del Bolson del Hueco oriental

Barry J. Hibbs and Monica Ortiz¹

¹CalState University

Abstract

A hydrogeological study was performed along a generalized groundwater flowpath in the Eastern Hueco Bolson, extending from the New Mexico/Texas State line to the Rio Grande alluvial floodplain. The area was evaluated for changes of hydrochemistry, isotopic patterns, and recharge sources. The study used discrete vertical groundwater data to perform the investigation at three points along the flowpath, where vertical control in the groundwater column uniquely enabled vertical resolution of the water column for data interpretation. Chloride and sulfate concentrations identified in the test wells are between 300 and 31,000 mg/L, with differences resulting from several possible salinity sources, including migration of saline water upward from deeper groundwater strata, mixing of more dilute water along the upper part of the flowpath with saline water coming in laterally along the flowpath, and/or dissolution of evaporite minerals directly along the flowpath trajectory. The data show that high Cl/Br weight values over 1000 are seen in most test intervals of the aquifer, providing strong evidence of a geologic source due to the third possible source, the dissolution of halite evaporite minerals along the flowpath. Chloride concentration increases by a factor of 5 between State line and the Rio Grande alluvial floodplain, and Cl/Br weight ratios suggest an evaporite source in basin fill less than 1000 ft deep being a likely control on salinity changes along the flowpath. Water isotopes imply a common recharge source between State line and the deeper bolson strata beneath the El Paso-Juarez Valley. It is likely that fault control and possible axial channels that are buried near the eastern margins of the Hueco Bolson act to control fluid movement down the axis of the bolson in the study area. Isotope data in the Tularosa Bolson may indicate the original source of evaporated water moving into the Eastern Hueco Bolson is from

ancient Lake Otero, and/or from surrounding phreatic playas where groundwater was at or near land surface during the early Holocene epoch. Isotopic stratification of groundwater observed at all test holes in the Hueco Bolson reveal that evaporated water is at the bottom of the test hole profiles and unevaporated and mixed evaporated water is in the middle and top parts of profiles. It is probable that younger unevaporated water recharges at the top and middle of the groundwater columns along the flowpath, resulting in isotopic stratification patterns with older, evaporated water in the deeper intervals in the groundwater column.

Resumen

Se realizó un estudio hidrogeológico a lo largo de una ruta de flujo de agua subterránea generalizada en el este del Bolsón del Hueco, que se extiende desde la línea de los estados de Nuevo México/Texas hasta la llanura aluvial del Río Grande. El área fue evaluada por cambios de hidroquímicos, patrones isotópicos y fuentes de recarga. El estudio utilizó datos discretos de aguas subterráneas verticales para realizar la investigación en tres puntos a lo largo de la trayectoria del flujo, donde el control vertical en la columna de agua subterránea permitió de manera única la resolución vertical de la columna de agua para la interpretación de los datos. Las concentraciones de cloruro y sulfato identificadas en los pozos de prueba están entre 300 y 31 000 mg/L, con diferencias como resultado de varias posibles fuentes de salinidad, incluida la migración de agua salina hacia arriba desde estratos de agua subterránea más profundos, mezcla de agua más diluida a lo largo de la parte superior de la trayectoria de flujo con agua salina entrando lateralmente a lo largo de la trayectoria de flujo, y/o disolución de minerales evaporíticos directamente a lo largo de la trayectoria de flujo. Los datos muestran que se observan valores altos de peso de Cl/Br superiores a 1000 en la mayoría de los intervalos de prueba del acuífero, lo que proporciona una fuerte evidencia de una fuente geológica debido a la tercera fuente posible, la disolución de minerales de evaporita de halita a lo largo de la trayectoria de flujo. La concentración de cloruro aumenta en un factor de 5 entre la línea estatal y la llanura aluvial del río Bravo, y las relaciones de peso Cl/Br sugieren que una fuente de evaporita en el relleno de la cuenca a menos de 1000 pies de profundidad es un control probable de los cambios de salinidad a lo largo de la ruta de flujo. Los isótopos de agua implican una fuente de recarga común entre la línea estatal y los estratos de bolsón más profundos debajo del valle de El Paso-Juárez. Es probable que el

control de fallas y los posibles canales axiales que están enterrados cerca de los márgenes orientales del Bolsón del Hueco actúen para controlar el movimiento del fluido por el eje del bolsón en el área de estudio. Los datos de isótopos en el Bolsón de Tularosa pueden indicar que la fuente original de agua evaporada que se mueve hacia el este del Bolsón del Hueco proviene del antiguo lago Otero y/o de las playas freáticas circundantes donde el agua subterránea estaba en o cerca de la superficie de la tierra durante la época del Holoceno temprano. La estratificación isotópica del agua subterránea observada en todos los pozos de prueba en el Hueco Bolsón revela que el agua evaporada está en la parte inferior de los perfiles de los pozos de prueba y el agua no evaporada y evaporada mezclada está en las partes media y superior de los perfiles. Es probable que el agua no evaporada más joven se recargue en la parte superior y media de las columnas de agua subterránea a lo largo de la trayectoria de flujo, lo que da como resultado patrones de estratificación isotópica con agua evaporada más vieja en los intervalos más profundos de la columna de agua subterránea.

Introduction

Purpose of Study

This study uses new test hole information and water samples provided by the City of El Paso to investigate groundwater flow and salinity in the Eastern Hueco Bolson, which is compared to data in the El Paso-Juarez Valley (Figure 1). An apparent groundwater flowpath determined by historical hydraulic head maps and extending from the New Mexico/Texas State line to the El Paso-Juarez Valley is evaluated for source of recharge, changes of hydrochemistry, and isotopic patterns along the flowpath. Groundwater in the Eastern Hueco Bolson has been little studied for flow system continuity. This study fills in gaps due to paucity of hydrogeologic studies in this part of the basin. The study uses discrete vertical groundwater data to perform the investigation, adding a unique combination of isotopic tracers and vertical resolution of groundwater data. Vertical test hole water samples collected by the City of El Paso and analyzed independently by the authors of this paper provide the necessary control for flowpath analysis and for interpretation of hydrochemical and isotopic changes along the flowpath from State line to the El Paso-Juarez Valley.

Overview of Groundwater Conditions in the Hueco Bolson

Groundwater investigations in the City of El Paso and Ciudad Juarez area have been formally underway since the early 1900s (Slichter, 1905; Meinzer, 1915). Since that time, the City of El Paso and Ciudad Juarez have depended on the groundwater resources of the Hueco Bolson, a late Tertiary and Quaternary basin fill aquifer extending from New Mexico, across the El Paso-Juarez Valley, into Chihuahua Mexico (Figure 1). Studies indicated predevelopment groundwater flow in the US part of the Hueco Bolson aquifer was south from the northern edge of the bolson toward the Rio Grande alluvial valley, where groundwater discharged into the overlying Rio Grande alluvium by cross-formational flow (Sayre and Livingston, 1945; de la O Carreno, 1958; Leggat and Davis, 1966; Meyer, 1976; Knowles and Alvarez, 1979).

In the late 1800's, drillers found that the Hueco Bolson was a prolific aquifer providing good quality water along the western part of the basin (Sayre and Livingston, 1945; White, 1983; Hibbs, 1999; Hutchison and Hibbs, 2008). Pumping created two large cones of depression beneath El Paso and Juarez (Land and Armstrong, 1985; Hibbs, 1999; Heywood and Yager, 2003). Groundwater now flows along the axis of the basin toward the Rio Grande, except where pumping beneath the twin cities has reversed the natural hydraulic gradient (Figure 2). Pumping has created an artificial groundwater divide just north of the Rio Grande (Hibbs, 1999).

Test hole drilling and water sampling at discrete vertical intervals indicates a depth-salinity relationship in the Hueco Bolson aquifer (Hibbs *et al.*, 1997). Groundwater salinity is broadly defined by two water quality zones (Figure 3). Zone 1 is a freshwater zone less than 1,000 ft (304.8 m) thick along the Franklin Mountains, thinning at the axis of the bolson. Salinities are 300 to 1,000 mg/L in Zone 1. Zone 2, which occupies most of the basin, contains water above 1000 mg/L and that approaches and exceeds the concentration of sea water (~35,000 mg/L) in some of the deeper strata. An exception to the above relationship is found in the El Paso-Juarez Valley where slightly to moderately saline groundwater exists in the Rio Grande alluvium, so that the freshwater zone is sandwiched between poorer quality groundwater above and below (Hibbs *et al.*, 1997). Most of the freshwater in the Hueco

Bolson lies along the flanks of the Organ and Franklin Mountains, where Camp Rice Deposits dominated by low solubility quartz and feldspar minerals store good

quality freshwater (Figures 1 and 3). Freshwater is not abundant along the basin axis or in the eastern side of the Hueco Bolson due to finer textured lithology and

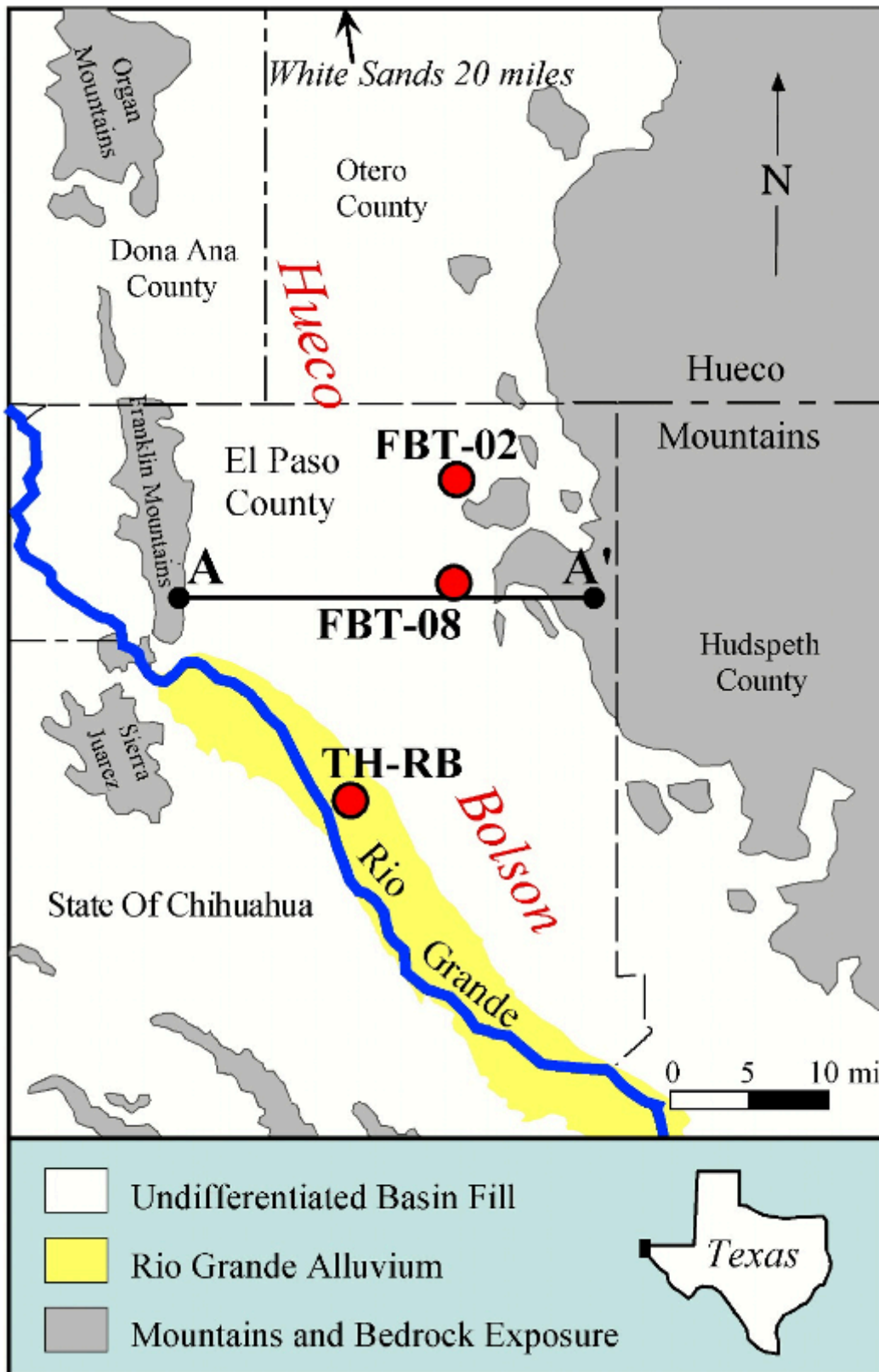


FIGURE 1: Regional area map showing the extent of the Hueco Bolson and modern Rio Grande floodplain. The sub-study area is centered between the Eastern Hueco Bolson west of the Hueco Mountains extending to the Rio Grande floodplain.



FIGURE 2: Hydraulic head map showing groundwater movement down the axis of the Hueco Bolson to discharge areas near the Rio Grande. Drawdown cones of depression have been formed by over-pumping by the City of El Paso and Ciudad Juarez, and an artificial groundwater divide is formed between the two cities north of the International boundary (3580 ft contours) (modified from Hibbs et al., 1997 and Hibbs, 1999).

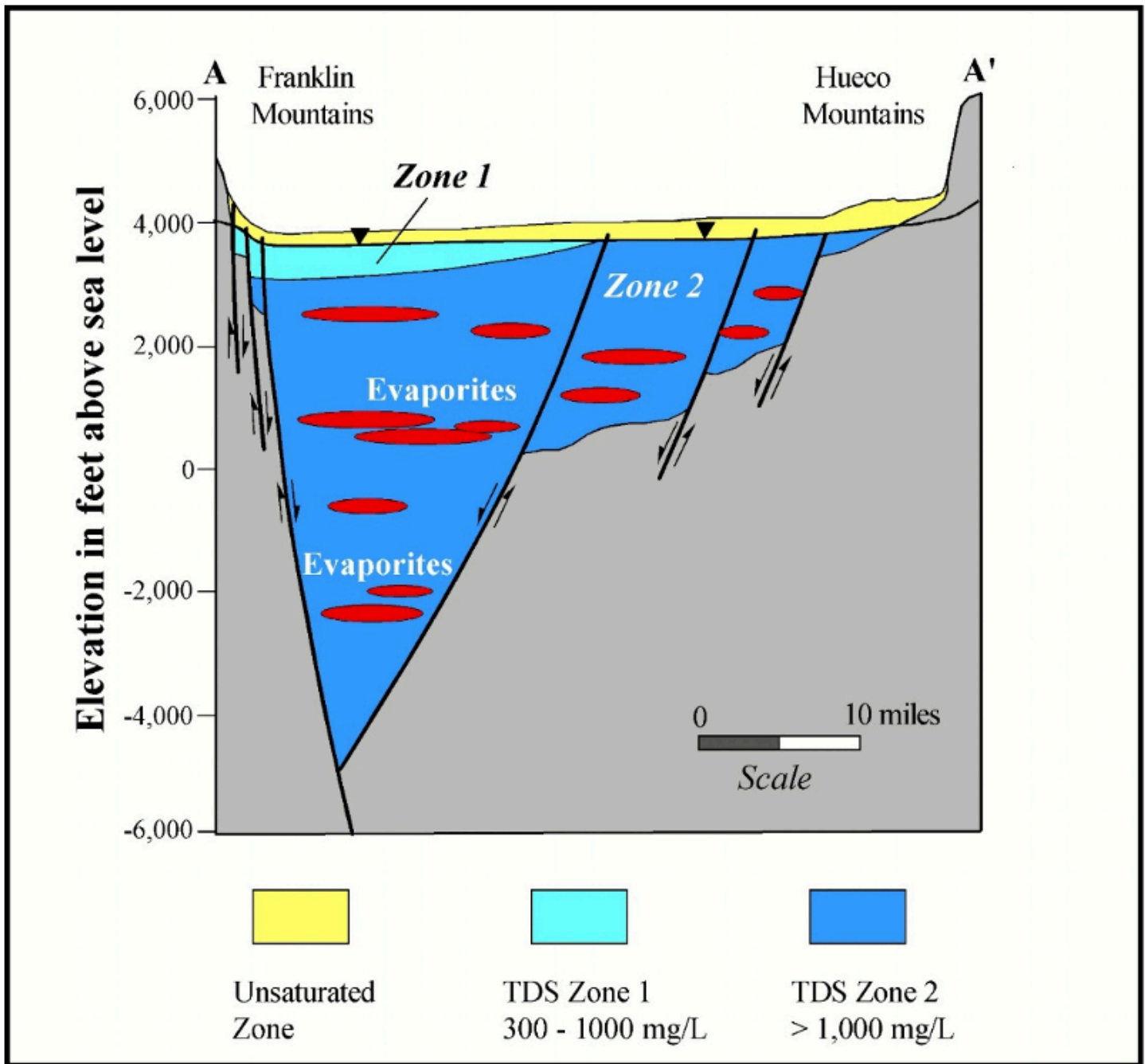


FIGURE 3: Generalized water quality cross section showing the relationship of the freshwater-bearing strata to strata with TDS greater than 1,000 mg/L (modified from Lee Wilson and Associates, 1986). Section oriented between the Franklin and Hueco Mountains in Figure 1.

presence of evaporite minerals in both basin fill and bedrock formations (Hibbs *et al.*, 1997).

Relevant Studies in the Eastern Hueco Bolson

Only a few studies have been carried out for purposes of evaluating groundwater development potential in the Eastern Hueco Bolson. Henry and Gluck (1981) investigated the geology, hydrogeology, geochemistry,

and geothermal potential near Hueco Tanks and surrounding area. Paine and Collins (2002) used airborne electromagnetic data and geological mapping techniques to further evaluate the potential for groundwater development in the eastern bolson and to correlate to major basin bounding faults and interior basin horst-graben faults, with focus on deeper basin fill material near the main basin bounding faults. Paine

and Collins (2002) identified a narrow buried channel running north-south a few miles east of the axis of the Hueco Bolson. They postulated that sand and gravel material deposited in the channel may provide supplemental water supply in the sparsely populated areas in the Eastern Hueco Bolson.

The City of El Paso conducted test hole drilling throughout the Hueco Bolson in the early 2000s, including on the eastern side of the basin. The City used the test hole information to determine the amount of slightly saline water in storage that could be extracted and desalinated. Hibbs (2017) studied groundwater conditions in the eastern bolson with focus on the temperature, salinity, and isotopic differences near basin bounding faults. Hibbs (2017) found hydrochemical and isotopic contrasts indicating distinct sources of water and compartmentalized groundwater conditions alongside major basin bounding faults that act as barriers to groundwater flow. This paper focuses on the deeper basin fill just west of the main basin bounding fault, and correlates information at the upper, midpoint, and discharge areas of the Eastern Hueco Bolson.

Physiography and Geology of the Study Area

The Hueco Bolson aquifer covers about 2510 square miles (6,500 square kilometers) in New Mexico, Texas, and Chihuahua, Mexico (Figure 1). In Texas, the Hueco Bolson occupies portions of El Paso and Hudspeth Counties. The Tularosa Bolson in New Mexico bounds the Hueco Bolson on the north. The boundary between the Tularosa Bolson and the Hueco Bolson is a subtle topographic boundary, and does not represent a hydrogeologic boundary, and groundwater flows from the Tularosa Bolson into the Hueco Bolson. The Franklin Mountains bound the Hueco Bolson on the west. The Hueco Mountains are the eastern boundary of the basin, and the Sierra Juarez and a set of northwest trending mountain ranges in Mexico form the southern bolson boundary (Figure 1).

The Hueco Bolson lies within the Rio Grande Rift and is down dropped by normal faults in relation to the bounding mountains (Figure 3). Consolidated strata provide small to moderate quantities of water in the highlands and range in age from Precambrian to Tertiary. Most of the water wells in bedrock are low to moderate capacity wells and penetrate up to a few hundred feet of saturated bedrock. The most prolific bedrock aquifers are karstified and fractured carbonate and clastic rocks. Intrusive and extrusive rocks and

metamorphic rocks are not usually highly prolific. The Franklin Mountains include sequences of Paleozoic carbonate rocks and Precambrian and Tertiary intrusive rocks. The Hueco Mountains, near where this study is conducted, are mostly carbonate and clastic rocks of Paleozoic and Cretaceous age. The part of the Diablo Plateau bounding the Hueco and Tularosa Bolsons consists mostly of Permian and Cretaceous carbonate rocks and some Tertiary intrusive rocks. The Sierra Juarez of northern Chihuahua, Mexico, is mostly carbonate and clastic rocks of Cretaceous age (Figure 1).

Basin fill sediments are usually weakly consolidated, heterogeneous materials that overly Precambrian through Tertiary rocks (Hawley and Kottowski, 1969; Wilkins, 1986; Kernodle, J.M., 1992). Fort Hancock deposits in the Hueco Bolson include lacustrine muds, interbedded with layers of bentonitic claystone and siltstone and some discontinuous sand lenses. Overlying the Fort Hancock Formation is the Camp Rice Formation, a Pliocene unit consisting of stream-channel and floodplain deposits that are the most prolific water bearing units in the Hueco Bolson. Camp Rice deposits are juxtaposed against fanglomerates along the margin of the basin (Strain, 1966; Gustavson, 1991; Hawley *et al.*, 2009). Deposits in the Camp Rice Formation include predominantly gravels and sands, interbedded with muds, volcanic ash, and caliche (Wilkins, 1986). Sand and gravel sediments in the Camp Rice Formation are thickest along the Franklin and Organ Mountains, becoming thinner and finer-textured to the east (USBR, 1973). Throughout the basin, the percentage of clay increases generally with depth (Orr and Risser, 1992). At its maximum extent, Hueco Bolson deposits are up to 9000 feet (2740 meters) thick (Figure 3).

The geology in the Eastern Hueco Bolson has been described by Henry and Gluck (1981). The Hueco Mountains are mostly carbonate and clastic sedimentary rocks of Paleozoic age. Several faults of late Tertiary age displace bedrock along a north-south structural trend in the study area. The frontal part of the Hueco Mountains presents a topographic escarpment reaching 985 feet (300 meters) (Henry and Gluck, 1981). West of the topographic escarpment the area is mantled by eolian material and alluvial fan sediments grading into and burying parts of the basin-bounding faults that form the structural boundary between deep basin fill and shallow pediment. The transitional pediment region forms a zone between the main basin-bounding fault and the topographic escarpment of the Hueco

Mountains. Groundwater conditions in the strata east of the basin bounding faults are described in Henry and Gluck (1981) and Hibbs (2017). This study focuses on the saturated deeper basin fill west of the basin bounding faults and does not focus on the pediment and bedrock material east of the main basin faults.

Basinwide Water Types

Studies by numerous authors including Hibbs *et al.* (2003), Dadakis, (2004), Druhan *et al.* (2007), Hutchison and Hibbs (2008), Eastoe *et al.* (2009), Eastoe *et al.* (2016), and Hibbs and Merino (2020) provide isotope information in different parts of the Hueco Bolson. Eastoe *et al.* (2009) identified differences in isotopic signatures in groundwater sampled in the Rio Grande Aquifer, in the Texas portion of the Hueco Bolson, and in the Mexican portion of the Hueco Bolson. They found that Rio Grande water and most groundwater in the Rio Grande Aquifer has been affected by evaporation in upstream reservoirs in New Mexico, the largest of which, Elephant Butte Dam, was completed in 1916. Groundwater in the Texas portion of the Hueco Bolson has isotopic signatures consistent with recharge from the Franklin Mountains and Organ Mountains to the west and north. Groundwater in the Chihuahua portion of the Hueco Bolson has isotopic signatures that are

consistent with pre-dam snow melt from Colorado and northern New Mexico, the source area for most of the flows of the Rio Grande. A general shaded depiction of these isotopic types is shown in Figure 4. These patterns represent the general isotopic signature of groundwater over a major part of the Hueco Bolson (Eastoe *et al.*, 2009).

The main water types are the Franklin Mountain water type plotting near the Global Meteoric Water Line, and pre-dam and post-dam Rio Grande water types plotting along the Rio Grande Evaporation Line (Figure 4). The Rio Grande Evaporation Line was defined by previous investigators based on runoff into the Rio Grande from snow melt and precipitation in Colorado and northern New Mexico (Hogan *et al.*, 2007; Eastoe *et al.*, 2009). Aquifers in the Rio Grande Basin that are recharged by Rio Grande water plot near the Rio Grande Evaporation Line because the aquifers were replenished by infiltrating river water. Aquifers in the Rio Grande Basin in southern New Mexico and western Texas that are recharged by local precipitation usually plot in isotopically distinct ranges because of different isotopic signature of precipitation in southern latitudes (Clark and Fritz, 1997). Consequently, it is often possible to distinguish local sources of recharge from river recharge (Eastoe *et al.*, 2009).

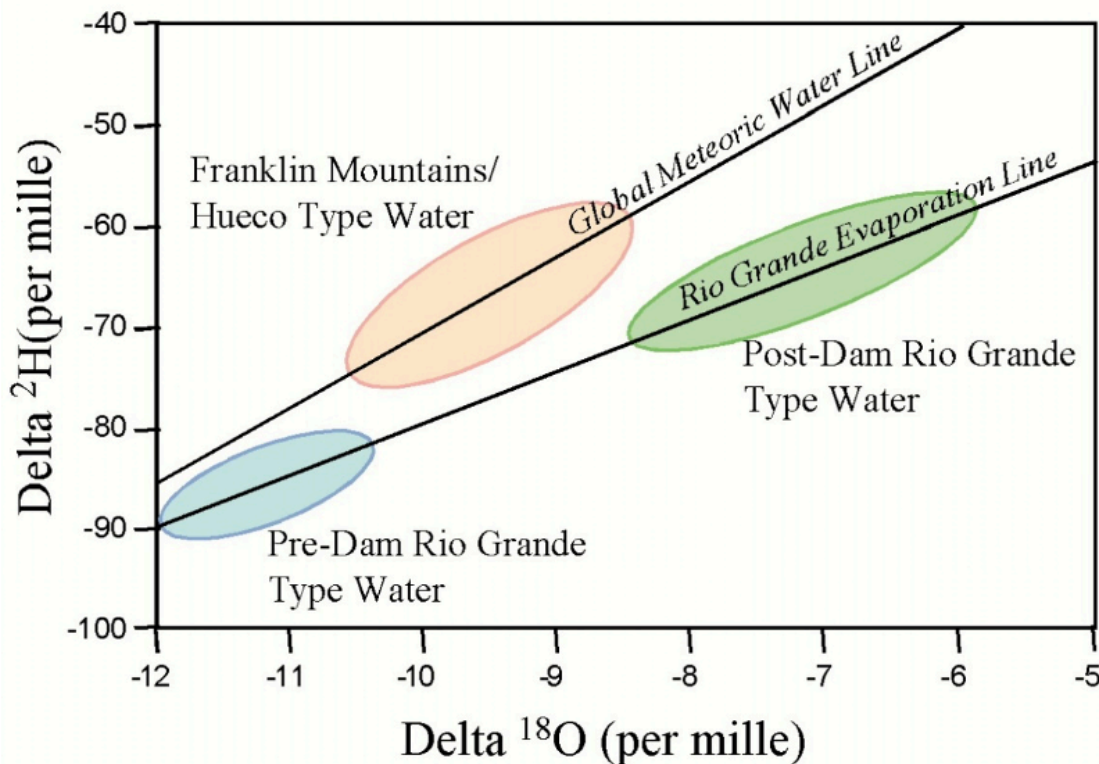


FIGURE 4: Major regional water types in the Hueco Bolson and stable water isotopes plotted for alluvial and bolson water wells sampled in this study. Regional water types include local recharge waters that characterize the Franklin Mountains-Hueco-type water and pre-dam and post-dam Rio Grande.

Pre-dam water is temporally referenced water because it is water that flowed down the Rio Grande before large dams were constructed in the Rio Grande Basin. Pre-dam water is not as evaporated as post-dam water because it was not retained in reservoirs. Post-dam water is held in reservoirs and is consequently much more evaporated. Water residence time in Elephant Butte dam is about 2.2 to 2.5 years and retention in the reservoir leads to evaporative enrichment of stable water isotopes. Post-dam water is easily distinguished from pre-dam water because it is evaporated and of younger age (Figure 4). Average pre-dam water is -10.5 to -12.0 per mille $\delta^{18}\text{O}$ while post-dam water that is much more evaporated is -5.7 to -8.5 per mille $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 4).

Field and Laboratory Methods

Nested groundwater samples obtained from three test holes drilled by El Paso Water Utilities were analyzed for common anions and stable water isotopes. The samples from El Paso Water Utilities are identified as FBT-02 and FBT-08 in the Hueco Tanks area and TH-RB in the Rio Grande floodplain (Figure 1). Depth to static water level is about 350 feet (107 m) in the FB test wells and less than 25 feet (7.6 m) in the TH-RB test well.

Water samples collected from EPWU test holes were obtained by using a gravel-pack method which provides discrete vertical water samples in the aquifer (Buckner, 1977). First, a test hole of approximately eight inches in diameter is drilled by mud rotary drilling to a total depth that includes all zones to be tested. After geophysical logs are collected, the cuttings and geophysical logs are examined in order to determine zones to be sampled for groundwater, from total depth to a predetermined distance below the water table. When the deepest zone to be sampled is identified, a screened pipe 20 feet (6 m) in length is attached to a string of 3-inch (7.6 cm) pipe and run down the borehole until the screen is in the zone to be sampled. Fine gravel is then placed in the mud-filled borehole from total depth to 100 feet above the deepest zone to be sampled. The fine gravel surrounded the screen and annular space of the borehole below and is backfilled at least 100 ft (30.5 m) above the top of the well screen. A T connector is next connected to the top of the 3 inch pipe and a smaller diameter airline of about 1.5 inches (3.8 cm) is run down one side of the T connector through the 3 inch (3.8 cm) pipe connected to the well screen. At the other end of the T connector

another line is connected for discharge of jetted fluid in the aquifer. An airtube is run down below the static water table and air is injected down the air tube with an air compressor. Air forced down and out of the air tube and up the 3 inch (3.8 cm) pipe creates a suction action at the screened section, causing groundwater to enter the screen as the compressed air forces the water up the 3 inch pipe to the surface discharge pipe (Buckner, 1977).

Following water sampling at the lowest level, the screen is raised to the next zone to be sampled, more fine gravel was placed in the borehole about 100 ft (30.5 m) above the zone to be sampled, and the process is repeated until all selected zones are sampled. Gates and White (1976) and Buckner (1977) state that this method introduces no more than 5 percent of contamination by drilling outside the aquifer interval tested. The method is reportedly superior to the conventional packer method used in uncased test holes in unconsolidated porous media (Buckner, 1977). When all intervals had been tested in these test holes, the hole is backfilled and sealed. The intervals tested in the 3 test wells are listed in Table 1. Due to minimal contamination, the testing procedure is acceptable for measuring conventional anions and water isotopes. The investigators determined that contamination from this method is not acceptable for measurement of radioisotopes such as tritium and carbon-14 in jetted samples due to the 5% contamination threshold).

Groundwater sample data presented in this paper include standard anions chloride, sulfate, bromide, and stable water isotopes (^2H and ^{18}O). Anions were analyzed by Ion Chromatography in the Hydrogeology Laboratory at California State University using a Dionex ICS-2500 Ion Chromatograph with total eluent peak separation time lengthened to 28 minutes to optimize bromide peak quantification. Stable water isotope measurements were made at the Laboratory of Isotope Geochemistry at the University of Arizona. The hydrogen and oxygen isotopic composition of water were determined using a Finnigan Delta-S Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) following reduction with Cr (Gehre *et al.*, 1996) or CO_2 equilibration (Craig, 1961a, 1961b), respectively. Results were expressed as $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in per mil (‰) relative to the standard VSMOW (Gonfiantini, 1978) with analytical precisions of 0.9 ‰ and 0.08 ‰, respectively.

Results

Major Anions and Halides

The results for chloride concentrations are observed in ranges from 296 mg/L to 30,500 mg/L in sample sites at the Eastern Hueco Bolson and at Rio Bosque Park (Figure 5). The highest and lowest chloride concentrations are observed in well TH-RB in Rio Bosque Park. In this well, the lowest concentration of 296 mg/L is at a depth of 100 ft (30.5 m) below ground surface (bgs) and the highest concentration of 30,500 mg/L is at a depth of 1,150 ft (350.5 m) bgs (Table 1). In the Eastern Hueco Bolson - Fort Bliss area, chloride concentrations in well FTB02 ranges from 1,096 mg/L to 8,397 mg/L at depths of 740 and 960 feet (225.5 and 292.6 m). For well FTB08, chloride concentrations range from 360 mg/L to 4,608 mg/L at depths from 480 to 940 feet (146.3 and 286.5 m) bgs. Both test holes in the Fort Bliss area generally show an increase in concentration values as the depth increases. There is a variable but generally increasing pattern observed for chloride concentrations in test hole TH-RB (Table 1). Chloride concentrations in this well increase significantly from 5,351 mg/L at 350 ft (106.7 m) to 14,426 mg/L at 550 ft (167.4 m) and later decrease to 8,813 mg/L at 730 ft (222.5 m), before increasing to a very high value of 30,500 mg/L at 1,150 ft (350.5 m).

Sulfate concentrations are observed in ranges from 154 to 1,962 mg/L (Figure 5). The lowest sulfate concentration of 154 mg/L is observed in site FBT08 at 790 feet (240.8 m). The highest sulfate concentration of 1962 mg/L is observed in site FBT02 at 1,000 feet (304.8 m). At depths between 560 to 790 ft (170.7 to 240.8 m) bgs, test hole FBT08 experiences a considerable decrease in sulfate concentration, from 713 mg/L to 154 mg/L (Table 1). This concentration increased in FBT08 to 712 mg/L at 940 ft (286.5 m). In Rio Bosque Park, a fluctuation of sulfate concentration levels is observed in TH-RB. In this well, concentrations are increasing and later decreasing creating a plot with an undulating concentration line (Figure 5). At test hole FBT02, sulfate concentrations increase significantly from 669 mg/L at a depth of 880 feet (268.2 m) to 1,750 mg/L at a depth of 960 feet (292.6 m), creating a notable shift in the lower part of the plot line (Figure 5).

The weight ratios for chloride to bromide range from 299 to 7,223 (Figure 6). The lowest ratio, 299, corresponds to sampling site FBT08 at a depth of 480 feet 146.3 m). The highest ratio of 6,321 also corresponds to well FBT08 at a depth of 940 feet (286.5

m) bgs. Chloride-bromide weight ratios are considered significant. Only three of nineteen samples had ratios below 1,000, of which only one was under 500. Two samples ranged between 500 and 850 Cl/Br. In test hole FBT08, Cl/Br weight ratios increase from 299 at 480 feet (146.3 m) to 3,190 at 850 feet (259.1 m) bgs. Both sites FBT02 and TH-RB had similar plot patterns in their Cl/Br weight ratios. Over 930 feet (283.5 m) below ground surface (bgs), both wells display parallel values of ratios.

Chloride to sulfate weight ratios are observed in ranges from 0.5 to 52 (Figure 6). The lowest ratio is observed in test hole FBT08 at 510 feet (155.5 m). The highest ratio is observed in test hole TH-RB at a depth of 1,150 feet (350.5 m). For test holes in the Eastern Hueco Bolson - Fort Bliss area (FBT02 and FBT08), weight ratios appear to have a consistent pattern of low values and slightly increasing values with depth. However, in Rio Bosque Park, a considerable increase is observed at 550 feet (167.6 m) and 1,150 feet (350.5 m). At TH-RB, seemingly lower values are seen at depths ranging from 730 to 930 feet (222.5 to 283.5 m) bgs.

To further compare chloride and sulfate concentrations in test-hole samples, a bivariate scatter plot is created (Figure 7). In this plot, test hole TH-RB has significantly higher chloride concentrations than Eastern Hueco Bolson test holes, FBT02 and FBT08. The discussion section details evidence for evaporite dissolution as the source of greatly elevated chloride concentration near the Rio Bosque well site. In test hole FBT02, the two deepest samples have a notable increase in salinity, probably due to dissolution of evaporites in the Fort Hancock strata. For well FBT02, a pattern between sulfate and chloride concentrations is observed in which anion concentrations increase or decrease in a corresponding manner.

TABLE 1: Test Intervals, Anion Concentrations, and Stable Water Isotopes in Study Area Test Holes

Test Hole	Interval Tested (feet bgs)	Cl (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Br (mg/L)	Delta ¹⁸ O (per mil)	Delta ² H (per mil)	Water Type
FBT02	680-700	1739	605	0.53	-9.6	-69	Mostly unevaporated
FBT02	740-760	1096	455	0.29	-9.8	-71	Mostly unevaporated
FBT02	770-790	1825	613	0.44	-9.8	-70	Mostly unevaporated
FBT02	880-900	2707	669	0.86	-9.6	-69	Mostly unevaporated
FBT02	960-980	8397	1750	2.23	-9.2	-68	Mixed evaporated
FBT02	1000-1020	8354	1962	2.22	-8.9	-66	Evaporated
FBT08	480-500	360	673	1.2	-8.0	-63	Evaporated
FBT08	510-530	361	713	--	-8.1	-64	Evaporated
FBT08	560-580	434	313	0.82	-9.0	-66	Evaporated
FBT08	620-640	747	197	0.39	-8.9	-67	Evaporated
FBT08	790-810	862	154	0.44	-10.0	-72	Unevaporated
FBT08	850-870	2277	391	0.71	-9.6	-71	Mostly Unevaporated
FBT08	940-960	4608	712	0.73	-9.2	-68	Mixed Evaporated
TH-RB	100-120	296	290	0.34	-8.3	-69	Rio Grande Source
TH-RB	350-370	5351	1098	1.67	-10.3	-75	Unevaporated
TH-RB	550-570	14426	650	4.17	-9.3	-67	Mostly Unevaporated
TH-RB	730-750	8813	1203	3.74	-9.4	-69	Mostly Unevaporated
TH-RB	930-950	18012	1550	5.77	-8.8	-66	Evaporated

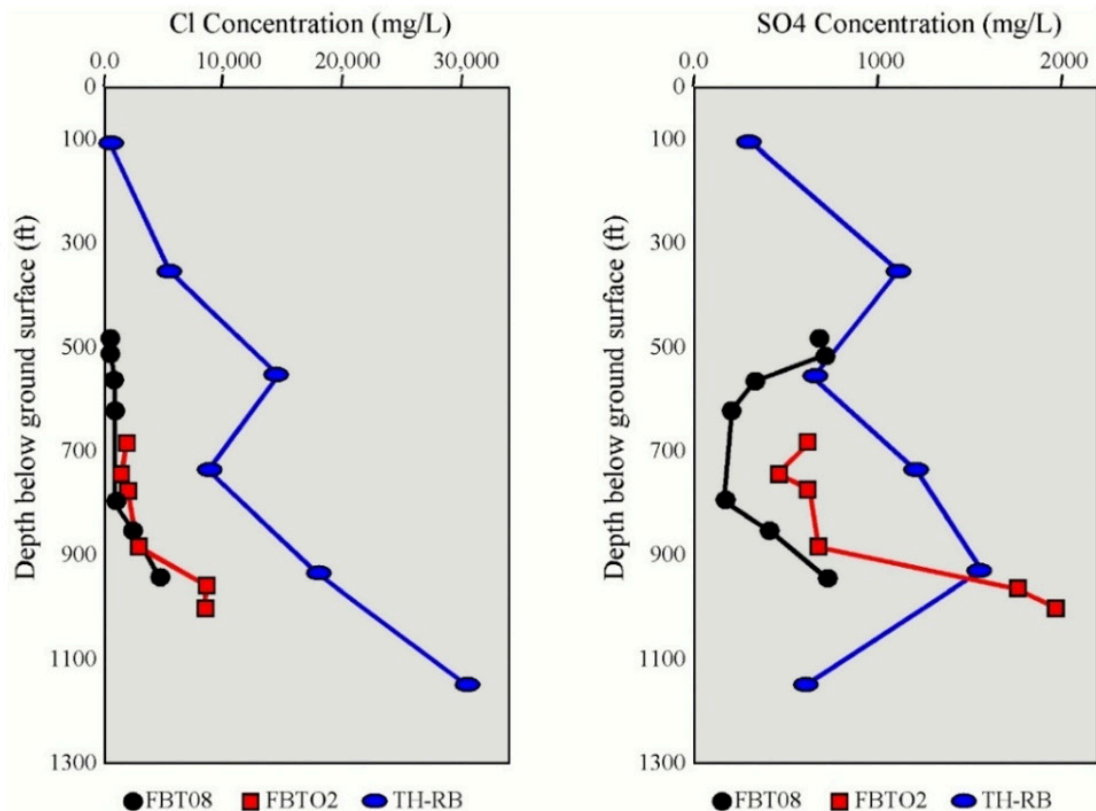


FIGURE 5: Concentrations of chloride and sulfate by depth in sampling sites FBT02, FBT08, and TH-RB in Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and the El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park).

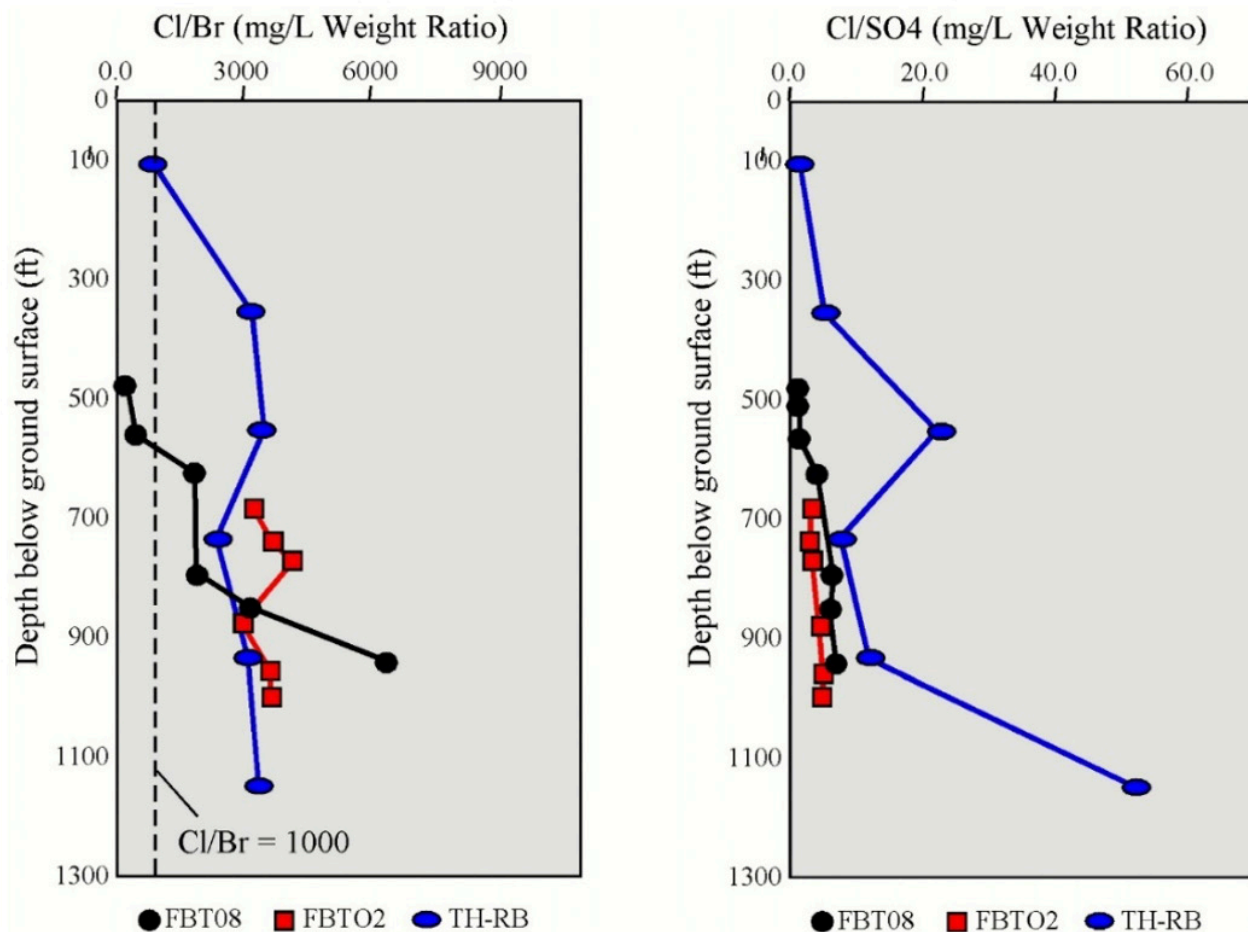


FIGURE 6: Weight ratios of chloride/bromide and chloride/sulfate by depth in sampling sites FBT02, FBT08, and TH-RB in Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and the El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park).

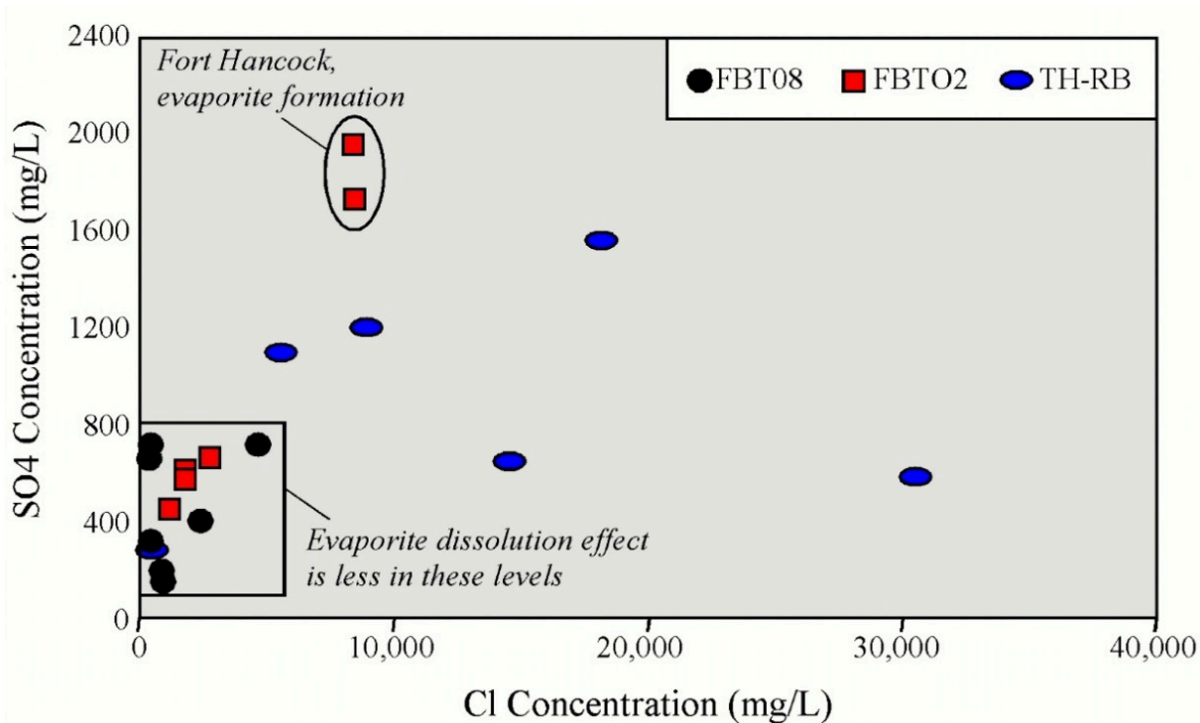


FIGURE 7: Bivariate scatter plot showing concentrations of chloride versus sulfate in sampling sites FBT02, FBT08, and TH-RB in the Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and the El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park).

Stable Water Isotopes

The isotopic composition of $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ of all sampling sites is plotted with the Global Meteoric Water Line (GMWL) and Rio Grande Evaporation Line (RGEL) as references (Figure 8). Individual plots for all test holes was fit to an evaporation trend line which all samples are also plotted against. In the plot for TH-RB, the most evaporated water isotopes are consistently seen with an increase in depth, except for the shallow sample of 100 ft at TH-RB. This shallowest sample in TH-RB has a uniquely evaporated water type at a depth of 100 feet (30.5 m) below ground surface (bgs). This water type is demonstrably sourced from the post-dam Rio Grande water. No other sample at Rio Bosque (TH-RB) shows evidence of intrusion of water from the Rio Grande. Intrusion of Rio Grande water to a minimum depth of 100 ft (30.5 m) bgs is therefore noted at Rio Bosque, despite very little pumping in the vicinity of this very saline part of the Hueco Bolson

aquifer. Intrusion of Rio Grande water at this depth must result from natural processes. Water isotopes in the FB test-holes are evaporated at the bottom and FBT08 has evaporated water at the top and the bottom of the water column.

Excluding the 100 feet-deep (30.5 m-deep) sample, all other water samples from the three test holes (TH-RB, FBT02 and FBT08) demonstrate an isotopic composition from a common source. These three test holes show evaporation from a common source along an evaporation trend (Figure 9). When TH-RB samples are plotted against FB samples (Figure 9) it is seen that all three wells have a similar evaporative trajectory, and possibly a similar recharge origin or recharge source. The discussion section provides evidence for probable groundwater flow from the Eastern Hueco Bolson to Rio Bosque during pre-development times and ties in the ultimate source of evaporated water to an ancient lake/phreatic playa complex in the Tularosa Bolson.

Discussion

Major Anions and Halides

In this study, data obtained from chemical and isotopic analysis of water samples was used to establish comparisons and to help determine possible salinity sources in the groundwater of the Eastern Hueco Bolson aquifer extending to the El Paso-Juarez

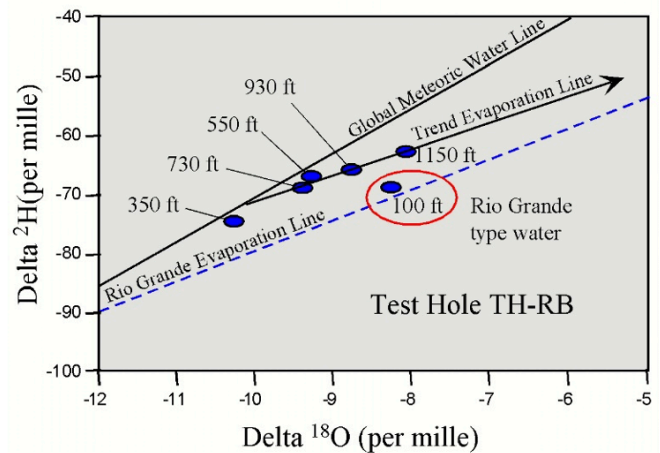
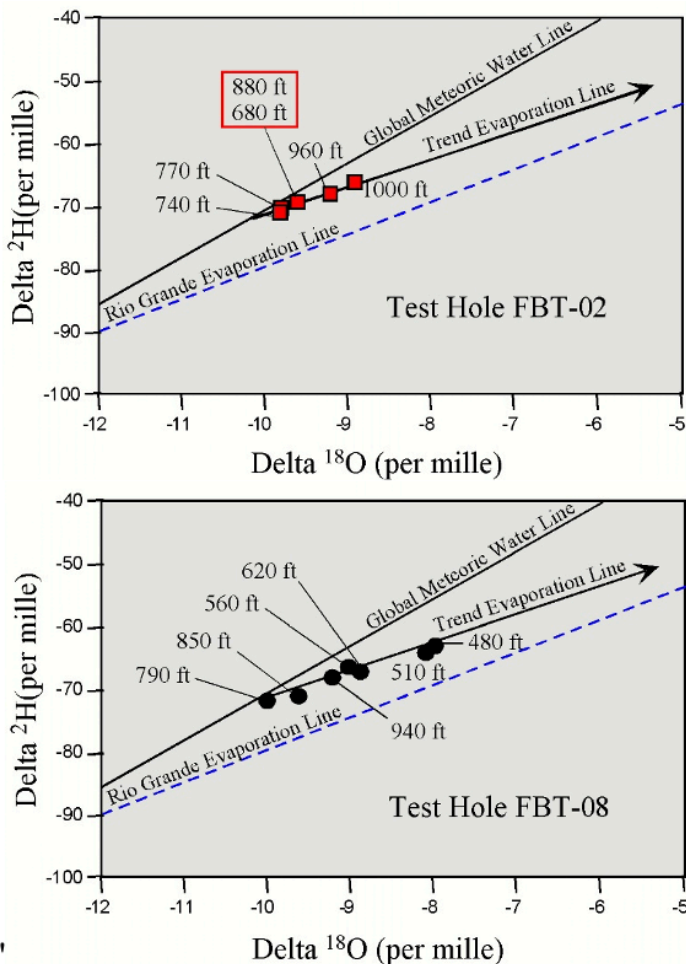


FIGURE 8: Individual stable water isotope plots for FBT02, FBT08, and TH-RB in the Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and the El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park) showing depth intervals sampled, and an evaporation line fitted to the evaporated data in test-holes.

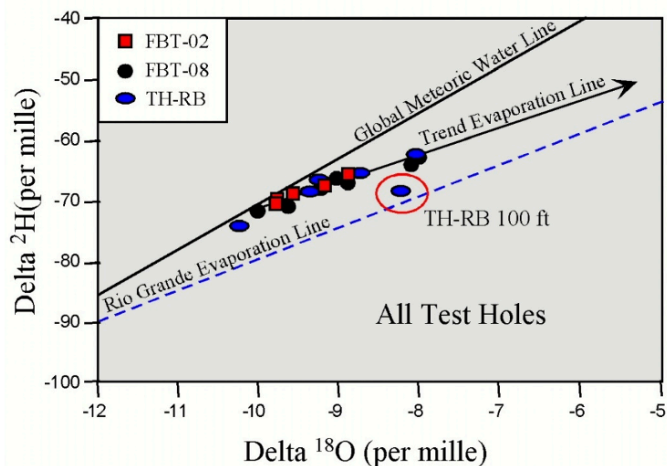


FIGURE 9: Integrated stable water isotope plot for FBT02, FBT08, and TH-RB in the Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and the El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park) showing how all data correlated in their fit to an evaporation line. The 100 ft sample at TH-RB is uniquely defined as a modern Rio Grande water source, but all other plots appear to come from a common source.

Valley. Future groundwater development depends on the final use for the water; for example, for drinking water, irrigation, or industrial uses. Although chloride and sulfate concentrations are not regulated by the Environmental Protection Agency (EPA) for drinking water purposes, there is a secondary drinking water standard established for both major ions. This standard is not an enforceable criterion because salts are considered secondary for aesthetic effects (e.g., taste). For both chloride and sulfate the secondary standard is 250 milligrams per liter (mg/L) (EPA, 2009). For many irrigation uses, concentrations of chloride should be below 350 mg/L (BER, 2004). The study area measured high concentrations of chloride in groundwater used for both irrigation and drinking water purposes. Many parts of the Hueco Bolson aquifer are already known for elevated salinity and this work has expanded our knowledge of these areas in the Eastern Hueco Bolson to the El Paso-Juarez Valley area, both vertically and spatially. Identification of salinity concentrations, dominant anion types, and anion ratios have aided our understanding of the Hueco Bolson aquifer.

Elevated chloride concentrations identified in the test holes in the study region may be a result of variable processes, including migration of saline water from deeper groundwater, mixing of saline water with

diluent water, and/or dissolution of evaporite minerals. Davis *et al* (2001) indicate that “Cl/Br ratios range from 50 to 150 in precipitation, 300 to 600 in domestic sewage, 280 to 300 in marine water, less than 250 in brine residues, and greater than 1,000 in waters that react with masses of halite in basin evaporites.” Alcala and Custodio (2008) indicate that “Cl/Br ratios may be increased up to 1,500 in groundwater by the addition of wastewater loaded with sodium chloride (NaCl) or leaching of solid waste and decreased to 300 by the use of bromide-based pesticides or leaching farm-animal or septic waste; leaching and dissolution of natural and industrial NaCl, and of gypsum-rich formations containing some NaCl may yield Cl/Br ratios between one thousand and several thousand.” The data show that high Cl/Br values are seen in the test wells especially at greater depth in the aquifer, providing strong evidence of a likely geologic source due to dissolution of evaporite minerals.

There is ample evidence to suggest halite dissolution associated with Fort Hancock Formation strata and more recent playa deposits formed after the ancestral Rio Grande was shut off from the Franklin Mountains-Organ Mountains gap (Hibbs and Merino, 2006). In nearby basins, high Cl/Br ratios in groundwater are linked to dissolution of minerals in deeper Paleozoic marine bedrock units that are known to contain halite and gypsum (Witcher *et al.*, 2004). An alternative source of salinity in the Hueco Bolson could be related to cross-formational leakage from bedrock formations beneath the basin fill. The Bolson deposits are already known to contain soluble evaporite units however, and it is more likely that salinity developed primarily due to in-situ dissolution reactions in the bolson deposits (Hibbs and Merino, 2006).

The lower facies of the Hueco Bolson are predominantly the fine textured, playa deposits of the Fort Hancock Formation of Tertiary and Quaternary age (Heywood *et al.*, 2003). According to Witcher *et al* (2004) “Gypsum and anhydrite (CaSO₄) are associated with Tertiary-Quaternary playa deposits and the dissolution and weathering of these deposits releases sulfur into groundwater as a sulfate anion.” High sulfate is very likely from groundwater reactions with Fort Hancock deposits. The two deepest points at FBT02 almost certainly penetrated gypsum and halite rich evaporite deposits in Fort Hancock strata in the last two test intervals (Figure 5).

A previous study by Gates and Stanley (1976) explains how the presence of dilute groundwater in the

El Paso-Juarez Valley area is compatible with recharge and groundwater flow through the sand-rich Camp Rice Formation, while the presence of higher salinity levels in groundwater is consistent with groundwater flow through evaporites contained in the clay-dominated Fort Hancock strata. Test holes FBT02 and FBT08 penetrated coarser textured strata in the Eastern Hueco Bolson and the groundwater is therefore comparatively dilute at most test intervals. Test hole TH-RB in Rio Bosque Park penetrates the Fort Hancock Formation at around 600 to 800 feet (182.9 to 243.8 m) bgs and groundwater is very saline at greater depth.

At depths ranging from 350 to 730 ft (106.7 to 222.5 m) bgs, the groundwater is still remarkably saline, and chloride enriched, at TH-RB (Figures 5 and 6). There is evidence to suggest that halite dissolution at these shallow depths is associated with groundwater reaction with more recent, shallower, post Camp Rice playa deposits that formed after the ancestral Rio Grande was shut off from the Franklin Mountains/Organ Mountains gap. This process isolated the ancestral Rio Grande from the Hueco Bolson before the submodern Rio Grande eventually cut through the gap between the Franklin and Juarez Mountains. Evaporite rich playa deposits subsequently formed in the Hueco Bolson during the time interval between flows of the ancestral and modern Rio Grande (Hibbs and Merino, 2006). Post Camp Rice playa deposits have been shown to be an important source of aquifer salinity further downstream in the Fabens area (Hibbs and Merino, 2006). The data collected in this study provides evidence that shallow, evaporite-rich playa deposits also formed in the vicinity of TH-RB at the same time.

Stable Water Isotopes

Water isotopes imply a common source in FB and TH-RB test holes between State line and the El Paso-Juarez Valley. Paine and Collins (2002) mapped a series of faults and a possible internal buried channel that trends between these test hole locations. For groundwater below 350 ft (106.7 m) bgs the water isotopes suggest a hydraulic connection between the FB test-holes and TH-RB. It is likely that fault control and possible axial channels that are buried near the eastern margins of the Hueco Bolson control fluid movement from the FB to the TH-RB test hole in the deeper strata.

The original source of evaporated water may be from the antecedent Lake Otero and surrounding phreatic (wet) playas where groundwater was at or near

land surface. Lake Otero existed until a few thousand years ago in the Tularosa Basin (Newton *et al.*, 2014). Today, the contemporary but much smaller Lake Lucero is still an evaporative discharge area. Recent isotope data collected in the White Sands/Lake Lucero area representing a shallow groundwater source plot along the same evaporative trend shown in the FB and TH-RB test holes (Figure 10) (Newton *et al.*, 2014). Some of the groundwater samples collected near Lake Lucero are not evaporated, and some of the samples are, alternatively, highly evaporated (Figure 10). This indicates recharge of unevaporated water at another location or time when depth to groundwater was too great for evaporation to occur, or where antecedent lakes were not present (Figure 11). That the historic Lake Otero region may be the source of water moving to the FB and TH-RB test hole areas of the Hueco Bolson must be considered a credible hypothesis, given the absence of evaporated waters in most other areas of the Hueco Bolson where the bolson aquifer is recharged by local precipitation and runoff internally.

Isotopic stratification of groundwater at the FB and TH-RB test holes revealed that evaporated water is at the bottom of the profiles (Table 1 and Figure 8). It is likely that another unevaporated recharge source comes in to the flowpath between the Tularosa Basin source area and the FB and TH-RB testholes collecting at the top of the groundwater column in FBT02 and TH-RB test holes, and midpoint of FBT08, resulting in older evaporated water being found in deeper intervals in test holes (Figure 11). This source could come from any source along the flowpath where active recharge occurs. This unevaporated source could either come directly through infiltration through basin fill at a time when the region's climate was cooler and moister, or from mountain front recharge that occurred at any time in the last several thousand years. An axial flow component coming into the mid-depth intervals in FBT08 is implied from the water isotopes (Table 1; Figures 8 and 11).

Conclusions

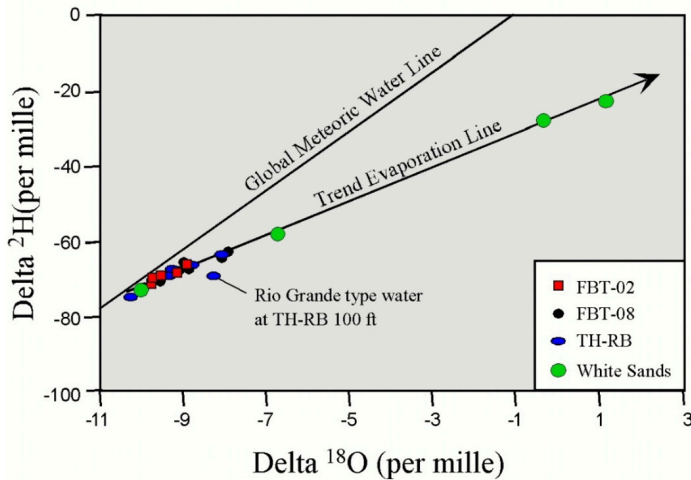


FIGURE 10: Integrated stable water isotope plot for FBT02, FBT08, TH-RB, and White Sands National Monument area extending from White Sands in the Tularosa Basin to the Eastern Hueco Bolson (Fort Bliss area) and El Paso-Juarez Valley area (Rio Bosque Park) in the Hueco Bolson. Data show how all data correlated in a fit to an evaporation trend line that may indicate a common evaporated source in the Tularosa Bolson, possibly from ancient Lake Otero and associated phreatic playas in the Tularosa Bolson (White Sands groundwater data from Newton and Allen, 2014).

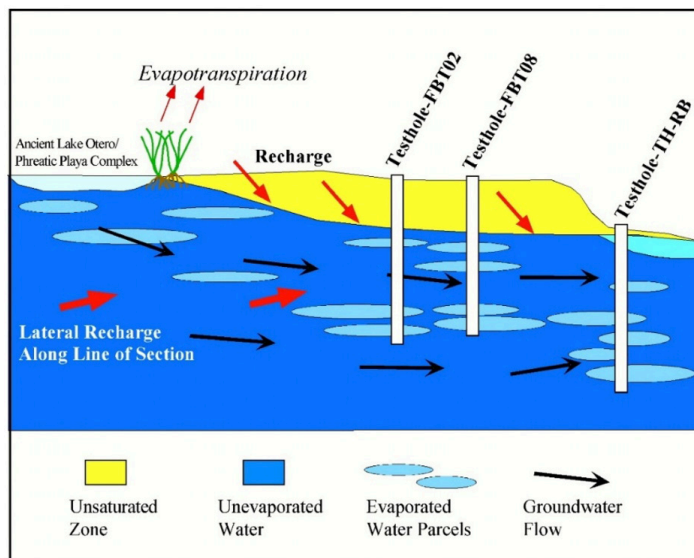


FIGURE 11: Conceptual model for groundwater flow from an evaporated water source near historic Lake Otero, extending across the Tularosa Bolson into the Eastern Hueco Bolson and moving to the El Paso-Juarez Valley.

Complementary use of hydrochemical and isotopic data provided a conceptual model for evaluating recharge sources and salinity in the Eastern Hueco Bolson. Well defined aquifer “stratification” of water isotopes and common anions is found in this part of the Hueco Bolson aquifer system. The evidence suggests that halite dissolution occurs as groundwater flows between the FB and TH-RB testholes. The original source of evaporated water in test holes may be from the antecedent Lake Otero and surrounding phreatic (wet) playas where groundwater was at or near land surface in early Holocene times. Another unevaporated recharge source(s) between the Tularosa Basin and the FB and TH-RB testholes collects at parts of the groundwater column, resulting in older evaporated water being found in deeper intervals in test holes, and younger less evaporated waters collecting at different points at and beneath the water table. Isotopic and hydrochemical segregation of groundwater along vertical profiles should be recognized in future conceptual and numerical groundwater models of the area.

Acknowledgments

Research supported by NSF Glue Grant and Center renewal grant to the CEA-CREST Center at California State University, Los Angeles. Special acknowledgments to El Paso Water Utilities for providing water samples from test holes.

References

- Alcala, F. and Custodio, E. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal: *Journal of Hydrology*, Vol. 359, p. 189– 207.
- Buckner, W.A. (1977). Results of exploratory drilling by the Texas Water Development Board in the El Paso Lower Valley, Texas, 1976-77: Texas Water Development Board Open-File Report (number unlisted), 38 p.
- Bureau of Environmental Remediation. (2004). Investigation and remediation of salt (chloride) impacted soil and groundwater. Remedial section guidance BER Policy # BER-RS-13A.
- Clark, I. and Fritz, C. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*: Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA, 328 p.
- Craig, H. (1961a). Isotopic variations in meteoric waters: *Science*. Vol. 133, p. 1702-1703.
- Craig, H. (1961b). Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters: *Science*. Vol. 133, p. 1833-1834.

- Davis, S., Cecil, L., Zreda, M. and Moysey, S. (2001). Chlorine-36, bromide, and the origin of spring water: *Chem. Geol.*, Vol. 179, p. 3-16.
- de la O Carreno, A. (1958). Investigation of subsurface geohydrologic conditions at Juárez, Chihuahua, applying electrical geophysics: Mexico City, D.F., 55 p.
- Druhan, J., Hogan, J., Eastoe, J., Hibbs, J., and Hutchison, W. (2007). Hydrogeologic controls on groundwater recharge and salinization, a geochemical analysis of the northern Hueco Bolson aquifer: *Hydrogeology Journal*, Vol.16, p. 281-296.
- Eastoe, C., Hibbs, B., Granados, A., Hogan, J., Hawley, J., and Hutchison, B. (2009). Isotopes in the Hueco Bolson aquifer, Texas (USA) and Chihuahua (Mexico) – local and general implications for recharge sources in alluvial basins: *Hydrogeology Journal*, Vol.16, p. 737-747.
- Eastoe, C., Hutchison, W., Hibbs, B., Hawley, J., and Hogan, J. (2010). Interaction of a river with an alluvial basin aquifer, stable isotopes, salinity, and water budgets: *Journal of Hydrology*, Vol. 395, p. 67-78.
- Eastoe, C., Granados, A., and Hibbs, B. (2016). Tracers of groundwater mixing in the Hueco Bolson Aquifer, Ciudad Juarez, Mexico: *Environmental and Engineering Geoscience Journal*, Vol. 22, p. 195-207.
- Gates, J., and Stanley, W. (1976). Hydrologic interpretation of geophysical data from the Southeastern Hueco Bolson, El Paso and Hudspeth counties Texas. United States Department of the Interior Geological Survey (USGS), Open File Report 76-650, 37 p.
- Gates, J., and White, D. (1976). Test drilling for ground water in Hudspeth, Culberson, and Presidio counties in westernmost Texas: U.S. Geological Survey Open-File Report 76-338, 76 p.
- Gehre, M., Hoefling, R., Lowski, P., Strauch, G. (1996). Sample preparation device for quantitative hydrogen isotope analysis using chromium metal: *Analytical Chemistry*, Vol. 68, p. 4414-4417.
- Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds: *Nature*. Vol. 271, p. 534-536.
- Gustavson, T. (1991). Arid basin depositional systems and paleosols: Fort Hancock and Camp Rice Formations (Pliocene-Pleistocene) Hueco Bolson, West Texas and adjacent Mexico: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations 198, 49p.
- Hawley, J., and Kottlowski, F. (1969). Quaternary geology of the south-central New Mexico border region, in Kottlowski, F.E., and Le Mone, D.V., eds., *Border stratigraphy symposium*: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 104, p. 89-115.
- Hawley, J., Kennedy, J., Granados-Olivas, A., and Ortiz, M. (2009). Hydrogeologic framework of the binational western Hueco Bolson-Paso del Norte area, Texas, New Mexico, and Chihuahua - Overview and progress report on digital model development: N.M. Water Resources Research Institute, New Mexico State University, Technical Completion Report 349, 45 p.
- Henry, C., and Gluck, J. (1981). A preliminary assessment of the geologic setting, hydrology, and geochemistry of the Hueco Tanks geothermal area, Texas and New Mexico: Texas Bureau of Economic Geology Geological Circular 81-1, 48 p.
- Heywood, C., and Yager, Y. (2003). Simulated ground-water flow in the Hueco Bolson, an alluvial-basin aquifer system near El Paso, Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4108, 55p
- Hibbs, B., Boghici, R., Hayes, M., Ashworth, J., Hanson, A., Samani, Z., Kennedy, J., Creel, B. (1997). Transboundary aquifers of the El Paso/Ciudad Juarez/Las Cruces region: Texas Water Development Board and New Mexico Water Resources Research Institute; Technical contract report prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, 148 p.
- Hibbs, B. (1999). Water quality and hydrogeologic issues along the City of El Paso/Ciudad Juarez corridor - international case study: *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol.5, p 27-39.
- Hibbs, B., Phillips, F., Hogan, J., Eastoe, C., Hawley, J., Granados, A., and Hutchison, B. (2003). Hydrogeologic and isotopic study of the Hueco Bolson aquifer: *Hydrological Science and Technology*, Vol. 19, p. 109-119.
- Hibbs, B., and Merino, M. (2006). A geologic source of salinity in the Rio Grande Aquifer: *New Mexico Journal of Science*, Vol. 44, p. 165-181.
- Hibbs, B. (2017). Aquifer compartmentalization at a transitional mountain front, implications for basin assessment and numerical modeling; in Dunn, C., and Van Weele, B., eds., *Groundwater, Sustainability, and Hydro-Climate/Climate Change*: American Society of Civil Engineers, Reston, VA. p. 90-101.
- Hibbs, B., and Merino, M. (2020). Reinterpreting models of slope front recharge in a desert basin: *Geosciences Journal*, Vol. 10, <https://doi.org/10.3390/geosciences10080297>
- Hogan, J., Phillips, F., Mills, S., Hendrickx, J., Ruiz, J., Chesley, J., and Asmerom, Y. (2007). Geologic origins of salinization in a semi-arid river, the role of sedimentary basin brines: *Geology* Vol. 35, p. 1063-1066.
- Hutchison, B., and Hibbs, B. (2008). Groundwater budget and isotopic analysis of cross formational flow in an arid basin: *Ground Water Journal*, Vol. 46, p. 384-395.
- Kernodle, J. (1992). Results of simulations by a preliminary

- numerical model of land subsidence in the El Paso, Texas, area: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4037, 35 p.
- Knowles, T., and Alvarez, J. (1979). Simulated effects of ground-water pumping in portions of the Hueco bolson in Texas and Mexico during the period 1973 through 2029: Texas Department of Water Resources Report LP-104, 26 p.
- Land, L., and Armstrong, C. (1985). A preliminary assessment of land-surface subsidence in the El Paso area, Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 85-4155, 96 p.
- Lee Wilson and Associates, Inc. (1986). Exhibit 1 of the City of El Paso in support of its applications to appropriate ground water in New Mexico: Unpublished consultant's report prepared for the El Paso Water Utilities Public Service Board, 75 p.
- Leggat, E., and Davis, M. (1966). Analog model study of the Hueco Bolson near El Paso, Texas: Texas Water Development Board Rept. 28, 26 p.
- Meinzer, O., and R. Hare. (1915). Geology and Water Resources of Tularosa Basin, New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 343. 317 p.
- Meyer, W. (1976). Digital model for simulated effects of ground-water pumping in the Hueco Bolson El Paso area, Texas, New Mexico, and Mexico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 58-75, 31 p.
- Newton, B. and Allen, B. (2014). Hydrologic investigation at White Sands National Monument: New Mexico Bureau Geology Mineral Resources, Open-file Report, Vol. 0559, 51 p.
- Orr, B., and Risser, D. (1992). Geohydrology and potential effects of development of freshwater resources in the northern part of the Hueco Bolson, Doña Ana and Otero Counties, New Mexico, and El Paso County, Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 91-4082, 92 p.
- Paine, J., and Collins, E. (2002). Evaluating potential groundwater resources on State Lands in El Paso County, Texas using airborne geophysics: Report prepared for the General Land Office under contract no. 02-306R, 87 p.
- Sayre, A., and Livingston, Penn. (1945). Ground-water resources of the El Paso area, Texas: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 919, 190 p.
- Slichter, C. (1905). Observations on ground water of the Rio Grande Valley: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 141, 83 p.
- Strain, W. (1966). Blancan mammalian fauna and Pleistocene formations, Hudspeth County, Texas: Texas Memorial Museum, Bulletin 10, 55p.
- USBR (U.S. Bureau of Reclamation). (1973). Water Resources of El Paso County, Texas: Rio Grande Project, New Mexico - Texas Project Office, El Paso, Texas, 97 p.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2009). Drinking water contaminants. US EPA 816-F-09-0004. Retrieved from EPA website: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm>
- Witcher, J., King, J., Hawley, J., Kennedy, J., Williams, J., Cleary, M., and
- Bothern, L. (2004). Sources of salinity in the Rio Grande and Mesilla Basin Groundwater: Las Cruces, NM. New Mexico Water Resources Research Institute of New Mexico State University, Technical Report 330.
- White, D. (1983). Summary of hydrologic information in the El Paso, Texas area, with emphasis on ground-water studies, 1903-80: U.S. Geological Survey Open-File Report 83-775, 77 p.
- Wilkins, D. (1986). Geohydrology of the southwest alluvial basins regional aquifer-systems analysis, parts of Colorado, New Mexico, and Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4224, 61 p.

III.3 Estimación de la transmisividad de un acuífero en un solo pozo

Estimation of the transmissivity of an aquifer in a single well

Zohrab Samani¹, Ana García-Vásquez¹, Alfredo Granados-Olivas², Mauricio Mercado-Pérez³

¹New Mexico State University, ²Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ³Consultor Independiente

Resumen

La transmisividad de un acuífero es un parámetro importante, el cual es utilizado en el modelado de aguas subterráneas y diseño de pozos. El método tradicional de estimación de la transmisividad en acuíferos requiere de uno o más pozos de observación en las cercanías de un pozo de bombeo. Este método requiere de mayor tiempo, costo y es limitado a un periodo corto de bombeo. El método de un solo pozo se define por el uso de la geometría de pozos a través de parámetros hidráulicos y registros geofísicos de un solo pozo para estimar la transmisividad del acuífero. Este método hace posible estimar los valores de la transmisividad para un gran número de pozos con una precisión razonable.

Abstract

Aquifer transmissivity is an important parameter which is used in groundwater modeling and well design. The traditional method of estimating aquifer transmissivity requires one or more observation wells at the vicinity of a pumping well. This method is time consuming, costly and is limited to a short pumping period. A single well method is described which uses well geometry along with hydraulic parameters and geophysical logs of a single well to estimate the aquifer transmissivity. This method makes it possible to estimate the transmissivity values for a large number of wells with reasonable accuracy.

Introducción

La transmisividad de un acuífero y los coeficientes de almacenamiento son dos de los parámetros más importantes mayormente utilizados en el diseño de pozos y el manejo de aguas subterráneas. Mientras que los coeficientes de almacenamiento representan la capacidad de almacenamiento del acuífero, la transmisividad representa la capacidad que tiene el acuífero para transmitir agua.

La transmisividad juega un rol más importante en el funcionamiento del acuífero que el coeficiente de almacenamiento. Por ejemplo, en un pozo típico, duplicando el valor del coeficiente de almacenamiento aumentará el abatimiento solo un 10 %, mientras que si duplicamos la transmisividad el abatimiento aumentará a un 190 %. Debido a la importancia de los valores de transmisividad, a menudo se utilizan los valores de transmisividad variables en la simulación de aguas subterráneas, mientras que solo se utiliza un valor en el coeficiente de almacenamiento para todo el acuífero (Frenzel, 1990).

Normalmente, los valores de la transmisividad se estiman mediante el método comúnmente llamado "prueba de bombeo" (Bouwer 1978), en el cual el agua es bombeada con un caudal constante desde un solo pozo y el abatimiento es medido en uno o más pozos de observación a cierta distancia. La relación entre la tasa de bombeo y el abatimiento en un pozo de observación está descrita por Theis (1935). Una versión más simplificada de la ecuación de Theis fue desarrollada por Cooper y Jacob (1946). Mientras que estimar la transmisividad del acuífero utilizando un pozo de observación basado en los supuestos es teóricamente correcto, el método requiere de mucho tiempo y es más costoso. Los pozos de observación normalmente no se encuentran disponibles. La duración de este tipo de pruebas a menudo es limitada por un periodo de tiempo corto, por lo tanto, representa solo un área limitada alrededor del pozo que es afectado por el cono de depresión, en tanto que el actual cono de depresión de un pozo de bombeo durante la operación actual puede prolongarse por días o meses y extenderse en una distancia significativa del pozo. Por consiguiente, los valores de transmisividad medidos en un periodo corto pueden no ser representativos para el acuífero o del rendimiento del pozo a largo plazo.

Debido al alto costo del método de la prueba de bombeo y a la falta de la disponibilidad de pozos de observación apropiados, este es el tipo de mediciones que a menudo se limitan a unos cuantos pozos en el acuífero. Por ejemplo, existen 140 pozos perforados en el Bolsón del Hueco en el acuífero de Ciudad Juárez, México, pero las pruebas de bombeo han sido realizadas únicamente en cinco pozos. En los 6000 km² del acuífero de la Mesilla, en Nuevo México, solo dos pruebas de pozos fueron dispuestos para los autores, mientras que cientos de pozos han sido perforados y operados en este acuífero. Por lo tanto, es muy conveniente estimar los valores de transmisividad de un solo pozo con datos

limitados. Este artículo describe el método de un solo pozo y compara los resultados.

Metodología

Teoría

La relación entre el abatimiento y la tasa de bombeo fue inicialmente descrita por Theis (1935) como se muestra a continuación:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

donde s es el abatimiento en una distancia específica de un pozo de bombeo, Q es la tasa de bombeo, T es la transmisividad y u es definida como:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2)$$

donde R es la distancia específica en la cual el abatimiento (s) es medida, S es el coeficiente de almacenamiento del acuífero, T es la duración del bombeo.

A pesar de la dificultad para calcular la transmisividad con el método de Theis, Cooper y Jacob (1946) desarrollaron una versión simplificada de la ecuación de Theis, donde el valor de u es menor que 0.005, como se muestra a continuación:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (3)$$

La ecuación III.3.3 también puede ser utilizada para calcular la capacidad específica (Q/s) de un pozo si el radio del pozo es tomado como la distancia (r). Reorganizando la ecuación de Theis para una capacidad específica (Q/s), da como resultado:

$$\frac{Q}{s} = \frac{4\pi T}{\ln \frac{2.25Tt}{r^2 S}} \quad (4)$$

La ecuación III.3.4 representa la capacidad específica teórica de un pozo. Sin embargo, la capacidad específica real es menor que la capacidad específica teórica representada por la ecuación III.3.4. Las diferencias se deben a varios factores, incluidas las convergencias de las líneas de flujo en la proximidad de un pozo, la pérdida de carga hidráulica en la rejilla del pozo y la obstrucción potencial de formación del

acuífero durante la operación de la perforación del pozo. La capacidad específica actual se calcula dividiendo la tasa de descarga Q por el abatimiento actual (S_a). Este abatimiento es afectado por la curvatura del flujo en las proximidades del pozo y la pérdida de carga hidráulica a través de la rejilla. Las pérdidas de carga hidráulica normalmente son significantes en un tubo de pantalla de pozo ranurado con un área abierta limitada, mientras que la pérdida de carga hidráulica a través de la pantalla envuelta en alambre con grandes áreas abiertas de la rejilla es comúnmente insignificante. Un cálculo de la pérdida de carga hidráulica teórica a través de la rejilla del pozo, el cual es diseñado para operar a una velocidad menor a 0.1 pies/s, mostrará que la pérdida de carga hidráulica es igual a 0.00013 m. Sin embargo, la pérdida de carga hidráulica, a pesar de la convergencia del flujo, puede ser significativa y depende de la tasa de descarga del pozo. La relación entre la capacidad específica teórica y actual se puede describir como se muestra a continuación (Briggs and Fiedler, 1975):

$$\frac{Q}{S_a} = \left(1 - 0.5 \frac{S_a}{S_m}\right) \frac{Q}{S} \quad (5)$$

donde S_m es el máximo abatimiento en el pozo, en el cual es igual a la profundidad del agua en el pozo bajo condiciones hidrostáticas, y S_a es la capacidad actual del cono de abatimiento, (Q/S_a) es calculado dividiendo la velocidad de la descarga por el abatimiento actual.

Una vez que la capacidad específica actual es calculada, la capacidad específica teórica (Q/s) puede ser calculada mediante la ecuación III.3.5. El valor de la transmisividad (T) calculada de la ecuación III.3.4 representa la transmisividad del pozo y no la transmisividad real del acuífero (Bouwer, 1978). Para calcular la transmisividad del acuífero, la conductividad hidráulica del área alrededor de la rejilla del pozo podría ser calculada y subsecuentemente corregida por la profundidad total del acuífero. De acuerdo con Bouwer (1978), la conductividad hidráulica del acuífero alrededor de la rejilla del pozo se puede calcular dividiendo la transmisividad del pozo por la longitud de la rejilla del pozo de la siguiente manera:

$$K = \frac{T}{L} \quad (6)$$

donde K es la conductividad hidráulica, T transmisividad del pozo y L longitud de la pantalla del pozo.

Una vez que la conductividad es calculada, la transmisividad del acuífero (T_a) se puede determinar

multiplicando la profundidad del acuífero por la conductividad hidráulica. El siguiente ejemplo muestra cómo la transmisividad de un acuífero fue estimada utilizando la geometría y los parámetros hidráulicos de un solo pozo.

Resultados

Los resultados en el acuífero Bolsón del Hueco se determinaron como sigue:

Datos disponibles

Nombre del pozo: 15-R
 Tasa de descarga: = 26.67 L/s = 2304 m³/día
 Duración del bombeo = 30 días
 Nivel estático del agua = 55.76
 Nivel dinámico del agua = 66.13 m
 Profundidad total del pozo = 218 m
 Radio del pozo (radio inicial del pozo) = 0.279 m
 Longitud de la rejilla = 118 m
 Coeficiente de almacenamiento estimado = 0.002
 Tipo de información: depósitos aluviales con capas de arcilla intercaladas.
 Otra información disponible: registros geofísicos.

Cálculos

$S_a = 66.13 - 55.76 = 10.37$ m
 $S_m = 218 - 55.76 = 162.24$ m
 $Q/S_a = 2304/10.37 = 222.2$ m³/día/m
 Q/S (Ecuación III.3.5) = 229.5 m³/día/m
 Transmisividad del pozo (Ecuación III.3.4) = 344 m²/día
 Conductividad Hidráulica (K) = 344/118 = 2.92 m/día
 Espesor del acuífero (de registros geofísicos) = 161.2 m

Espesor total de las capas de arcilla (de registros geofísicos) = 9 m

Transmisividad del acuífero (T_a) = (161.2-9) × 2.92 = 444 m²/día

Comparación de campo

En el acuífero del Bolsón del Hueco, 140 pozos están en operación, bombeando un volumen anual total de 140 millones de metros cúbicos de agua. Sin embargo, las pruebas de bombeo son realizadas solo en pozos que utilizan pozos abandonados como pozos de observación. Las pruebas de bombeo se realizaron en periodos de 24 horas. Se utilizó el método de un solo pozo para estimar la transmisividad del acuífero en esos pozos y los resultados fueron comparados con el método de la prueba de bombeo. El valor del coeficiente de almacenamiento fue comparable con el valor del coeficiente de almacenamiento de Orr y Winsler (1992) de 0.001 para el lado estadounidense del Bolsón del Hueco. Los abatimientos fueron medidos en los pozos de bombeo después de periodos de un mes de bombeo continuo. La Tabla 1 compara los valores de transmisividad estimados y medidos.

Las estimaciones de un solo pozo son generalmente inferiores que los resultados de las pruebas de bombeo. Esto se puede atribuir al impacto de la perforación rotatoria del lodo en el acuífero, lo cual resulta en la reducción de la permeabilidad del acuífero en las proximidades del pozo. La otra razón para la diferencia podría deberse a la diferencia en la duración de las pruebas. Los resultados de las pruebas de bombeo se basaron en un periodo de prueba de 24 horas, mientras que las pruebas de un solo pozo se basaron en periodos de 30 días. Una vez que se confirmó la validez del método de un solo pozo se midieron los valores de

TABLA 1: Comparación de los valores de transmisividad estimados y medidos para cinco pozos en el acuífero del Bolsón del Hueco (México).

Pozo	T_a (prueba de bombeo) (m ² /día)	T_a (un solo pozo) (m ² /día)	Diferencia porcentual
P15-R	534.8	444	17.0
P73-R	416.0	400	3.8
P75-R	2229.1	2004	10.0
P98-R	818.2	864	6.0
P98-R	1080.0	834	23.0

transmisividad para los 140 pozos utilizando los registros de los pozos.

Conclusión y discusión

Se introdujo un método simple que utiliza los parámetros geométricos e hidráulicos junto con los registros geofísicos de un solo pozo para estimar la transmisividad del acuífero en la proximidad de un pozo. El método propuesto es simple y utiliza los registros del pozo que están fácilmente disponibles. El método propuesto permite estimar los valores de transmisividad para un gran número de pozos sin necesidad de pozos de observación. Los resultados del método de un solo pozo se acercaron razonablemente a los valores obtenidos por el método tradicional de prueba de bombeo. Las ventajas del método de un solo pozo propuesto son el bajo costo y la simplicidad del método.

Referencias

- Bouwer, H., 1978. Groundwater Hydrology. New York McGraw Hill Book Company. Cooper H.H., and C.E. Jacob, 1946. A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History. Trans. Am. Geophysical Union 27:526-534
- Frenzel, P. and C. Kaehler. 1990. Geohydrology and Simulation of Groundwater Flow in the Messilla Basin, Dona Ana County, New Mexico and El Paso County, Texas. USGS Open File Report 88-305
- Briggs, G. F. and Fiedler, A. G. Universal Oil Products Company. Johnson Division. 1975. Groundwater and Wells: a Reference Book for the Water-well Industry.
- Theis, C. V. 1935 The Relation between Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of a Well Using Groundwater Storage. Trans. Am. Geophys. Un. 16:519-524
- Orr, B. R. and D. W. Risser. 1992. Geohydrology and Potential Effects of Water Sources in the Otero Counties, New Mexico and El Paso County, Texas. USGS Open File Report 91-4082.

III.4 Assessment of water availability and water scarcity in an irrigated watershed using SWAT

Evaluación de la disponibilidad de agua y la escasez de agua en una cuenca de regadío utilizando SWAT

Sora Ahn¹, Zhuping Sheng¹, Chunggil Jung¹, Ali Mirchi², Alfredo Granados-Olivas³, Maryam Samimi², William Hargrove⁴

¹Texas A&M, ²Oklahoma State University, ³Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ⁴University of Texas at El Paso

Abstract

As the population growth continues and competition for water between agricultural production and urban water supplies intensifies, water availability continues to attract more attention especially in arid regions. To sustain water availability for agricultural production we need a better understanding of the overall balance among the components of the hydrologic cycle at the watershed scale. In this chapter a new index approach was presented with a case study in Rincon Valley, New Mexico. The surface water and groundwater exchange were first assessed by using the SWAT model. Based on a better understanding of the hydrologic behavior of the selected watershed, an integrated water availability index was then developed combining the primary hydrologic attributes from SWAT to provide guidelines for irrigation management. The results helped to identify and visualize key factors that contribute to water availability in the agricultural area. As case study demonstrated that the integrated water availability index scores captured water stresses for different crops and different irrigation units. For example, 0.21, 0.56, 0.91, and 0.20 were for alfalfa, corn, cotton, and pecans, respectively in the normal year while 0.16, 0.78, 0.88, and 0.24 for them, respectively in the dry year. During the dry year, water supply and demand were balanced by controlling crop patterns from reducing alfalfa acreage by 12% and increasing cotton acreage by 13%. The water uses of major crops were ranked in order as alfalfa, pecans, cotton, and corn. The proposed approach provides useful information and guidelines for securing water sustainability of irrigated agriculture at the level of different irrigation units.

Resumen

A medida que continúa el crecimiento de la población y se intensifica la competencia por el agua entre la producción agrícola y el suministro de agua urbana, la disponibilidad de agua sigue atrayendo más atención, especialmente en las regiones áridas. Para mantener la disponibilidad de agua para la producción agrícola, necesitamos una mejor comprensión del equilibrio general entre los componentes del ciclo hidrológico a escala de la cuenca. En este capítulo se presentó un nuevo enfoque de índice con un estudio de caso en Rincon Valley, Nuevo México. El intercambio de aguas superficiales y subterráneas se evaluó primero mediante el modelo SWAT. Sobre la base de una mejor comprensión del comportamiento hidrológico de la cuenca seleccionada, se desarrolló un índice integrado de disponibilidad de agua que combina los atributos hidrológicos primarios de SWAT para proporcionar pautas para el manejo del riego. Los resultados ayudaron a identificar y visualizar factores clave que contribuyen a la disponibilidad de agua en el área agrícola. El estudio de caso demostró que los puntajes del índice integrado de disponibilidad de agua capturaron el estrés hídrico para diferentes cultivos y diferentes unidades de riego. Por ejemplo, 0.21, 0.56, 0.91 y 0.20 fueron para alfalfa, maíz, algodón y nueces, respectivamente, en el año normal, mientras que 0.16, 0.78, 0.88 y 0.24 para ellos, respectivamente, en el año seco. Durante el año seco, la oferta y la demanda de agua se equilibraron controlando los patrones de cultivo para que no redujeran la superficie cultivada de alfalfa en un 12 % y aumentarían la superficie cultivada de algodón en un 13 %. Los usos del agua de los principales cultivos se clasificaron en orden como alfalfa, nueces, algodón y maíz. El enfoque propuesto proporciona información y directrices útiles para asegurar la sostenibilidad del agua en la agricultura de regadío a nivel de diferentes unidades de riego.

Introduction

Background

As the population continues to grow and competition for water between agricultural production and urban water supplies intensifies, water availability continues to attract more attention especially in arid regions. Climate change is expected to further affect the regional hydrologic systems and redistribution of water resources over different temporal and spatial scales

(Sheng 2013; Bai *et al.*, 2016; Aliche *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018). Drought is expected to be more severe over time and prolonged, specifically under extreme climate conditions, and will become a serious challenge for agricultural water management in arid/semi-arid regions (Zektser *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2005; Barnett *et al.*, 2008; Liu and Sheng 2011; Herrera-Pantoja & Hiscock, 2015; Kim *et al.* 2017). The negative effects of reduced water availability for agricultural production become acute for drought-sensitive crops (e.g., alfalfa, corn, rice, and nut trees) of high economic importance. To sustain water availability for agricultural production we need a better understanding of the overall balance among the components of the hydrologic cycle at the watershed scale.

Few studies on water availability and water scarcity have been conducted for effective watershed management by using different models (Perrin *et al.* 2012; Herrera-Pantoja and Hiscock 2015, Garrote *et al.* 2016; Versini *et al.* 2016). Jordan *et al.* (2018) analyzed the water-use efficiency by changing the land cover and irrigation practices in the Bulgan River watershed of western Mongolia by using the SWAT model. Duan *et al.* (2019) evaluated effectiveness of the natural and anthropogenic water connections in mitigating climate change impact on surface water supply stress at the Hydrologic Unit Code (HUC-8) watersheds across the conterminous U.S. and concluded that mitigation practices could largely offset water stress trends by reducing demand and enhancing supply. However, approaches used in those studies addressed specific hydrological issues without accounting for the interactions among various hydrologic components.

Some recent studies have proposed different water resources indices and matrices to rank water scarcity, water stress and water availability at different scales from a water system to a watershed. For example, Sanchez *et al.* (2015) analyzed the relationships among stream health indicators in the Saginaw River watershed of Michigan (i.e., flow, sediment, and nutrient loads) using the SWAT model and spatial-clustering techniques. Wu *et al.* (2016) used the soil topographic index approach to identify the spatial variability of hydrologic sensitive areas for maintaining water sustainability in a watershed in Clinton and Tewksbury Townships in New Jersey, U.S. Ahn & Kim (2017) proposed the watershed health index in the Han River basin of South Korea by considering six essential indicators of landscape, geomorphology, hydrology, water quality, habitat, and biological condition based

on monitoring data and hydrologic modeling results. Nilsalab & Gheewala (2019) proposed the water stress index for assessing water scarcity in the Bang Pakong watershed of Thailand with two approaches based on a human perspective and an environmental perspective. These indices not only offer a clear overview of water availability and vulnerability, but also provide important information for decision makers in the planning and managing the water resource systems. However, the indices of most studies were evaluated at a watershed or river basin scale and did not address the water availability and the water stress of major crops at a field or irrigation unit scale in an irrigated agricultural area. There is need to expand the scope of indexing systems to characterize the integrated influence of watershed hydrologic systems with various watershed characteristics by linking hydrologic cycle components, weather conditions, and crop coverages.

To fill this gap, we propose a new approach. We first assessed surface water and groundwater exchange in Rincon Valley, New Mexico in the Upper Rio Grande, a watershed in a semi-arid irrigated agricultural region using the SWAT model (Ahn *et al.* 2018). Based on a better understanding of the hydrologic behavior of the selected watershed, we then developed an indexing approach to assess water availability of the agricultural area (Ahn *et al.* 2018; Ahn and Sheng 2020). It considered weather conditions and crop patterns. The objectives of this study include: 1) expanding applications of SWAT modeling in an irrigated agricultural watershed, considering irrigation as a primary component of the water balance; 2) developing an integrated water availability index by combining the primary hydrologic attributes from SWAT to provide guidelines for irrigation management; and 3) identifying and visualizing key factors that contribute to water availability in the agricultural area and their potential risks by quantifying selected hydrologic components as indicators. The results of the study provide useful information and guidelines for securing water sustainability of irrigated agriculture at the level of different irrigation units.

In this chapter we introduce a new approach for assessment of water availability by integrating all the primary hydrological attributes from a SWAT model developed for simulation of hydrological processes in an irrigated agricultural watershed (Ahn *et al.* 2018; Ahn and Sheng 2020). A case study for Rincon Valley, New Mexico, USA, is used to demonstrate its application.

Methodology

There are many methods for assessment of water availability, from simple water balance/budget models to sophisticated numerical models. In this section we will present a new approach for assessment of water availability in an arid region by using the SWAT model based on a recent study sponsored by USDA (Ahn *et al.* 2018; Ahn and Sheng 2020). In this approach a SWAT model is first developed for a selected irrigation watershed and calibrated and validated with the observed data. The calibrated SWAT model is then used to simulate hydrological processes under specific weather conditions, for example, dry, normal, or wet condition. At the last step SWAT outputs of hydrological budget components are extracted and compiled to calculate water availability indices at the watershed scale or irrigation unit level.

Procedures for water availability assessment

Water availability can be defined as a function of relative supply and demand (Averyt *et al.* 2013). In this study the water availability assessment refers to evaluation of watershed hydrologic components and processes in the irrigated agricultural watershed. The water availability assessment is essentially based on the compilation and synthesis of the primary hydrologic attributes of a watershed (Figure 1). Five indicators, namely surface flow, evapotranspiration, soil water, groundwater recharge, and irrigation water are considered in this case. The methodology suggested by the United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA, 2012) was used to normalize different hydrologic attributes to a reference case so that they can be integrated into a composite score. In this study, all the indicators for water availability assessment are derived from the results of the SWAT model. It is designed to assess the effects on water availability by changing crop patterns and weather conditions in the irrigated agriculture areas within the watershed. Water availability assessment units here can be delineated based on hydrological response units (HRUs) from the SWAT model. These HRUs are the smallest hydrologic units that can be designated by the crop areas in the SWAT model. Sub-indices for each of these five components are obtained and aggregated as one integrated water availability index for each HRU within the watershed. As a result, all the sub-index and integrated index values are relative (i.e., “more available” vs. “less available”) rather than

absolute (i.e., “available” vs. “unavailable” cutoff score is identified). Therefore, they are used to compare the relative differences of water availability among regions rather than precisely defining whether water is available in the region. This methodology can be used to assess the available water capacity of an irrigated agricultural watershed and identify problems and possible solutions for effective water resources management. It provides a comprehensive understanding of the water system and allows for targeting irrigation management actions to ensure water availability.

SWAT model configuration and hydrological simulation

SWAT MODEL

In this study we used the SWAT model, a physically-based, continuous, long-term, and distributed-parameter watershed hydrological model designed to assess the effects of land management practices on hydrology and water quality in agricultural watersheds under the varying soil, land use, and management conditions (Arnold *et al.*, 1998). In the SWAT model a watershed is divided into different areas based on the

concept of HRUs, which are portions of a sub-basin with unique land use, management, and soil attributes. The runoff, sediment, and nutrient loadings are calculated separately for each HRU based on weather conditions, soil properties, topography, vegetation, and land management and then summed up to determine the total loading from the sub-basin (Neitsch *et al.*, 2002). In SWAT the hydrologic cycle is based on the water balance equation:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

where SW_t is the final soil water content (mm), SW_0 is the initial soil water content on day i (mm), t is the time (days), R_{day} is the amount of precipitation on day i (mm), Q_{surf} is the amount of surface runoff on day i (mm), E_a is the amount of evapotranspiration on day i (mm), W_{seep} is the amount of water entering the vadose zone from the soil profile on day i (mm), and Q_{gw} is the amount of return flow on day i (mm).

The SWAT user’s manual and theoretical documents provide a detailed description of the model development and theories (Neitsch *et al.*, 2005a, 2005b).

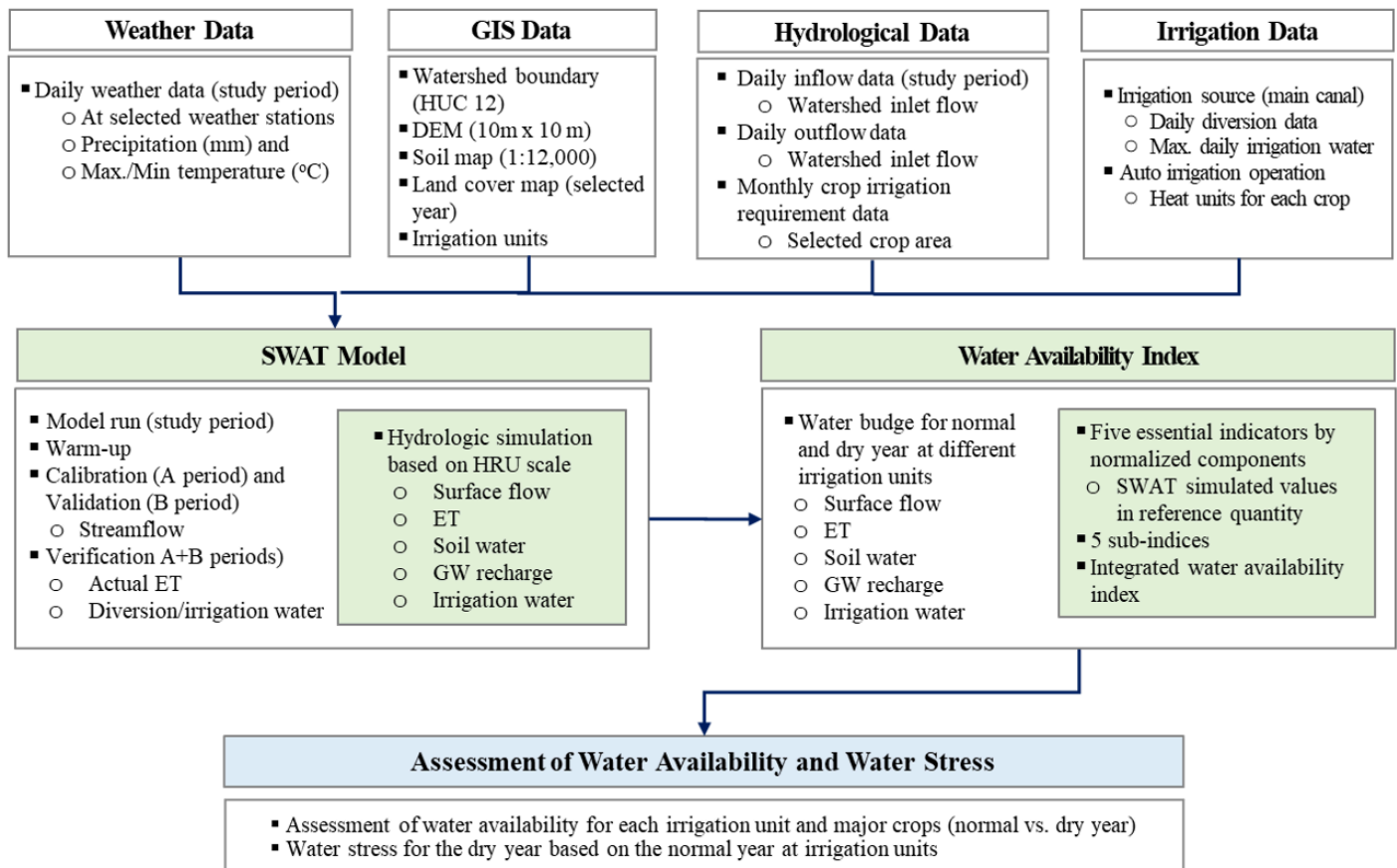


FIGURA 1: Flowchart of the water availability assessment procedure (modified from Ahn and Sheng 2020).

MEASURED DATA FOR THE SWAT MODEL EVALUATION

As shown in Figure 1, weather data, GIS coverages, hydrologic data and irrigation data is used as inputs of the SWAT model. The National Elevation Dataset (NED) Digital Elevation Model (DEM) produced by the U.S. Geological Survey (USGS) rasterized to 10m grid cell was used to define the SWAT sub-watershed delineation in this study (The data is freely available from <https://viewer.nationalmap.gov/basic/>). The watershed can be further divided into sub-watersheds based on DEM. The Hydrologic Unit Code (HUC) 12 from the Watershed Boundary Dataset (WBD) is used to delineate the watershed as the standard of an appropriate resolution for the SWAT modeling and irrigation assessment. As the smallest hydrologic unit here, they capture tributary systems for surface water drainage mapping designated by the National Subcommittee on Spatial Water Data.

The State Soil Geographic (STATSGO) soil map at the scale of 1:250,000 from the U.S. Department of Agriculture (USDA) National Resources Conservation Service (NRCS) provides SWAT soil attributes for all STATSGO MUKEY values in the United States. The STATSGO map could be used to identify different soil types (silty clay loam) of crop areas. The data is distributed as a spatial dataset from the USDA (2021a) soil survey.

The Cropland Data Layer (CDL) from USDA National Agricultural Statistics Service (NASS) is a raster, geo-referenced, crop-specific land cover data layer to provide acreage estimates of annual agricultural land cover for the continental U.S. For the model application of changes in crop areas, two spatial crop coverages including primary crops were prepared to represent normal and dry years. The land cover maps of CDL and NLCD were obtained from CropScape (USDA, 2021b) and Land Cover Institute (LCI).

Daily meteorological data of maximum / minimum temperature and precipitation over the study period were collected from available weather stations of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) to set up SWAT. Daily outflow data of a gauge station at the head of the watershed were used in the SWAT model as inlet flow. The flow data were obtained from the U.S. Bureau of Reclamation (USBR). For the calibration and validation of the SWAT model, daily streamflow data for the calibration period were obtained from a gauge station at the watershed outlet monitored by the USBR. In addition, monthly crop

water requirement data for the calibration period were prepared for the evapotranspiration verification of the SWAT model. The crop water requirement data were calculated from the Food Agriculture Organization (FAO) Irrigation and Drainage Paper 56 (Allen *et al.*, 1998). The monthly crop water requirement data were derived from a modified version of the Penman equation for calculating reference evapotranspiration (E_o) based on ASCE standard guidelines. This value is empirically derived from experimental data based on a grass referenced method that combines energy balance and heat and mass transfer functions (Allen *et al.*, 2005). A crop coefficient (K) is applied to the E_o to determine the daily ET , in inches.

Daily discharge data of a canal diverted from the river at the head of the watershed were obtained from the USBR and used in the SWAT model as an irrigation source. In this study, irrigation source was selected to be supplied from the reach. Discharge data helped us understand the water use (in depth) over the agricultural area and estimate the irrigation amount (mm) for the different crops in the study area. In the SWAT model, irrigation amount is estimated based on auto-irrigation function and scheduled by heat units applied to each crop. Auto-irrigation function simulates irrigation based on plant water demand or soil water content. In this model, the water demand method was chosen. More detailed information and explanation regarding the auto-irrigation function can be found in Neitsch *et al.* (2011). The planting date, planting period, and heat unit data for each crop were obtained from the FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (Allen *et al.*, 1998). Irrigation water amount (mm) for each crop can be supplied from the reach specified irrigation source.

SWAT MODEL IMPLEMENTATION

The water availability assessment requires the indicator data to be simulated with the SWAT model. This study uses the formulated SWAT calibration results (Ahn *et al.* 2018) in which calibration and validation periods were extended to capture the full hydrologic variability present in the system for longer periods using the same parameters. The calibration and validation of daily streamflow were conducted at the downstream gauge station. Additional verification was made with water diversion and evapotranspiration. A detailed selection of indicator data is presented in Section 2.3.3.

The most influential parameters and initial parameter ranges for each hydrologic component were selected with the sensitivity analysis. Then, a 6-step calibration

procedure was chosen for the entire watershed hydrologic cycle (Ahn *et al.* 2018). In this study, both calibration and validation were manually performed using a trial-and-error approach within recommended ranges to maximize the expert knowledge of watershed characteristics and modeling experience in a semi-arid watershed with heavily irrigated agricultural lands.

The coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE), root-mean-square error (RMSE), and percent bias (PBIAS) were used to quantitatively assess the model's ability to replicate temporal trends in the observed hydrological data.

R^2 values are defined as the square of the coefficient of correlation (Steel and Torrie, 1960). The NSE ranges from $-\infty$ to 1, where a value of 1 (NSE = 1) corresponds to a perfect match between the modeled value and the observed data and a value of 0 (NSE = 0) indicates that the model predictions are as accurate as the mean of the observed data. An efficiency of less than zero (NSE < 0) denotes that the observed mean is a better predictor than the model result, or the model residual variance (i.e., the numerator in the NSE equation) is larger than the data variance (i.e., the denominator) (Nash and Sutcliffe, 1970). PBIAS is the deviation of the simulated flow time series from the observed data and expressed as a percentage. It was recommended that the model performance can be judged "satisfactory" for flow simulation if the R^2 is >0.60, the NSE is >0.50, and the PBIAS is less than or equal to $\pm 15\%$ for watershed scale models (Moriassi *et al.* 2015).

WATER AVAILABILITY ASSESSMENT

The assessment of the water availability of irrigated agricultural areas within the watershed requires long-term streamflow observation data for each crop area. However, sufficient gauging stations might not be available to fully assess the entire watershed and irrigation units for the long-term period. No data were available for the hydrologic cycle components that were associated with surface-groundwater interactions, except for the streamflow at the watershed outlet. If there is no data or not enough observed data available, watershed modeling techniques can be employed to produce the long-term hydrologic data. In this study the SWAT model was used to simulate the hydrologic cycle components.

The annual average hydrologic cycle components at the surface, in the shallow aquifer, and in the unsaturated zone can serve as essential indicators of potential hydrologic alteration. In this study surface water and groundwater flow interactions are of great importance for the hydrologic cycle because sustaining agricultural production relies on conjunctive use of surface water and groundwater. Therefore, soil water storage, groundwater recharge, and irrigation water are important factors for the entire hydrologic cycle.

In this study the model was applied to simulate the potentially available water quantity of the crop area within the watershed at the HRU levels. The SWAT simulation outputs were reported for each of the HRUs, including SQ (surface runoff) for the surface processes; ET (evapotranspiration) and SW (soil water storage) for the crop and soil water dynamics; GR (groundwater recharge and deep aquifer recharge) for the groundwater dynamics; and IRR (irrigation water) for the irrigation. All the SWAT model results were then extracted within each irrigation unit.

First of all, the SWAT model results of the hydrologic components (SQ , ET , SW , GR , and IRR) over the simulation period were used to define the reference metric value. The land and crop covers of USGS NLCD and CDL for a selected year (in this case 2011, a dry year) will be chosen. The annual average value for irrigation units during this period was used as the reference condition to reconstruct the normalized values. Then, the storage ratio of the five components will be calculated by dividing the simulated value according to two different land cover conditions for the normal (2008) and dry (2011) years as the reference conditions. But the inverse value of ET was used in the calculation because the ET accounts for the water loss consumed by crops. The normalized metric (NM) value for water availability assessment was calculated as follows:

$$NM = \frac{\text{Simulated value (mm) } (SQ, \frac{1}{ET}, SW, GR, \text{ and } IRR) \text{ of HRU}}{\text{Reference metric value (mm) for all irrigation units in watershed}}$$

WATER AVAILABILITY INDEX FORMULATION

Based on the standard approach suggested by the USEPA (U.S. EPA, 2012) we formulated the normalization (Equation 2) and integration methods (Equation 3 and 4) for water availability index. The water availability was

evaluated by integrating the data on variable hydrologic watershed attributes into a composite score with the normalized metric scores. A reference value was obtained by normalizing five indicator scores (*SQ*, *ET*, *SW*, *GR*, and *IRR*) that was considered high potential water availability as defined in Equation 2. Then, a sub-index was calculated with normalized indicator scores method for each hydrologic attribute using Equation 3. For comparison purposes, the indicator score was scaled to normalize each sub-index score in a range between 0 and 1 based on the percentile rank method, which gives the relative rankings for each sub-index. At last, an integrated water availability index was constructed with a range from 0 to 1 by using Equation 4 and each sub-index score. The indicator scores must also be directionally aligned, meaning that higher scores should equate to “better” conditions for each metric. If the metrics are not directionally aligned in their original units, then its inverse ($1/X$) can be taken as a score, for example *ET*.

In addition, a weight can be applied on some attributes than on others, or optional sub-indices can be used to reflect the specific management objectives. At this point, a logical decision framework can be used to solicit and document expert opinions because the process becomes subjective (Smith *et al.*, 2003). Weighting was not employed for integrated assessment because this index is physically based in this study. However, all the index scores are listed, and users can choose them for their own specific purpose (e.g., surface water or groundwater). By listing all the information, “more available” parts or “less available” parts can be identified in the desired area, providing basic data needed for action. The sub-indices (*SI*) and integrated water availability index (*IWAI*) were calculated as follows:

$$SI = \frac{(NM1 + NM2 + \dots + NMx)}{x} \quad (3)$$

$$IWAI = \frac{(SI1 + SI2 + \dots + SIx)}{x} \quad (4)$$

WATER SCARCITY ASSESSMENT

To better understand water shortage, water stress, or the water scarcity the WAI scores of a dry year were compared with those of a normal year. For a better statistic interpretation, they were divided into five levels: <-0.19, -0.20 – -0.39, -0.40 – -0.59, -0.60 – -0.79, and -0.80 – -0.99 (extremely dry). This shows a relative water scarcity as compared with the normal year.

Case Study-Rincon Valley, New Mexico

STUDY AREA

The watershed (36,990 km²) from Elephant Butte Reservoir in New Mexico to the confluence of the Rio Conchos from Mexico along the US-Mexican border is a highly managed river system for irrigated agriculture in the Upper Rio Grande. The Rincon Valley (2466 km²) located within the latitude range of 32.88°N – 32.39° N and the longitude range of 107.78° W – 106.83° W in New Mexico is one of the sub-watersheds within this watershed (Fig. 2). This area has a typical arid/semi-arid climate with annual maximum and minimum temperatures of 24.3 °C and 5.8 °C, respectively, and an average annual rainfall of about 270 mm, 55 % of which occurs during the monsoon months of July, August, and September.

The Rio Grande water released from the Caballo Reservoir flows through the Rincon Valley. Along the way the river water is diverted at Percha Dam and then distributed through an irrigation network, consisting of Arrey, Garfield, Hatch, and Rincon canals of Elephant Butte Irrigation District. The average discharge rates of the Caballo Dam and Arrey canal are 28 m³/sec and 3.7 m³/sec, respectively. It covers around 82.2 km² of agricultural land with major crops, alfalfa (40%), cotton (16%), pecans (15%), corn (11%), onions (6%), and peppers (5%). In the SWAT model, the whole watershed was divided into 29 sub-watersheds and four irrigation units as shown in Figure 2.

ASSESSMENT OF WATER AVAILABILITY

The process of water availability assessment and associated data are shown in Figure 1 (Ahn and Sheng 2020). The elevation of Rincon Valley ranges from 1209 to 2901 m based on the NED DEM data. The watershed was divided into 29 sub-watersheds with an area from 33 to 137 km² (Figure 2). The STATSGO map was used to identify different soil types of crop areas (Figure 3a). Most of the soil types in the watershed are silt loam (39%) and clay loam (16%). The CDL data for the six-year period (2008–2013) were obtained from New Mexico portion of USDA data. Two spatial crop coverages including 14 crops that are represented by normal (2008) and dry (2011) years were prepared to demonstrate changes in crop areas. The 2008 and 2011 CDL have spatial resolutions of 56 and 30 m, respectively.

Additional data for the year 2011 was obtained from USGS National Land Cover Database (NLCD) to

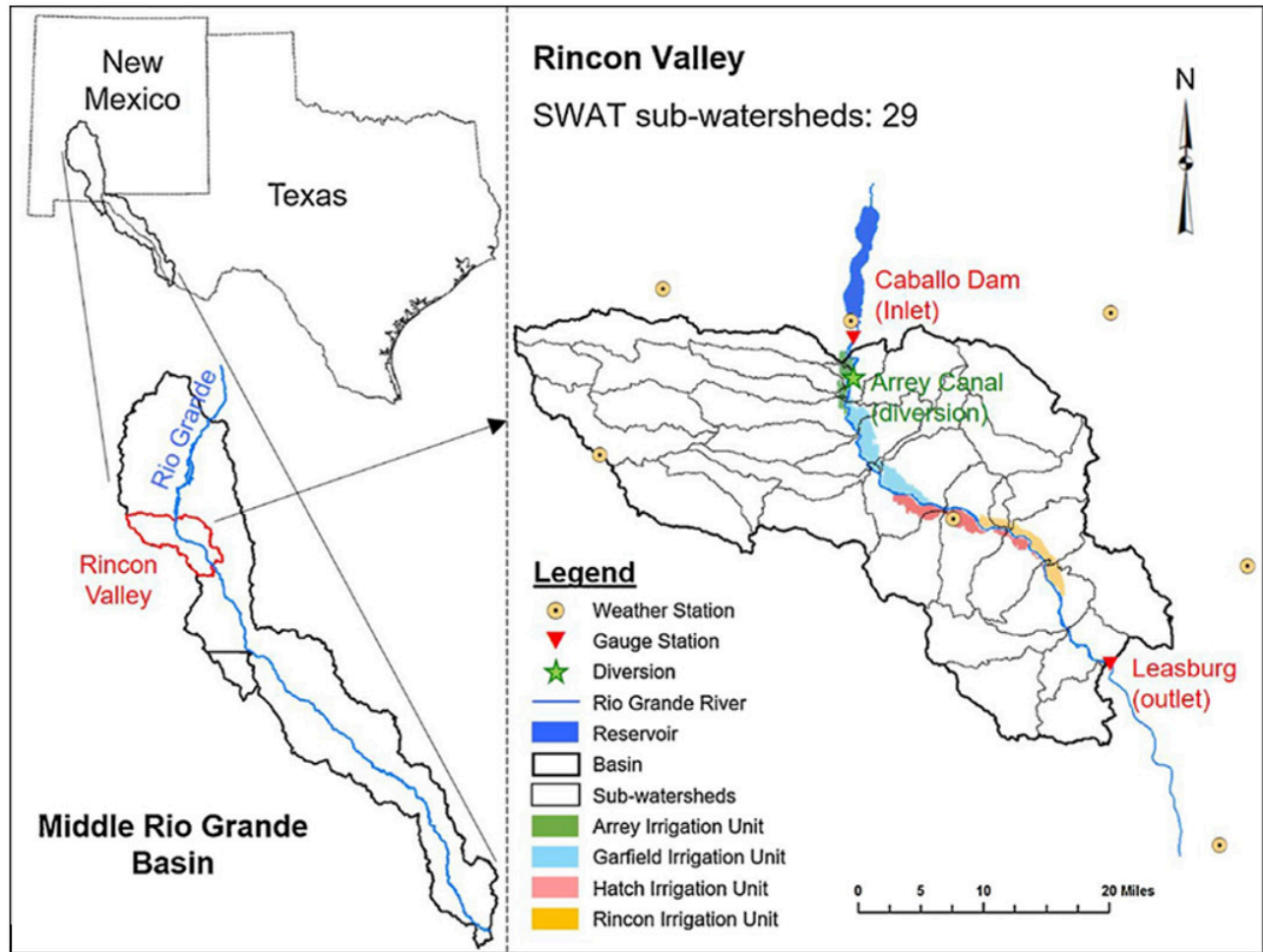


FIGURA 2: Delineation of a watershed for SWAT model configuration (modified from Ahn et al., 2018).

characterize the non-agricultural land cover including 13 classes. The land covers and the distribution of crop areas are shown in Figure 3b and 3c. The irrigated agricultural area is dominant along the river area. The agricultural production areas of normal (2008) and dry (2011) years were 87.3 km² (3.5% of the total watershed) and 82.6 km² (3.3%), respectively. The crop patterns of normal (2008) and dry (2011) years within the watershed are summarized in Table 1. Daily outflow data at the gage station below Caballo Dam were used as an inlet flow in the SWAT model. The flow data obtained from the USBR covers the period from 1993 to 2013. Daily streamflow data over 13 years (1994–2006) at Leasburg gauge station obtained from the USBR was used for the calibration and validation of the SWAT model at the watershed outlet.

For the evaluation of water availability, changes in crop areas, were selected based on outflow of Caballo Dam at the watershed inlet, crop area, and annual precipitation for the normal (2008) and dry (2011)

years during the SWAT modeling period of 20 years (1994–2013). The outflow of Caballo Dam and annual precipitation were 337.7 mm/year (105% of the 20 years average) and 324.9 mm/year (120% of the 20 years average) for the normal year (2008), while only 198.5 mm/year (61% of the 20 years average) and 235.7 mm/year (87% of the 20 years average) for the dry year (2011). The crop area of dry year (82.6 km²) was 4.7 km² smaller than the normal year (2008) (87.3 km²).

Results

SWAT Model Calibration and Validation

The SWAT model was calibrated with a total of 22 most influential parameters identified through the sensitivity analysis, including 5 parameters for surface runoff (CN2, CNCOEF, SURLAG, OV_N, and CH_N), 2 for evapotranspiration (CANMAX and ESCO), 2 for soil water (SOL_AWC and SOL_K), 5 for groundwater (GW_DELAY, GWQMN,

ALPHA_BF, REVAPMN, and GW_REVAP), and 8 for auto-irrigation (FLOWMIN, DIVMAX, FLOWFR, AUTO_WSTRS, IRR_EFF, IRR_MX, IRR_ASQ, and Heat Unit) processes. The final values of model parameters were selected based on a statistical evaluation of the performance measures (Ahn *et al.* 2018). The average R^2 , RMSE, NSE reaches 0.94, 2.1 mm/day, and 0.92 for the calibration, and 0.85, 1.3 mm/day, and 0.95 for the validation. In addition, the model calibration and validation included the NSE with inverse discharge ($1/Q$) to assess base flow. The average NSE values with the inverse discharge ($1/Q$) were 0.70 and 0.81 for the calibration and validation periods, respectively. The PBIAS range of the calibration and validation periods are <15%.

Sub-Indices of Essential Indicators for Normal and Dry Years at Irrigation Units

Five sub-indices were calculated based on HRUs of irrigation unit using the data reconstruction results for five essential indicators for the normal year (2008) and dry year (2011) as shown in Figure 4. The water availability of each essential indicator varies spatially. The sub-index scores of *ET* in a dry year were lower than

that in the normal year, indicating that a dry year has less water availability from the high evapotranspiration.

The sub-index scores of SW and GR in a dry year were generally poor (brighter color) in comparison with those in a normal year. In contrast, SQ and IRR showed conflicting results between the dry year (2011) and normal year (2008).

They showed more water available in the upstream than the downstream in a normal year (2008), but less water available in the upstream than the downstream in a dry year (2011). It means they have more surface and irrigation water in the upstream in a normal year. The upstream flows may have been overestimated, and downstream may have been underestimated in the model probably because SWAT only considered one diversion dam at the inlet.

This is a limitation of the current model in accounting for the irrigation part, needing improvement in the future. It should be noted that the areas of alfalfa, pecans, cotton, and corn within four irrigation units were 53%, 11%, 19%, and 11%, respectively, for the normal year and 41%, 10%, 30%, and 6% for the dry year, respectively. The planted area of alfalfa that is the

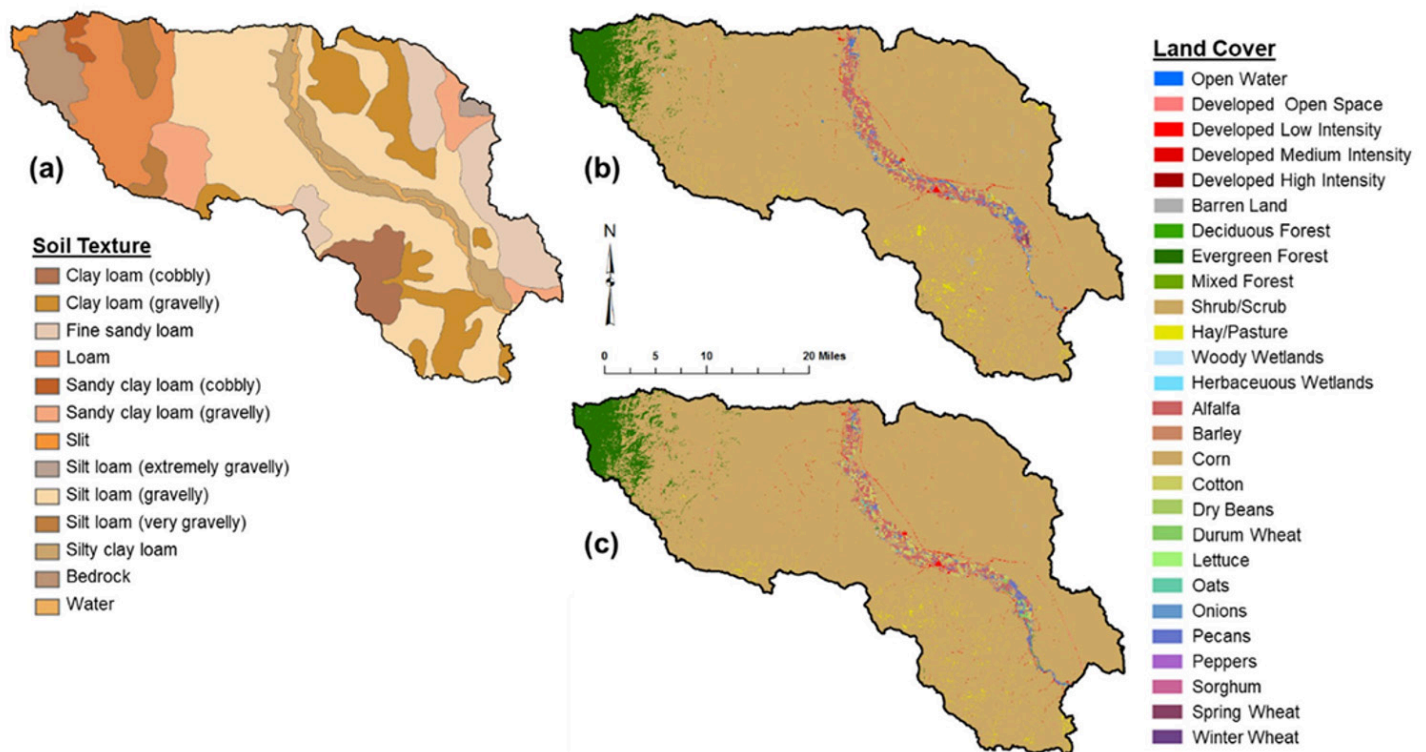


FIGURA 3: Soil types (a), land cover and crop patterns for the year 2008 (b) and 2011 (c) (Ahn and Sheng 2020).

Crops	2008 (Normal year)		2011 (Dry year)	
Alfalfa	43.62	49.98	33.45	40.49
Barley	0.07	0.08	1.57	1.90
Corn	11.64	13.34	4.33	5.24
Cotton	15.38	17.63	23.42	28.36
Dry beans	0.02	0.02	0.16	0.19
Durum wheat	0.07	0.08	2.90	3.51
Lettuce	0.00	0.00	0.02	0.03
Oats	1.25	1.43	2.13	2.58
Onions	0.52	0.59	2.91	3.52
Pecans	12.15	13.92	10.54	12.76
Peppers	0.08	0.10	0.94	1.14
Sorghum	0.22	0.26	0.15	0.18
Spring wheat	2.24	2.57	0.04	0.05
Winter wheat	0.00	0.00	0.03	0.04
Total	87.26	100.00	82.60	100.00

TABLE 1: Crop patterns of (a) 2008 normal year and (b) 2011 dry year (modified from Ahn and Sheng 2020).

largest water user in the Rincon watershed was reduced by 12%, whereas the planted area of cotton, which has a relatively low root length density and higher resilience to short-term water stresses, was increased by 13%. Such crop pattern changes might have attributed to the abnormal variations in water availability for a dry year.

ASSESSMENT OF WATER AVAILABILITY AND WATER SCARCITY AT IRRIGATION UNITS

The water availability index value ranges from 0 to 1, with 1 being the most available and 0 the least available in comparison to the reference condition of 20 years (1993–2013). Four irrigation units, crop covers, and integrated water availability index in Rincon Valley for the normal year (2008) and dry year (2011) are shown in Figure 5. The integrated water availability indices in the Arrey irrigation unit for the normal and dry years were above the middle levels, with average scores of 0.56 and 0.57, respectively. However, the dry year exhibited a weakness with respect to the surface water (0.40) and irrigation water (0.40) because of the insufficient water supply.

CABALLO DAM DURING A SEVERE DROUGHT

The integrated water availability indices in the Garfield irrigation unit were 0.49 and 0.54 for 2008 and 2011, respectively. The Garfield irrigation unit is the largest crop area, which has the most alfalfa, and the area of alfalfa in dry year was reduced by about 30% (4 km²) compare with normal year. The different patterns of crop coverages may have affected the water availability, with an increased water availability scores for the dry year in the Garfield irrigation unit. For the Hatch unit

the integrated water availability indices were 0.50 and 0.48 for the normal and dry years, respectively. For the Rincon unit the integrated water availability indices were 0.47 for the normal year and 0.43 for the dry year. The integrated water availability index exhibited a smaller tendency of water availability farther downstream within the watershed.

ASSESSMENT OF WATER AVAILABILITY OF MAJOR CROPS

The interpretation of the water scarcity has also been linked to crop types and areas, especially alfalfa and cotton. In the dry year, water stress has been observed in alfalfa areas, while no stress or good water availability was observed in cotton areas. The water availability score and statistical comparison of four major crops of the normal year (2008) and the dry year (2011) are shown in Figure 6. In this case study four major crops were identified, namely alfalfa, corn, cotton, and pecans, and water availability index scores for these crops were compared for each irrigation unit. In general, the averaged water availability of alfalfa and pecans, known as the largest water users, were very low, 0.21 and 0.20, respectively, in the normal year in comparison with 0.16 and 0.24 in the dry year. On the other hand, the averaged water availability of corn and cotton were relatively high, 0.56 and 0.91, respectively, in the normal year in comparison with 0.78 and 0.88 in the dry year. According to Vilsack and Reilly 2013, for alfalfa and nut trees the irrigation water was applied approximately at 732 and 700 mm/year, respectively, while for corn and cotton at 366 and 396 mm/year. The averaged values of water availability index showed the slightly lower availability in the dry year. The water was most likely transferred to the

pecan orchard. In a normal year there were definite differences of water availability between different crops and the same crop tends to have stable water availability across different irrigation units. However, in a dry year, the water availability varied significantly between crop types and irrigation units. Such differences also showed a reducing trend from the upstream area to the downstream area. Therefore, the results suggest that the drought condition will most likely cause unstable water

cotton. In the dry year, water stress has been observed in alfalfa areas, while no stress or good water availability was observed in cotton areas. The water availability score and statistical comparison of four major crops of the normal year (2008) and the dry year (2011) are shown in Figure 7. In this case study four major crops were identified, namely alfalfa, corn, cotton, and pecans, and water availability index scores for these crops were compared for each irrigation unit. In general, the averaged water

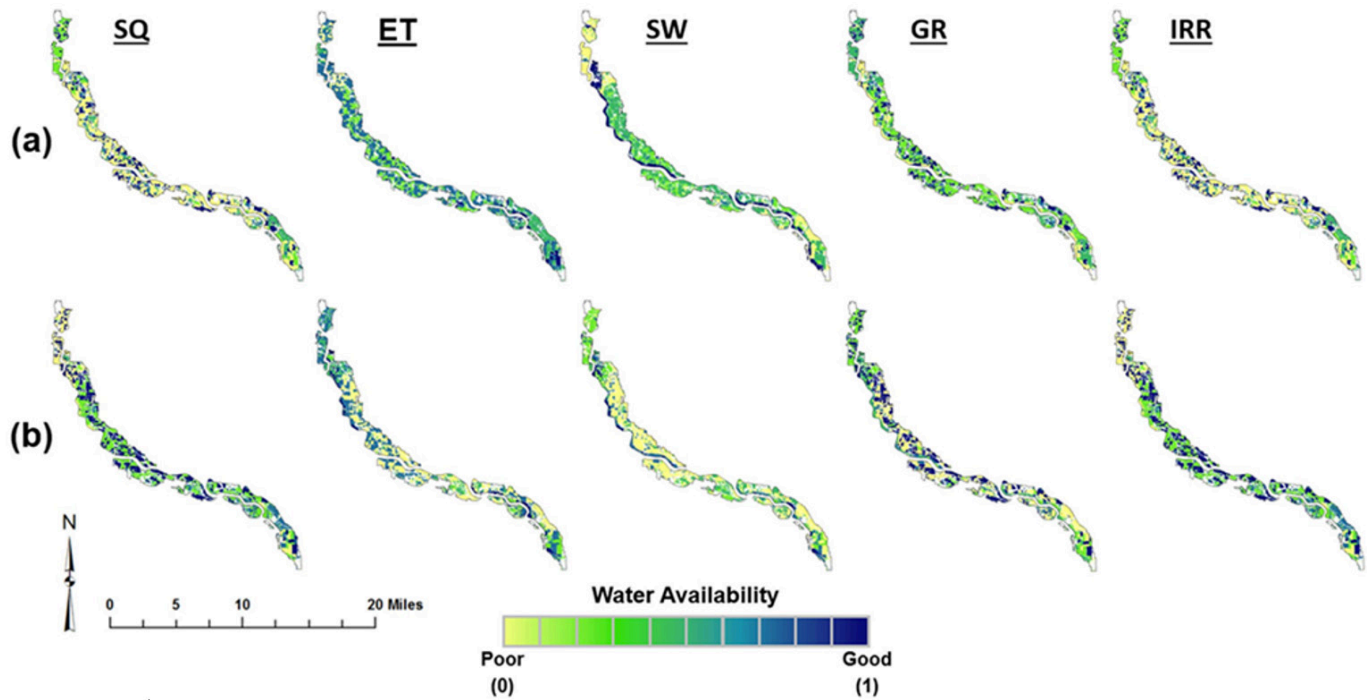


FIGURA 4: Five sub-indices of five essential indicators (SQ, ET, SW, GR, and IRR) only for agricultural areas of the period (a) 2008 normal year and (b) 2011 dry year (Ahn and Sheng 2020).

availability in irrigated agriculture. Under conditions of scarcity, annual less profitable crops will likely not be grown, and all the available water will be applied to the perennials, alfalfa and pecans. If prolonged drought continues, water scarcity may reach a point where the minimum needs of alfalfa and pecans cannot be met.

dry years, respectively. For the Rincon unit the integrated water availability indices were 0.47 for the normal year and 0.43 for the dry year. The integrated water availability index exhibited a smaller tendency of water availability farther downstream within the watershed.

ASSESSMENT OF WATER AVAILABILITY OF MAJOR CROPS

The interpretation of the water scarcity has also been linked to crop types and areas, especially alfalfa and

availability of alfalfa and pecans, known as the largest water users, were very low, 0.21 and 0.20, respectively, in the normal year in comparison with 0.16 and 0.24 in the dry year. On the other hand, the averaged water availability of corn and cotton were relatively high, 0.56 and 0.91, respectively, in the normal year in comparison with 0.78 and 0.88 in the dry year. According to Vilsack and Reilly 2013, for alfalfa and nut trees the irrigation water was applied approximately at 732 and 700 mm/year, respectively, while for corn and cotton at 366 and 396 mm/year. The averaged values of water availability index showed the slightly lower availability in the dry year. The water was most likely transferred to the pecan orchard.

In a normal year there were definite differences of water availability between different crops and the same crop tends to have stable water availability across different irrigation units. However, in a dry year, the

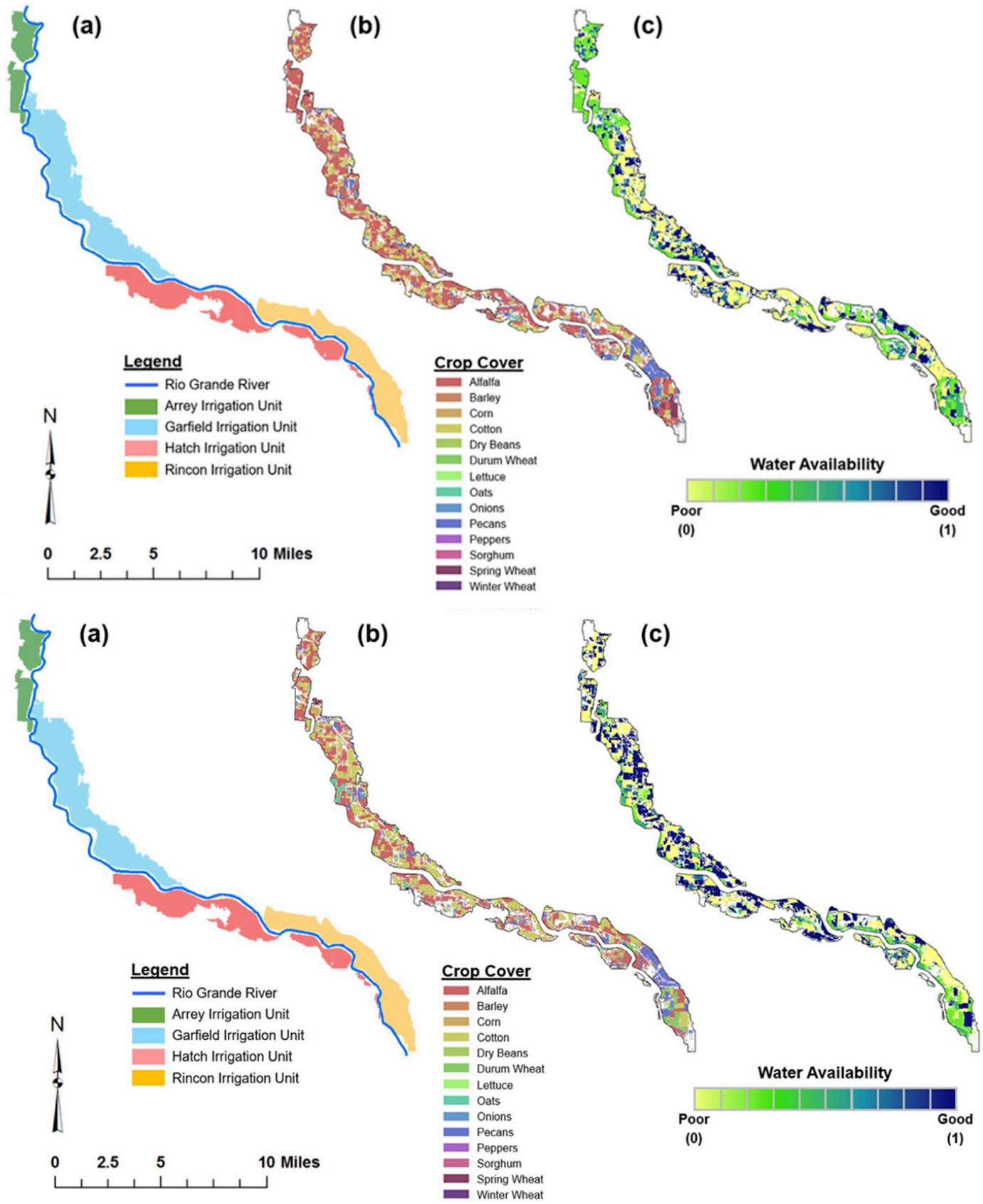


FIGURA 5: The spatial distributions of (a) four irrigation units, (b) crop covers, and (c) integrated water availability index for 2008 (upper) of 2011 (lower) (modified from Ahn and Sheng 2020).

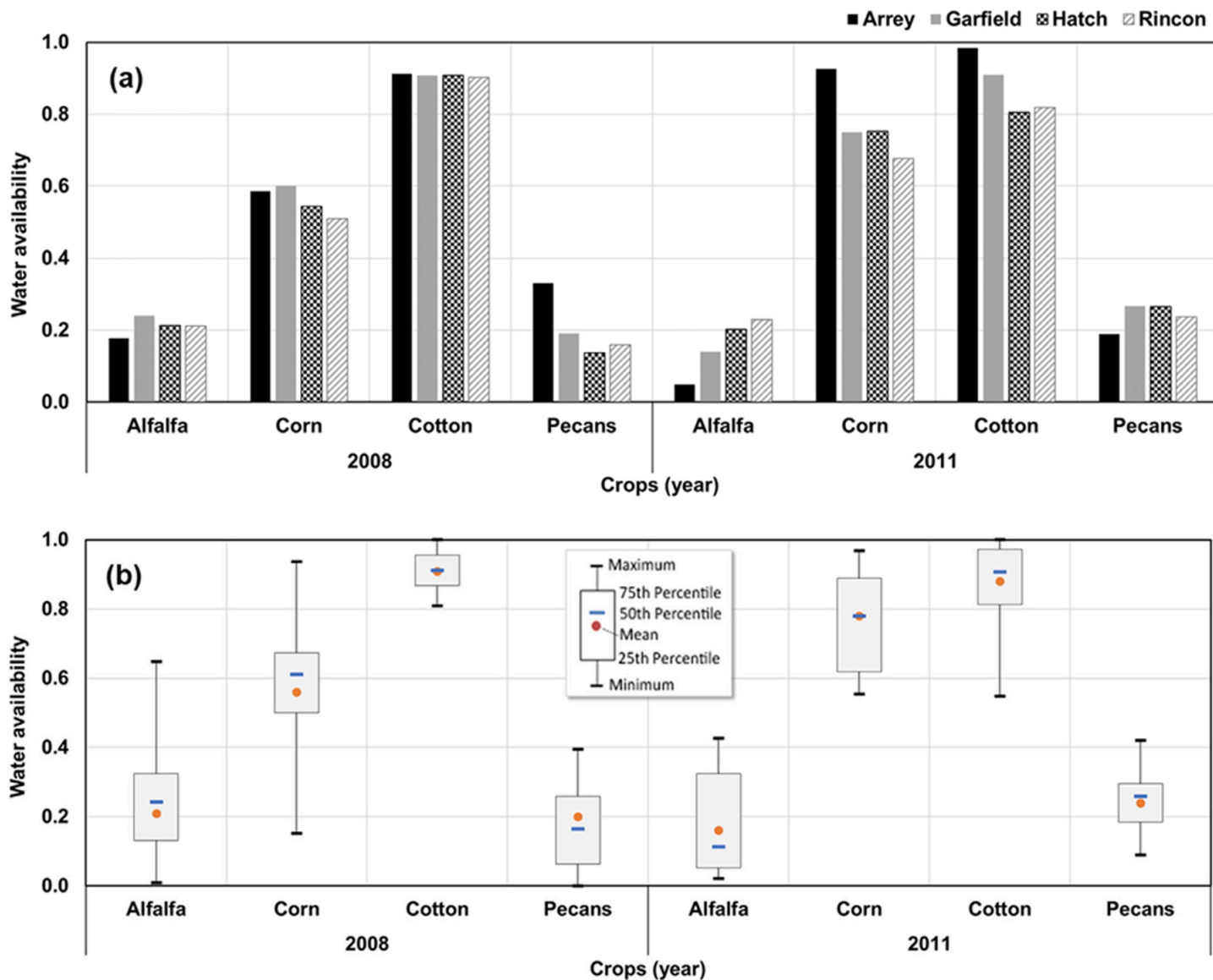


FIGURE 6: Distribution of (a) the water availability scores of four major crops under irrigation units and (b) the statistical comparisons of water availability four major crops of the normal year (2008) and dry year (2011) (Ahn and Sheng 2020).

water availability varied significantly between crop types and irrigation units. Such difference also showed a trend from the upstream area to the downstream area. Therefore, the results suggest that the drought condition will most likely cause unstable water availability in the irrigated agriculture.

Summary and Recommendations

In this chapter we proposed a new method aimed at gaining a better understanding of the water availability and water scarcity of irrigated agriculture in a semiarid watershed. The SWAT model was employed to simulate hydrological processes, especially surface water and groundwater interaction in a semiarid irrigated

agricultural watershed. The selected hydrologic components, namely surface runoff, evapotranspiration, soil moisture, groundwater recharge, and irrigation water, were used to calculate the water availability index to capture temporal and spatial variability of water availability. It links the different crop types and locations to water availability assessment based on the drought condition, providing good guidelines for crop planning and decision making for securing water resources in the agricultural area. This approach also integrates the watershed modeling with an indexing system, providing a powerful tool for capturing the behavior of agricultural hydrologic cycle visibly at a high resolution in field scale and a strong foundation for guiding future advancements in development of hydrological models

in arid/semiarid regions.

For extreme weather conditions in a semiarid watershed such as drought, well-designed management strategies are essential for successful river and irrigation operations because of the increased temporal and spatial variations of water availability. The proposed approach better quantifies and characterizes temporal and spatial changes of water stresses in the agricultural area and thus provides better guidelines for planning and decision making in irrigation operations in the arid environment. Furthermore, the approach can be used to identify the highest priority areas to avoid inefficient use of irrigation water so that we can target the management efforts at different time and temporal scales.

The limitation of the model is that it does not physically simulate groundwater flow and level to represent groundwater dynamics in an aquifer system. Additional effort is recommended to link SWAT and MODFLOW models, which could provide insights into interaction of groundwater and surface water and guidelines for conjunctive uses of groundwater and surface water. Another limitation of this study is that it does not consider the impacts of the socio-economic drivers and anthropogenic activities on crop yields as well as potential impacts of water quality on the water availability. Additional study is recommended to fill these gaps.

References

- Ahn, S., S. Abudu, Z. Sheng, and A. Mirchi. 2018. "Hydrologic Impacts of Drought-Adaptive Agricultural Water Management in a Semi-Arid River Basin: Case of Rincon Valley, New Mexico." *Agricultural Water Management* 209: 206–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.040>.
- Ahn, S.R., and S.J. Kim. 2017. "Assessment of Integrated Watershed Health Based on the Natural Environment, Hydrology, Water Quality, and Aquatic Ecology." *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 5583–602. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5583-2017>.
- Ahn, S., and Z. Sheng. 2020. "Assessment of Water Availability and Scarcity Based on Hydrologic Components in an Irrigated Agricultural Watershed Using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association* 1–18. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12888>.
- Aliche, E.B., M. Oortwijn, T.P.J.M. Theeuwens, C.W.B. Bachem, R.G.F. Visser, and C.G. van der Linden. 2018. "Drought Response in Field Grown Potatoes and the Interactions between Canopy Growth and Yield." *Agricultural Water Management* 206: 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.013>.
- Allen, R.G.L.S., D.R. Pereira, and M. Smith. 1998. "Crop Evapo-transpiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements." FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Allen, R.G., I.A. Walter, R.L. Elliott, T.A. Howell, D. Itenfisu, and M.E. Jensen. 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. Reston: American Society of Civil Engineers.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. "Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I. Model Development." *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Bai, L., Z. Chen, J. Xu, and W. Li. 2016. "Multi-Scale Response of Runoff to Climate Fluctuation in the Headwater Region of Kaidu River in Xinjiang of China." *Theoretical and Applied Climatology* 125: 703–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1539-2>.
- Barnett, T.P.D.W., H.G. Pierce, C. Hidalgo, B.D. Bonfils, T. Santer, G. Das, A.W. Bala *et al.* 2008. "Human-Induced Changes in the Hydrology of the Western United States." *Science* 319 (5866): 1080–83. <https://doi.org/10.1126/science.1152538>.
- Djebou, D.C.S. 2017. "Spectrum of Climate Change and Streamflow Alteration at a Watershed Scale." *Environmental Earth Sciences* 76: 653. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7006-x>.
- Djebou, D.C.S., and V.P. Singh. 2016. "Impact of Climate Change on Precipitation Patterns: A Comparative Approach." *International Journal of Climatology* 36: 3588–606. <https://doi.org/10.1002/joc.4578>.
- Duan, K., P.V. Caldwell, G. Sun, S.G. McNulty, Y. Zhang, E. Shuster, B. Liu, and P.V. Bolstad. 2019. "Understanding the Role of Regional Water Connectivity in Mitigating Climate Change Impacts on Surface Water Supply Stress in the United States." *Journal of Hydrology* 570: 80–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.011>.
- Garrote, L., A. Granados, and A. Iglesias. 2016. "Strategies to Reduce Water Stress in Euro-Mediterranean River Basins." *Science of the Total Environment* 543: 997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.106>.
- Herrera-Pantoja, M., and K.M. Hiscock. 2015. "Projected Impacts of Climate Change on Water Availability Indicators in a Semi-Arid Region of Central Mexico." *Environmental Science & Policy* 54: 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>.
- Ionus, O. 2017. "Watershed Sustainability Index Development and Application: Case Study of

- the Motru River in Romania.” *Polish Journal of Environmental Studies* 26 (5): 2095–105. <https://doi.org/10.15244/pjoes/69935>.
- Jordan, G., S. Goenster-Jordan, G.-J. Lamparter, B. Ulziisuren, N. Soninkishig, E. Schlecht, and A. Buerkert. 2018. “Water Use in Agro-Pastoral Livelihood Systems within the Bulgan River Watershed of the Altay Mountains, Western Mongolia.” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 251: 180–93. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.008>.
- Kim, I.S., S. Arnhold, Q.B. Le Ahn, S.J. Kim, S.J. Park, and T. Koellner. 2017. “Land Use Change and Ecosystem Services in Mountainous Watersheds: Predicting the Consequences of Environmental Policies with Cellular Automata and Hydrologic Modeling.” *Environmental Modelling & Software* 122: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.018>.
- Liu, J., W. Zhang, T. Liu, and Q. Li. 2018. “Runoff Dynamics and Associated Multi-Scale Responses to Climate Changes in the Middle Reach of the Yarlung Zangbo River Basin, China.” *Water* 10 (295): 1–14. <https://doi.org/10.3390/w10030295>.
- Liu, Y., and Z. Sheng. 2011. “Trend-Outflow Method for Understanding Interactions of Surface Water with Groundwater and Atmospheric Water for Eight Reaches of the Upper Rio Grande.” *Journal of Hydrology* 409: 710–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.004>.
- Lowe, M., and G. Gereffi. 2008. “A Value Chain Analysis of Selected California Crops.” Durham, NC: Center on Globalization, Governance & Competitiveness Duke University, Social Science Research Institute. <https://gvcc.duke.edu/cggclisting/a-value-chain-analysis-of-selected-california-crops/>.
- Ma, J.Z., X.S. Wang, and W.M. Edmunds. 2005. “The Characteristics of Ground-Water Resources and Their Changes under the Impacts of Human Activity in the Arid Northwest China — A Case Study of the Shiyang River Basin.” *Journal of Arid Environments* 61 (2): 277–95. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.07.014>.
- McNulty, S.G.A., G. Emma, V.N. Mark, E. Meine, A.B. David, X. Juan, B. Jianchu *et al.* 2018. “Determinants of the Forest-Water Relationship.” In *Forest and Water on a Changing Planet: Vulnerability, Adaptation and Governance Opportunities: A Global Assessment Report*, edited by I.F. Creed and M. van Noordwijk, 61–73. Vienna: IUFRO World Series.
- Moriyas, D.N., M.W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati. 2015. “Hydro-logic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria.” *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 58 (6): 1763–85. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- Nash, J.E., and J.V. Sutcliffe. 1970. “River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles.” *Journal of Hydrology* 10: 282–90. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2002. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2000*. Temple: USDA-ARS Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Blackland Research Center.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. 2011. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009*. College Station: Texas Water Resources Institute.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, and K.W. King. 2005a. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005*. Temple: Agricultural Research Service and the Texas Agricultural Experiment Station.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, and K.W. King. 2005b. *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation, Version 2005*. Temple: Agricultural Research Service and the Texas Agricultural Experiment Station.
- Nilsalab, P., and S.H. Gheewala. 2019. “Assessing the Effect of Incorporating Environmental Water Requirement in the Water Stress Index for Thailand.” *Sustainability* 11 (152): 2–13. <https://doi.org/10.3390/su11010152>.
- Niraula, R., L.M. Norman, T. Meixner, and J.B. Callegary. 2012. “Multi-Gauge Calibration for Modeling the Semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT.” *Air Soil and Water Research* 5: 41–57. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410>.
- Perrin, J., S. Ferrant, S. Massuel, B. Dewandel, J.C. Marechal, S. Aulong, and S. Ahmed. 2012. “Assessing Water Availability in a Semi-Arid Watershed of Southern India Using a Semi-Distributed Model.” *Journal of Hydrology* 460–461: 143–55. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.002>.
- Sanchez, G.M., A.P. Nejadhashemi, Z. Zhang, S. Marquart-Pyatt, G. Habron, and A. Shortridge. 2015. “Linking Watershed-Scale Stream Health and Socioeconomic Indicators with Spatial Clustering and Structural Equation Modeling.” *Environmental Modelling & Software* 70: 113–27. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.04.012>.
- Sheng, Z. 2013. “Impacts of Groundwater Pumping and Climate Variability on Groundwater Availability in the Rio Grande Basin.” *Ecosphere* 4 (1): 1–25. <https://doi.org/10.1890/ES12-00270.1>.
- Smith, E., L. Tran, and R. O’Neill. 2003. *Regional Vulnerability Assessment for the Mid-Atlantic Region: Evaluation of Integration Methods and Assessments Results*. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection

Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=81590.

USEPA. 2012. Identifying and Protecting Healthy Watersheds: Concepts, Assessments, and Management Approaches. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water and Office of Research and Development. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/hwi-watersheds-foreword.pdf>.

Versini, P.A., L. Pouget, S. McEnnis, E. Custodio, and I. Escaler. 2016. "Climate Change Impact on Water Resources Availability: Case Study of the Llobregat River Basin (Spain)." *Hydrological Sciences Journal* 61 (14): 2496–508. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154556>.

Vilsack, T., and J.T. Reilly. 2013. Farm and Ranch Irrigation Survey 2013. Volume 3, Special Studies, Part 1. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture and National Agricultural Statistics Service. https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2012/Online_Resources/Farm_and_Ranch_Irrigation_Survey/.

Wu, Y., S. Giri, and Z. Qi. 2016. "Understanding the Spatial Distribution of hydrologic sensitive Areas in the Landscape Using Soil Topographic Index Approach." *International Soil and Water Conservation Research* 4: 278–83. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.10.002>.

Zektser, S.H., H.A. Loaiciga, and J.T. Wolf. 2004. "Environmental Impacts of Groundwater Overdraft: Selected Case Studies in the Southwestern United States." *Environmental Geology* 47 (3): 396–404. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1164-3>.

III.5 Aspectos de modelación del balance hídrico y recarga para el acuífero Valle de Juárez, incorporando escenarios de eficiencias de riego, cultivos agrícolas y escenarios de recarga inducida

Modeling aspects of the water balance and recharge for the Juárez Valley aquifer, incorporating irrigation efficiency scenarios, agricultural crops, and induced recharge scenarios

Sergio Saúl Solís¹, Alfredo Granados Olivas¹, Arturo Soto Ontiveros¹, William L. Hargrove², Josiah M. Heyman², Edith Flores Tavizon¹, Marisela Soto Padilla¹, Katya Esquivel Herrera¹, Carolina Salazar Gonzalez¹, Miguel Duran Rangel¹

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, ²Universidad de Texas en El Paso

Abstract

El acuífero Valle de Juárez abarca la mancha urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, así como sus zonas aledañas. La sobreexplotación de este acuífero, aunado a los cambios en su sistema de recarga natural, ha llevado a una disponibilidad hídrica limitada. La cuantificación de las variables hídricas del sistema representa una herramienta para lograr un manejo sustentable. Con este objetivo y con el uso del paquete computacional ArcGIS, se aplicó la herramienta Soil and Water Assessment Tool (SWAT), la cual consiste en una secuencia metodológica que permite modelar a escala cuencas hidrográficas para series de tiempo continuas, y por la cual es posible calcular el balance hídrico de las cuencas. En el presente trabajo se desarrollaron dos aproximaciones de modelación. En la primera, se crearon y analizaron 15 modelos para cuatro diferentes cultivos con el fin de evaluar de manera conceptual los efectos de cambios hipotéticos en la eficiencia de riego, los cuales se ven reflejados en la evapotranspiración de dichos cultivos y el consumo de agua. Los cultivos ordenados de mayor a menor consumo de agua fueron el algodón, el nogal, la alfalfa y la vid. La segunda tuvo como objetivo simular los efectos en el balance hídrico cuando se consideran condiciones de recarga inducida, para lo cual se establecieron seis escenarios de manejo de

agua para el periodo de 1995 a 2015, y se desarrollaron mapas e información tabulada para comparar los resultados de recarga para los modelos planteados. Se observó un incremento significativo en la recarga del acuífero en 2015 en el modelo BU, mismo que considera condiciones genéricas de manejo del agua, de 1.85mm/anuales, y se le comparó con el modelo que plantea la creación de un reservorio dentro de las terrazas del río Bravo, obteniendo 1.91mm/anuales, lo que se considera como buena opción para la sustentabilidad del acuífero. Cabe resaltar que los cálculos de balance hídrico están directamente vinculados a las condiciones y variables climáticas registradas, como la precipitación y otras variables, y en este sentido se encontraron limitaciones para realizar la calibración y validación de los modelos dada la escasez de datos disponibles, sin embargo, se adquirió un mejor entendimiento sobre los procesos hidrológicos del área de estudio.

Abstract

The Valle de Juárez aquifer covers the urban area of Ciudad Juárez, Chihuahua, as well as its surrounding areas. The overexploitation of this aquifer, coupled with changes in its natural recharge system, has led to limited water availability. The quantification of the hydric variables of the system represents a tool to achieve a sustainable management. With this objective and with the use of the ArcGIS computational package, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was applied, which consists of a methodological sequence that allows to model river basins at a scale for continuous time series, and for which it is possible to calculate the water balance of the basins. In the present work, two modeling approaches were developed. In the first, 15 models were created and analyzed for four different crops in order to conceptually evaluate the effects of hypothetical changes in irrigation efficiency, which are reflected in the evapotranspiration of these crops and water consumption. The crops ordered from highest to lowest water consumption were cotton, walnut, alfalfa and vine. The second aimed to simulate the effects on the water balance when conditions of induced recharge are considered, for which six water management scenarios were established for the period from 1995 to 2015, and maps and tabulated information were developed to compare the results of recharging for the raised models. A significant increase in aquifer recharge was observed in 2015 in the BU model, which considers generic water management conditions, of 1.85 mm / year, and was compared with the model that proposes the creation

of a reservoir within the terraces of the Rio Bravo, obtaining 1.91mm / year, which is considered a good option for the sustainability of the aquifer. It should be noted that the water balance calculations are directly linked to the climatic conditions and variables recorded, such as precipitation and other variables, and in this sense, there were limitations to perform the calibration and validation of the models given the scarcity of available data, however, a better understanding of the hydrological processes of the study area was acquired.

Introducción

Para el surgimiento de la vida y desarrollo de la humanidad, históricamente ha sido necesario uno de los componentes más importantes de nuestro planeta: el agua. Este recurso vital ha disminuido considerablemente de acuerdo con el Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados en 2019, debido a prácticas no sustentables de extracción, la contaminación ocasionada por aguas residuales y desechos industriales, el cambio climático y, principalmente, el consumo a gran escala, la desaparición de especies vegetales e inclusive conflictos por el desplazamiento de las personas a otras zonas o países en su lucha de obtener este líquido.

Aunque el agua se encuentra en todas partes, solo el 2.5 % corresponde al agua dulce, de los cuales el 1.2 % se encuentra en cuerpos o fuentes superficiales, el 30.1 % en fuentes subterráneas y el 68.7 % congelado en los glaciares (Shiklomanov, 1993). Existen regiones donde no hay agua superficial, por lo que se requiere de la extracción del agua subterránea almacenada en los acuíferos. En México, alrededor del 76 % de toda el agua se destina al uso agrícola (CONAGUA, 2014). Además, el aumento de la demanda hídrica para uso urbano, ecológico e industrial ha provocado una disminución de la disponibilidad de agua para la agricultura, ya que compete con otros usos de agua.

A causa de los problemas mencionados, Ruiz y Rodríguez (2013) indican que se requiere de un proceso de planificación sustentable para disminuir el efecto que tienen estas prácticas respecto a la disponibilidad de este recurso, además de mejorar el aprovechamiento mediante el uso de nuevas tecnologías y la integración de intereses comunes, suscitando un aumento en la calidad y cantidad del agua.

Con base en las características geofísicas de la zona norte de México, el cual presenta un escenario desértico y con problemas de disponibilidad hídrica, es que se requiere ampliar el espectro de análisis, que derive o

incida en un manejo sustentable para este recurso. En este capítulo se presentan los trabajos de investigación realizados con diferentes enfoques de balance hídrico en el área de estudio de la cuenca hidrológica y acuífero del Valle de Juárez, con el objetivo de mejorar el entendimiento del funcionamiento y respuesta de las variables hidrológicas principales, incluyendo diversos escenarios de modelación en procesos de riego agrícola, manejo de aguas residuales tratadas y opciones de infiltración artificial, así como los efectos potenciales que el cambio climático pueda tener en el sistema local hidrológico.

ANTECEDENTES

El acuífero Bolsón del Hueco es considerado el principal suministro de agua para Ciudad Juárez, Chihuahua, y El Paso, Texas, donde aproximadamente el 90 % del agua bombeada es utilizada para el abastecimiento público. Este acuífero se ha visto afectado de manera significativa debido a la sobreexplotación, generando problemas de disponibilidad de agua en la zona fronteriza. En la Figura 1 se muestra el Bolsón del Hueco junto con sus divisiones, según la clasificación de Regiones Hidrológicas de la Comisión Nacional del Agua, denominada Región Hidrológica 24 “Río Bravo-Conchos” y sus subdivisiones. De manera histórica, el cultivo sembrado de forma preferente es el algodón en el Distrito de riego 009 Valle de Juárez (CONAGUA, 2016-2017). Sin embargo, este cultivo destaca por su consumo elevado de agua.

Alatorre *et al.* (2017) determinaron en esta zona de estudio la relación que guarda la ineficiencia de riego rodado por surcos con las propiedades geométricas de los predios agrícolas y el abatimiento del nivel freático del acuífero presentado en las últimas décadas, y además mostraron que el índice de ineficiencia de riego rodado por surcos demuestra la existencia de predios agrícolas que exceden 2.5 a 13 veces el largo máximo permitido, sugiriendo la utilización de nuevas tecnologías como el riego por aspersión y por goteo, además de estrategias territoriales que incrementen las zonas de recarga natural y artificial del acuífero. Por ende, la agricultura en el Distrito de Riego 009 “Valle de Juárez” es uno de los factores de mayor importancia en la recarga del acuífero del mismo nombre. Sin embargo, dado que este acuífero cuenta con una disponibilidad hídrica limitada (CONAGUA, 2015), es necesario hallar el balance entre el cultivo que permita aumentar la recarga inducida por irrigación y que no represente un consumo excesivo de agua, además de que comparar estos cultivos

dentro de estos criterios puede aportar información que beneficie el balance del acuífero, así como la actividad agrícola.

Las poblaciones fronterizas citadas suplen su demanda urbana de agua de la extracción de los mantos acuíferos, sin embargo, el incremento de la población ha traído consigo un aumento también en la demanda de agua potable, haciendo que estos acuíferos empiecen a tener procesos de abatimiento acompañados de bajos niveles de recarga, lo cual, aunado a las variaciones de las condiciones climáticas, justifican la necesidad de realizar un análisis de la disponibilidad de agua para establecer e iniciar medidas que permitan asegurar la oferta hídrica para la región en los próximos años.

CONTEXTO DEL ÁREA DE ESTUDIO

A la porción mexicana del acuífero Bolsón del Hueco se le denomina acuífero Valle de Juárez, posee la clave 0833 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA y se localiza al norte del estado de Chihuahua. Tiene una superficie de 3386 km², colinda al norte y al este con el límite internacional con Estados Unidos, al oeste con el acuífero Conejos-Médanos y al sur con los acuíferos Laguna de Patos, El Cuarenta y Valle del Peso (CONAGUA, 2015). El área de análisis fue establecida a partir de la definición la región hidrológica 24 “Bravo-Conchos”, particularmente las subcuencas ID, IE, IF e IG, las cuales se presentan en la Figura 1.

La cuenca está directamente relacionada con el río Bravo, el cual fluye siguiendo una discontinuidad en la planicie aluvial en el puerto entre la Sierra de Juárez y las montañas Franklin. Esta planicie está subyacente por depósitos fluviales irregularmente distribuidos, formando un acuífero de tipo libre. La recarga al acuífero se da por medio de infiltración de aguas superficiales en áreas de cultivo, canales y cauces; precipitación directa; y filtraciones en formaciones fracturadas. Por otra parte, las descargas son producto de la extracción por bombeo y por flujo subterráneo lateral al Bolsón del Hueco.

Con relación al clima de Ciudad Juárez, de acuerdo a la clasificación de climas de Köppen modificada para México, el clima de la región se clasifica como BWkx'(e'), que corresponde a un clima seco de vegetación xerófila (B) con clima desértico (W), temperatura media anual menor a 18 °C, temperatura media mensual mayor a 18 °C en el mes más cálido, y de subtipo frío (k), así como con lluvia todo el año (x'). Además, se cuenta con un rango de oscilación de temperaturas mayor a los 14 °C, por lo que se considera muy extremo (e').

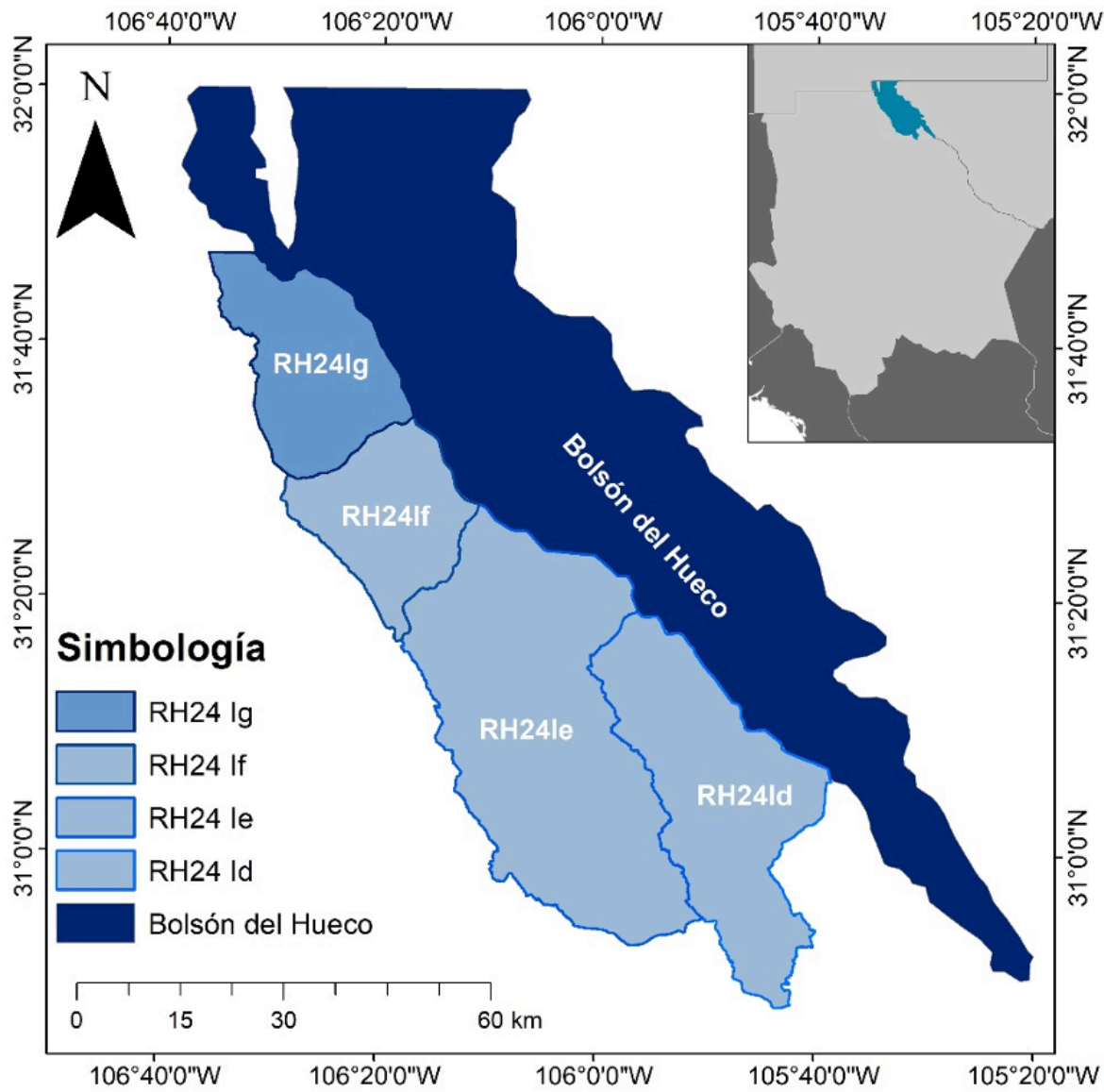


FIGURA 1: Acuífero Valle de Juárez subdividido en subcuencas de la RH24 y porción norte restante del Bolsón del Hueco.

Los datos de la estación climatológica Juárez (DGE) (31° 44' 11" Norte, 106° 29' 11" Oeste), con clave 08213 del Servicio Meteorológico Nacional de México, de 1997 a 2013 se registra una precipitación promedio anual de 232.82 mm, temperatura media anual para estos años de 19.5 °C (superior al promedio histórico de 18 °C) mencionado por CONAGUA en 2015, un máximo medio anual de 33.08 °C en agosto y un mínimo medio anual de 11.53 °C en enero, (SMN s.f.).

Con relación a la fisiografía, la cual define regiones con un relieve producto del mismo agente modelador y con un mismo origen geológico, el área de estudio se encuentra dentro de la provincia Sierras y Llanuras del Norte delimitada por el INEGI (2008). Esta provincia representa la extensión sur de la provincia Basin and Range de Estados Unidos. Consiste en cadenas montañosas alargadas con orientación predominante al norte o noroeste, delimitadas por fallas y con depresiones

tectónicas con rellenos de planicies aluviales y de piedemonte (Lugo-Hubp, 1990).

La geología superficial del área de estudio comprende litología principalmente sedimentaria y en menor medida ígnea. Dentro de los afloramientos las rocas de mayor edad corresponden a las formaciones Navarrete-Las Vigas, Cuchillo y Aurora, pertenecientes al Cretácico inferior. La porción ígnea corresponde a derrames riódacíticos y riolíticos e intrusivos graníticos del Oligoceno. Estas secuencias están cubiertas por depósitos sedimentarios del Neógeno Superior al Cuaternario de origen lacustre, aluvial y eólico (CONAGUA, 2015). La columna estratigráfica de la región abarca del Mesozoico (250 a 55 Ma) al Cenozoico.

El acuífero se considera de tipo libre, con una porción superior formada de material clástico de origen aluvial y eólico. Este medio granular incluye los depósitos de

Conceptos de balance hídrico

bolsón, formados por material granular (arcilla, limo, areniscas y conglomerados), que van de finos en la parte central a gruesos en los márgenes. Se considera que esta es la unidad hidroestratigráfica receptora y almacenadora de agua (CONAGUA, 2015). En la parte inferior se encuentra el medio fracturado formado por rocas sedimentarias marinas y, en menor medida, ígneas extrusivas. Este actúa como transmisor cuando aflora en superficie al permitir la infiltración por medio de fallas y fracturamiento. En algunas zonas, principalmente al sur, la presencia de capas arcillosas genera condiciones locales de confinamiento (CONAGUA, 2015).

El acuífero cuenta con valores de transmisividad hidráulica (T) que van de 72 a 1448 $m^2/día$, con un patrón de variación definido por valores altos en la porción noroeste con una disminución gradual hacia el sureste. La conductividad hidráulica (K) varía entre 0.1 y 28.5 $m^2/día$, mientras que el coeficiente de almacenamiento (S), tiene un valor promedio de 0.00044 y un rendimiento específico (m_e) de 0.12 a 0.26 (CONAGUA, 2015).

Con relación al contexto poblacional, Ciudad Juárez tenía 1 391 180 habitantes, según la información de la Encuesta Intercensal 2015, siendo la ciudad más poblada del estado de Chihuahua y la octava zona metropolitana de México. Junto con El Paso, Texas, crean un área binacional de casi más de 2 millones y medio de habitantes, siendo la segunda área binacional más grande de México, por debajo de Tijuana, B. C. - San Diego, California, lo cual tiene una incidencia directa en la demanda de agua en la región y las consecuencias y estrés que esto conlleva.

Históricamente, Ciudad Juárez se ha caracterizado por sus niveles altos de crecimiento de población debido, principalmente, a la constante llegada de inmigrantes a la urbe. Estas tasas de crecimiento son de las más altas que se han presentado en el México contemporáneo. Tan solo durante el periodo transcurrido entre 1940 y 2000, la cantidad de habitantes pasó de poco más de 48 881 personas a más de 1 187 000 millones. La principal razón de este rápido crecimiento se relaciona con la alta movilidad de personas que se han desplazado hasta esta ciudad en el pasado y, aunque cada vez con menor frecuencia, por migrantes que no pudieron lograr su cometido de llegar a Estados Unidos y se han quedado a residir en la ciudad, al tiempo que la dinámica del mercado de trabajo local ha generado una alta demanda de fuerza laboral, sobre todo en los últimos treinta años, mucha de la cual ha tenido que llegar desde fuera puesto que la oferta de mano de obra local no ha solventado los puestos de trabajo generado (Soto, 2018).

Frecuentemente, los acuíferos están estrechamente relacionados con corrientes o cuerpos de agua superficiales, como ha sido el caso en el área de estudio, con el río Bravo. Es importante determinar los intercambios positivos (recarga), o negativos (descarga) entre estos para realizar el balance hídrico. En zonas con déficit pluviométrico la alimentación mediante infiltración de aguas de riego es importante y puede ser la principal fuente de renovación de reservas.

La hidrología estudia la distribución y movimiento del agua sobre la tierra, sus reacciones físicoquímicas contra sustancias de la naturaleza y vida del planeta tierra (Chow, 1994). Teniendo esto en cuenta, podemos llegar a definir el ciclo hidrológico como un motor impulsado por la energía solar que proporciona el nexo vital entre océanos y continentes. El agua se evapora en la atmósfera desde el océano y en menor grado desde los continentes, lo cual es importante conocer, ya que dentro de este ciclo entran la mayoría de las variables con las que se desarrolla un balance hídrico, que consiste en la cuantificación de los aportes y los consumos de agua; su cálculo se basa en datos relacionados con elementos hidrológicos y tiene como principio el establecimiento de un estudio de detalle de las variaciones en las reservas de un acuífero y su interrelación con el comportamiento hídrico de la cuenca donde se encuentra (Chow, 1994). Su expresión general se indica en la Ecuación (1), la cual indica que la variación del volumen es igual a las entradas menos las salidas de agua en un intervalo de tiempo específico.

$$\frac{dV}{dt} = E - S \quad (1)$$

donde:

V = volumen de agua (hm^3),

t = tiempo (varía según lo requerido),

E = entradas (hm^3) y

S = salidas (hm^3).

Por otra parte, desglosando lo que son las variables de entradas y salidas de la Ecuación (1), con el fin de entender qué es lo que llega a una cuenca y qué es lo que se va, para así saber con qué se cuenta, quedaría de la siguiente manera, según la Ecuación (2):

$$\overline{BH} = P - E - T - I - FS \quad (2)$$

donde:

BH = balance hídrico (hm^3),
 P = precipitación (hm^3),
 E = evaporación (hm^3),
 T = transpiración (hm^3),
 I = infiltración (hm^3) y
 FS = flujo superficial (hm^3).

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas en los cuales se concentran los escurrimientos que confluyen y desembocan en un área común llamado punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago o el mar o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. La cuenca en sí cuenta con propiedades de suma importancia para el análisis hidrológico de una región, como lo es su elevación, caudales, la magnitud de su área, su pendiente, tipos de suelo, sus relieves, clima prevaleciente, así como las propiedades y uso que se le dé a los suelos. Estas características se traducen en un complejo conjunto de interacciones entre el agua que almacenan y su entorno, las cuales imparten una correlación directa con las extracciones y demandas de agua antropogénicas específicas para la zona de estudio. La diferencia entre la cuenca hidrográfica y la hidrológica es que la primera se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la segunda incluye las aguas subterráneas.

Existen diferentes metodologías para la integración del cálculo de balance hídrico, cada uno con aproximaciones específicas, ya que las variables o parámetros que se llegan a utilizar provienen de diferentes derivaciones conceptuales. Con relación a lo anterior y a manera de ejemplo, podemos considerar la metodología del Programa Hidrológico Internacional (PHI) (UNESCO, 2006), mediante el cual se obtienen balances hídricos por cuencas hidrográficas, integrando las variables ciclo hidrológico, según se indican en la Ecuación (3).

$$\Delta V = (VII + Ar + Im + Re + Sm + B) - (Ev + ET + Ab + Ex + U + f + In) \quad (3)$$

donde todas las variables se expresan en indican en (hm^3):

ΔV = variación de volumen en la cuenca,
 VII = volumen de lluvia,
 Ar = escurrimiento aguas arriba,
 Im = importaciones de cuencas vecinas,
 Re = retornos de agua,
 Sm = salidas de agua por manantiales,

B = extracciones por bombeo dentro de la cuenca,
 Ev = evaporación de cuerpos de agua,
 ET = evapotranspiración,
 Ab = escurrimiento aguas abajo,
 Ex = exportaciones hacia cuencas vecinas,
 U = usos del agua (superficial y subterráneo),
 f = pérdidas en redes de agua potable (fugas) e
 In = infiltración de lluvia.

MODELACIÓN HIDROGRÁFICA CON SWAT

Con base en la pertinencia y alcance de los objetivos de la presente investigación y tomando en cuenta una evaluación preliminar sobre diversas herramientas de modelación hidrológica, su compatibilidad con otros paquetes de modelación geohidrológica como Visual ModFlow, así como la viabilidad de generar la información de entrada inicial, se seleccionó el paquete computacional SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Texas A&M University, 2020), desarrollado por el Departamento de Servicio de Investigación Agrícola de Estados Unidos, consiste en una secuencia metodológica que permite modelar cuencas hidrográficas para series de tiempo continuas y funciona como una extensión que se integra con diferentes Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS/QGIS). Por medio de este paquete, es posible calcular el balance hídrico de las cuencas partiendo de la generación de unidades de respuesta con un comportamiento similar o unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés). Cada una de estas HRU implica una combinación única de un tipo de suelo, un uso de suelo y el grado de inclinación de la pendiente. El conjunto de estas agrupa de forma espacial el área de estudio. Como producto es posible obtener diferentes datos de interés, como las condiciones hidrológicas de la cuenca para el periodo modelado, información sobre transporte de sedimentos, pérdida de nutrientes, procesos fluviales, ciclo de nitrógeno y fósforo.

Por lo tanto, SWAT permite generar modelos a pequeña escala de cuencas hidrográficas para simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea, además de predecir el impacto ambiental por el uso de suelo, administración de la tierra y efectos potenciales por el cambio climático (Winchel *et al.*, 2013). Las variables requeridas para esta aproximación de balance hídrico se presentan en la Ecuación (4).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

donde:

SW_t = contenido final agua en el suelo (mm),

SW_o = contenido inicial agua en el suelo (mm) en el día (días),

R_{day} = precipitación (mm/día),

Q_{surf} = escorrentía superficial (mm),

E_a = evapotranspiración (mm),

w_{seep} = agua percolando a zona vadosa (mm) y

Q_{gw} = agua de retorno (mm).

Alrededor del mundo se han realizado diferentes clases de estudios de balance hídrico en función de las condiciones climatológicas, tratando de desarrollar alternativas para determinados problemas encontrados en su región mediante la herramienta SWAT. Por ejemplo, Chen *et al.* utilizaron en 2017 información de observaciones de clima, riego, evapotranspiración, índice de área foliar y rendimiento de cultivos, derivados de un campo con lisímetro irrigado en el Laboratorio de Investigación de Conservación y Producción del USDA en Bushland, Texas, donde el acuífero Ogallala está experimentando una disminución continua de su nivel debido al bombeo para riego y una recarga limitada, y evaluaron la eficacia de las funciones de riego automático en SWAT. Encontraron una buena concordancia entre la evapotranspiración diaria simulada y observada durante los periodos de calibración del modelo (2001-2005) y validación (2010), dando como resultado simulaciones de evapotranspiración razonables por debajo de los umbrales de activación del déficit de agua del suelo, según lo indicado en campo.

Batoukhteh *et al.* (2016) evaluaron los impactos del riego presurizado en la cuenca de Abharrud sobre el ahorro de energía, el flujo de retorno y la eficiencia de riego con SWAT. El riego presurizado pudo reducir el consumo de agua en aproximadamente 144 Mm³/año en comparación con el riego superficial actual en el área de estudio (186 Mm³/año). Sin embargo, este tipo de riego redujo el flujo de retorno en aproximadamente la misma cantidad, lo que no produjo un cambio significativo en la eficiencia total de la cuenca.

En la región árida de Texas High Plains se ha tenido una disminución en la disponibilidad de agua, por lo que fue necesario adoptar un programa de riego por goteo. Por ello, en 2018, Chen *et al.* realizaron un modelamiento de tales prácticas para conocer las alternativas rentables en campo. Sin embargo, los estudios

identificaron deficiencias en los algoritmos de riego automático en la herramienta SWAT. En consecuencia, se desarrollaron algoritmos de riego automáticos nuevos y representativos, realizando comparaciones con datos de riego observados de un campo con un lisímetro, mostrando un rendimiento mejorado del modelo para las simulaciones de la cantidad y frecuencia de riego, además de la evapotranspiración real. Aunque el uso de algoritmo de riego automático constante mejoró ligeramente la simulación de evapotranspiración del modelo, en comparación con los escenarios de riego automático predeterminados de SWAT, la simulación de riego estacional mejoró enormemente.

Uddin, en 2010, desarrolló un modelo de evaluación con SWAT para realizar una simulación de variables hidrológicas de manera continua, en el periodo 1998-2006, respecto al flujo terrestre, el flujo del canal, las pérdidas de transmisión para la cuenca del Raudatain en el Norte de Kuwait y la cuenca del Umm Al Aish en el centro de Kuwait. Obtuvo resultados preliminares, donde en el norte y el centro de Kuwait se recibe una precipitación anual promedio de ~ 210 mm/año, de los cuales considera que se podría recargar 30 mm a los acuíferos poco profundos. En el área donde se realizó el estudio, dichos modelos proporcionan soluciones alternativas para la evaluación de los recursos hídricos sostenibles de la región.

Baker & Miller, en 2013, utilizaron tres mapas de uso del suelo que representaron un periodo de 17 años, en los cuales la región experimentó transiciones significativas que sirvieron como insumos para el modelado hidrológico, utilizando la herramienta de Evaluación Automática de Cuencas Geoespaciales (AGWA) para parametrizar el paquete SWAT, calibrado mediante datos de observación tomados durante la década de los noventa, con una alta concordancia anual. Los resultados de la simulación mostraron que los cambios en el uso del suelo generaron aumentos correspondientes en la escorrentía superficial y disminuciones en la recarga del agua subterránea. Estos cambios tienen implicaciones negativas para la salud ecológica del sistema fluvial, así como para el lago Nakuru y las comunidades locales.

Dos años después, Hashemi *et al.* (2015), simularon los efectos de una recarga artificial en el sur árido de Irán en el periodo 2010-2050, con base en una necesidad de una gestión adecuada, ya que el agua subterránea es la única fuente de suministro de agua dulce en la región estudiada. Se propusieron cuatro escenarios de extracción y recarga simulando el nivel de agua subterránea y la cantidad de recarga en el acuífero estudiado. Los

resultados mostraron que los escenarios de extracción tienen el efecto óptimo en el nivel del agua subterránea. Además, se encontró que la continuación de la tasa de bombeo actual conduciría a una disminución del agua subterránea en 18 m hasta 2050.

Por otro lado, Fallatah *et al.* (2018) desarrollaron un enfoque integrado utilizando observaciones geofísicas, geoquímicas y de teledetección para cuantificar las tasas de recarga de los acuíferos de regiones áridas que están experimentando un rápido agotamiento del agua subterránea. El análisis de los resultados SWAT indica que, de 1998 a 2014, los acuíferos Saq en la Península Arábiga recibieron una precipitación anual promedio de 19.20 km³, de los cuales aproximadamente el 51 % se divide como posible recarga. Las variaciones temporales en el almacenamiento y la recarga están relacionadas

Secuencia metodológica genérica, para la modelación de escenarios hidrológicos con SWAT.

INTEGRACIÓN DE DATOS Y DESARROLLO DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN SWAT

Con base en el progreso de cada etapa de construcción de los modelos, se utilizaron diferentes conjuntos de datos, partiendo de la definición específica del área de estudio, según el objetivo de investigación. El área fue establecida a partir de la definición la región hidrológica 24 “Bravo-Conchos” definida por la CONAGUA (2016), particularmente las subcuencas ID, IE, IF e IG, según se presentó en la Figura 1. Para definir la ubicación y dimensión de la cuenca se utilizó como base la Red hidrológica 1:50 000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que posteriormente

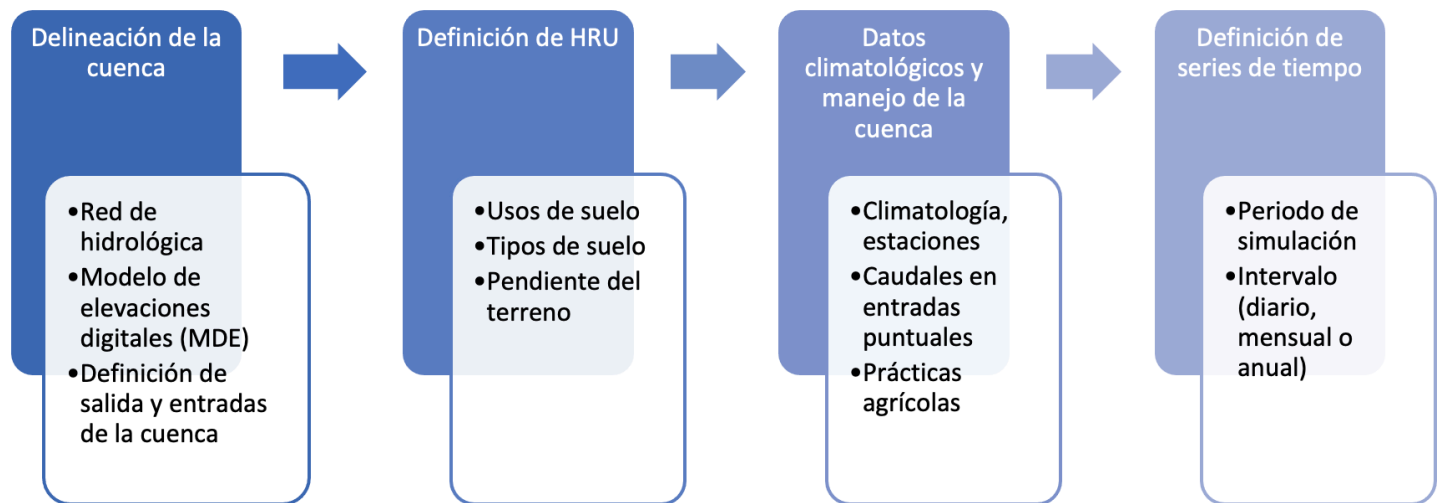


FIGURA 2: Secuencia metodológica genérica, para la modelación de escenarios hidrológicos con SWAT.

con los cambios en la extracción regional de agua subterránea, la lluvia y la extensión de las áreas irrigadas.

En resumen, la técnica de modelación presentada en esta sección permite simular además la calidad y cantidad de agua superficial y la percolación de agua subterránea, predecir el impacto ambiental del cambio hidrológico del uso de la tierra, la relación entre la variabilidad climática y el régimen hidrológico, y la influencia antropogénica en este régimen (Gassman *et al.* 2007), (Shao *et al.* 2019).

La metodología SWAT se puede dividir en cuatro grandes segmentos: la delineación de la cuenca, la definición de las HRU, la integración de los datos climatológicos y de manejo de la cuenca, y la definición de los componentes de serie de tiempo a modelar (Figura 2).

fue modificada para incluir la red de canales presentes en la región del Valle de Juárez. Con relación al Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), este correspondió y se recortó del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) INEGI (2013), con una resolución de 15 m por 15 m, recortado con base a la extensión de la cuenca y definiéndose manualmente la red hidrológica a mayor detalle a partir del continuo citado. Con base en lo anterior, se definió a su vez la configuración de la red de drenaje y dirección de flujo. También se identificó la entrada y la salida de la cuenca, delimitándola, así como la ubicación de las fuentes puntuales de agua, asociadas a la Acequia Madre y a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

El mapa de tipos de suelos fue generado a partir de la carta edafológica H13-1 con escala 1:250 000 del

INEGI. Los mapas de tipo de suelo fueron elaborados previamente al presente estudio a partir de un análisis espectral de imágenes satelitales, generando un mapa anual. En la Figura 3 se presentan dos ejemplos de los archivos de sistemas de información geográfica generados para las simulaciones, correspondientes a los tipos de suelo y usos del mismo. Sobre el particular, para el uso de suelo se consideró la clasificación definida

como fuentes de aportación superficial, consistieron de las aguas provenientes de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) localizadas en Ciudad Juárez. Se tomaron en consideración las entregas de agua de Estados Unidos en la Acequia Madre, conforme a la convención entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América para la equitativa distribución de las aguas del río Grande (CILA, 1906),

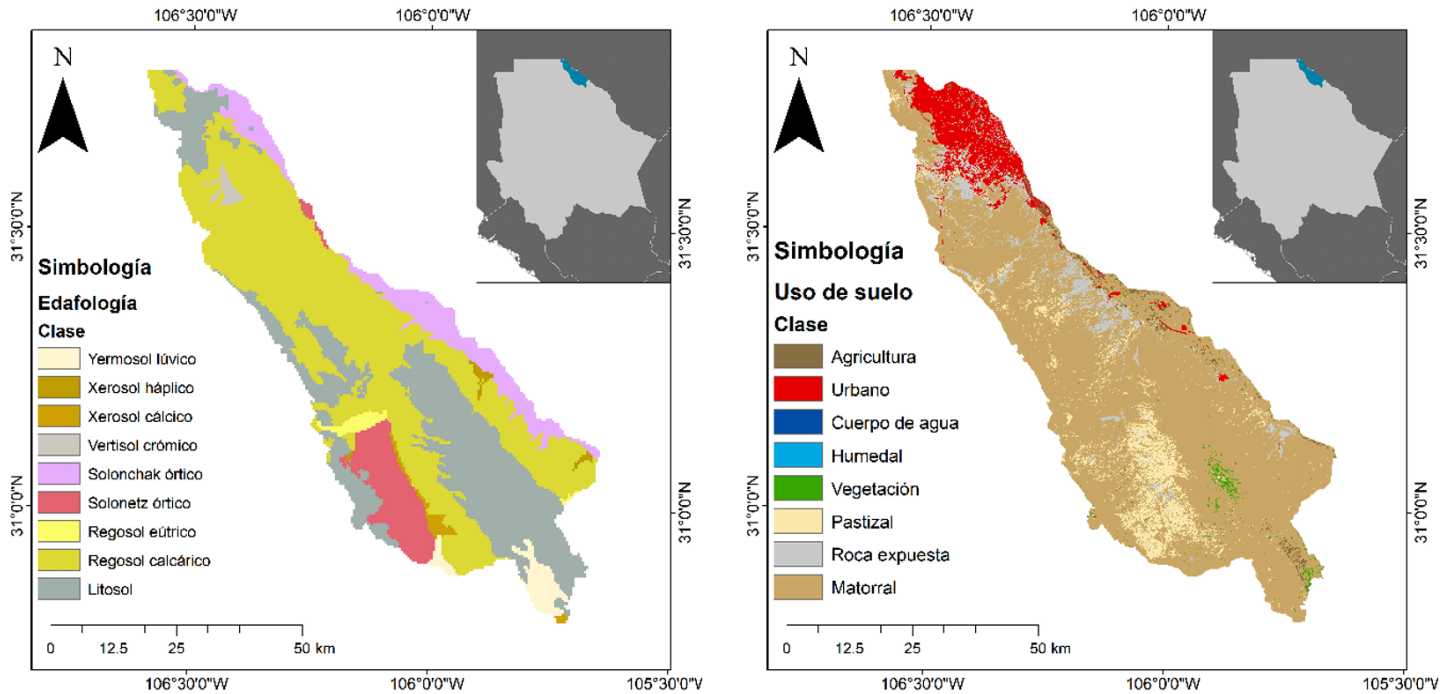


FIGURA 3: Ejemplo de mapa de tipos de suelo y usos de suelo utilizados en las modelaciones.

para los archivos digitales en formato ráster, las cuales se clasificaron en ocho clases: agrícola (AGRR), urbano (URHD), cuerpos de agua (WATR), humedales (WETF), vegetación perene (FRSE), matorrales (RNGB), pastizales (RNGE), y suelo raso (SWRN). En el caso de la edafología, se utilizó el Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos del INEGI, el cual se recortó a la zona y se adaptó a la base de datos edafológicos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés).

En el caso del mapa de pendientes de terreno, el cual se deriva a partir del modelo digital de elevación, se definieron tres categorías de pendiente basadas en los criterios del Mapa Digital de Suelos del Mundo (FAO, 2008). Estas fueron: 0 a 5 %, indicando pendiente nula a suave; 5 a 10 %, indicando pendientes suaves a accidentadas; y >10 %, indicando pendientes pronunciadas. Las entradas puntuales de agua al sistema,

y los escurrimientos del norte del río Bravo hacia este. En los dos primeros casos, se elaboró una proyección mensual mediante la captura y procesamiento de datos históricos.

Con relación a la información climatológica, se incorporaron los datos de precipitación, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y temperatura correspondientes a las estaciones climatológicas del área de estudios, tanto de Ciudad Juárez como de El Paso, Texas, y se comparó con la información climatológica que genera el algoritmo de programa SWAT Weather Generator (Anh *et al.*, 2019).

Las proyecciones de población en el área de estudio son necesarias para la estimación de caudales de abastecimiento y posteriormente de efluentes de agua residual tratada. Con base en los trabajos desarrollados por Soto en 2018, se identificó que los métodos de predicción Malthus e interés compuesto, presentan un comportamiento acorde con el que deben observarse en

procesos de crecimiento poblacional. Para determinar el caudal per cápita fue necesario realizar una consulta histórica de estos consumos, el cual varía desde 158 l/habitante día en 1966, hasta 388 l/habitante día en el año 1995, teniendo un valor promedio de 272.57 l/habitante.

Con el valor promedio del consumo per cápita y las proyecciones anuales de población, se procedió a determinar el valor total de agua potable demandada y se continuó con la determinación del caudal de agua residual, con una aproximación de un 75 % de la dotación de agua potable, con base en los criterios técnicos académicos para este tipo de estimaciones. Después de contar con los caudales anuales de agua residual, se desarrolló un procedimiento estadístico para distribuir el mismo en los meses del año debido a que SWAT los requiere tabulados de forma mensual. Se siguió un procedimiento similar a lo anterior para la generación de caudales mensuales con el agua de irrigación del río Bravo proveniente del tratado de aguas de 1906, tomando en cuenta la información histórica con los caudales otorgados de forma mensual desde 1938 hasta 2016. En este caso, el agua se entrega entre los meses de marzo a septiembre, por tal razón, se determinaron caudales de entrega promedio intermensuales por año, pero solamente teniendo en cuenta los meses en los que el agua fue entregada, mismos que fueron incorporados en el agua rodada del sistema de canales para irrigación en el valle de Juárez e influyen en los procesos de balance hídrico y recarga.

Escenarios de modelación de balance hídrico

EFFECTOS POR MODIFICACIONES EN LA EFICIENCIA DE RIEGO EN DIFERENTES CULTIVOS EN EL VALLE DE JUÁREZ

Con base en los registros históricos de la demanda de agua, el acuífero Bolsón del Hueco ha sido impactado por los efectos en su extracción, así como el manejo y administración de los recursos hídricos a nivel cuenca. Tomando en consideración lo anterior, el objetivo del trabajo que se presenta en esta sección es el de evaluar la posibilidad de la disminución del consumo de agua dentro del sector agrícola, tratando de mantener las tasas óptimas de productividad de los cultivos. Con el beneficio adicional de que el riego propicie eficiencia en agua y energía, también proporciona una serie de beneficios ambientales y socioeconómicos (UN Environment Program, 2018), por lo que es fundamental conocer el impacto positivo que este cambio en la eficiencia de riego pueda traer.

Para lograr este objetivo de investigación se evaluó el efecto de la eficiencia de riego y el caudal disponible para diferentes cultivos que podrían ser sembrados en el Valle de Juárez, mediante un estudio de balance hídrico, para lo cual se utilizó el modelo SWAT, presentado en detalle párrafos arriba, mismo que incorpora datos de escorrentía superficial, flujos de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en estanques y depósitos, crecimiento e irrigación de cultivos, carga de nutrientes y pesticidas, y caudales a escala de cuenca, con el fin de cuantificar el impacto de las prácticas de gestión de la tierra de uso agrícola.

Con relación a la definición espacial del área de estudio, se tomó un segmento de la cuenca ID, el cual cuenta con una porción considerable de uso de suelo agrícola (342.8 km²), en la región mexicana de esta cuenca hidrológica, por lo que se realizaron diversos procesos de las capas digitales de información con ArcGIS, con el modelo digital de elevaciones, mapas de uso y tipos de suelo, y red hidrológica en esta cuenca, la cual se indica en la Figura 4. La evaluación inició con la generación de unidades de respuesta hidrológica, a partir de combinaciones únicas de un mismo uso de suelo, tipo de suelo y pendiente del terreno, las cuales se presentan en la Figura 5.

Para la integración de la variable de irrigación se consideraron los cultivos de algodón, nuez, alfalfa y vid en la zona agrícola, de acuerdo con estadísticas de las unidades de riego, tomando en cuenta los datos presentados en dichas estadísticas correspondientes al periodo de 2007 a 2018, además de haberse seleccionado con base en la disponibilidad de información fitológica de los cultivos en las bases de datos internas de SWAT.

Se plantearon tres escenarios con enfoque a la modificación a la eficiencia de riego en el área agrícola. En el primero se considera una eficiencia de riego del 45 % asociado a riego por inundación sin ningún tipo de control la irrigación. El segundo considera una eficiencia del 75 % asociado al método de irrigación por aspersión. En el último escenario, se utiliza como método potencial más eficiente, el goteo con una eficiencia máxima del 90 %. Se consideró un caudal disponible para irrigación basado en las desviaciones de agua hacia el canal de riego que atraviesa la zona agrícola. Las aportaciones de agua consideradas dependen de la descarga de la planta de tratamiento de aguas residuales principal de la ciudad (planta norte), así como de las entregas anuales de agua en la Acequia Madre, río arriba. Dentro de la configuración del modelo, se incluyen las unidades de

calor de cultivo bajo un estrés hídrico del 90 %, y las correspondientes al inicio de germinación de la planta.

cultivos, y obteniendo un total de 60 simulaciones para obtener resultados diarios, mensuales y anuales, de

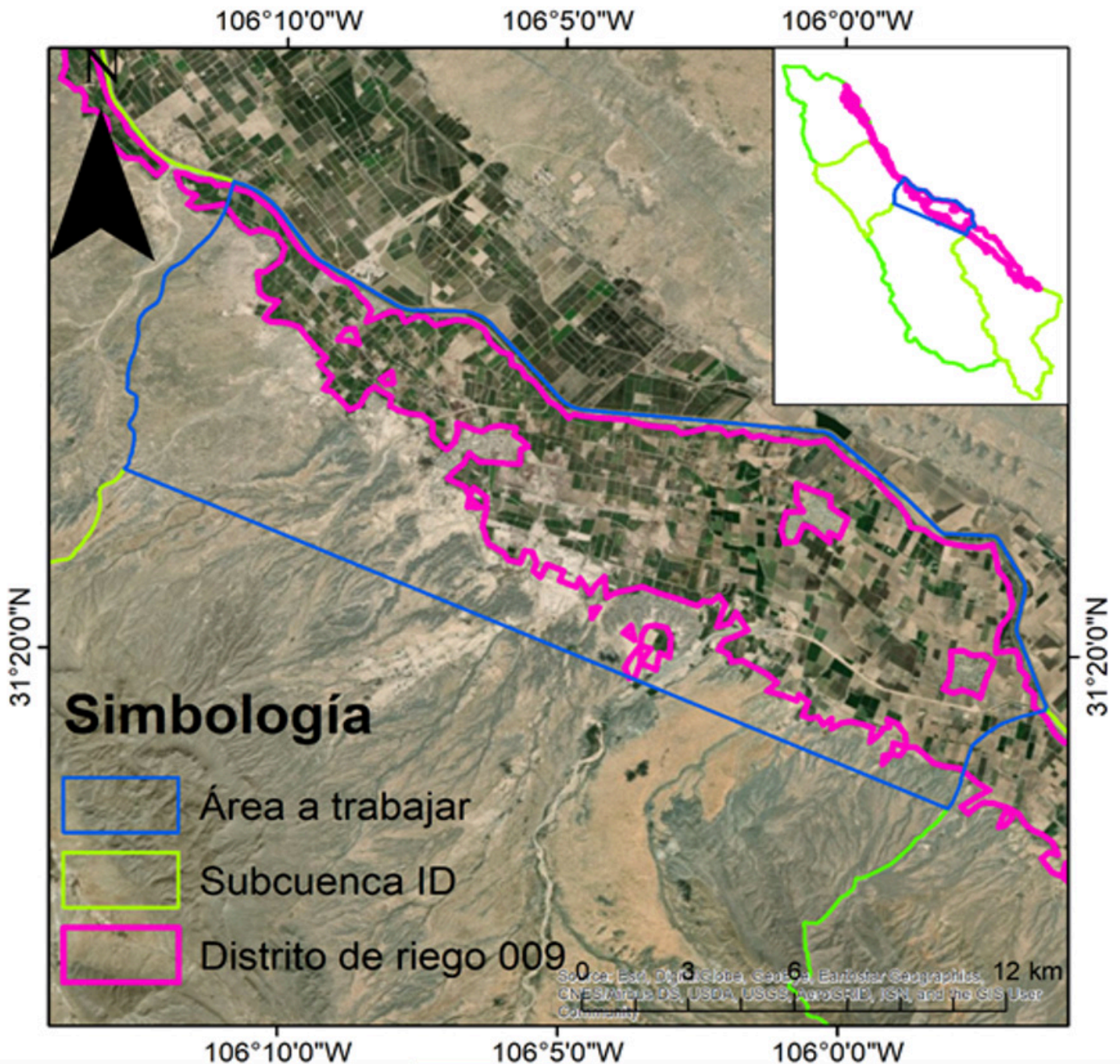


FIGURA 4: Delimitación de cuenca hidrológica y distrito de riego en el área de estudio.

Por último, y con el objetivo evaluar de manera conceptual los efectos de cambios hipotéticos en la eficiencia de riego y su relación con la evapotranspiración de los cultivos y el consumo de agua promedio, se configuraron las simulaciones para que corriera el modelo correspondiente a 2015, con información de tres años previos para el calentamiento o estandarización del modelo, generando 15 modelos para cuatro diferentes

las variables hidrológicas de interés, para su posterior procesamiento.

Con relación al análisis de los resultados de los modelos, se accedió a las bases de datos generadas por SWAT, extrayendo la información de recarga y evapotranspiración en la red hidrológica para cada uno de los años mencionados, los cuales se presentan a manera de resumen en las Tablas 1, 2 y 3. De manera

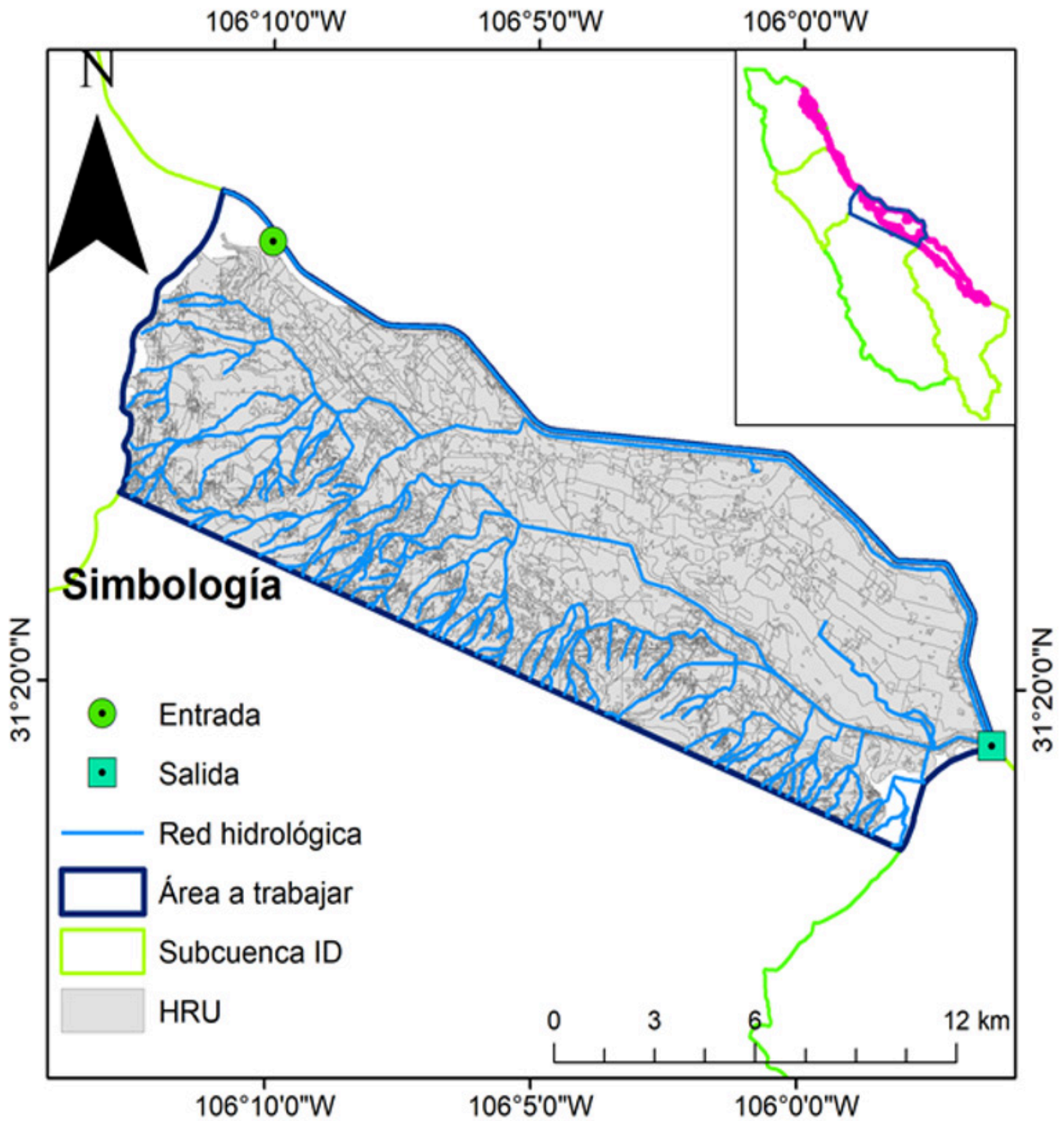


FIGURA 5: Unidades de Respuesta Hidrológica del área de estudio.

adicional, se obtuvo la variación en el consumo de agua para cada uno de los cultivos con modificación a la eficiencia de riego.

Se observaron cambios en el comportamiento de la variable de evapotranspiración, de acuerdo con el tipo de cultivo la modificación a la eficiencia de riego. En el caso de la alfalfa, la evapotranspiración aumentó

conforme creció la eficiencia, mientras que en el caso del nogal se presentó el caso contrario. Por otro lado, tanto el algodón como la vid mostraron un aumento en la evapotranspiración en la eficiencia del 75 %, volviendo a disminuir en la de 90 %.

Los resultados de cada uno de los diferentes modelos con el cultivo seleccionado muestran diferencias

TABLA 1: Caudal promedio en m³/s observado para los distintos tipos de eficiencia (45, 75 y 90 %), conforme a los cuatro distintos cultivos analizados.

	Eficiencia (%)		
	45	75	90
Cultivo	Caudal promedio (m ³ /s)		
Alfalfa	0.44	0.18	0.11
Algodón	1.55	0.87	0.69
Vid	0.11	0.01	0.01
Nogal	1.38	0.73	0.56

TABLA 2: Recarga promedio en mm al año observado para los distintos tipos de eficiencia (45, 75 y 90 %) conforme a los cuatro distintos cultivos analizados.

	Eficiencia (%)		
	45	75	90
Cultivo	Recarga promedio (mm)		
Alfalfa	273.79	273.79	272.06
Algodón	3158.26	3158.26	3158.301
Vid	213.43	213.43	215.25
Nogal	216.28	216.28	216.28

TABLA 3: Evapotranspiración acumulada para los diferentes tipos de cultivo, con modificaciones en la eficiencia de riego.

	Eficiencia (%)		
	45	75	90
Cultivo	Evapotranspiración acumulada (mm)		
Alfalfa	473.68	495.62	517.50
Algodón	515.95	567.44	474.07
Vid	464.06	478.92	464.05
Nogal	512.22	512.08	512.07

considerables entre sí en el consumo de agua para irrigación y recarga inducida por irrigación al acuífero. Por otra parte, no se observa un cambio significativo (>1 %) entre los modelos con el mismo tipo de cultivo, pero con diferente eficiencia de irrigación, siendo este cambio nulo en todos los cultivos entre la eficiencia de 45 % y 75 %.

Los cultivos en orden de mayor a menor consumo de agua fueron el algodón, el nogal, la alfalfa y la vid. Se observa, por lo tanto, que el cultivo que genera una mayor recarga al acuífero es el algodón, con un consumo de agua similar al del nogal. Se entiende que los cambios en estos efectos son debido a los parámetros que maneja el paquete computacional como

predeterminados, los cuales no fueron modificados porque no se cuenta con la información específica para cada uno de los cultivos, como los requiere para realizar el proceso adecuadamente. Por ejemplo, de acuerdo con Supak (s.f.), el algodón requiere estar en un rango de 1800 a 2200 en unidades de calor para un crecimiento adecuado, pero el paquete computacional maneja este dato de manera fija como 2351.24 unidades de calor, por lo que es necesario calibrar a detalle la información a utilizar en este tipo de proyectos.

Por otro lado, la relación entre eficiencia y recarga no fue lineal como se pudiera esperar. De los cuatro cultivos solo la alfalfa presentó una disminución en la recarga con el aumento de la eficiencia, mientras que el algodón y la vid presentaron un aumento y el nogal se mantuvo normal.

Los resultados de la modelación presentada en esta sección constituyen una primera aproximación para el análisis del balance hídrico, con particular énfasis en la recarga potencial derivada de procesos de irrigación para los campos agrícolas de la región. Con base en la experiencia adquirida, cabe señalar algunas de las limitaciones del paquete de modelación usado, como la imposibilidad de calibrar satisfactoriamente las simulaciones debido a la falta de información y/o datos técnicos requeridos en el cálculo de las variables del balance. Un ejemplo de lo anterior representó la necesidad de interpolar la información climatológica de la red local, en comparación del algoritmo de modelación a escala global de la climatología necesario para poder ejecutar el modelo SWAT adecuadamente. Por otra parte, las aproximaciones mostradas anteriormente fueron realizadas sin un mecanismo para poder calibrar la información de los caudales de la red hidrológica, y en particular de la red de irrigación dentro del distrito de riego. Por ello, es necesario considerar que los modelos presentados requieren de un proceso de calibración que permita incorporar información de campo, como la percolación real que se registra en función de las características de los tipos de suelo utilizados, caudales y láminas de riego utilizadas por cobertura de área de cultivo, calendario de riego y datos climatológicos locales, entre otros. Las implicaciones de tiempo y recursos que implicaría la recolección de información para generar este tipo de calibración y validación se encontraron fuera de los alcances de esta investigación.

Manejo de aguas residuales tratadas de Ciudad Juárez, como elemento potencial de recarga al acuífero Valle de Juárez

Con base en una alta demanda de agua y baja disponibilidad de este recurso en la región, derivado de las actividades socioeconómicas propias de la zona fronteriza, y sus características climáticas y geofísicas, es menester realizar un análisis de las medidas que conlleven a un manejo sustentable de los recursos hídricos y, en especial, las fuentes de abastecimiento disponibles. Con este objetivo, se propuso una aproximación de estudio mediante la construcción de un modelo de balance hídrico que incorporara el concepto de recarga superficial al acuífero, incluyendo las tasas de extracción, las cuales se estima exceden entre 15 a 20 veces la tasa de recarga (Hibbs *et al.* 2002), lo que contribuye a una disminución del nivel freático y que favorece un proceso de salinización del agua disponible de acuífero.

El propósito principal fue el evaluar de manera hipotética o conceptual, el potencial de inyectar directamente al acuífero agua tratada de nivel terciario, proveniente de las plantas de tratamiento de Ciudad Juárez, Chih., comparando los distintos escenarios de modelación de recarga al acuífero que se proponen, destacando el más viable para la sustentabilidad del acuífero. Se plantearon seis escenarios a modelar para el periodo de 1995 a 2015, con un intervalo de cinco años para cada análisis, a su vez la modelación consideró las condiciones de uso de agua, las cuales fueron estimadas con base en la demanda global anual de agua para el periodo señalado. Se presenta en la Figura 6 los componentes del área de estudio y puntos de aportación de agua en la cuenca y el río Bravo.

Como punto de partida, se consideró una aproximación inicial en la cual no se incorporó ninguna condición de manejo específico del agua superficial, escenario que fue utilizado como punto de referencia

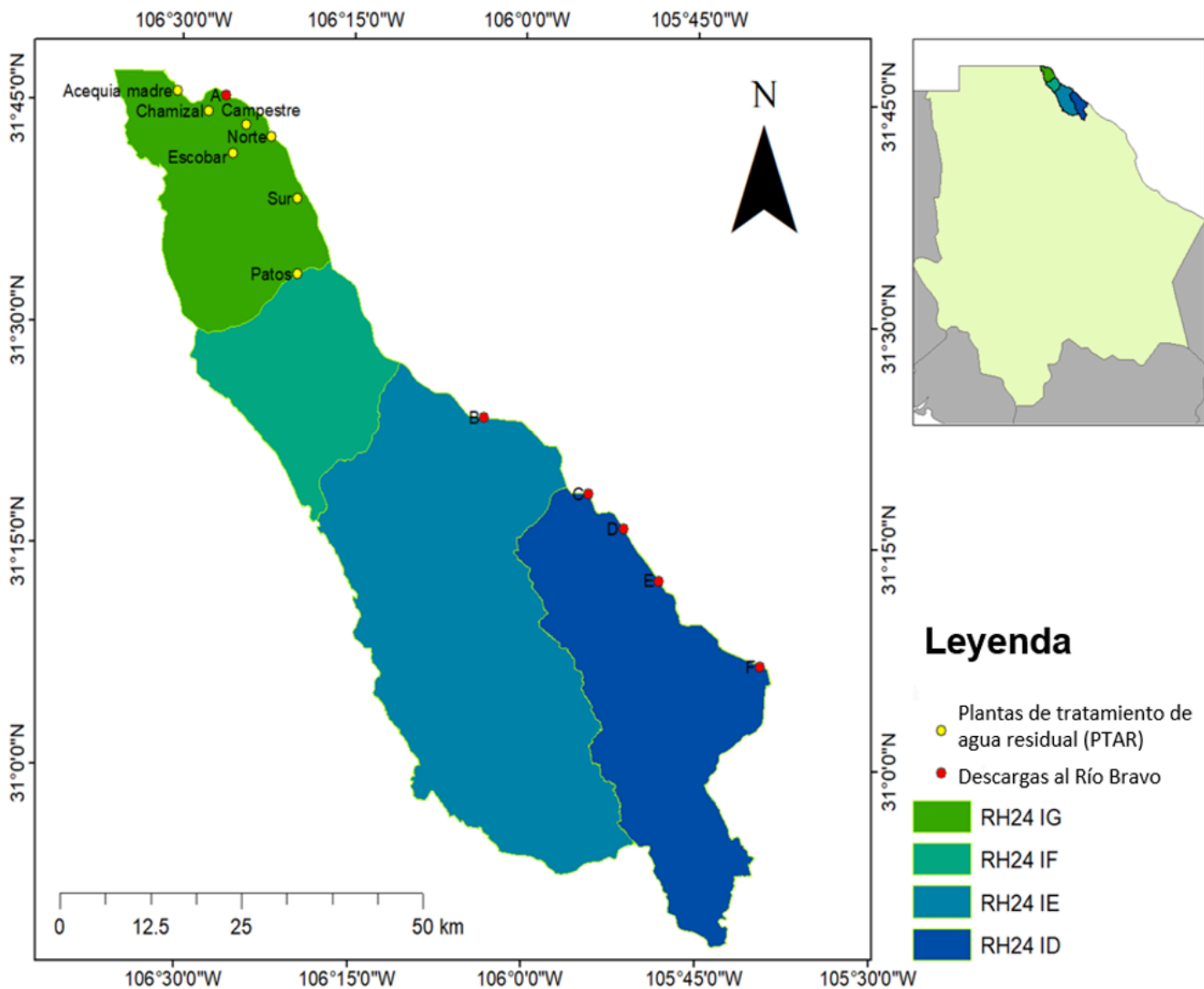


FIGURA 6: Extensión del área de estudio, subcuencas y ubicación de fuentes puntuales de aportación de agua.

para los demás modelos, denominándose “Como de Costumbre” (BU, por sus siglas en inglés). Este escenario incluyó el escurrimiento de los caudales de los efluentes tratados de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Ciudad Juárez, también la asignación y suministro de agua del tratado internacional con Estados Unidos de América, que se deriva en la compuerta americana en la frontera conforme a la Convención entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, para la equitativa distribución de las aguas del Río Grande (CILA, 1906). Por lo tanto, los escenarios de simulación se enlistan según se indica y se les asignó una nomenclatura que se presenta en negrillas:

1. BU - *Business as usual*. Modelo base sin ninguna modificación de las condiciones históricas de caudales y condiciones climáticas registradas.
1. Extracción para inyección directa. Suponen que se utiliza una porción del caudal de efluente tratado posterior a un tratamiento terciario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) sur, para recarga artificial en el acuífero.
 - S0.5** – Extracción de 0.5 m³/s - Efluente PTAR sur, equivalente a 43 200 m³/día
 - S1.0** – Extracción de 1.0 m³/s - Efluente PTAR sur, equivalente a 86 400 m³/día
 - S1.5** – Extracción de 1.5 m³/s - Efluente PTAR sur, equivalente a 129 600 m³/día
2. Inclusión de un reservorio. Supone la creación de un reservorio artificial, con una capacidad de 500 000 m³ de volumen, al cual llegue constantemente una porción del caudal de una PTAR, con el fin de forzar una percolación al acuífero.

RSV – Creación de un reservorio dentro del modelo con un caudal de entrada de 1.0 m³/s

Con relación a la propuesta de establecer un lago artificial a manera de reservorio, se propuso una ubicación en una zona dentro de las terrazas del río Bravo (Figura 7), el cual cuenta con un tipo de suelo regosol cálcico, características organolépticas de 86 % arena, 8 % limo y un 6 % de arcilla, con una pendiente del 0 % al 5 % y una dimensión de 10 hectáreas cuadradas con 5 metros de profundidad, que fue caracterizado de esta manera

debido a la alta conductividad hidráulica de la zona que es relativamente poco poblada, causando nula afectación a los residentes, además que las dimensiones fueron determinadas para que el reservorio pudiese recibir el caudal mencionado tomando en cuenta la velocidad de infiltración sin ocasionar un desborde. A partir de los modelos desarrollados, se generaron mapas anuales de distribución espacial de variables hidrológicas, diagramas de variación mensual de estas mismas y una comparación entre el caudal de salida del modelo y el caudal registrado en la estación hidrométrica de Fort Quitman, que se encuentra varios kilómetros río abajo de la salida final del modelo. Para la determinación de la recarga hidrológica en la cuenca con respecto a los modelos, se tuvo acceso a las bases de datos generadas por SWAT y su herramienta complementaria SWAT Check, extrayendo la información de recarga de cada uno de los años mencionados y prosiguiendo con la elaboración de mapas de las variables hidrológicas para el periodo de años referido. En las figuras siguientes se muestran los mapas de distribución espacial de la recarga de la cuenca del Bolsón del Hueco de 1995 y 2015, ya que muestran una diferencia notoria a diferencia de los demás años.

En estos, la Figura 8 es referente al modelo **BU**; en la Figura 9 se muestran los mapas para el modelo **S0.5** para dicho periodo; en la Figura 10 se exponen los mapas para el modelo **S1.0** respectivamente; en la Figura 11 son presentados los mapas para el modelo **S1.5** para estos mismos años; y en la Figura 12 se indican los modelos respectivos al modelo **RSV**.

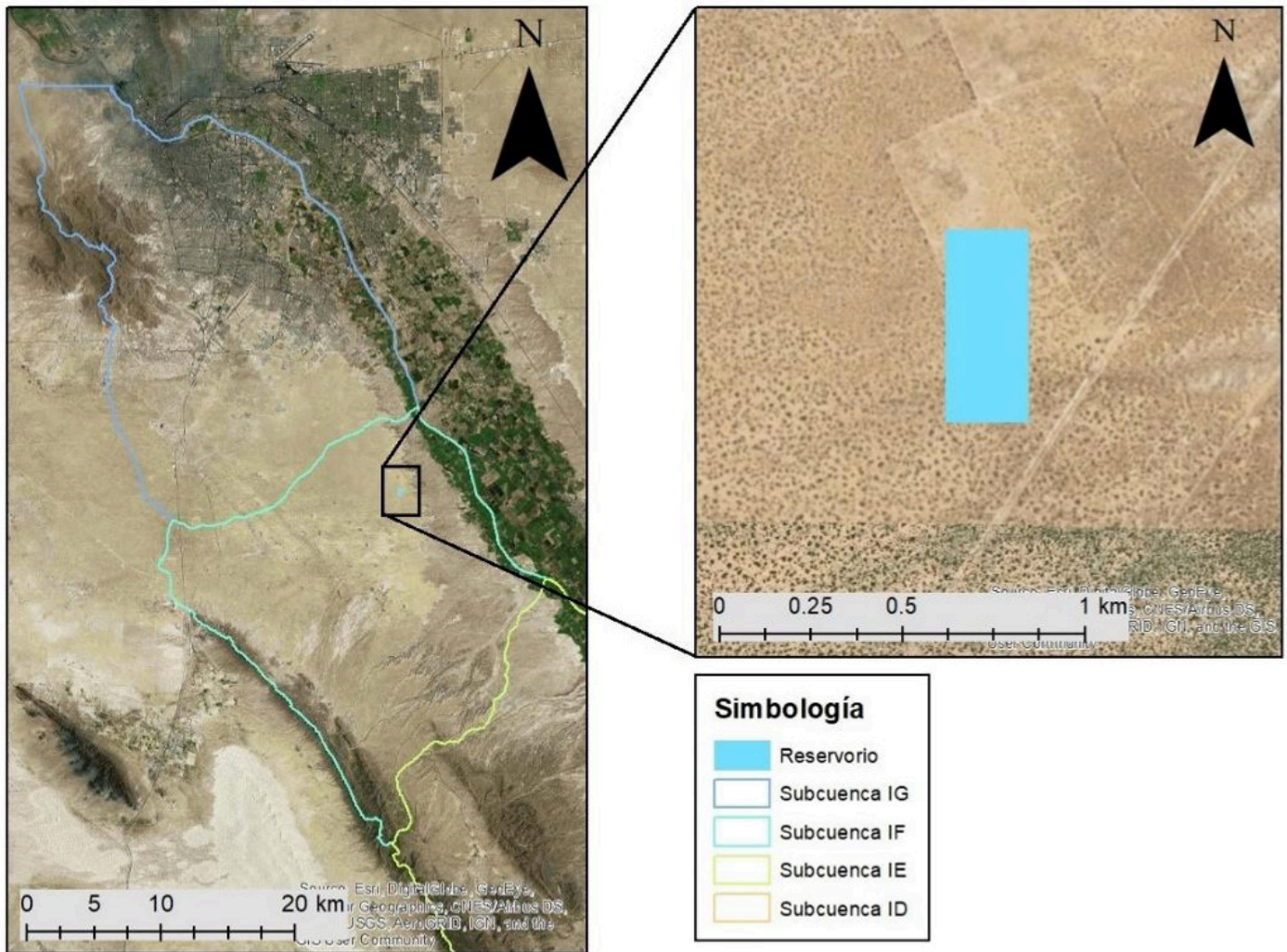


FIGURA 7: Geolocalización de reservorio propuesto para el escenario de modelación RSV.

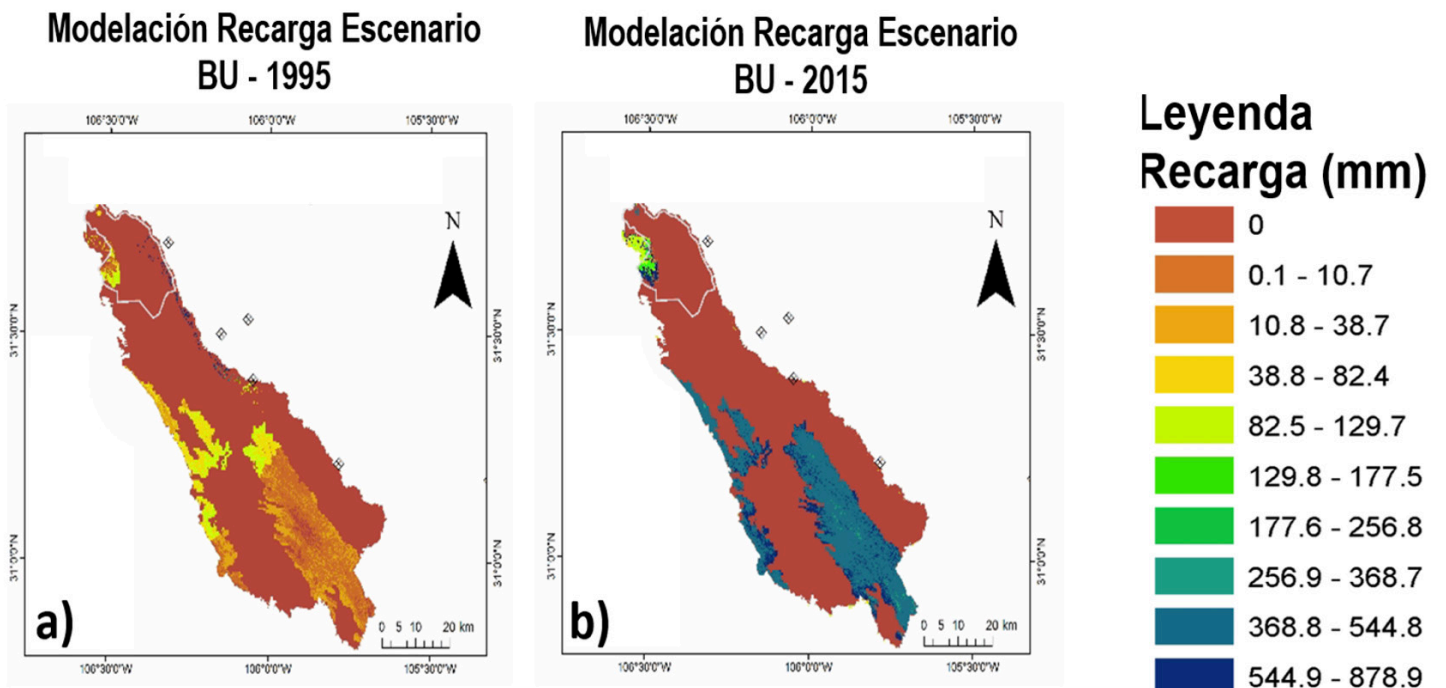


FIGURA 8: Mapas de distribución espacial recarga de la cuenca al Bolsón del Huevo para el escenario BU, donde: a) Recarga para el año 1995, b) Recarga para el año 2015.

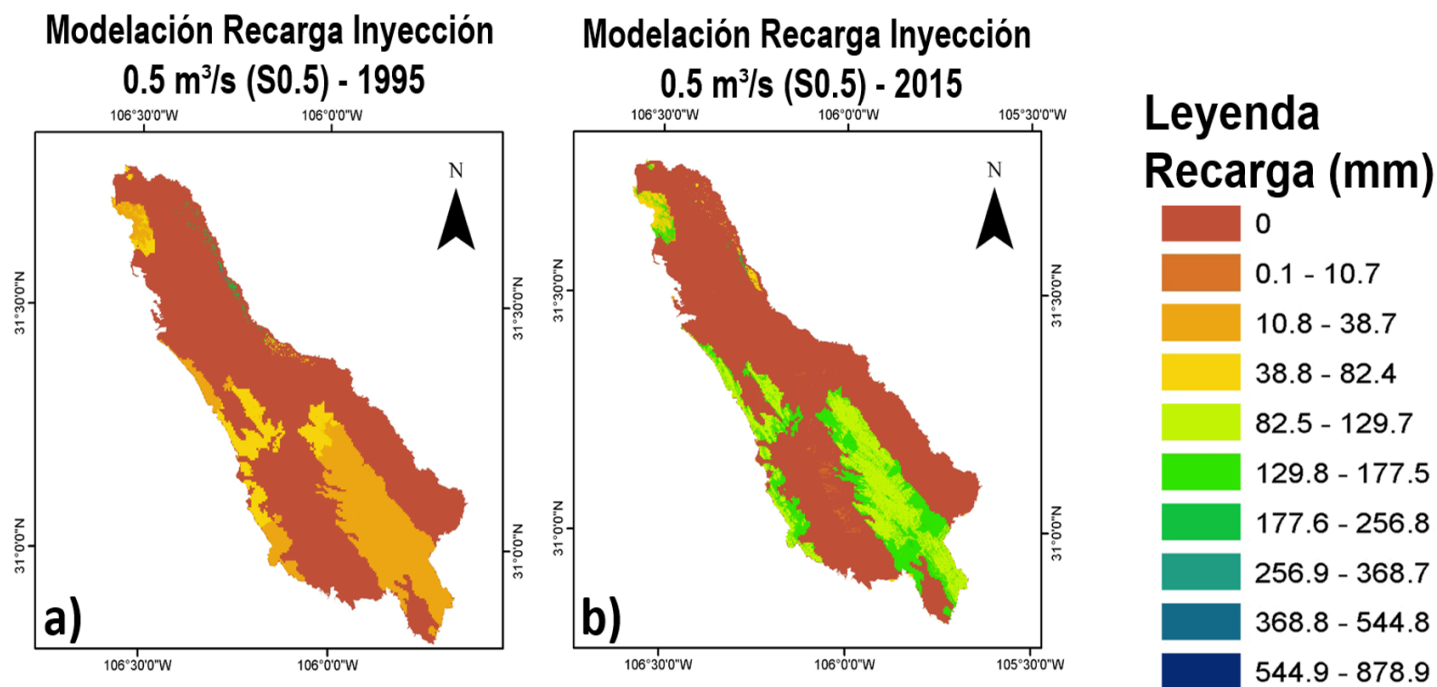


FIGURA 9: Mapas de distribución espacial de la recarga de la cuenca al Bolsón del Huevo para el modelo S0.5, donde: a) Recarga para el año 1995, b) Recarga para el año 2015.

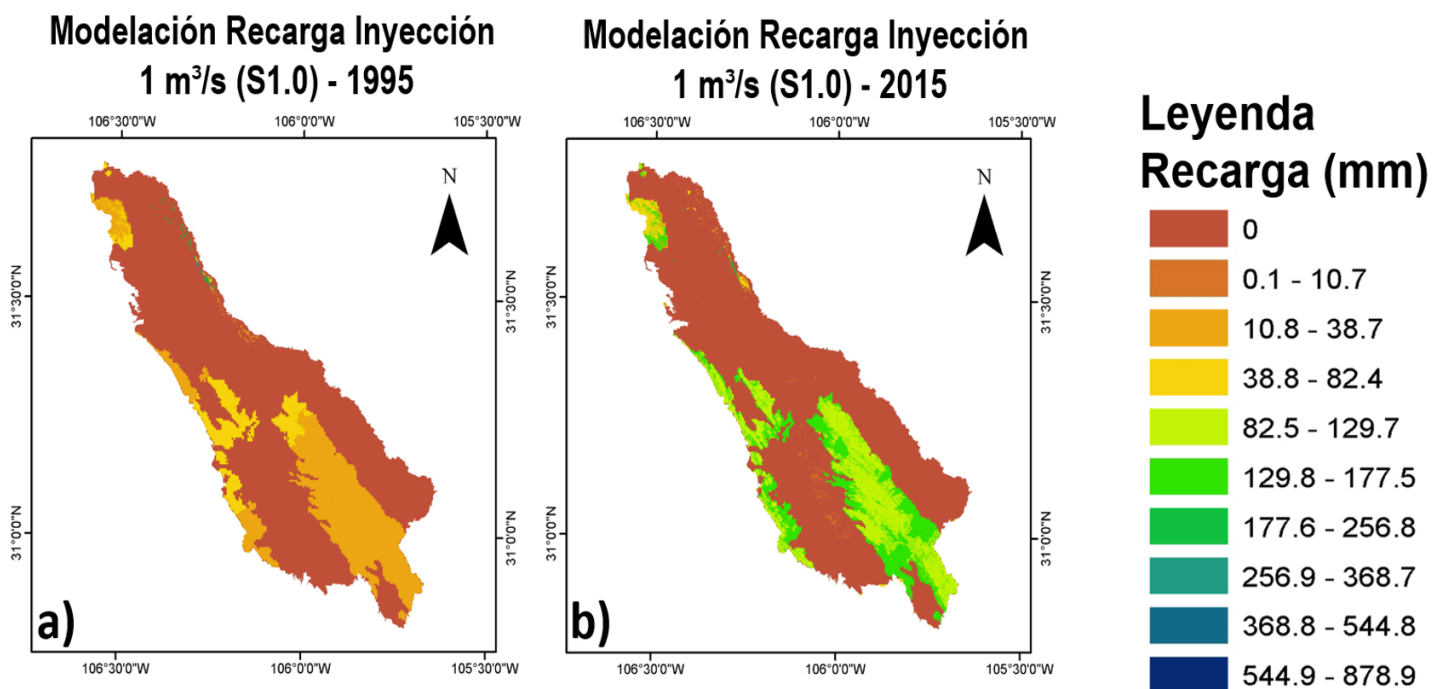


FIGURA 10: Mapas de distribución espacial de la recarga de la cuenca al Bolsón del Huevo para el modelo S1.0 donde: a) Recarga para el año 1995, b) Recarga para el año 2015.

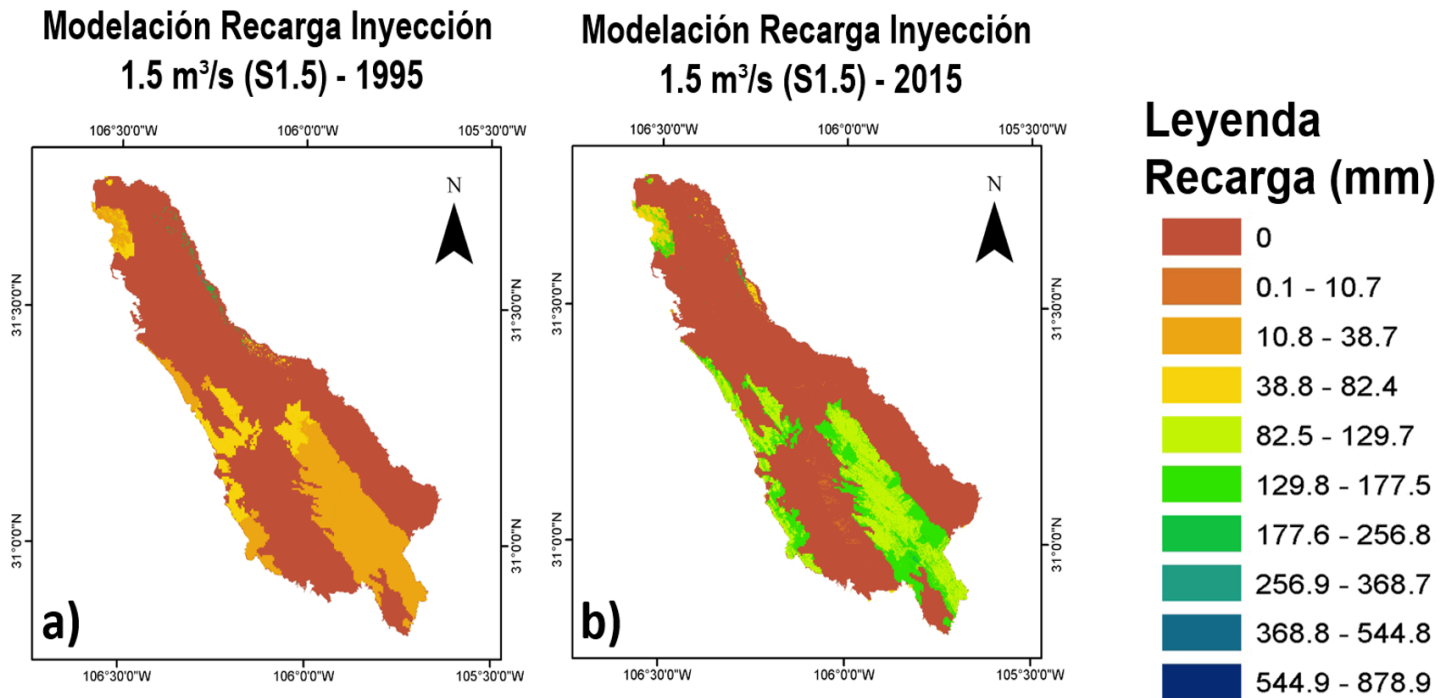


FIGURA 11: Mapas de distribución espacial de la recarga de la cuenca al Bolsón del Huevo para el modelo S1.0 donde: a) Recarga para el año 1995, b) Recarga para el año 2015.

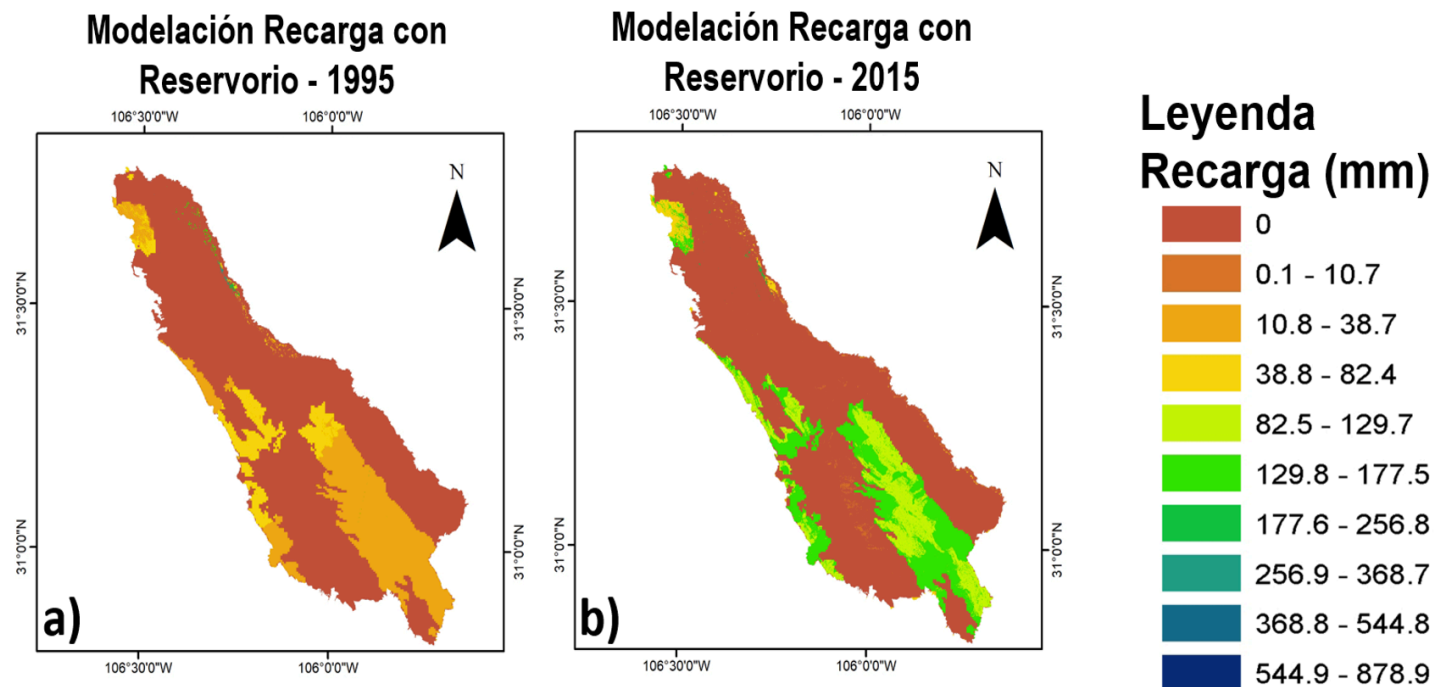


FIGURA 12: Mapas de distribución espacial de la recarga de la cuenca al Bolsón del Huevo para el modelo RSV donde: a) Recarga para el año 1995, b) Recarga para el año 2015.

En la Tabla 4 se muestran los valores en milímetros promedio de recarga anuales para los modelos elaborados que abarcan toda la extensión de la cuenca, mostrando diferencias mínimas pero significativas para el acuífero. En la Tabla 5 se muestra el volumen total en metros cúbicos al año que se obtuvo en los modelos de recarga para el año 2015 respecto a los distintos escenarios, debido a que este tuvo una recarga mayor que los demás años modelados, como se muestra en la Tabla 1. Estos valores fueron obtenidos multiplicando los valores de recarga en milímetros anuales por el área total de la cuenca. En la Figura 13 se muestran los valores de precipitación y recarga de manera mensual para los años 1995 y 2015, puesto que, como fue explicado anteriormente, estos son los años que muestran más diferencias entre sí.

Con base en los numerales presentados en la Tabla 1, se observa un incremento en la recarga del acuífero con la implementación del reservorio en comparación a los otros escenarios planteados. Esto se explica por sus características geofísicas e hidrológicas, como la capacidad de retención de humedad de estos suelos

TABLA 4: Valores de recarga (mm/anuales) para los distintos escenarios obtenidos mediante la herramienta SWAT

Escenario	1995	2000	2005	2010	2015
BU	0.45	0.37	0.26	0.78	1.85
S0.5	0.43	0.36	0.25	0.78	1.84
S1.0	0.42	0.34	0.24	0.78	1.84
S1.5	0.44	0.37	0.25	0.73	1.85
RSV	0.43	0.35	1.16	0.75	1.91

(FAO, 2008), las cuales permiten una mayor recarga en una extensión de 10 hectáreas cuadradas con 5 metros de profundidad y una capacidad de almacenaje de 500 000 m³, por ende, genera un aumento en la recarga de la cuenca. Por ejemplo, para el modelo del reservorio se obtuvo una recarga anual en el acuífero para el 2015 de 1.91 mm/anuales en comparación a la recarga normal (BU) de 1.85 mm/anuales. El efecto que tiene el caudal en el cauce del agua superficial es significativo, ya que, si se disminuye, se observa que hay una menor recarga de manera natural, tomando en cuenta la recarga “Como de Costumbre” (BU) de 1.85 mm/anuales a causa de la reducción de flujo en la red hidrológica superficial.

Cabe señalar que los escenarios de modelación carecen de un componente realista, como lo representan las pérdidas de flujo en las redes de distribución de agua en la ciudad por fugas y tomas clandestinas. Uddin, en 2010, recomienda que, al implementar acciones contra

TABLA 5: Volumen total de recarga en metros cúbicos al año para el 2015 considerando los diferentes escenarios de recarga hidrológica.

Escenario (2015)	mm de recarga	Volumen inyectado (m ³ /año)	Volumen total de recarga (m ³ /año)
BU	1.86	-	7 015 883
S0.5	1.86	15 768 000	22 783 883
S1.0	1.85	31 536 000	38 514 163
S1.5	1.85	47 304 000	54 282 163
RSV	1.91	-	7 204 482

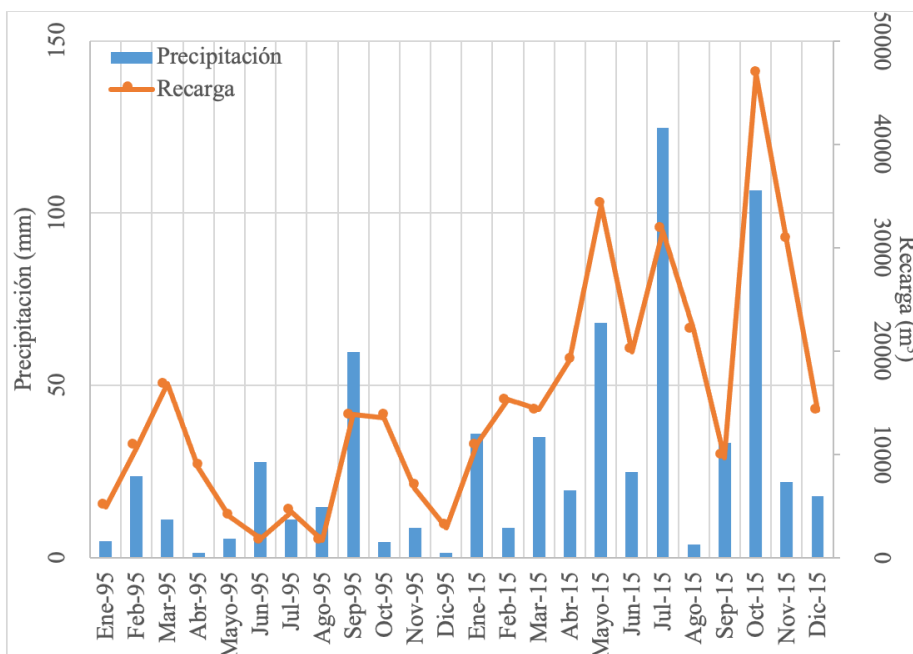


Figura 13: Precipitación y recarga mensual para los años 1995 y 2015.

las pérdidas de flujo, los acuíferos poco profundos del norte y centro de Kuwait podrían obtener una recarga extra de 30 mm, proporcionando soluciones sostenibles en dicha región, por lo que esta información sirve de referencia para la generación de futuros proyectos en Ciudad Juárez para combatir la pérdida de agua en el sistema. Hashemi *et al.* (2015) simularon una recarga artificial en el sur árido de Irán para evaluar los impactos del cambio climático en el agua subterránea debido a que se han ido agotando estos recursos hídricos por malos manejos en la distribución. En este trabajo se encontró que, de acuerdo con las predicciones a futuro, todos los pozos de bombeo se secarían en la década iniciada en 2020, teniendo graves impactos sociales y económicos si no se implementan sistemas de modernización en sus acuíferos. Es crucial señalar que Ciudad Juárez cuenta con un estrés hídrico de 4.63 puntos, donde el valor máximo posible es 5, lo cual se debe a la sobreexplotación de los mantos acuíferos y a la poca recarga de agua al mismo (Olmos, 2019). En la ciudad de El Paso, Texas, misma que comparte el acuífero en estudio, el organismo operador de administración del agua implementó la instalación de pozos de inyección profunda para introducir agua residual tratada a nivel terciario directamente al acuífero. Con base en la experiencia adquirida por El Paso Water Utilities (EPWU) en conjunto con la American Waterworks Research Foundation, concluyeron que los estanques de infiltración excavados representan un método más económico para recargar el acuífero, en términos de construcción y costos recurrentes de operaciones y mantenimiento. Desde entonces, EPWU ha construido cuatro estanques de infiltración y ha reducido su dependencia de los pozos de inyección, por lo que es necesario evaluar la viabilidad técnica y financiera de este tipo de proyectos de recarga en Ciudad Juárez.

Conclusiones y trabajo futuro de investigación

Con relación a las limitaciones propias de los modelos presentados, se incluye la imposibilidad de haberlos calibrado satisfactoriamente debido a la falta de información medida en campo de las variables del balance hídrico. Asimismo, no fue posible incorporar algunos mecanismos importantes de recarga como, por ejemplo, la recarga inducida por las pérdidas del sistema de distribución de agua potable dentro de la mancha urbana. Sobre la información climatológica, algunos datos requeridos por el modelo fueron generados por

procesos de interpolación. Por último, no se contó con información de caudales de la red de los canales de irrigación del distrito de riego del valle de Juárez, así como los calendarios de riego e información de la extensión de las parcelas cultivadas. Las aportaciones hídricas de escurrimiento de la cuenca del lado estadounidense fueron incorporadas como aportaciones de fuentes puntuales identificadas a lo largo del río Bravo, con base en la red hidrológica de dicha cuenca, en colaboración el equipo de investigación de la Universidad Texas A&M, liderados por los doctores Sora Ahn y Zuping Sheng, que desarrollaron modelos similares del lado estadounidense.

La falta de información de medición de caudales, en particular en la parte de salida de la cuenca mexicana, no permitió contar con una aproximación calibrada de las simulaciones de caudales obtenidas cuando se compararon estas últimas con los datos de la estación hidrométrica del río Bravo ubicada en Fort Quitman, Texas, la cual mide los caudales más cercanos a la salida de la cuenca de análisis. Lo anterior no demerita la experiencia adquirida por el desarrollo de los modelos, ya que representa la parte inicial de un proceso de investigación que se volverá más robusto y complejo con el tiempo y que, en su caso con el desarrollo de un modelo hidrológico binacional integral, permita contar con elementos que puedan esclarecer el comportamiento de los resultados observados en esta primera aproximación.

Con base en el análisis del trabajo de investigación realizado, y tomando en consideración que las condiciones desérticas prevalecientes en el área de estudio, aunado a una creciente demanda del recurso hídrico por el crecimiento urbano y económico del entorno fronterizo, continuarán generándose problemas de disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes, se puede concluir que es necesaria la continuidad de estos esfuerzos de investigación, así como la implementación de proyectos de sustentabilidad para la zona fronteriza, y será imperativo contar con el apoyo e interés de sectores de la sociedad, gubernamental y académico.

Lo anterior conlleva y requiere de un nivel de inversión y financiamiento continuo por parte de las entidades gubernamentales de cada país y a diferentes niveles, lo cual contribuirá a su vez en la generación de formación de capital humano especializado en estas temáticas y, además, permitirá contar con herramientas y equipar con materiales e instrumentales medición analítica e hidrométrica, a los grupos de trabajo e investigación que se establezcan para el registro de información de parámetros de campo, medición de

percolación, evapotranspiración, caudales y calidad del agua, entre otros.

Debido a la naturaleza técnica y especializada de los modelos en desarrollo, resulta crítico el poder contar con una mayor apertura para la disseminación, por parte de las entidades operativas del manejo de agua, de la información necesaria para el desarrollo y calibración de los modelos, como lo representan las series de tiempo de los caudales de extracción, los niveles estáticos y dinámicos de los pozos de abastecimiento e información de los perfiles litológicos, y los sistemas de la red de abastecimiento y alcantarillado.

Desde la perspectiva académica y científica, resulta altamente pertinente continuar el desarrollo e integración de diferentes aproximaciones de simulación, incluyendo, mas no limitando, los modelos fisiográficos e hidrológicos, geohidrológicos, climáticos, desarrollo poblacional, abastecimiento de agua y drenaje, regulación ambiental y de manejo del agua, entre otros. La construcción de un modelo de balance hídrico y geohidrológico para el acuífero binacional Bolsón del Hueco-Valle de Juárez, que incorpore elementos de almacenamiento de agua superficial y subterránea, procesos de irrigación, demandas de los diferentes usuarios del agua, extracción, pérdidas en el sistema de abastecimiento, precios del agua y restricciones gubernamentales, y los efectos potenciales que los diferentes escenarios de cambio climáticos pueden incidir, será necesario para proteger la sostenibilidad del acuífero, junto con análisis pertinentes de costo-beneficio.

Referencias

- Ahn, S., Sheng, Z., Jung, C., Park, S., Bailey, R., Granados-Olivas, A., Mirchi, A., Samimi, M., Hargrove, W. (2019). Coupled SWAT-MODFLOW Modeling for Determining Groundwater Sustainability Under Climate and Pumping Scenarios in a Semi-Arid Agricultural Watershed. [Conferencia] American Geophysical Union, fall meeting 2019. Recuperado de <https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/608472>
- Alatorre, L., Granados-Olivas, A., Bravo, L., Torres, Maria Wiebe, L., Uc, M., González, M., Sánchez, E., Rojas, H., & Salas, V. (2019). Agricultural furrow irrigation inefficiency in the basin of the Laguna de Bustillos, Chihuahua, Mexico: geometric characteristics of agricultural plots and aquifer depletion. *Tecnología y ciencias del agua*. 10. 10.24850/j-tyca-2019-05-10.
- Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados. (2019). Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias. Madrid, España: Agencia de la ONU para los Refugiados. Recuperado de <https://eacnur.org/blog/escasez-agua-en-el-mundo/>
- Batoukhteh, F., Dehghanisanij, H. & Misaghi F. (2016). Using SWAT model to Assess the Impact of Increasing Irrigation Efficiency (Case Study: Abharrud River Catchment). 2nd World Irrigation Forum (WIF2) 6-8 November 2016, Chiang Mai, Thailand.
- Baker, T. & Miller S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology* 486 (2013) pp.110-111.
- Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), (1906). Convención entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América para la equitativa distribución de las aguas del Río Grande.
- Chen, Y., Marek, G., Marek, T., Brauer, D. & Srinivasan, R. (2018). Improving SWAT auto-irrigation functions for simulating agricultural irrigation management using long-term lysimeter field data, *Environmental Modelling & Software*, 99, pp 25-38.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2014). Estadísticas del Agua en México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Planeación. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833), Estado de Chihuahua. *Diario Oficial de la Federación*, 20 de abril de 2015
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2016). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego: Año Agrícola 2014-2015. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADR2014-2015.pdf>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2017). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego: Año Agrícola 2015-2016. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EA_2015-2016.pdf
- Chen, Y., Marek, G., Marek, T., Brauer, D., Srinivasan, R. (2017). Assessing the Efficacy of the SWAT Auto-Irrigation Function to Simulate Irrigation, Evapotranspiration, and Crop Response to Management Strategies of the Texas High Plains. *Water* 2017, 9, 509.
- Chow, V. T., 1994. *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogota: McGraw-Hill, 1994.
- Food and Agriculture Organization (FAO), (2008). *Organización de las Naciones Unidas. Base referencial*

- mundial del recurso suelo. Informe sobre recursos mundiales de suelos. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Estados Unidos: Land & Water. Recuperado de <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1111246/>
- Fallatah, O. A., Ahmed, M., Cardace, D., Boving, T., & Akanda, A. S. (2018). Assessment of Modern Recharge to Arid Region Aquifers Using an Integrated Geophysical, Geochemical, and Remote Sensing Approach. *Journal of Hydrology*. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.09.061
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C., & Arnold, J. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE* 2007, 50, 1211–1250
- Hashemi, H., Uvo, C.B. & Berndtsson, R. (2015). Coupled modeling approach to assess climate change impacts on groundwater recharge and adaptation in arid areas. *Hydrology Earth System Sciences*, 19, 4165–4181, 2015.
- Hibbs B., C. Eastoe, F. Philips y J. Hogan (2002). Groundwater and surface Water salinization in the El Paso/Juarez Region. Thrust Area 2 Overview. SAHARA. Recuperado de: http://www.sahra.arizona.edu/research/TA2/2_9.html
- INEGI. (2008). Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Relieve continental. Recuperado el 11 de marzo de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Lugo-Hubp, J. (1990). El relieve de la República Mexicana. *Revista de la Universidad Nacional Autónoma de México*, vol. 9, 82-111. Instituto de Geología.
- Olmos, J. (2019). Chihuahua, octavo lugar en crisis de agua. *El Diario de Juárez: Chihuahua*. Recuperado de: <https://diario.mx/estado/chihuahua-octavo-lugar-en-crisis-de-agua-20190809-1549260.html>
- Ruiz, A. y Rodriguez, C. (2013). La importancia del manejo sustentable del agua. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Recuperado de <https://www.unicen.edu.ar/content/la-importancia-del-manejo-sustentable-del-agua>
- SMN, (s.f.). Servicio Meteorológico Nacional, Normales Climatológicas por Estado: Chihuahua. Recuperado el 12 de marzo de 2020, de Servicio Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>
- Soto, Ontiveros Arturo. (2018). Disponibilidad de Agua Subterránea y su relación con el Desarrollo Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua: Un análisis retrospectivo y prospectivo durante el periodo 2008 al 2030. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Instituto de Arquitectura Diseño y Arte, Doctorado en Estudios Urbanos, Tesis Doctoral. pags.115–208.
- Supak, J. (s.f.). Understanding and Using Heat Units. Texas Agricultural Extension Service. Recuperado de: <http://cotton.tamu.edu/General%20Production/arch-understandingandusingheat.pdf>
- Shao, G., Zhang, D., Guan, Y., Xie, Y. & Huang, F. (2019). Application of SWAT Model with a Modified Groundwater Module to the Semi-Arid Hailiutu River Catchment, Northwest China.
- Shiklomanov, L.A. (1993) World Freshwater Resources. In: Gleick, P.H., Ed., *Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources*, Oxford University Press, New York, 13-2.
- Texas A&M University, 2020. SWAT: Soil & Water Assessment Tool. Recuperado de <https://swat.tamu.edu>
- Uddin, Saif. (2010). Remote Sensing Inputs to SWAT Model for Groundwater Recharge Estimates in Kuwait. *Advances in Natural and Applied Sciences*. 41. 526-542.
- United Nations Environment Program. (2018). Climate Change Adaptation and Integrated Water Resources Management. Recuperado de http://www.unepdhi.org/-/media/microsite_unepdhi/publications/documents/unep_dhi/cap-net-cca-and-iwrm-december-2018.pdf?la=en
- UNESCO. (2006). Evaluación de los recursos hídricos: elaboración del equilibrio hídrico integrado por cuencas hidrográficas. 95p. Oficina de la UNESCO en Montevideo y Oficina Regional de Ciencia en América Latina y el Caribe. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN:92-9089-090-8.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J.G. (2013) ArcSWAT Interface for SWAT 2012: User's Guide. Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, College Station, 1-464.

IV

Datos en red y mapas digitales

Datalake and Digital Maps

IV.1 Monitoring crops water use with unmanned aerial vehicle (UAV)

Monitoreo del uso de agua de los cultivos con vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Esmail Mokari¹, Zohrab Samani¹, Richard Heerema¹,
Mohammad Niknejad¹

¹New Mexico State University

Abstract

Crops use water for various purposes including cooling, nutrient transport, and photosynthesis. Most of the water used by the crop is evaporated from the leaves' surface to cool the plant during the photosynthesis process. The ability of leaves to produce carbohydrate through photosynthesis is crucial to the plant growth. The light is captured when the leaves' surface is exposed to the sun. This exposure to the solar energy causes leaves to open stomata to let in carbon dioxide (CO₂) and solar energy to produce carbohydrate. The evaporated water through the stomata is known as transpiration. The sum of transpiration and evaporation outside of stomata (e.g., soil surface) are known as evapotranspiration (ET). The ET is affected by several factors which include climate condition, plant leaf area, and the plant stomata behavior. The stored moisture within the plant rooting zone supplies the water loss through ET. Therefore, providing sufficient water on a timely basis is highly required for the success of the crop growth. Water is the major growth parameter in the irrigated agriculture. This chapter describes how the crops' water use (ET) is estimated through unmanned aerial vehicle (UAV) to achieve successful production.

Resumen

Los cultivos utilizan el agua para diversos fines, incluido el enfriamiento, el transporte de nutrientes y la fotosíntesis. La mayor parte del agua utilizada por el cultivo se evapora de la superficie de las hojas para enfriar la planta durante el proceso de fotosíntesis. La capacidad de las hojas para producir carbohidratos a través de la fotosíntesis es crucial para el crecimiento de las plantas. La luz se captura cuando la superficie de las hojas se expone al sol. Esta exposición a la energía solar hace que las hojas abran las estomas para dejar entrar el dióxido de carbono (CO₂) y la energía solar para producir carbohidratos. El agua evaporada a través de las estomas se conoce como transpiración. La suma

de la transpiración y la evaporación fuera de las estomas (por ejemplo, la superficie del suelo) se conoce como evapotranspiración (ET). La ET se ve afectada por varios factores que incluyen la condición climática, el área foliar de la planta y el comportamiento de las estomas de la planta. La humedad almacenada dentro de la zona de enraizamiento de la planta suministra la pérdida de agua a través de ET. Por lo tanto, es muy necesario proporcionar suficiente agua de manera oportuna para el éxito del crecimiento del cultivo. El agua es el principal parámetro de crecimiento en la agricultura de regadío. Este capítulo describe cómo se estima el uso de agua (ET) de los cultivos a través de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para lograr una producción exitosa.

Introduction

Crops use water for various purposes including cooling, nutrient transport, and photosynthesis. Most of the water used by the crop is evaporated from the leaves' surface to cool the plant during the photosynthesis process. The ability of leaves to produce carbohydrate through photosynthesis is crucial to the plant growth. The light is captured when the leaves' surface is exposed to the sun. This exposure to the solar energy causes leaves to open stomata to let in carbon dioxide (CO₂) and solar energy to produce carbohydrate. The evaporated water through the stomata is known as transpiration. The sum of transpiration and evaporation outside of stomata (e.g., soil surface) are known as evapotranspiration (ET). The ET is affected by several factors which include climate condition, plant leaf area, and the plant stomata behavior. The stored moisture within the plant rooting zone supplies the water loss through ET. Therefore, providing sufficient water on a timely basis is highly required for the success of the crop growth. Water is the major growth parameter in the irrigated agriculture. This chapter describes how the crops' water use (ET) is estimated through unmanned aerial vehicle (UAV) to achieve successful production.

Evapotranspiration (ET)

The traditional method of estimating ET is comprised of using two distinct parameters including crop coefficient (K_c) and Reference Evapotranspiration (ET_0) as follow:

$$ET = K_c ET_0$$

K_c represents the crop and it is the most difficult parameter to be determined. The K_c is highly variable where it changes not only with the crop type, but also with time or stage of the crop growth, crop density, and general growth conditions. ET_0 is calculated from the climatic parameters which are easily accessible from weather stations. ET_0 can be estimated using various methods such as FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) and Hargreaves-Samani equation (Hargreaves and Samani, 1985).

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Method

Although calculating ET from remote sensing techniques has been developed, data analysis and calculations are time consuming and require special skills which are normally beyond the capability of a typical farmer. Here, we describe a simple technique to use drone equipped with a thermal sensor to measure crop's canopy temperature and use the data to calculate ET using a simple modified model. Fig .1 shows a typical thermal image taken at 60 meter above the ground from a pecan orchard located at Leyendecker Plant Science Research Center (PSRC) of New Mexico

State University (latitude 32° 11' 56.66" N, longitude 106° 44' 30.50" W), USA. The minimum, maximum, and average temperatures are measured in the sensor scene which represents 12 pecan trees (Figure 1).

When the temperature data are extracted from the thermal image, a modified version of Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model is used (Senay *et al.*, 2019) to calculate the K_c and ET . The SSEBop model calculates ET from each Landsat image using an algorithm that takes T_s (the Landsat thermal band) and ET_0 as primary model forcing inputs (Senay *et al.*, 2019; Senay, 2018). As the SSEBop model is developed for remote sensing purposes, the modified model for drone purposes is described as follow:

$$T = 1.25 \left[1 - \frac{(T_c - T_a)}{(T_d - T_a)} \right] ET_0 \quad (2)$$

where ET is the actual crop water use (mm/d), T_c is the canopy temperature which is equal to the measured average temperature in the thermal image ($^{\circ}C$) (Figure1), T_a is the air temperature which can be derived from either a nearby weather station or a handheld thermometer ($^{\circ}C$), T_d is the dry spot temperature which is equal to the measured maximum temperature in the

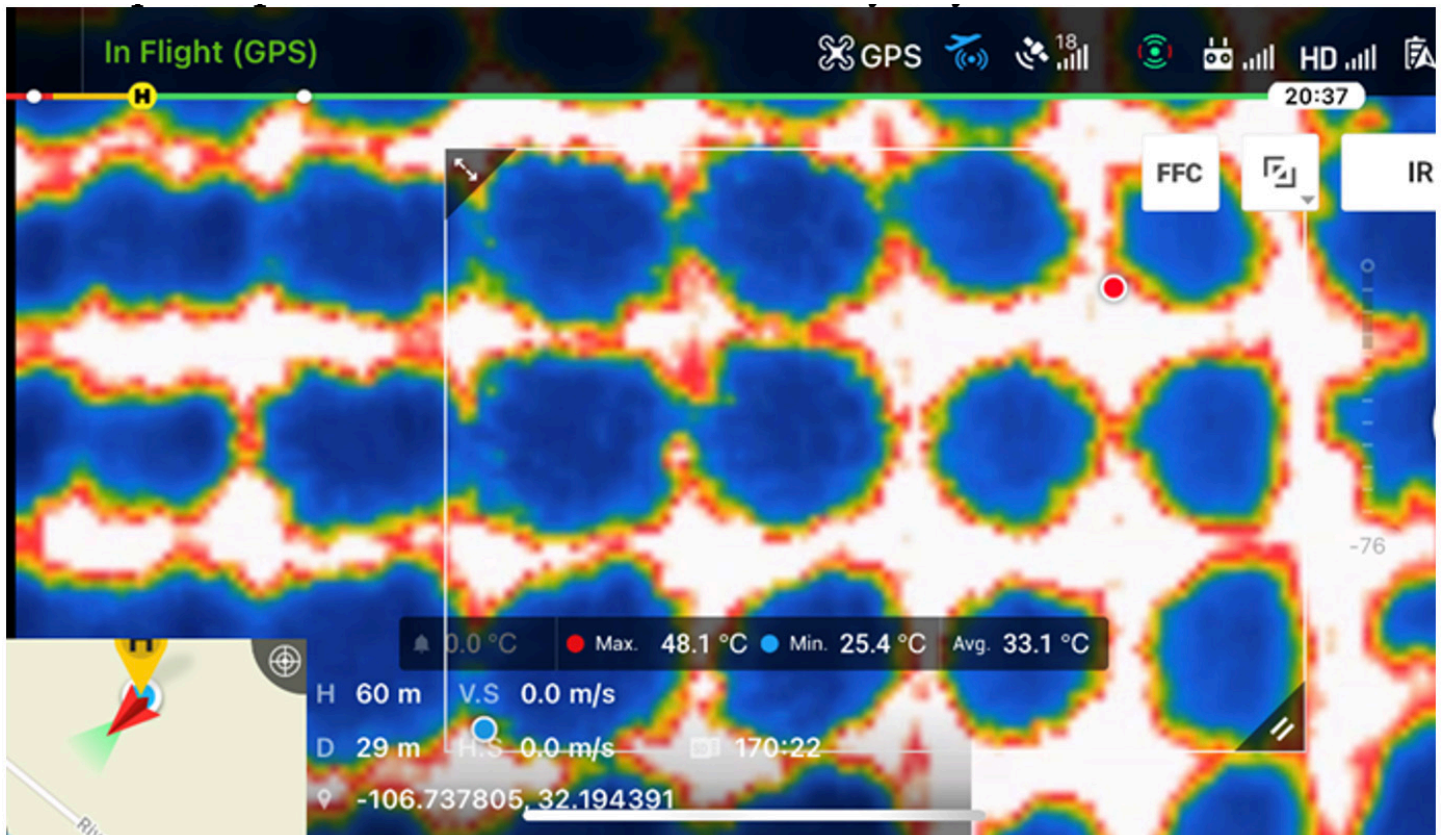


Figure 1: A sample thermal image taken from a drone.

thermal image ($^{\circ}\text{C}$) (Figure 1), and ET_0 is reference evapotranspiration (mm/d) which can be obtained from various methods.

To validate the calculated ET values by the modified SSEBop model, the Fractional Cover Based (FCB) model developed by Samani *et al.* (2011) is used. The FCB model calculates ET values for perennial crops through adjusting the K_c values based on the fractional cover (f_c) as follow:

$$\frac{K_c}{K_{c-ref}} = 0.6035f_c + 0.4808 \quad (3)$$

where K_c is the crop coefficient for a given orchard, K_{c-ref} is the crop coefficient of the reference orchard which can be taken from Table 1, and f_c is the fractional cover. The f_c is calculated as the ratio of shaded area to total area at nadir/mid-day.

TABLE 1: Measured monthly K_{c-ref} values for growing season of mature pecan orchard using flux tower (Samani *et al.*, 2011).

Months	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct
K_c	0.59	0.87	1.02	1.04	1.24	1.26	0.84

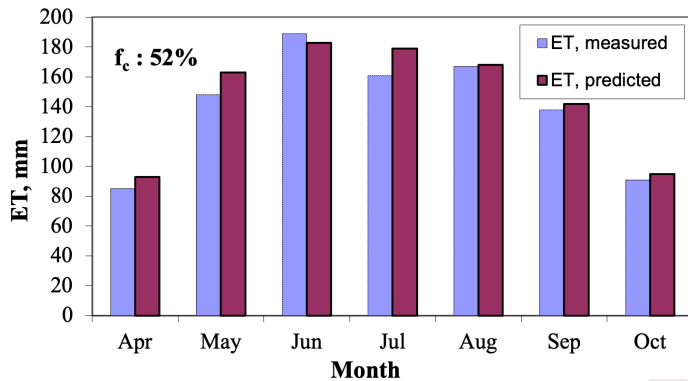


Figure 2: Measured and predicted monthly ET for a young pecan orchard with fractional cover of 52% (Samani *et al.*, 2011).

Measurement number	Measurement date	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	T_d ($^{\circ}\text{C}$)	T_a^* ($^{\circ}\text{C}$)	ET_0^* (mm/d)
1	7/19/2019	35.00	48.00	29.80	7.47
2	7/30/2019	33.80	47.10	29.30	7.08
3	8/16/2019	34.40	47.70	28.10	6.02
4	9/27/2019	26.70	38.40	24.65	4.02
5	6/26/2020	39.30	58.20	34.55	6.73
6	7/17/2020	36.70	53.50	32.50	7.33
7	9/18/2020	32.60	48.10	26.35	4.81

* T_a and ET_0 (FAO Penman-Monteith model) are obtained from the weather station located in PSRC.

The FCB model was previously validated using measured monthly ET for orchards with different f_c (Samani *et al.*, 2011). Figure 2 shows the comparison between measured and predicted monthly ET using FCB model for a young pecan orchard where the fractional cover is 52%.

To show how this new drone-based method works, we have used seven drone images taken from a pecan orchard during two growing seasons of 2019 and 2020. The orchard is located in PSRC. The area of orchard is about 3 ha and it is under drip irrigation system where the fractional is 45%. Table 2 shows the required data for calculating ET using the modified SSEBop model (Equation 2).

Based on Table 2 and Equation 2, the ET using the modified SSEBop model for measurement #1 is calculated as follow:

$$ET \text{ for measurement \#1} = 1.25 \left[1 - \frac{(35-29.8)}{(48-29.8)} \right] 7.47 = 6.67 \left(\frac{\text{mm}}{\text{d}} \right)$$

ET values for all measurements are shown below (Table 3):

TABLE 3: Calculated ET using modified SSEBop model.

Measurement number	ET (mm/d)
1	6.67
2	6.62
3	5.11
4	4.28
5	6.73
6	7.33
7	4.28

Based on Tables (1, 3) and Equations (1, 3), the ET using FCB model for measurement #1 is calculated as follow:

$$\frac{K_c}{1.04} = 0.6035 \times 0.45 + 0.4848 \rightarrow K_c \text{ (measurement \#1)} = 0.78$$

$$\frac{K_c}{1.04} = 0.6035 \times 7.47 = 5.84 \left(\frac{\text{mm}}{\text{d}} \right)$$

TABLE 2: Required data for calculating ET using the modified SSEBop model.

$$ET_{\text{for measurement \#1}} = 0.78 \times 7.47 = 5.84 \left(\frac{\text{mm}}{\text{d}}\right)$$

ET values for all the measurements are shown below (Table 4):

TABLE 4: Calculated ET using the FCB model.

Measurement number	ET (mm/d)
1	5.84
2	5.54
3	5.62
4	3.81
5	5.17
6	5.74
7	4.56

Figure 3 shows compares estimated ET using modified SSEBop model (a drone-based method) with the FCB model. The comparison shows the proposed drone-based model is able to estimate crop water use in the drip-irrigated pecan orchard with average RMSE of 1 mm/day.

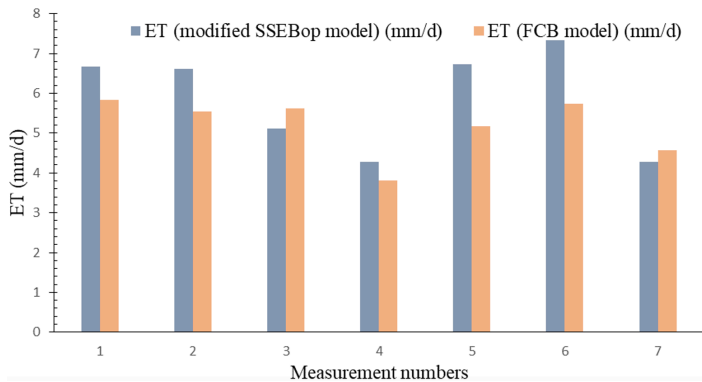


Figure 3: The comparison between predicted daily ET using the modified SSEBop model and the FCB model for a young pecan orchard with the fractional cover of 45%.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.
- H. Hargreaves, G., A. Samani, Z., 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture 1, 96-99.
- Samani, Z., Bawazir, S., Skaggs, R., Longworth, J., Piñon, A., Tran, V., 2011. A simple irrigation scheduling

- approach for pecans. Agricultural Water Management 98, 661-664.
- Senay, G., Schauer, M., Velpuri, N.M., Singh, R., Kagone, S., Friedrichs, M., Litvak, M., Douglas-Mankin, K.R., 2019. Long-term (1986–2015) crop water use characterization over the Upper Rio Grande Basin of United States and Mexico using Landsat-based evapotranspiration. Remote Sensing 11.
- Senay, G.B., 2018. Satellite Psychrometric Formulation of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Model for Quantifying and Mapping Evapotranspiration. Applied Engineering in Agriculture 34, 555-566.

IV.2 Una Plataforma Bilingüe basada en web para el Modelado y la Visualización de Datos para la Sustentabilidad de Recursos Hídricos

A Bilingual web-based Platform for Modeling and Data Visualization for the Sustainability of Water Resources

Luis A. Garnica Chavira¹, Natalia Villanueva-Rosales¹,
Deana D. Pennington¹, Josiah Heyman¹

¹Universidad de Texas en El Paso

Resumen

La creación de modelos científicos es una tarea común en todas las regiones del mundo para informar el manejo de recursos naturales limitados, por ejemplo, el suministro del agua basado en el ciclo del agua. Sin embargo, el desarrollo de modelos y comunicación de sus resultados bajo un marco unificado son un desafío para sistemas hídricos compartidos que cruzan límites territoriales y áreas jurisdiccionales y que también unifican aguas superficiales y subterráneas. Este desafío implica considerar múltiples márgenes de gobernanza y diversos estándares, idiomas y culturas. Para atender dicha problemática, la plataforma bilingüe basada en web, SWIM, fue creada para que los usuarios interactúen con modelos científicos hídricos y visualicen sus resultados. Esta plataforma tiene la finalidad de facilitar el acceso y uso de modelos complejos y facilitar potencialmente la colaboración entre usuarios. En este capítulo se describe el desarrollo de la interfaz web de la plataforma SWIM y la funcionalidad en su versión actual. La plataforma SWIM se enfocó inicialmente en los modelos de agua concebidos como parte del proyecto binacional de Sustentabilidad de Recursos Hídricos entre México y Estados Unidos en la región de El Paso del Norte.

Abstract

The creation of scientific models is a common task in all regions of the world to inform the management of limited natural resources, e.g., the water supply based on the water cycle. However, the development of models and communication of their results under a unified framework are a challenge for shared water systems across territorial boundaries and jurisdictional areas that integrate superficial and underground water resources. This challenge requires considering multiple

governance policies, and diverse standards, languages, and cultures. To address this challenge, the bilingual web-based SWIM platform was created for users to interact with scientific water models and visualize their results. This platform has the purpose to facilitate access and use of complex water-related models with the potential to support collaboration between users. This chapter describes the development of the web interface of the SWIM platform and the features available in its current version. The SWIM platform initially focused on water models conceived during the binational project for Sustainability of Water Resources between Mexico and the United States in the El Paso del Norte region.

Introducción

Los modelos científicos son representaciones abstractas de sistemas físicos y/o biológicos creados con el objetivo de entender cómo funciona el mundo natural (Cartier *et al.*, 2001). En base a estos modelos, se tiene el potencial de generar proyecciones a futuro bajo diferentes escenarios y estados iniciales del sistema. Para el estudio del ciclo del agua en una determinada región, los hidrólogos se enfocan en ambientes terrestres y examinan el balance de agua en dicha localidad o región (Marshall, 2014). Se han desarrollado múltiples modelos para determinar flujos y almacenamiento de agua a nivel superficial y subterráneo (Devia *et al.*, 2015) que pueden ser usados para informar la toma de decisiones de administradores, instituciones y dependencias gubernamentales.

Existen alrededor de 263 sistemas de lagos y ríos transfronterizos a nivel mundial que abarcan una amplia gama de territorios y pasan a través de múltiples fronteras políticas y jurisdiccionales (International Decade for Action “Water for Life” 2005-2015. Focus Areas, 2014). El desarrollo de modelos científicos unificados se vuelve un reto al existir divergencia en la gobernanza, administración y estándares de medición entre dos o más territorios. A su vez, la diversificación existente entre modelos y disciplinas involucradas dificulta la comunicación de resultados homogéneos y de interés general. Este desafío es particularmente evidente en la frontera norte de México y sur de los Estados Unidos, donde se comparten recursos hídricos: ríos y acuíferos, para el abastecimiento de agua a sus poblaciones.

La pregunta de interés en este ámbito es: ¿cómo desarrollar y comunicar modelos unificados de recursos hídricos? Para responder a esta área de oportunidad, se desarrolló una plataforma digital bilingüe denominada

Sustentabilidad de Agua Mediante Modelado Integrado (SWIM, por sus siglas en inglés, referentes a Sustainable Water Through Integrated Modeling), la cual ofrece modelos científicos por medio de una interfaz gráfica versátil y amigable basada en tecnologías web. El desarrollo de SWIM inició en 2016 como parte del proyecto Sustainable Water Resources for Irrigated Agriculture in a Desert River Basin Facing Drought and Competing Demands: From Characterizations to Solutions, que fue financiado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (en inglés United States Department of Agriculture, USDA por sus siglas). Para más información sobre dicho proyecto, consúltese el artículo de Mayer *et al.* en este libro.

A partir de 2019, SWIM recibió fondos adicionales por parte de la Fundación Nacional de Ciencias (en inglés National Science Foundation, NSF por sus siglas), permitiendo el desarrollo de la segunda versión de la plataforma a la cual se hace aquí referencia como SWIM 2. La segunda etapa de desarrollo comprende actividades complementarias de investigación interdisciplinaria en las áreas de las ciencias computacionales, naturales y sociales. En este artículo se describe el desarrollo de la plataforma realizado de 2016 a 2019 y se presenta la funcionalidad representativa de la plataforma durante la segunda fase de desarrollo (2019-2022).

Este artículo se divide de la siguiente manera: en la sección de antecedentes se habla sobre la accesibilidad de información a través de tecnologías web y principios a los cuales se alinea SWIM, siendo ambos temas relevantes para justificar la selección de tecnologías y principios que rigen el desarrollo de la plataforma. La siguiente sección describe la metodología de desarrollo del proyecto. En cuanto a colaboración interdisciplinaria y transfronteriza, se presenta la organización y estrategias usadas para el intercambio de información de manera eficiente. En la sección enfocada en la plataforma, se describen las principales funcionalidades y el flujo de trabajo para ejecutar los modelos integrados en la interfaz web. También se describe el proceso de evaluación hecho con la primera versión de la plataforma. Posteriormente, en la sección de conclusión, se resumen las aportaciones de SWIM y finalmente se habla de sus limitantes y trabajo a futuro.

Antecedentes

La velocidad de conectividad a internet se ha incrementado considerablemente en los últimos años, hasta un 26 % anual a nivel global en banda ancha fija

durante 2018 (The World's Internet in 2018, 2018) y hasta un 1331.9 % en uso global de 2000 a 2021 (World Internet Users Statistics and 2021 World Population Stats, 2021). La web ha pasado de albergar sitios estáticos a aplicaciones que proveen acceso a grandes bases de datos, computación de alto rendimiento y capacidades visuales robustas (Shivalingiah & Naik, 2008). Las aplicaciones basadas en web tienen la ventaja de ser fácilmente accesibles por una amplia gama de dispositivos, independientemente del sistema operativo que se utilice. Esto las convierte en una excelente opción para proveer fácil acceso a un gran número usuarios. Sin embargo, la facilidad de propagar información en la web no necesariamente significa que sea fácil de encontrar o que cumpla con los requisitos necesarios para ser reutilizada.

En 2016 se publicaron en la revista científica *Nature* los principios FAIR para el manejo y gobierno de datos científicos (Wilkinson *et al.*, 2016), que ponen énfasis en que los datos sean fáciles de encontrar (*findable*), accesibles (*accessible*), interoperables (*interoperable*) y reutilizables (*reusable*). El artículo hace hincapié no solamente en el aspecto humano, sino también en poder proporcionar dichas facilidades para agentes inteligentes dados los escenarios donde el alcance, escala y velocidad de análisis sobrepasa las capacidades humanas. Estos principios son una guía para reducir las barreras para encontrar y reusar datos, que en este proyecto también se aplican a los modelos científicos, sus resultados e interpretaciones. A la fecha de esta publicación, los principios FAIR ya han sido adoptados como un prerequisite en múltiples agencias y herramientas que albergan datos científicos (Jones *et al.*, 2020).

Con base en estos antecedentes, se justifica la elección de desarrollar SWIM como una plataforma basada en tecnologías web para aprovechar las ventajas de accesibilidad y versatilidad visual para los usuarios, además de la funcionalidad de compartir modelos fácilmente. De manera paralela, la tecnología facilita la práctica de los principios FAIR al establecer interfaces públicas accesibles por agentes inteligentes para buscar datos, acceder a metadatos (información sobre los datos) y en un futuro descargar la información con base en su descripción semántica.

Metodología de desarrollo iterativo en SWIM

El ciclo de diseño y desarrollo de la plataforma SWIM se concibió bajo un marco de ingeniería de software basado en iteraciones incrementales (Larman & Basili, 2003) debido a su naturaleza de proyecto de investigación y desarrollo en el que el producto se conceptualiza y mejora en cada iteración. Las etapas de cada una de las iteraciones incrementales en SWIM fueron las siguientes: licitación y análisis de requisitos, diseño, implementación, verificación y validación, éstos basados en los lineamientos planteados en el modelo tradicional en cascada atribuido a Winston W. Royce y revisado en Sommerville (2016). Cada iteración tuvo variaciones en tiempo, manteniendo un límite máximo de seis meses para completarse. Las primeras iteraciones del proyecto fueron las más prolongadas, ya que incluyeron un análisis global de los requisitos del proyecto y el establecimiento de los cimientos técnicos durante las etapas de diseño. En las iteraciones intermedias, el tiempo de análisis de requisitos y diseño disminuyó proporcionalmente, mientras que el tiempo de implementación se incrementó. Las últimas iteraciones fueron de menor duración, pero con una mayor asignación de tiempo a las etapas de verificación y validación, las cuales se manejan como si fueran una misma.

Un agregado a esta metodología usada en SWIM es el enfoque centrado en el usuario (Abrams *et al.*, 2004), bajo el cual se pretende que los diferentes grupos de usuarios estén involucrados en proveer retroalimentación desde las iteraciones iniciales del proyecto. Para lograr esto, se prestó especial atención a las etapas de verificación y validación dentro de cada ciclo iterativo. La verificación involucró evaluar el software para asegurar que cumple con los requisitos previamente establecidos y la validación involucró probar el software para asegurar los resultados esperados (Wallace & Fujii, 1989).

En la Tabla 1 se muestra la descomposición de actividades que se realizaron para las etapas de verificación y validación. Las actividades en SWIM incluyeron pruebas de unidad que abarcan pruebas de caja blanca, las cuales se centran en detalles estructurales ligados al código fuente, y pruebas de integración que incluyen principalmente pruebas de caja negra centradas en los requisitos funcionales (Nidhra, 2012).

TABLA 1: Descomposición de actividades de verificación y validación en el proyecto SWIM.

Actividad	Descripción	Involucrados
Pruebas de unidad	Pruebas estructurales de <i>caja blanca</i> en módulos específicos de SWIM, p. ej., transformación de datos y conversión de unidades.	Desarrolladores de SWIM.
Pruebas de integración	Pruebas funcionales de <i>caja blanca</i> y <i>caja negra</i> sobre un conjunto de módulos, incluyendo presentación y comportamiento de la interfaz web con los modelos.	Desarrolladores y usuarios de SWIM.
Presentación nuclear	Presentación y revisión de productos de software (p. ej., generación de gráficas) con los principales miembros del equipo de trabajo (p. ej., investigadores) y en ocasiones con colaboradores de la iteración.	Equipo principal.
Pruebas de usabilidad	Actividades interactivas con grupos de usuarios para evaluación de productos finales de SWIM con un máximo de 20 participantes.	Colaboradores y potenciales usuarios externos al equipo de trabajo.
Presentación abierta	Presentaciones generales, demostraciones o seminarios donde se presentaron las características principales y funcionalidad de SWIM.	Público en general.
Talleres de trabajo	Actividades interactivas con un enfoque o tema a desarrollar específico, p. ej., interpretación de modelos hídricos en ciertos grupos de enfoque.	Grupos elegidos específicamente según los objetivos del taller.

Las actividades que involucraron múltiples tipos de interesados, entre ellas presentación nuclear, pruebas de usabilidad, presentación abierta y talleres de trabajo, permitieron obtener retroalimentación desde diferentes puntos de vista y diversificó las condiciones a las que se sometieron las evaluaciones de las diferentes versiones de SWIM.

Durante el desarrollo de SWIM, las presentaciones nucleares se dieron entre miembros principales del equipo (integrantes del equipo de investigación y creadores de los modelos hídricos) y en ellas se discutieron aspectos de funcionalidad y apariencia de la interfaz web en SWIM. Las pruebas de usabilidad en SWIM se detallan en la sección de evaluación. Las presentaciones abiertas se utilizaron para dar a conocer la plataforma a personas que no tenían conocimiento previo del proyecto y diseminar las funciones de la plataforma y su visión. La mayoría de estas presentaciones se hicieron en un contexto académico y con participantes del proyecto financiado por USDA. Finalmente, los talleres de trabajo tuvieron objetivos específicos y con un proceso más selectivo de participantes (más información de algunos de estos talleres se encuentra en Pennington *et al.* [2018]). El desarrollo de cada versión principal de SWIM incluyó un ciclo de iteraciones. Se espera que el ciclo iterativo en el desarrollo de SWIM 2 finalice en el año 2022.

Colaboración interdisciplinaria y transfronteriza

El desarrollo de SWIM, como una plataforma que integra datos binacionales, requirió de la colaboración entre académicos de múltiples disciplinas y la consideración de las perspectivas de grupos en ambos lados de la frontera México-Estados Unidos. Uno de los principales retos derivados de tener tal diversidad de involucrados es llegar a un consenso sobre el alcance del proyecto, así como limitaciones guiadas por los recursos técnicos, humanos y de tiempo.

Una de las estrategias usadas para llegar a un consenso fue involucrar al equipo principal (ingenieros de software, académicos en ciencias computacionales, investigadores de las áreas de Ciencias de la Tierra y estudiantes participantes) en todas las actividades posibles del proyecto base de USDA. Estas actividades incluyeron la conceptualización de modelos científicos, los aspectos técnicos de los modelos científicos, reuniones científicas, presentaciones y actividades con los miembros del proyecto y colaboradores del proyecto. Por consiguiente, el equipo de SWIM adquirió un rol

de puente entre las disciplinas involucradas para el intercambio de ideas y conceptos que gradualmente serían convertidos en un producto de software. Adicionalmente, se usaron artefactos como puentes de información entre las disciplinas de los miembros participantes en el equipo de SWIM, los cuales incluyeron mapas conceptuales y diagramas. La eficacia del uso de estos artefactos para comunicar ideas y conceptos en equipos interdisciplinarios se discute en Pennington *et al.* (2021).

La plataforma SWIM se desarrolló en paralelo a los modelos científicos que se integraron. Durante dicho periodo, se establecieron canales de comunicación abiertos entre los desarrolladores de software y los autores de los modelos en la zona de estudio, que requirió información de ambos lados de la frontera. Esto dio lugar a un importante intercambio de información para definir contenido, estructuras de datos y pautas que concordaran en ambas líneas para su posterior integración en una sola plataforma. Entre estos aspectos destacan la estructura del código fuente, la selección de unidades de medición base, recolección de datos, cobertura de los modelos, parámetros editables por usuarios y la selección de variables de salida.

Al final de cada iteración se fueron presentando una serie de prototipos que permitieron a los demás involucrados tener una clara definición del sistema en desarrollo, de tal manera que se facilitó la retroalimentación sobre un producto tangible en lugar de un concepto abstracto. Estos prototipos fueron fundamentales para la mejora continua en el diseño de la interfaz web de SWIM, lo cual implicó establecer su cobertura, apariencia, flujo, contenido y lenguaje.

Cabe destacar que el establecimiento del lenguaje requirió de especial atención por parte del equipo principal de SWIM. El lenguaje, en este caso, se refiere no solamente a los idiomas que se utilizaron (español e inglés), si no al vocabulario y manera de redactar el contenido textual referente a los modelos. Los modelos integrados en la plataforma se desarrollaron en inglés como idioma base (incluyendo su código fuente), sin embargo, las etiquetas y texto descriptivo que se presenta al usuario final queda dinámicamente manejado por la plataforma (inglés o español). Cada campo de texto pasó por un proceso iterativo para desglosar los tecnicismos de los modelos, definir el vocabulario, proveer contexto y adaptar el texto a un lenguaje natural para cada uno de los idiomas.

Resultados

Sustentabilidad del agua mediante modelado integrado

SWIM es una plataforma innovadora compuesta por diferentes módulos de software que interactúan entre sí por medio de una interfaz web que oculta su complejidad a los usuarios finales. Su principal funcionalidad es proveer un acceso sencillo a modelos científicos desarrollados en otras herramientas y plataformas, con diferentes lenguajes de programación y formatos de datos. Las entradas y salidas de cada modelo científico son transformadas a un formato estándar que puede ser procesado por los diferentes módulos de SWIM, incluyendo la interfaz web. La arquitectura inicial de la plataforma de SWIM y la descripción de los formatos usados se presentan en Garnica Chavira *et al.* (2018).

La plataforma SWIM integra dos modelos hídricos de baja demanda computacional, lo cual permite a usuarios analizar proyecciones a futuro bajo diferentes escenarios, p. ej., climáticos, tecnológicos, operacionales, con resultados disponibles de inmediato. El diseño de la actual interfaz web de SWIM permite la selección de escenarios para los modelos hídricos en una primera instancia, ya que los escenarios determinan muchos de los parámetros que se usan para generar una corrida del modelo. Ambos modelos tienen una cobertura geográfica que abarca parte del estado de Nuevo México y oeste de Texas, en los Estados Unidos, y norte de Chihuahua, en México. A dicho espacio se le denomina la región del Río Bravo Medio en el resto del capítulo. El suministro de agua superficial se extiende desde los medidores de San Marcial, al norte de la Presa del Elefante en Nuevo México, hasta el Fuerte Quitman en Texas. Al sur de la Presa del Elefante se encuentra la Presa del Caballo, la cual se usa como un almacenamiento temporal previo a la extracción de agua para uso regional. En cuanto a suministro subterráneo, se consideran los dos principales acuíferos de la región, siendo estos el acuífero de la Mesilla (conocido como Conejos Médanos en México) y el Bolsón del Hueco. .

Integración de un modelo de balance de agua del río Bravo medio en SWIM

El modelo más simple integrado en SWIM es el modelo de balance de agua, creado inicialmente por Alex Mayer con contribuciones de David Gutzler, Robyn Holmes y Luis Garnica Chavira. Este modelo simula cambios futuros en almacenamiento de agua, flujos pluviales y niveles de almacenamiento subterráneos en base a las condiciones hídricas actuales, asumiendo que los usos históricos de los sectores agrícola y urbano en la región son constantes. Este es un modelo agregado de cubeta, donde las cubetas representan cambios en almacenamiento de agua en las dos presas y los dos acuíferos, flujos en el río Bravo dependientes de las extracciones de las presas, flujos de irrigación y flujos de retorno al río, pérdidas por evaporación y evapotranspiración y, finalmente, recarga de los acuíferos. La extracción de agua proveniente de las presas del Elefante y del Caballo es determinada con base al Acuerdo de Operación del Proyecto del Río Bravo establecido en 2008 (Reclamation, 2008). El modelo asume que, si la extracción de agua superficial no satisface la demanda anual, se acude a la extracción de agua subterránea según la proporción utilizada históricamente por los diferentes sectores.

SWIM 2, desarrollado en la segunda fase del proyecto, ofrece una interfaz web para poder seleccionar escenarios (actualmente once) considerados en el modelo de balance de agua, incluyendo seis escenarios climáticos proyectados a futuro (2020–2070). Estos escenarios representan flujos anuales de agua a través de los medidores de San Marcial y se presentan al usuario con una descripción breve y una imagen que identifica las características del escenario. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestran escenarios basados en diferentes proyecciones climáticas en la región. Los escenarios climáticos en el Modelo de Agua son derivados de modelos climatológicos del Buró de Reclamación de los Estados Unidos (Pierce *et al.*, 2015), los cuales proyectan flujos naturales de agua bajo diferentes escenarios de gases de efecto invernadero (Nakicenovic & Swart, 2000). Los flujos resultantes de estos modelos son normalizados en Townsend & Gutzler (2020), considerando los manejos artificiales río arriba, dando como resultado los valores utilizados en SWIM.

Adicionalmente, se cuenta con un escenario de simulación histórico proporcionado por Alex Mayer para validar el modelo con observaciones hechas entre 1994 y 2013. Los escenarios climáticos se pueden

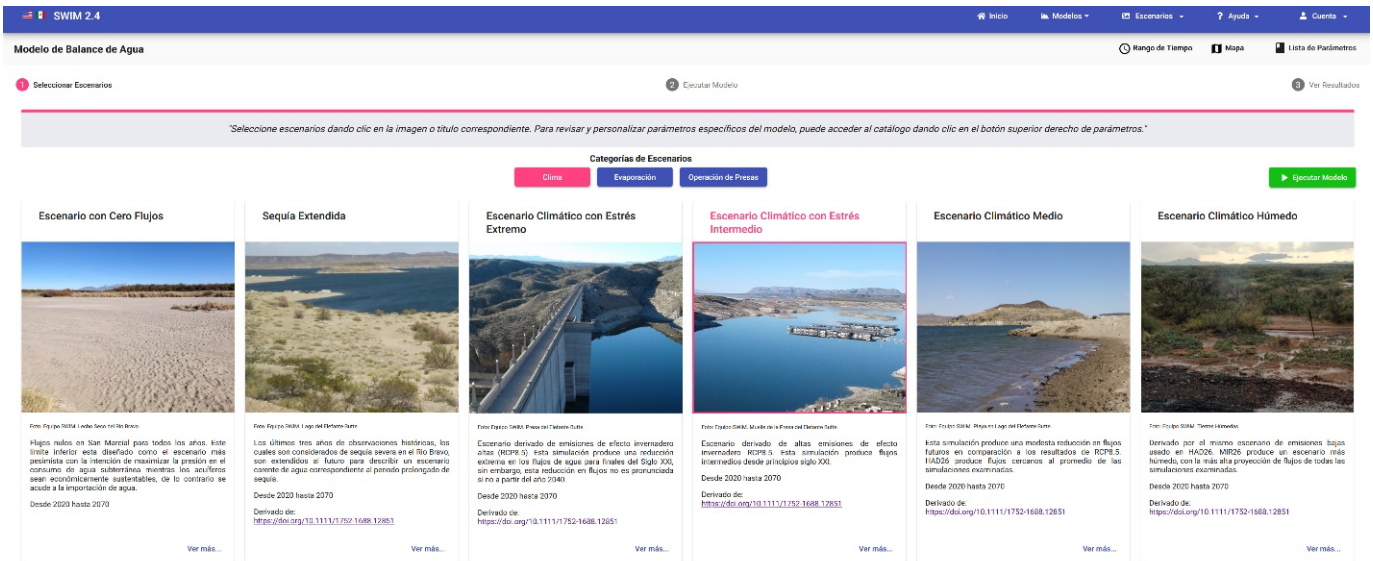


Figura 1: Escenarios climáticos predefinidos como parte del flujo principal en la interfaz web de SWIM 2

combinar con escenarios de operación y evaporación donde se permite modificar los valores mínimos de almacenamiento superficial y el ritmo de evaporación sobre aguas superficiales. Cabe mencionar que los escenarios de operación fueron creados por el equipo de investigación de SWIM en colaboración con Alex Mayer y los escenarios de evaporación en colaboración con David Gutzler, para facilitar el uso de los modelos hídricos.

El modelo de balance de agua integrado actualmente en SWIM tiene 34 parámetros (datos de entrada), que se dividen en la plataforma en categorías que incluyen parámetros de almacenamiento, de clima,

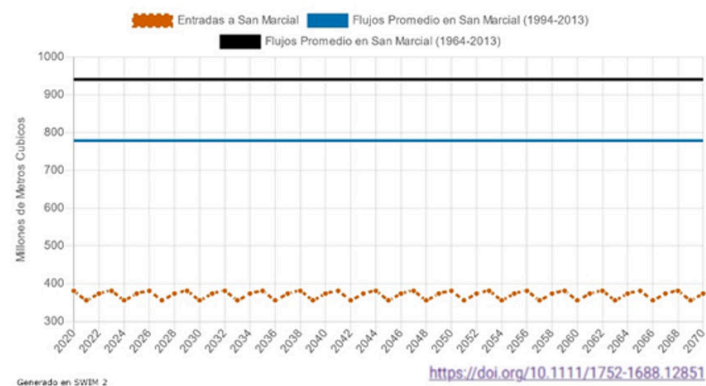
de políticas de operación, de distribución y parámetros generales que representan rangos de temporalidad y ajustes de la simulación. El uso de categorías fue una decisión del grupo principal de trabajo de SWIM para facilitar a los usuarios el análisis enfocado en alguna de las áreas de interés consideradas por el modelo.

La interfaz web de SWIM 2 establece un flujo de trabajo generalizado e independiente al modelo científico con el que se trabaja. En la Figura 1 se presenta el flujo principal para creación de escenarios con el modelo de balance de agua, utilizando el idioma español en la interfaz. Los pasos del flujo principal comprenden lo siguiente: 1) la selección de escenarios,

Escenario: Sequía Extendida

Suministro en San Marcial

Descripción: Suministro de agua a la Presa del Elefante a través de San Marcial



Escenario: Escenario Climático con Estrés Intermedio

Suministro en San Marcial

Descripción: Suministro de agua a la Presa del Elefante a través de San Marcial

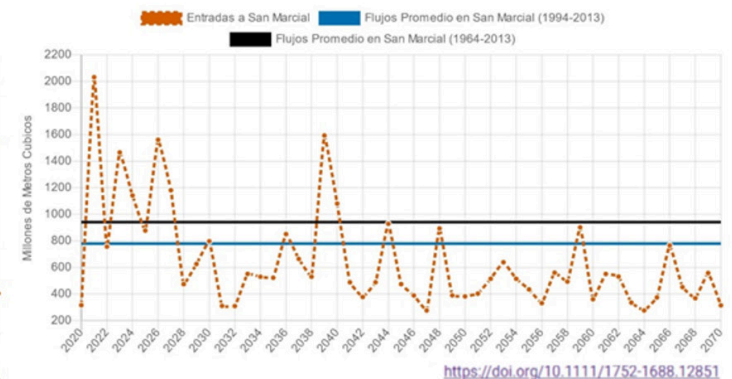


Figura 2: Flujos anuales de agua proyectados en San Marcial de 2020 a 2070 con diferentes escenarios climáticos. Gráficas generadas en la interfaz web de SWIM 2 para el modelo de balance de agua.

2) la ejecución de modelos y 3) la visualización de resultados. Opcionalmente se cuenta con un paso adicional fuera del flujo principal etiquetado como “Lista de Parámetros”, donde se permite la personalización de escenarios a mayor grado de granularidad. El paso 1: Selección de escenarios, ofrece la opción de

seleccionar escenarios predefinidos que simplifican el flujo de trabajo. La Figura 2 muestra gráficas generadas en SWIM al seleccionar la opción “Ver más de cada escenario”; en ella se presentan valores de flujo anual en San Marcial bajo diferentes escenarios climáticos.

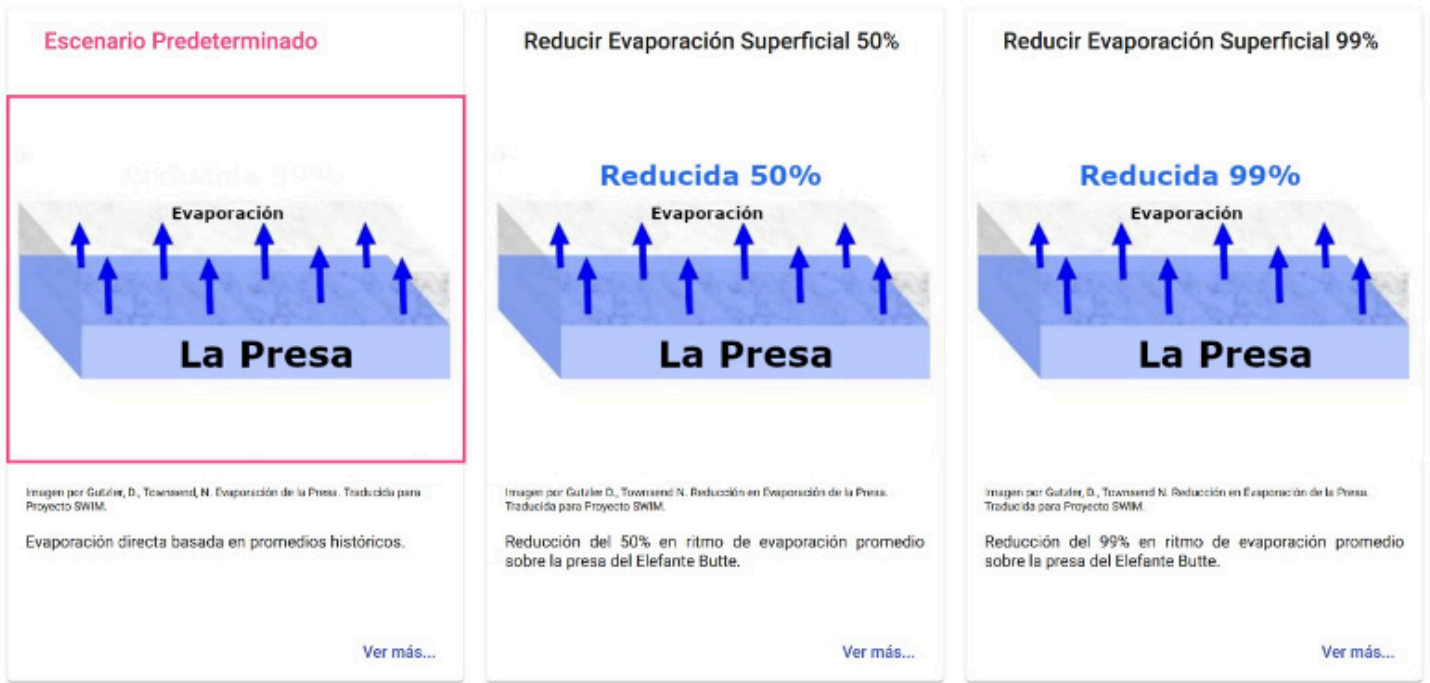


Figura 3: Escenarios de evaporación de presas para el modelo de balance de agua disponibles en la interfaz web de SWIM 2.

Categorías de Parámetros

🔍 Buscar Parámetros de Entrada

Parámetro	Categoría	Descripción	Limite Superior	Limite Inferior	Unidades
Almacenamiento Inicial en Presa Caballo	Almacenamiento	Volumen de agua almacenada en el año inicial de la simulacion	343990	0	Acre-Pies
Almacenamiento Inicial en presa del Elefante Butte	Almacenamiento	Volumen inicial de agua en la presa del Elefante Butte	1990000	0	Acre-Pies
Almacenamiento Mínimo en Elefante Butte	Almacenamiento	Volumen de almacenamiento minimo en presa del Elefante Butte	1990000	0	Acre-Pies
Almacenamiento Observado en Presa del Elefante Butte	Almacenamiento	Volumen de agua almacenada en la presa del Elefante Butte (1994-2013).	10000000	0	Acre-Pies
Capacidad Maxima de Elefante Butte	Almacenamiento	Volumen maximo de agua que puede almacenar la presa del Elefante Butte	1990000	0	Acre-Pies

Figura 4: Ejemplo de los parámetros del modelo de balance de agua que se muestran en la interfaz web de SWIM 2.

En los escenarios de operación de presas se permite modificar valores mínimos de almacenamiento superficial (p. ej., al 20 % o al 50 %) en proporción a la capacidad máxima. También se incluyen escenarios hipotéticos (Figura 3) donde se permite reducir el ritmo de evaporación sobre la superficie de la Presa del Elefante (p. ej., al 50 % o al 99 %).

Para usuarios más experimentados, se cuenta con la Lista de Parámetros (Figura 4). Estos se pueden filtrar por categoría, búsqueda directa, editables, no editables y observados. De los 34 parámetros disponibles en el modelo de balance de agua, 9 son editables por el usuario, 19 son no editables y 6 son valores observados históricamente.

En la interfaz web de SWIM 2, los valores de los parámetros editables pueden ser manipulados directamente por medio de tablas, deslizadores y campos abiertos dependiendo de la estructura y tipo del conjunto de datos. Esta funcionalidad permite que un usuario pueda modificar valores de parámetros que no estén considerados en los escenarios predefinidos. Por ejemplo, para parámetros climáticos se puede acceder a la tabla de valores para flujos de San Marcial y cambiar los valores anuales según lo requiera el usuario. Otros parámetros, como proporciones mínimas de la presa, tiempo de proyección y condiciones iniciales de almacenamiento en las presas, también pueden ser modificados por el usuario.

Una vez definido el escenario personalizado, se permite al usuario continuar con el paso 2: Ejecutar. La ejecución de un modelo requiere al usuario

proporcionar información como el nombre del escenario, seleccionar un rol o perspectiva del usuario (p. ej., residente urbano, investigador, agricultor) y proveer una descripción del escenario. El campo de descripción se llena automáticamente con texto sugerido en base los escenarios predefinidos que se tengan seleccionados, no obstante, se permite agregar o modificar la descripción según la preferencia de la usuaria. Después de enviar el formulario de ejecución, el modelo se ejecuta. En promedio, la ejecución del modelo de balance de agua dura menos de un minuto.

Al concluir la ejecución, la interfaz web presenta de manera dinámica el paso 3 para visualizar los resultados de la simulación. Este paso cuenta con dos subsecciones: resumen y catálogo de salidas. En la sección de resumen se presenta información general sobre la ejecución del escenario como son: el estado, tiempo de inicio y tiempo de terminación. Para el modelo de balance de agua se incluyen, por ejemplo, los valores de almacenamiento al inicio, promedio y finales de la simulación. En la Figura 5 se muestra algunos valores de la pantalla de resumen para un escenario climático con Sequia Extendida y operación normal de las presas.

El catálogo de salidas muestra un listado de variables resultantes de la simulación. Sobre el listado se permite seleccionar una o múltiples variables de salida, cuyos resultados se pueden observar de par en par. En la Figura 6 se presentan algunas visualizaciones generadas en SWIM con los valores resultantes de almacenamiento en la Presa del Elefante Butte. Las variables compuestas por series de tiempo se pueden representar como graficas

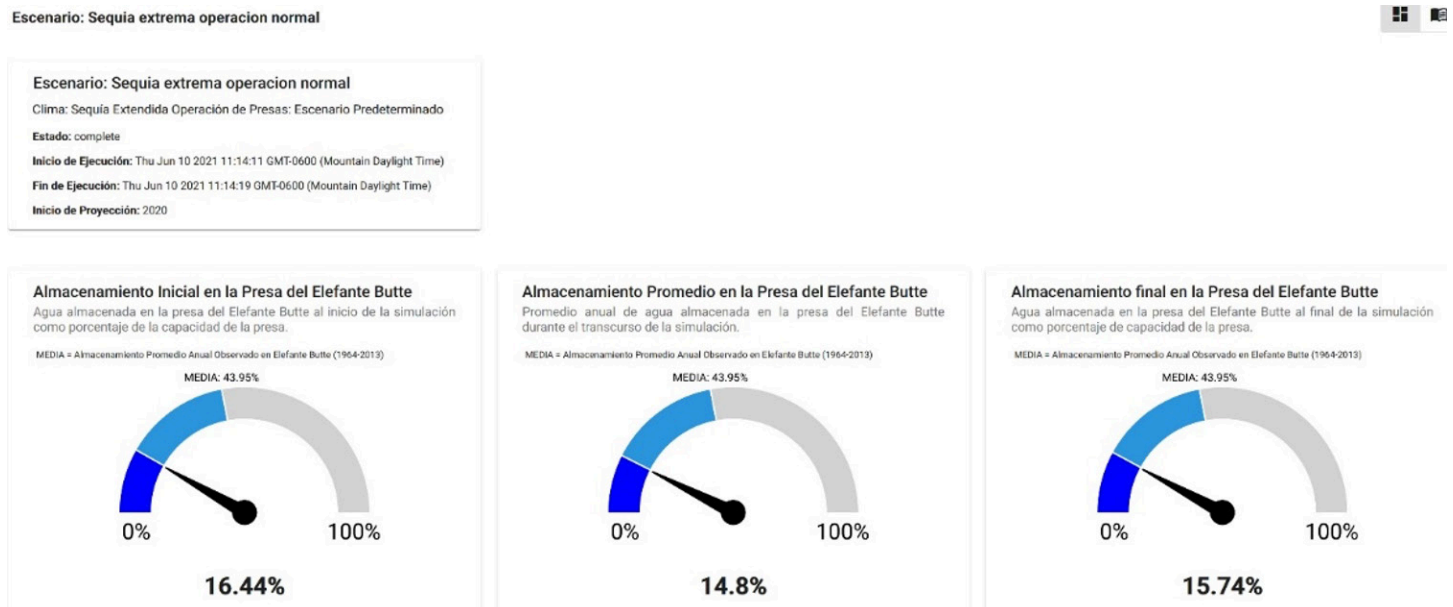


Figura 5: Pantalla generada en interfaz web de SWIM 2 para el resumen de algunos resultados de ejecución con el modelo de balance de agua.

de línea, gráficas de barras y tablas de datos. También se cuenta con herramientas que permiten facilitar el análisis e interpretación de los datos con funciones de cambio de unidades de medición, combinación de series de datos, análisis de tendencia por media móvil simple y la opción de exportar datos a hojas de cálculo.

En contraste al modelo de balance de agua, el modelo hidroeconómico es un modelo de optimización económica restringido. En lugar de simular procesos biofísicos basados en la especificación de parámetros de entrada, el modelo analiza todas las posibles combinaciones de parámetros para determinar cuál se acerca al objetivo dado las restricciones establecidas. Los resultados óptimos pueden no ser consistentes con los datos históricos ya que ese no es parte del objetivo.

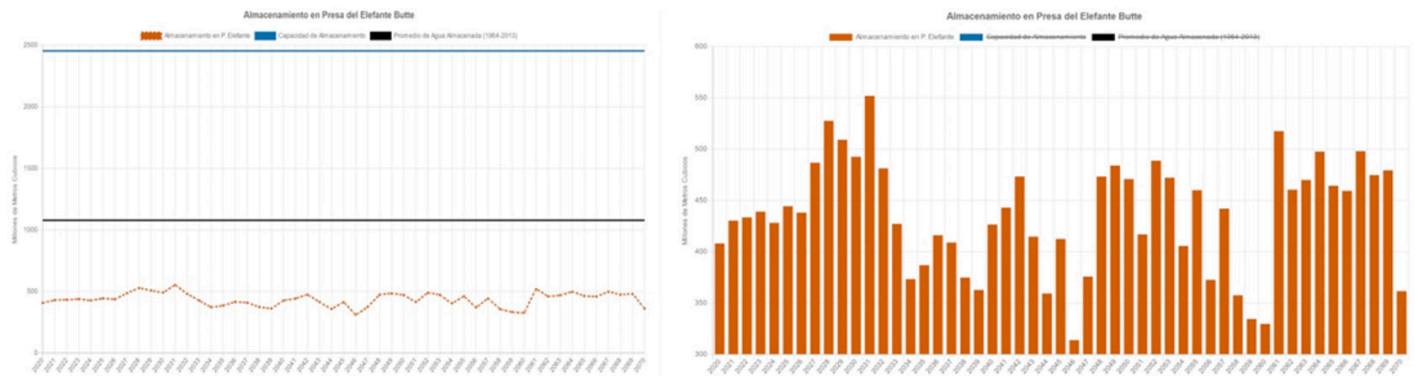


Figura 6: Gráficas generadas en SWIM 2 para visualizar resultados de simulación por variable de salida.

Sin Medidas de Recuperación	Recuperación Intermedia	Recuperación de Almacenamiento Superficial	Recuperación de Acuíferos
<p>Foto: Equipo SWIM. Anillos de Bañera en la Presa del Elefante Butte.</p> <p>Ninguna medida de protección de recursos hídricos es implementada. Uso cotidiano de recursos sin restricciones de bombeo.</p> <p>Porcentaje mínimo de almacenamiento superficial al 3% del periodo inicial.</p> <p>Derivado de: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.081</p> <p>Ver más...</p>	<p>Foto: Equipo SWIM. Muelle en la Presa del Elefante Butte.</p> <p>El almacenamiento superficial y subterráneo es protegido al 50% del volumen inicial para el final del periodo de simulación.</p> <p>Derivado de: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.081</p> <p>Ver más...</p>	<p>Foto: Equipo SWIM. Presa El Caballo.</p> <p>Enfoque en proteger las fuentes de suministro de agua superficial el 90% de su volumen inicial para el final del periodo de simulación.</p> <p>Bombeo puede alcanzar máxima capacidad de cada distrito y/o ciudad.</p> <p>Derivado de: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.081</p> <p>Ver más...</p>	<p>Imagen por el Equipo SWIM con datos contribuidos por UACJ, TAMU, NMSU, UTEP. Límites de los Acuíferos Regionales.</p> <p>Enfoque en proteger las fuentes de suministro de agua subterránea al 90% de su volumen inicial para el final del periodo de simulación.</p> <p>Volumen mínimo de presas al 3% de su capacidad.</p> <p>Derivado de: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.081</p> <p>Ver más...</p>

Figura 7: Escenarios de recuperación para el modelo hidroeconómico disponibles en la interfaz web de SWIM 2.

INTEGRACIÓN DE UN MODELO HIDROECONÓMICO DEL RÍO BRAVO MEDIO EN SWIM

Similar al modelo de balance de agua, el modelo hidroeconómico es un modelo regional compuesto de tres cubetas que representan almacenamiento superficial, dos acuíferos y el flujo entre estos y el río Bravo (Ward *et al.*, 2019).

La finalidad del modelo hidroeconómico es optimizar la distribución de agua con el objetivo de maximizar las ganancias económicas tomando en cuenta restricciones legales y funcionales. El modelo está restringido a respetar capacidades mínimas y máximas de los diferentes derechohabientes, por ejemplo, la cobertura mínima de producción de algún cultivo y las capacidades de bombeo de los distritos de irrigación y sectores

urbanos. Las restricciones también incluyen reglas de operación de la región basados en el Tratado de Aguas de 1944 y el Acuerdo de Operación del Proyecto del Río Bravo de 2008 (Reclamation, 2008). Este modelo ha sido utilizado extensivamente para explorar los costos económicos de proteger los acuíferos al incorporar dichas restricciones (Ward *et al.*, 2019).

El modelo hidroeconómico integrado en SWIM actualmente incluye un total de 13 escenarios predefinidos divididos en cuatro categorías. La primera categoría, de escenarios climáticos proyectados a futuro, contiene los mismos escenarios que los utilizados en el modelo de balance de agua. Sin embargo, se abarca un periodo de proyección que cubre hasta 2033. La segunda categoría, de políticas institucionales, representa escenarios donde se restringe o flexibiliza la aplicación de reglas operacionales, como el acuerdo de operación de 2008. Al flexibilizar las reglas operacionales, el modelo tiene mayor amplitud para optimizar la distribución de agua.

La tercera categoría, ofrece escenarios de recuperación (Figura 7) con diferentes objetivos de conservación para las presas y acuíferos subterráneos. En cada uno de los escenarios de recuperación se pone como objetivo llegar a cierto nivel de almacenamiento para el final del periodo de la simulación aplicado a las presas, a los acuíferos o a una combinación de ambos. Finalmente, la cuarta categoría, de uso de tecnología, incluye escenarios que aplican un costo económico para la utilización de tecnología (p. ej., desalinización de acuíferos profundos). En base a estos costos y el estado de suministros tradicionales, el modelo decide en que periodos de tiempo es económicamente viable el uso de esas tecnologías. Cabe destacar, que al igual que en el modelo de balance de agua, se pueden combinar los diferentes escenarios seleccionando uno por categoría.

El modelo hidroeconómico incluye 44 parámetros divididos en seis categorías. Por ejemplo, la categoría de parámetros de agricultura representa valores del sector agrícola relacionados a costos de producción que involucran cultivos y capacidad de bombeo. Otra categoría incluye los parámetros del sector urbano que representan costos y proporciones de distribución en el sector urbano.

Los resultados del modelo son calculados anualmente para 59 variables diferentes, las cuales se dividen en cinco categorías. Por ejemplo, las variables de agricultura representan uso de agua, superficie cultivada y beneficios de producción en el sector agrícola, mientras que las variables de economía representan ingresos y

costos económicos en todos los sectores.

El flujo de trabajo en la interfaz web de SWIM 2 para generar escenarios de modelos hídricos es el mismo para cualquier modelo. Por lo tanto, el flujo para el modelo hidroeconómico es igual que el presentado para el modelo de balance de agua. Sin embargo, el modelo hidroeconómico puede llegar a tomar hasta dos minutos en tiempo de procesamiento debido a su complejidad. Una vez procesado el modelo, se presenta el resumen de resultados y acceso al catálogo de salidas.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

La evaluación de primera versión de la plataforma SWIM durante el periodo de proyecto patrocinado por USDA (2016-2018) se enfocó en 1) el funcionamiento de la infraestructura, 2) la usabilidad y 3) la presentación de datos.

La evaluación de infraestructura se realizó con una metodología de caja negra donde se compararon los resultados de los modelos antes y después de ser integrados a la plataforma (Villanueva-Rosales *et al.*, 2017). El objetivo es que los resultados de los modelos mantengan su integridad después de haber sido procesados para ser utilizados en SWIM.

Por otro lado, el propósito de los estudios de usabilidad se alineó acorde a las pautas establecidas por la Administración de Servicios Generales de los Estados Unidos (en inglés U.S. General Services Administration, GSA por sus siglas). Los objetivos incluyeron identificar problemas de diseño para poder mejorar la eficiencia, productividad y satisfacción del usuario final (Department of Health and Human Services, 2013). Esta actividad de evaluación en SWIM y aprobado por el Comité de Revisión Institucional (en inglés Institutional Review Board, IRB por sus siglas) de la Universidad de Texas en El Paso comprendió una serie de ejercicios interactivos con los usuarios finales y la interfaz web seguido de unos cuestionarios. Los cuestionarios incluyeron preguntas para evaluar patrones de presentación de datos y procedencia, algunos de los resultados se presentan en Villanueva-Rosales *et al.*, (2017). Algunas de las decisiones de diseño de SWIM se basaron en las observaciones derivadas de los estudios de usabilidad, los cuales incluyeron disminuir el uso de tecnicismos y uso de siglas especializadas, proveer resúmenes de resultados y simplificar el flujo de trabajo. Durante el periodo del proyecto actual (2019-2022) apoyado por la NSF, se han elaborado sesiones formales de usabilidad y talleres de trabajo con usuarios finales para SWIM 2. Los talleres de trabajo incluyen

identificar patrones de razonamiento que los usuarios puedan tener al interactuar con los modelos. Los datos recabados en estos estudios se encuentran bajo análisis al momento de enviar este escrito.

DISPONIBILIDAD

En la Tabla 2 se presenta los productos de SWIM disponibles en línea. La primera versión de la plataforma SWIM ha sido descontinuada, sin embargo, se encuentra disponible en el sitio web del proyecto de Sustentabilidad de Agua financiado por USDA bajo la sección de herramientas. La segunda versión, SWIM 2, es actualmente financiada con fondos de NSF y ha sido migrada a su propio sitio web. Adicionalmente, se incluye acceso a los detalles técnicos y código fuente que ha sido publicado hasta la fecha.

Conclusiones

En este capítulo se presenta la plataforma bilingüe basada en web, SWIM, la cual fue concebida por un esfuerzo interdisciplinario y transfronterizo con el fin de desarrollar y comunicar modelos computacionales unificados de recursos hídricos en la región de El Paso del Norte. El uso de tecnologías web permitió aprovechar las ventajas de accesibilidad y versatilidad visual para los usuarios finales. A su vez, el desarrollo de la plataforma fue influenciado por las prácticas de los principios FAIR para facilitar que los datos y modelos científicos que fueron integrados en la plataforma puedan ser fáciles de encontrar, accesibles, interoperables y reutilizables. Para que los datos y modelos de SWIM sean fáciles de encontrar, se agregaron metadatos para describirlos usando vocabularios estándar. Se implementaron protocolos abiertos para la consulta de datos para

mejorar su accesibilidad, los datos fueron alineados a formatos de datos interoperables con extensiones semánticas y actualmente el equipo de desarrollo está en proceso de mejora de prácticas de procedencia para la reutilización de datos y reproducción de resultados generados en SWIM 2.

Debido a la naturaleza de investigación del proyecto, se optó por un ciclo de desarrollo de software basado en iteraciones incrementales con un enfoque centrado en el usuario. Los productos de cada iteración generaron una serie de prototipos tangibles que permitieron avanzar la mejora continua en el diseño de la plataforma al recibir retroalimentación por parte de grupos con diferentes perspectivas en ambos lados de la frontera México-Estados Unidos.

Al establecer canales de comunicación abiertos entre autores de modelos científicos y los desarrolladores de la plataforma, se logró integrar dos modelos heterogéneos bajo una sola interfaz, entre ellos el modelo de balance de agua, con la finalidad de hacer proyecciones a futuro de valores de flujo y almacenamiento de agua conforme a los patrones de distribución actual; y el modelo hidroeconómico del Río Bravo Medio, con el objetivo de maximizar las ganancias económicas regionales optimizando el balance de agua en contraste a las tendencias históricas.

A pesar de que los modelos que se integraron dentro de la plataforma SWIM son de baja demanda y complejidad computacional, la descomposición y entendimiento de cada modelo científico requirió de un uso importante de tiempo. El conocimiento de los modeladores tuvo que ser captado plenamente por el equipo encargado de exponer el modelo en una interfaz web. Para esto se consideraron los objetivos principales de cada modelo, su estructura programática, sus métodos matemático-computacionales y el vocabulario utilizado

Producto	Descripción	Hipervínculo
Sitio web Proyecto USDA	Sitio web del proyecto con acceso a la primera versión de SWIM	https://water.cybershare.utep.edu
Plataforma SWIM 2	Sitio web con interfaz web de SWIM 2	http://purl.org/swim
Documentación Técnica	Detalles técnicos de la arquitectura y funcionalidad de la plataforma.	http://purl.org/swim/docs/es
Repositorio de GitHub	Código fuente del proyecto SWIM 2	http://purl.org/swim/repos

TABLA 2 : Disponibilidad de productos SWIM en la web.

por el modelador para definir los datos de entrada y variables de salida. Se asignó un rol de curador a un miembro del equipo para poder llevar un mejor control de las etiquetas, descripciones y explicaciones de cada modelo. Estas prácticas fueron fundamentales para la presentación de un lenguaje coloquial en la interfaz final.

La plataforma fue evaluada en términos de su funcionalidad, usabilidad y presentación de datos. Los modelos matemáticos mantuvieron su integridad después de ser procesados para su uso en SWIM. Como derivado de los estudios de usabilidad, se prestó atención en la redacción de descripciones y explicaciones. Se mantuvo la consistencia para la legibilidad de los resultados de los modelos. Adicionalmente, la simplificación del flujo de trabajo para la ejecución de modelos fue un aspecto fundamental para poder introducir usuarios no expertos en el dominio de la plataforma.

Trabajo a futuro

El proyecto financiado por USDA produjo modelos adicionales de tipo estadísticos (Capt *et al.*, 2021) y fisicomatemáticos (Granados-Olivas *et al.*, 2016), (Samimi *et al.*, 2019) aparte de los que ya están integrados en la plataforma SWIM 2. Por lo anterior, existe la oportunidad de integrar más modelos en la plataforma SWIM 2, sobre todo aquellos que requieren acceso a computación de alto rendimiento. De tal manera, una línea futura investigación es definir los requerimientos técnicos para integrar modelos más complejos en la plataforma, incluyendo lo siguiente: 1) establecer una infraestructura con acceso a computación de alto rendimiento y 2) integrar herramientas apropiadas de visualización geoespacial. El uso de mayores recursos computacionales, aunque suelen reducir los tiempos de procesamiento, pueden no ser suficientes para tener resultados inmediatos. Por ende, la pre-ejecución de escenarios podría ser una buena opción para exponer modelos complejos en la plataforma. Bajo este esquema, los resultados de escenarios predefinidos estarían directamente disponibles para su consulta inmediata.

Un área de oportunidad que se encontró durante el desarrollo de los modelos fue en el registro y uso de procedencia (origen) de los datos. En la plataforma existen algunos datos usados en los modelos que no cuentan con un registro completo de: origen, recopilación y/o pre-procesamiento. La procedencia es un aspecto fundamental para infundir confianza en que

los datos son fidedignos, permitiendo la transparencia y reproducibilidad. El uso de procedencia también se puede aplicar a los resultados del modelo para establecer el origen y derivación de estos dentro del contexto del modelo. De igual manera, para continuar reforzando los principios FAIR, las áreas de oportunidad incluyen el agregado de contexto semántico en la interfaz web para consumo de agentes inteligentes y la apertura de datos generados en SWIM en forma de grafos de conocimiento.

Otro tema por discutir es la usabilidad y la utilidad. El término de usabilidad tiene diferentes significados que pueden incorporar factores de calidad y seguridad. Para fines de este contexto, se refiere a usabilidad como “la capacidad del producto de software para ser entendido, aprendido, usado y atractivo al usuario, cuando es usado bajo condiciones específicas”, de acuerdo estándar ISO/IEC 9126 (Bevan, 2001). En cambio, la utilidad se mide por el valor que un modelo, y en nuestro caso la herramienta, provee al usuario final (Holzworth *et al.*, 2011). Un sistema altamente intuitivo no define la utilidad para el usuario final. En la primera etapa de desarrollo de SWIM se puso énfasis a la mejora continua de usabilidad de la plataforma sin dejar de lado la utilidad final. Sin embargo, hay que considerar que, aun teniendo una interfaz perfecta, los modelos mismos van a tener una utilidad innata que va a estar limitada a las preguntas que los usuarios puedan responder con ellos, pero ¿cómo va a saber un usuario que preguntar? y ¿cómo interpretar lo que ya se tiene disponible? La fase actual de desarrollo de SWIM 2 incluye actividades para responder a estas preguntas.

El ciclo actual del proyecto (2019-2022), ELEMENTS: DATA: HDR: SWIM to a Sustainable Water Future, NSF Award # 1835897, tiene como uno de sus objetivos la generación de interfaces dinámicas e interpretación de modelos científicos para fomentar el uso de modelos por parte de usuarios no especializados. Para ello se estableció un equipo diverso de investigadores que contribuyen a entender cómo converger de manera más efectiva con otros investigadores interesados en la sustentabilidad del agua desde varias disciplinas y perspectivas y usuarios provenientes de diversos grupos de interés. Actualmente, el equipo de SWIM continúa desarrollando herramientas y metodologías innovadoras que apoyen el uso de la interfaz web de SWIM 2 a diferentes grupos de usuarios, que difieren en cuanto a su experiencia, interés y conocimiento.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al equipo de investigación (científicos y estudiantes) que han participado en este proyecto por sus invaluable contribuciones. Un especial agradecimiento a William Hargrove, Alfredo Granados Olivas, Frank Ward, Alex Mayer y David Gutzler por la retroalimentación y contribución de modelos científicos y datos que han sido integrados en la plataforma SWIM.

This material is based upon work supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130. This material is based upon work supported by the National Science Foundation under Grant No. 1835897. This work used resources from Cyber-ShARE Center of Excellence, which is supported by NSF Grant number HDR-1242122. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the National Science Foundation.

Referencias

- Abras, C., Maloney-Krichmar, D., & Preece, J. (2004). User-centered design. *Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Thousand Oaks: Sage Publications, 37(4), 445–456.
- Bevan, N. (2001). International standards for HCI and usability. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55(4), 533–552. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0483>
- Capt, T., Mirchi, A., Kumar, S., & Walker, W. S. (2021). Urban Water Demand: Statistical Optimization Approach to Modeling Daily Demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(2), 04020105. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452001315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452001315)
- Cartier, J., Rudolph, J., & Stewart, J. (2001). The Nature and Structure of Scientific Models. 10. Department of Health and Human Services. (2013, July 18). Usability.gov. Department of Health and Human Services. <https://www.usability.gov/>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Garnica Chavira, L., Caballero, J., Rosales, N. V., & Pennington, D. (2018). Semi-structured Knowledge Models and web Service Driven Integration for Online Execution and Sharing of Water Sustainability Models. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2018/Stream-A/43>
- Granados-Olivas, A., Alatorre-Cejudo, L. C., Adams, D., Serra, Y. L., Esquivel-Ceballos, V. H., Vázquez-Gálvez, F. A., Giner, M. E., & Eastoe, C. (2016). Runoff Modeling to Inform Policy Regarding Development of Green Infrastructure for Flood Risk Management and Groundwater Recharge Augmentation along an Urban Subcatchment, Ciudad Juarez, Mexico. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 159(1), 50–61. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2016.03229.x>
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., & deVoil, P. G. (2011). Simple software processes and tests improve the reliability and usefulness of a model. *Environmental Modelling & Software*, 26(4), 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.001>

- doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.10.014
International Decade for Action “Water for Life”
2005–2015. Focus Areas: Transboundary waters.
(2014, October 23). https://www.un.org/waterforlifedecade/transboundary_waters.shtml
- Jones, S., Pergl, R., Hooft, R., Miksa, T., Samors, R., Ungvari, J., Davis, R. I., & Lee, T. (2020). Data Management Planning: How Requirements and Solutions are Beginning to Converge. *Data Intelligence*, 2(1–2), 208–219. https://doi.org/10.1162/dint_a_00043
- Larman, C., & Basili, V. R. (2003). Iterative and incremental developments. A brief history. *Computer*, 36(6), 47–56. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1204375>
- Marshall, S. J. (2014). The Water Cycle. In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09091-6>
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000). Emissions Scenarios—IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>
- Nidhra, S. (2012). Black Box and White Box Testing Techniques—A Literature Review. *International Journal of Embedded Systems and Applications*, 2(2), 29–50. <https://doi.org/10.5121/ijesa.2012.2204>
- Pennington, D., Bondank, E., Clifton, J., Killion, A., Salas, K., Shew, A., Sterle, K., & Wilson, B. (2018). EMBeRS: An Approach for Igniting Participatory Learning and Synthesis. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2018/Stream-C/68>
- Pennington, D., Vincent, S., Gosselin, D., & Thompson, K. (2021). Learning across disciplines in socio-environmental problem framing. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 3, 17895–17895. <https://doi.org/10.18174/sesmo.2021a17895>
- Pierce, D. W., Cayan, D. R., Maurer, E. P., Abatzoglou, J. T., & Hegewisch, K. C. (2015). Improved Bias Correction Techniques for Hydrological Simulations of Climate Change*. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2421–2442. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0236.1>
- Reclamation. (2008). Operating Agreement For The Rio Grande Project. <https://usbr.gov/uc/albuquerque/RGP/pdfs/Operating-Agreement2008.pdf>
- Samimi, M., Mirchi, A., Townsend, N. T., Gutzler, D. S., Ahn, S., Sheng, Z., Moriasi, D., Granados-Olivas, A., & Hargrove, W. L. (2019). Climate Change Impact Assessment for an Agricultural Watershed in the U.S. Desert Southwest. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 33. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFM.H33M2149S>
- Shivalingaiah, D., & Naik, U. (2008). Comparative Study of web 1.0, web 2 and web 3.0. <http://ir.inflibnet.ac.in:8080/ir/handle/1944/1285>
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering: 10th ed.* Pearson Education.
- The World’s Internet in 2018: Faster, Modernizing and Always On. (2018, December 10). *Speedtest Stories & Analysis: Data-Driven Articles on Internet Speeds*. <https://www.speedtest.net/insights/blog/2018-internet-speeds-global/>
- Townsend, N. T., & Gutzler, D. S. (2020). Adaptation of Climate Model Projections of Streamflow to Account for Upstream Anthropogenic Impairments. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(4), 586–598. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12851>
- Villanueva-Rosales, N., Chavira, L. G., Tamrakar, S. R., Pennington, D., Vargas-Acosta, R. A., Ward, F., & Mayer, A. S. (2017). Capturing Scientific Knowledge for Water Resources Sustainability in the Rio Grande Area. 6
- Wallace, D. R., & Fujii, R. U. (1989). Software verification and validation: An overview. *IEEE Software*, 6(3), 10–17. <https://doi.org/10.1109/52.28119>
- Ward, F. A., Mayer, A. S., Garnica, L. A., Townsend, N. T., & Gutzler, D. S. (2019). The economics of aquifer protection plans under climate water stress: New insights from hydroeconomic modeling. *Journal of Hydrology*, 576, 667–684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.081>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- World Internet Users Statistics and 2021 World Population Stats. (2021). <https://internetworldstats.com/stats.htm>

V

**Special chapter:
Conservation of shared groundwater
resources in the binational Mesilla Basin-El
Paso del Norte region – A hydrogeological
perspective**

Capítulo especial:

Conservación de los recursos hídricos subterráneos compartidos en la
región binacional Cuenca Mesilla-El Paso del Norte – Una perspectiva
hidrogeológicas

Conservation of shared groundwater resources in the binational Mesilla Basin-El Paso del Norte region — A hydrogeological perspective

Conservación de los recursos hídricos subterráneos compartidos en la región binacional Cuenca Mesilla-El Paso del Norte
– Una perspectiva hidrogeológica

John W. Hawley¹ and Baird H. Swanson²

¹ Ph.D., Emeritus Sr. Environmental Geologist, NM Bureau of Geology & Mineral Resources, NM Institute of Mining & Technology; and Visiting Senior Hydrogeologist, NM Water Resources Research Institute, NM State University, ² Swanson Geoscience LLC, Albuquerque, NM.

FOREWORD

WATER AND THE LAND

“Above all, it is a land where water has always been scarce and therefore precious, a thing to be fought for, prayed for and cherished in beautiful vessels—a land where thunder is sacred and rain is a god.”¹⁴

THE LANDSCAPE AND THE RIVER

“Landscape is often seen as static; but it never is static. From its first rock [peak] in the sky to its last embrace by the estuary at the sea, the river has been surrounded by forces and elements constantly moving and dynamic, interacting to produce its life and character. It has taken ocean and sky; the bearing of winds; the vagary of temperature; altitude and tilt of the earth’s crust; underground waters and the spill of valleys and the impermeable texture of deserts; the cover of plants and the uses of animals; the power of gravity; and the perishability of rock; the thirst of things that grow; and the need of the sea to create the Rio Grande. The main physical circumstances of the Rio Grande are timeless. They assume meaning only in terms of people who came to the river.”¹⁵

THE BORDER AND THE PEOPLE

“People always talk about the border as that fence

between people there in those towns. That’s not the border. It’s something else, something underscoring the difference between danger and grace, which is not something that separates people. It’s something that joins them, as they face the same border.”¹⁶

ABSTRACT-SUMMARY

The myriad *challenges* that face long-term development of the Transboundary aquifers of the El Paso del Norte (EPdN)-southern Mesilla Basin region (MBR) must be addressed with viable strategies for groundwater (GW)-resource “conservation” that are based on hydrogeological *reality*. Groundwater (GW) is, and will remain the primary source of supply for the large urban/suburban population and expanding industrial economy, and its ever-increasing use to supplement Rio Grande Project (RGP) surface-water deliveries for irrigation-agricultural (I-Ag) uses that date back to the 1915 completion of Elephant Butte Dam construction. In the most-recent hydrogeologic studies reviewed herein, economically producible GW in the fresh to slightly saline quality range (~300 to 3,000 mg/L tds) is considered to be an asset rather than a liability. Part 1 includes the following “Background” sections: (1) USGS Regional Aquifer-Systems Analysis—Southwest Alluvial Basins Program, and definition of Groundwater (GW) Basins; (2) progress in hydrogeologic database compilation and cartography; (3) basic concepts and terminology; (4) the Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP); (5) remaining problems in definition of geohydrologic and /hydrogeologic boundaries; (6) four “glossary tables” with definitions of commonly used terms in hydrogeologic investigations. Part 2 introduces the *groundwater sustainability* concept in the context of the *realities* related to (1) the hydrogeologic framework; (2) the “tragedy of the commons; (2) global climate

¹⁶ Alberto Álvaros Ríos (1999) *Capirotada: A Nogales Memoir* (p. 49). Born in Nogales, AZ in 1952 to Alberto Alvaro Ríos, a justice of the peace (b. Mexico), and Agnes Fogg Ríos, a nurse (b. England). State of Arizona Poet Laureate (since 2013); Regents Professor of English, Arizona State University (since 1992). Capirotada: (1) A Mexican bread pudding made, as Ríos notes, “from ‘a mysterious mixture of prunes, peanuts, white bread, raisins, quesadilla cheese, butter, cinnamon and cloves . . . and things people will not tell you,’ like his life.” (2) Capirotada originated from a 15th century Spanish dish that was heavily influenced by Moorish cuisine Capirotada, like bread pudding, was seen as a way to make use of otherwise ruined, stale bread. Legend holds that the dish, . . . , was created in order to use leftovers before Lent (La Cuaresma) began. Because of its exotic mixture of solid and liquid ingredients in an Anglo-American and Hispano-American cultural-geographic setting, this special chapter could be classed as a Hydrogeological Capirotada!

¹⁴ From *Country* - Harvey Fergusson, 1933, Rio Grande: New York, Alfred A. Knopf, p. 10.

¹⁵ From “Riverscape 3 (Cycle)” - Paul Horgan (1954) *The Great River: The Rio Grande in North American history*: New York, Holt, Rinehart and Winston, p. 6-7. Winner of both the Pulitzer Prize and Bancroft Prize for History.

change, and associated (a) river-basin-scale shifts in types and seasonality of temperature and precipitation, and (b) related change in vegetative cover and erosion and sedimentation. *Subjective* terms like *sustainability* can only provide a conceptual starting pointing for the iterative processes involved in hydrogeologic-framework characterization; and evaluation of the anthropogenic factors now involved in all contemporary water-resource development, especially “GW mining.” Predictive outcomes are qualitatively described as belonging to in one of three broad categories: (1) possible to probable, (2) possible to improbable, and (3) improbable but still possible, including COVID 19 and a wide variety of “Anthropocene” environmental phenomena.

Part 3 comprises detailed summaries of the MBR’s physiographic, geomorphic, and geologic settings, and includes descriptions of major landscape features of the Mexican Highland section of the Basin and Range (B&R) physiographic province and the northern Chihuahuan Desert “ecoregion.” Emphasis is on Pliocene and Pleistocene evolution of the Ancestral Rio Grande (ARG) fluvial system that 1) deposited the bulk of the Upper SFG basin fill in the central parts of RG-rift basins throughout the MBR (between about 5 and 0.75 Ma); 2) episodically “excavated” the present valleys of the RG-RB (from about 750 to 12 ka; and 3) then deposited much of the inner river-valley alluvial fill. Emphasis of Part 4 is on description of the primary structural and stratigraphic components RG-rift basins and interbasin bedrock uplifts in the MBR. A provisional geochronology (past 30 Ma) has been developed for 1) early, middle, and late stages of RG-rift structural evolution and SFG basin-fill deposition, and 2) river-valley/canyon incision and partial back filling that correlate with Pleistocene glacial/interglacial cycles. The resulting chronostratigraphic and sedimentological record is designed to ultimately facilitate the more-detailed characterization of aquifer-material properties, and GW-flow and hydrochemical systems that is described in Parts 5 and 6. Part 5 summarizes the basic components of a hydrogeologic-framework classification scheme for intermontane-basin deposits that was initially developed by the NM Bureau of Geology & Mineral Resources (NMBGMR) in cooperation with the WRRI and USGS in the 1980s, and has been subject to series of subsequent refinements. Is it designed primary for “basin-scale” hydrogeologic-framework characterization (here ~1:100,000) of SFG basin-fill and river valley-fill deposits, and has three primary components: (1) Sedimentary Lithofacies-

Assemblages (*LFAs*) in SFG basin-fill and river valley-fill deposits; (2) Hydrostratigraphic Units (*HSUs*) comprising an *LFA* or *LFA*-combination that are designed for mapping of basin- and valley-fill deposits; and (3) Bedrock-lithologic, and structural boundary components of interbasin RG-rift uplifts, and intra-basin areas.

Part 6 provides Historical background on binational groundwater-resource “Governance” in the southern MBR. Geopolitical aspects of water-resources investigations are described from a 19th and 20th Century Historical perspective, and emphasis is on hydrogeological studies conducted since drilling of the first deep water wells for “steam railway” use. Background material is also included that relates to 1) the late Spanish Colonial period, 2) the 1821 to 1848 Republic of Mexico, and 3) the geopolitical conditions and events of the 1836 to 1848 “Second Conquest-Manifest Destiny period that led up to the formal recognition of the “1853 [aka Gadsden] Treaty” Boundary west of EPdN. Hydrogeology-related studies in the Mesilla Basin region since 1890 are reviewed in Part 7. Topics covered include: (1) early geologic investigations in northwestern Mexico; (2) first comprehensive hydrogeologic investigations in Chihuahua; (3) studies related to the 1984 La Paz and 1994 North American Free Trade Agreements; (4) background on collaborative hydrogeologic investigations: 2000 to 2007; (5) the primary hydrogeologic control of EPdN on the regional GW-flow regime; and (6) hydrogeologic research on pluvial-Lake Palomas—EPdN GW-flow linkage.

Part 8 reviews 1) major challenges facing, and 2) viable opportunities for long-term GW-resource development in the shared aquifer systems of the EPN-MBA. In the most-recent hydrogeologic studies described herein, millions of hectare-meters of GW of the fresh to slightly saline quality range (~300 to 3,000 mg/L tds) is stored in Middle and Upper SFG aquifers of this area. Except near the valleys of the Rio Grande-Rio Bravo fluvial system, however, these basin-fill reservoirs were last replenished during the last Pleistocene glacial stage. Viable opportunities for long-term aquifer-system development occur in parts of the EPN-MBA where SFG aquifer systems are 1) capable of producing large quantities of slightly saline BGW, 2) ideally suited for state-of-practice desalination projects, and/or where de-watered spaces in partly developed aquifers can be refilled using “managed aquifer recharge (MAR)” technology.

1. Introduction

Humankind cannot bear very much reality. Thomas Stearns Eliot (1888-1965). https://en.wikipedia.org/wiki/T._S._Eliot

Reality is that which, when you stop believing in it, doesn't go away. Philip K. Dick (1928-1982). https://en.wikipedia.org/wiki/Philip_K._Dick

1.1. Purpose and Scope, and Background on the Hydrogeological Setting

While today's Rio Grande hardly lives up to its "grand river" title (the flow of the Colorado River is 17 times greater), it reigns as the region's only renewable water supply.¹⁴

The Paso del Norte on the U.S.-Mexico Border is a region where economic, social, and cultural lives are intertwined. However, management of natural resources faces sometimes insufficient communication among government agencies responsible for their well-being. The international dimension of the region aggravates the lack of coordination among government agencies of both countries. As the region's main aquifer, the Hueco Bolson's ability to support the region's water needs is coming to an end. Additionally, there is no legal framework that could facilitate the process of bringing all the parties together on common grounds to address the situation. As population growth is expected to continue, so is the demand for water. The *white map syndrome*, when nothing is considered to exist on the other side of a border line, is a fact of life in the region. The cities of El Paso and Ciudad Juárez are one large metroplex with two distinct water systems. Unless all the actors in the region really work together to jointly develop alternatives for future water supply, the region is on a collision path. Water is a precious resource anywhere, especially in the desert. . . .¹⁵

1.1.1. PURPOSE AND SCOPE

Issues related to "conservation" of shared groundwater (GW) resources in Transboundary aquifers of the Paso del Norte-southern Mesilla Basin region (EPN-SMBR) are addressed in this paper. Emphasis is on hydrogeologic-framework controls on GW flow and chemistry in a Chihuahuan Desert region where 1) the aquifer-recharge role of the Rio Grande-Rio Bravo fluvial system is limited, 2) GW-use greatly exceeds

aquifer recharge, and 4) large *white map* areas still exist where the composition and limits of Transboundary aquifers and GW-flow systems remain poorly defined (e.g., Chávez 2000, Heywood and Yager 2003, Hawley and Kennedy 2004, Sheng and Devere 2005, Hawley *et al.* 2009 and 2021).

The myriad *challenges* that face long-term development of the Transboundary aquifers of the EPN-SMBR, must be addressed with viable strategies for GW-resource "conservation" that are based on *ground-truth* information on the water-storing and transmitting properties of the region's intermontane basin-fill deposits. **Figure 1-1** is an index map of a large United States-Mexico border region that includes parts of Chihuahua, New Mexico, and Trans-Pecos Texas. It shows locations of 1) major landscape and cultural features of the "Mesilla Basin region (MBR)." GW pumped from basin-fill aquifers is the primary source of public water supply for 1) the Ciudad Juárez-El Paso "metroplex" with a population of more than 2.2 million in 2020; and 2) the Las Cruces metro-area with a 2020 population of almost 200,000. Groundwater will also remain the primary source of supply for an expanding industrial economy, and to supplement Rio Grande Project (RGP, **Fig. 1-2**) surface-water deliveries for irrigation-agricultural (I-Ag) uses that date back to the Elephant Butte Dam completion (Kelley *et al.* 2006, Harris 2012; *cf.* **Part 6.5**).

Clearly this is not a *happy* situation for the nearly 2.5 million "Humankind" who must face these water-resource *realities* on a daily basis; and it quite appropriate to ask the following question: How long can the large, but still finite, aquifer systems of the EPN-SMBR meet the enormous demands of the combined municipal and industrial (M&I), and irrigation-agriculture (I-Ag) sectors? A *realistic* answer from a 2021 perspective would be a century at most; and that, of course, would depend on the existence of functional binational collaboration in water-resource *conservation*, with the latter including detailed and very costly investigations of subsurface hydrogeological conditions. Accordingly, the content of this paper reflects the need to find a proper mix of *optimism* and hydrogeological *reality* when addressing the many pressing issues associated with the effective *conservation* of both surface- and subsurface-water resources. A pragmatic and holistic approach to water-resource management is especially important in a region with a recorded geopolitical history that dates back to its initial period of Hispanic colonization between April 1598 and October 1680 (Pérez de Villagrà 1610-1962, Hughes 1914, and Hackett 1942; *cf.* **Parts 6.1.2** and **6.1.3**).

14 Linda Harris (2012, p. 229): "A Grand River" in One Hundred Years of Water Wars in New Mexico-1912-2012.

15 *Mining of Internationally Shared Aquifers* (Octavio E. Chávez, 2000, p. 237). Director, Mexico/Latinoamerica, International City/County Management Association (ICMA)-2017 to present.

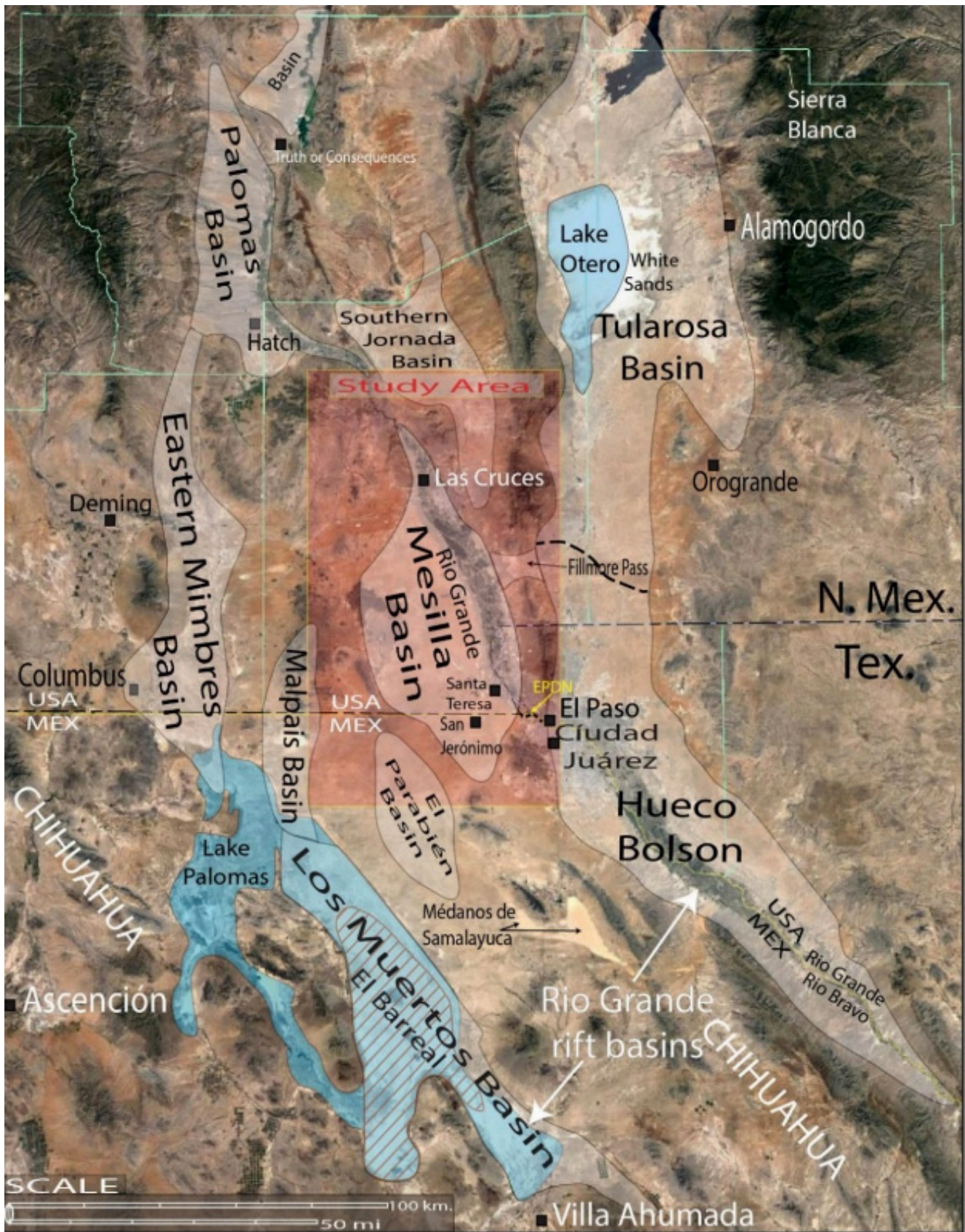


Figure 1-1. Index map of the Mesilla Basin region (MBR) showing locations of the NM WRRRI Study Area (**Fig. 1-2**, beige rectangle), major landscape features in the northern Mexican Highland section of the B&R province (**Fig. 1-3**), and basins of the southern RG-rift province. 2017 Google earth® image-base.

In the Figure 1-1, the location of El Paso del Norte is shown with a yellow EPDN. Blue shading shows the approximate extent of the areas inundated by pluvial-Lakes Palomas and Otero at their respective Late Pleistocene high stands in the Los Muertos-El Barreal and Laguna Guzman/Santa Maria basin complex, and the Tularosa Basin.

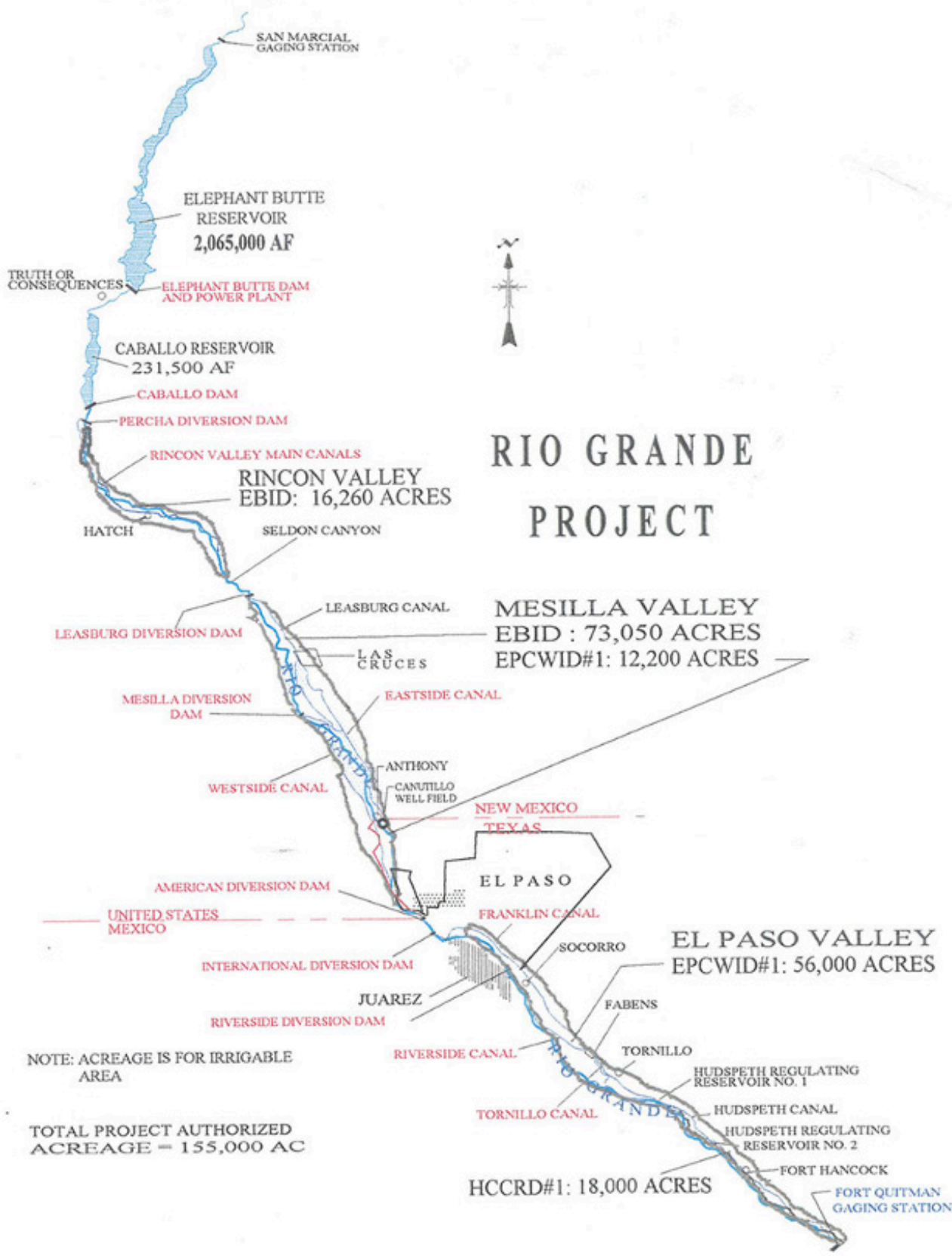


Figure 1-2. U.S. Bureau of Reclamation Map showing locations of principal components of the Rio Grande Project (RGP) between the San Marcial (removed 1964) and Fort Quitman Gaging Stations. EBID: Elephant Butte Irrigation District (courtesy of Rhea Graham).

1.1.2. BACKGROUND ON HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS IN THE PASO DEL NORTE-MESILLA BASIN REGION

The 2018 Google earth® image base for **Figure 1** allows detailed depiction of major landforms of both the southern Rio Grande rift (RG-rift) tectonic province, and large parts of the Basin and Range (B&R) physiographic province-Mexican Highland section (Hawley 1975 and 2005; **Fig 1-4**). Blue shading on shows the approximate extent of two large “pluvial lakes” that formed during the last major glacial stage of the Pleistocene Epoch (~12,000 to 29,000 yrs. ago [ka]): Lake Otero in the Tularosa Basin and Lake Palomas in the Los Muertos Basin area of northern Chihuahua. GW (underflow) discharge from pluvial-Lake Palomas was a significant recharge contributor to SFG basin-fill and Mesilla Valley (MeV) alluvial aquifer systems in the area north and west of EPdN (**Fig. 1-1**; cf. **Fig. 1-11**). During the Holocene Epoch (past 11.7 ka), however, flow of the Rio Grande-Rio Bravo has served as the EPN-SMBR’s sole “renewable water supply.”

The beige rectangle in **Figure 1** shows the location of the primary area of hydrogeologic investigations that are coordinated by the New Mexico Water Resources Research Institute (NM WRRI); and it is informally named the WRRI “Study Area” herein (**Fig. 1-3**). The Institute, which is located at New Mexico State University in Las Cruces, was established in 1963 by the New Mexico legislature and approved under the 1964 federal Water Resources Research Act. It coordinates funding of research conducted by faculty and students from universities across the state that address water problems critical to New Mexico and the American Southwest; and it also participates in joint efforts to solve water-related problems along the U.S./Mexico border (cf. **Part 1.8**). Through the funding of research and demonstration projects, the Institute utilizes knowledge and experience of researchers throughout the state to solve New Mexico’s pressing water problems. In-house staff administers the institute’s programs, conducts special research projects, and produces a variety of “issue” reports, of which address specific GW-resource concerns in the EPN-SMBR (e.g., King *et al.* 1969; Peterson *et al.* 1984; Hibbs *et al.* 2007; Hawley *et al.* 2000, 2005 and 2009; Witcher *et al.* 2004; Hawley 2000, and Kubicki *et al.* 2021).

The RG-rift tectonic province comprises a group of north-trending block-faulted mountain ranges and

intermontane-structural basins that are connected by valleys and canyons of the Rio Grande-Rio Bravo fluvial system. With the exception of the Malpais Basin (Seager 1989) and El Parabién Basin (Jiménez and Keller 2000), names and locations of RG-rift basins in **Figure 1-1** are from Seager and Morgan (1979, Fig. 1). The Santa Fe Group (SFG) forms the primary basin-fill component throughout the RG-rift province (Hawley *et al.* 1969, Seager *et al.* 1987, Seager 1995, Connell 2008). Thickness of the sedimentary fill of the deepest rift basins exceeds 1.5 km in the MBR. **Figure 1-4** (Gile *et al.* 1981) is an index map for major subdivisions of the Basin and Range (B&R) physiographic province-Mexican Highland section (cf. **Part 3.1**). The WRRI Study Area (**Fig. 1-2**) occupies most of Doña Ana County and includes the 1957-1977 USDA-SCS Desert Soil-Geomorphology Project area (blue rectangle, Monger *et al.* 2009). The MBR boundaries (**Fig. 1-1**) approximate the 30° 30’ and 33° 30’ N parallels, and the 105° 30’ and 108° N meridians. The acronym EPN-SMBR is used herein the designate for the EPdN-southern Mesilla Basin area the 31° and 32° N Parallels.

Hydrogeologic-framework controls on GW flow and chemistry in the Transboundary-aquifer system west of the lower Mesilla Valley (MeV) and EPdN get special attention in this paper. The only significant Transboundary aquifer systems in this area comprise 1) thick (as much 600 m) SFG rift-basin fill, and 2) the thin (≤20 m) alluvial aquifers of the inner-river valley (**Figs. 1-1 to 1-3**). Groundwater pumped from SFG basin-fill aquifers is the primary source of public water supply for 1) the Ciudad Juárez-El Paso “metroplex” with a population of more than 2.2 million in 2020; and 2) the Las Cruces metro-area with a 2020 population of almost 200,000. Groundwater will also remain the primary source of supply for an expanding industrial economy, and to supplement Rio Grande Project (RGP) surface-water deliveries for irrigation-agricultural (I-Ag) uses that date back to the 1916 completion of Elephant Butte Dam construction (**Fig. 1-4**; cf. **Part 6.5**).

As is pointed out in **Part 2.1**, *subjective* terms like *sustainability* only provide a conceptual starting pointing for the iterative processes involved in 1) hydrogeologic-framework characterization; and 2) evaluation of the anthropogenic factors involved in all contemporary water-resource development, especially the negative effects of “GW mining.” As recognized two decades

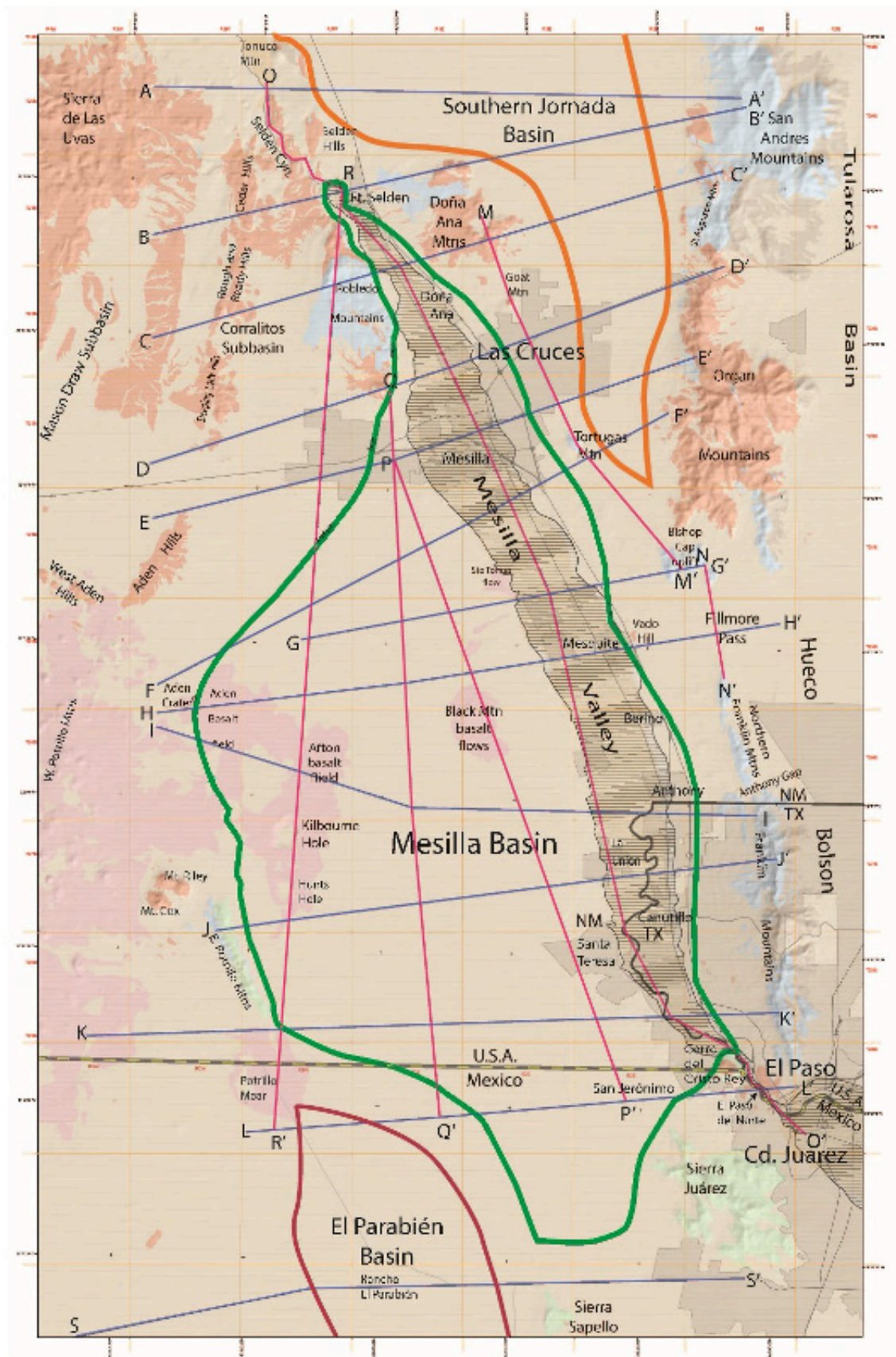


Figure 1-3. NM WRI Study Area index map on a hydrogeologic map base (Hawley *et al.* 2021, **PL. 1**). The Mesilla, Southern Jornada, and El Parabién GW basins (MeB, SJB and EPB) are outlined in green, orange and red, respectively. Also shown are locations of major landscape and cultural features (including the Mesilla Valley of the Rio Grande), and hydrogeologic cross-sections A-A' to S-S'.

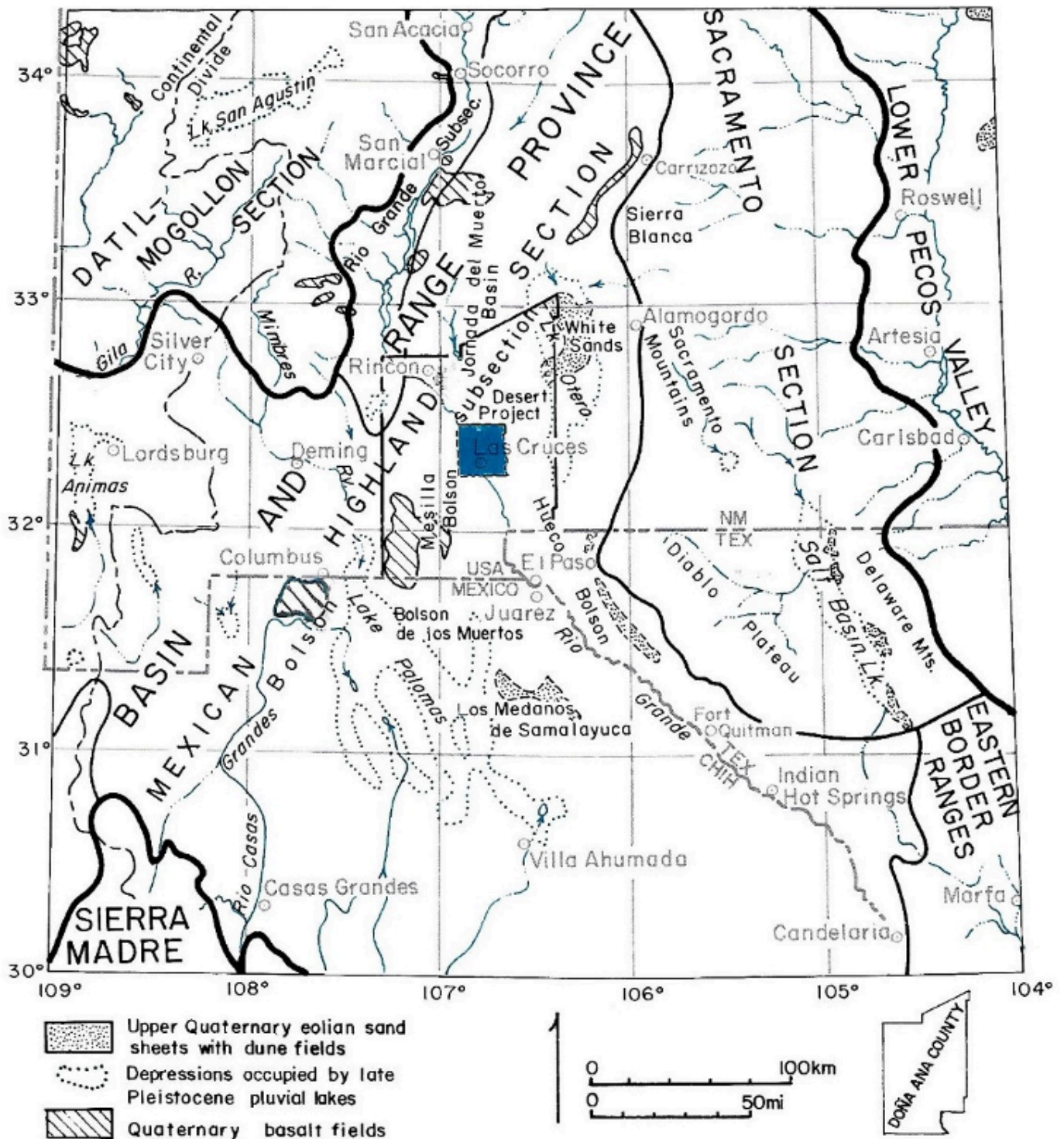


FIGURE 1—PHYSIOGRAPHIC SUBDIVISIONS OF THE DESERT PROJECT REGION, New Mexico, Texas, and Chihuahua, showing major stream systems, pluvial-lake basins, dune fields, and basalt terranes (adapted from Hawley, 1975, fig. 1).

Figure 1-4. (Gile *et al.* 1981, FIG. 1; modified from Hawley 1975, Fig. 1). Index map to physiographic subdivisions and major landforms and streams in the Basin and Range (B&R) province-Mexican Highland region of New Mexico, Trans-Pecos Texas, and Chihuahua (Hawley 1969 and 1975, Underwood 1980).⁶

⁶ The “Rio Grande” below the International Boundary at EPdN has the compound name “Rio Grande/Bravo” in this paper. The NM WRRRI Study Area (Fig. 1-3) occupies most of Doña Ana County and includes the 1957-1977 USDA-SCS Desert Soil-Geomorphology Project area (blue rectangle, Monger *et al.* 2009). The boundaries of the informally designated Mesilla Basin region (MBR, Fig. 1-3) are near the 30° 30' and 33° 30' N parallels, and the 105° 30' and 108° N meridians.

TABLE 1-1. Definitions of key specialty and technical terms.

Aquifer: A *saturated* geologic unit that is permeable enough to transmit significant quantities of water under ordinary hydraulic gradients (Deming 2002, p. 429).

Conservation: A careful preservation and protection of something; especially planned management of a natural resource to prevent exploitation, destruction, or neglect; e.g., water *conservation*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/conservation>

Environmental geology: A specialty of geology concerned with Earth processes and resources, and engineering properties of Earth materials that is relevant to (1) protection of human health and natural ecosystems from adverse biochemical and/or geochemical reactions to naturally occurring chemicals or to chemicals or chemical compounds released into the environment by human activities (Neuendorf *et al.* 2005, p. 212).

Geology: The study of the planet Earth, the materials of which it is made, the processes that act on these materials, the products formed, and the Earth's history and that of and its life forms (Neuendorf *et al.* 2005, p. 267).

Geomorphology: A branch of geology dealing the general configuration of the earth's surface; specifically, the study of the classification, description, nature, origin, and development of landforms and their relationships to underlying structures (Neuendorf *et al.* 2005, p. 267).

Geopolitics: 1. A study of the influence of such factors as geography, economics, and *demography* on the politics and especially the foreign policy of a state. 2. A governmental policy guided by geopolitics. 3. A combination of political and geographic factors relating to something (such as a state or particular resources [e.g., water resources]). Adapted from www.merriam-webster.com/dictionary/geopolitics

Groundwater: 1. *Subsurface water* that is in the saturated zone ... (Neuendorf *et al.* 2005, p. 286). 2. Any *subsurface* aqueous fluid, either saline or fresh (Deming 2002, p. 433).

Groundwater mining: The process, deliberate or inadvertent, of extracting groundwater at a rate so in excess of the replenishment that the water level declines persistently, threatening exhaustion of the supply or at least the decline of pumping levels to uneconomic depths (Neuendorf *et al.* 2005, p. 286).

Hydrology: The study of the occurrence and movement of water at and beneath the surface of the Earth, the properties of water, and its relationship with living and material components of the environment (Hornberger *et al.* 2005, p. 282).

Hydrogeology: The Earth science that deals with *subsurface waters* and related geologic aspects of surface waters (Neuendorf *et al.* 2005, p. 311).

Pleistocene [Ice Age]: The first epoch of the Quaternary Period of geologic time, following the Tertiary Pliocene Epoch and preceding the Holocene (alinas. from 2.6 Ma to 11.7 ka). Glacial-interglacial cycles characterized much of the Pleistocene in high latitude and altitude regions, while complex cool-moist, cold-dry, and hot-dry (pluvial-interpluvial) cycles occurred in the American Southwest.

Rift zone (tectonics): A large region where Earth-crustal extension results in formation of an array of kinematically related *faults*, along with associated *grabens*, *half grabens*, and *horsts*. Some active rift zones [like the RG rift] have associated volcanic activity. Many such zones are broad with distributed faults and evolve into deep troughs filled with thick sequences of *sediment*.

Rio Grande: The conventional name of the river in the United States, and the one used in this paper in the area upstream from El Paso del Norte (EpdN) in New Mexico and Texas. The informal designation Rio Grande/Bravo is used herein for the river downstream from point where it forms the U.S.-Mexico boundary (i.e., SE of the 31°47' N Parallel; Fig. 1-3). The entire fluvial system in the MBR is here informally named the Rio Grande-Rio Bravo.

Tectonics: A branch of geology dealing with the broad architecture or outer part of the Earth that is the regional assembling of structural or deformational features in studies of their mutual relationships, origin, and evolution (Neuendorf *et al.* 2005, p. 659).

ago by Octavio Chávez, as well as herein, this remains an issue of great concern in the EPN-SMBR (*cf.* **Parts 2.4 and 8.1**) ⁷:

(p. 238) For centuries the river and shallow wells had been the source of water in the region. With the turn of the century, the growing urban centers along the Rio Grande, where the river becomes the international boundary, started increasingly to depend on groundwater. The primary source of the region's groundwater is the aquifer called Hueco Bolson, which is being depleted at a dramatic rate. Both communities are mining the same source; however, Ciudad Juárez faces the biggest challenges since it currently depends on the Hueco Bolson for 100 percent of its water supplies. On the other hand, El Paso has had alternative sources for several decades.

(p. 239) The region's three main sources of water are the Rio Grande and two aquifers, the Hueco Bolson and the Mesilla Bolson. The Hueco Bolson extends south from the New Mexico/Texas state line to the Sierra Juárez to the west, and to the Sierra El Presidio and Sierra Guadalupe to the south. From the Sierra Juárez, the Hueco Bolson turns southeast to Indian Hot Springs. The Hueco Bolson has a connection with the Tularosa Bolson on the north. This aquifer is truly shared by the two countries, and it is the key source of water for the city of El Paso, Ciudad Juárez, and military installations and smaller cities in New Mexico, Texas, and Mexico. The Mesilla Bolson is a renewable aquifer west of El Paso that is also shared with the state of New Mexico. Historically, the urban areas have exploited high quality groundwater while the region's farmers have relied on the surface waters of the Rio Grande, managed downstream of Elephant Butte Dam by a complex system of international treaties and interstate compacts.

The large size and river-connected nature of the Santa Fe Group (SFG) aquifer system in the Mesilla Basin region was first described in a hydrogeological context in NM WRI Report No. 6 (W. King, Hawley, Taylor, and R. Wilson, 1969). While the field studies by King and associates (1969 and 1971) did not extend into Mexico, they also recognized that at least the upper part of the SFG aquifer system was present in Chihuahua as far south as the Federal Highway 2 corridor west of the Sierras de Juárez and Sapello [aka Mesquite] (Hawley *et al.* 2021-**APNDX D1.1**; Córdoba *et al.*, 1969, p. 3-6).

Soon after the WRI Report's publication, however, Professor John W. Clark ⁸, P.E., past Civil Engineering Department Chair at NMSU and second NM WRI Director, advised the report's authors not to be overly optimistic in their estimates of the size and production

⁷ *Mining of Internationally Shared Aquifers: The El Paso-Juarez Case* (O. Chávez 2000).

⁸ In the late 1960s, John Clark also acted as a private civil engineering consultant for the border-development visionary, Charles L. (Charlie) Crowder (1932-1918) in the early planning stages of the future Santa Teresa Industrial Park and adjacent parts of the MeB-West Mesa (*cf.* **Part 6.3.4c**; Culbertson 2018, Kocherga 2018b, Pacheco 2018c).

potential of the reservoir's fresh (<1,000 mg/L tds)-GW component. He recognized that, with increasing distance from the Rio Grande, long-term aquifer-system development might be possible in terms of water quantity; but its initial fresh-water content would eventually be replaced by progressively more-saline water derived from drainage of brackish GW reservoirs in contiguous intermontane-basin and mountain areas.

El Paso Herald-Post investigative reporter, Terrance E. Poppa⁹, wrote a short "Metro section" article in February 1985 that was titled "Vast water under Mexico's sands?." In it, he correctly inferred (but without citing supporting geohydrologic information) that large amounts of groundwater were stored in what is now referred to as the "Acuífero Conejos Médanos" the "Zona Hidrogeológica de Conejos Médanos" (INEGI 2012; *cf.* **Fig. 1-10**). What Poppa did not realize was that, as John Clark had already noted in the Mesilla Basin, most of the fresh GW reservoirs of the EPN-SMBR could not be replenished on a long-term basis.

1.2. The USGS Regional Aquifer-Systems Analysis—Southwest Alluvial Basins Program

While not formally involved in any binational activity, the Regional Aquifer-Systems Analysis (RASA)—Southwest Alluvial Basins (SWAB) Program of the U.S. Geological Survey had a major impact on development of new conceptual and digital models of intermontane-basin hydrogeologic systems. This selection from Frenzel and Kaehler (1992, p. iii) summarizes the RASA-SWAB program's scope:

The Regional Aquifer-System Analysis (RASA) program was started in 1978 after a congressional mandate to develop quantitative appraisals of the major ground-water systems of the United States.... The broad objective for each study is to assemble geologic, hydrologic, and geochemical information; to analyze and develop an understanding of the system; and to develop predictive capabilities that will contribute to the effective management of the system. The use of computer simulation is an important element of the RASA studies, both to develop an understanding of the natural, undisturbed hydrologic system and any changes brought about by human activities as well as to provide a means of predicting the regional effects of future pumping or other stresses [*cf.* Freethey *et al.* 1986, Wilkins 1986 and 1998].

1.3. Groundwater (GW) Basins Defined

⁹ 1. Pulitzer Prize Finalist for Investigative Reporting: "Terrence Poppa of El Paso Herald-Post For his resourceful investigation of the dealings of Mexican drug lords." 2. Poppa, T.E., 1998, *Drug Lord: The Life and Death of a Mexican Kingpin [Pablo Acosta]: a True Story*: Demand Publications, 364 p.

Parts of the larger “Southwest Alluvial Basins (SWAB)” that contain the most-productive aquifers have been formally designated as “groundwater (GW) basins” in many USGS investigations in the region. For example, Frenzel and Kaehler (1990 and 1992, Fig. 4) include the deep-central section of the Mesilla RG-Rift Basin in their Mesilla GW Basin (Fig. 1-5); and this “GW-basin” conceptual model has been used by the WRRRI in delineation of “GW basins” throughout the B&R-Mexican Highland section. For example: the Mesilla, Southern Jornada and El Parabién GW Basins in the WRRRI Study Area (Fig. 1-2) have been assigned the respective acronyms of MeB, SJB, and EPB (cf. Hawley *et al.* 2021, Tbl. 1-2). The MeB, as defined by Frenzel and

Kaehler (1992, Fig. 4), has a dashed outline in Figure 1-5; and the Mesilla Valley of the Rio Grande (MeV) is shown with light shading. “El Paso Narrows” is the name for El Paso del Norte (EpdN) that is commonly used in USGS publications on the MBR; and “West Mesa” refers to a remnant of a fluvial-deltaic plain west of the MeV that was constructed by Ancestral Rio Grande distributary channels that terminated in the Bolson de Los Muertos prior to Mesilla Valley entrenchment (cf. Parts 3.4 and 4.4.2).



Figure 1-5. (Frenzel and Kaehler 1992, Fig. 4). 1990 USGS-Water Resources Division index map showing locations of the Mesilla “groundwater” Basin (MeB-dashed outline), the Mesilla Valley of the Rio Grande (MeV-shaded area), the “West Mesa,” and major bedrock uplifts in the southern Doña Ana County, NM area.

1.4. Progress in Hydrogeologic Database Compilation and Cartography

WRRI technical reports on the hydrogeologic framework of the MBR are illustrated by a number of new digital cartographic products that effectively deal with the “white map syndrome” issue raised by Octavio Chavez (2000, **Part 1.1**; e.g., Hawley *et al.* 2005, 2009, and 2021). Advances in GIS, GPS Google Earth® capabilities require continued upgrading of the critical databases that are provided by water-well and other types of deep-subsurface information. The UTM (NAD-83) coordinate system for feature-location control was adopted by the NM WRRI-GIS Laboratory in the mid-1990s for all project-completion reports with a transboundary-aquifer component (e.g., Hibbs *et al.* 1997, Hawley *et al.* 2000). Latitude/longitude coordinates (degree-minute-second and/or decimal), however, also continue to be used by the WRRI, as well as other federal and state agencies in the United State part of the MBR (e.g., **Figs. 1-2** and **1-5**). Note also that WRRI cartographic products with binational coverage now use both U.S. Standard and International System IS (metric) Units for length-category measurements (e.g., **Figs. 1-7** and **4-3**).

Figure 1-6 is an index map 2018 Google earth® image base that shows locations of the 397 *Key Wells* (red dots) that were the primary sources of subsurface hydrogeologic and geohydrologic information used in the WRRI study (cf. **TBL. 1** Excel® spreadsheet in Hawley *et al.* 2021, **Fig. 1-2**). The Mesilla, Southern Jornada, and El Parabién GW Basins are outlined, respectively, in green, orange, and violet. Acronyms for major Hydrogeologic Subdivision and basin-boundary fault zones are defined in Hawley and others (2021) **Tables 1-4** and **1-5**. **Figure 1-7** shows major geohydrologic features of the NM WRRI Study Area (**Fig. 1-2**) on a 2017 Google earth® image base. The Mesilla Basin (MeB) is outlined in green. An approximation of the pre-development (~1976) GW-level altitude is shown with thin, dark-blue lines (20-ft, ~6-m contour interval); solid and dashed thick-blue lines show major surface-watershed divides.

In the **Figure 1-6**, the Mesilla, Southern Jornada, and El Parabién GW Basins are outlined, respectively, in green, orange, and violet. Hydrogeologic Subdivision acronyms and basin-boundary fault zones defined in Hawley and others (2021) **TbIs 1-4** and **1-5**.

An approximation of the predevelopment (1976-82), potentiometric-surface configuration in the WRRI

Study Area is shown on **Figure 1-7**. The map is the *first-of-its-kind* product of a binational collaboration that was initiated in 1995 (e.g., Hibbs *et al.* 1997 and 1998, Hawley *et al.* 2000 and 2009; cf. **Part 7.4.1**). Primary sources of information include water-level data collected in the United States before February 1976 (Wilson *et al.* 1981), and in Mexico through 1982 (INEGI 1983b). The base-map compilation-scale of 1:100,000 conforms to state-of-practice, basin-scale platforms that are needed for USGS GW-flow and hydrochemical models (e.g., Teeple 2017, Hanson *et al.* 2018). Due to the lack of access to precise databases on well location and well-head altitudes in many places, preparation of accurate potentiometric-surface maps of areas south of the International Boundary remains a special problem.

1.5. Basic Concepts and Terminology

While the subject matter of this paper remains complex, the authors have tried to communicate effectively with the broadest possible “audience.” The unique English/Spanish linguistic styles that have evolved in this part of the U.S.-Mexico Border region obviously pose problems for any PC-spellcheck system. Names of cultural and landscape features are chiefly obtained from the following sources: New Mexico—Julyan (1996); Trans-Pecos Texas—Underwood (1980); and Chihuahua—Almada (1968) and Haenggi 2002. The hydrogeological perspective on GW flow-system dynamics requires use of terms that will always pose comprehension problems for a “general audience.” To assist the reader in understanding basic geological concepts as applied in water-resource investigations, definitions of the commonly used terms are listed in **Tables 1-2** to **1-5** in **Part 1.10**. **Table 1-2** includes definitions of standard geologic terms: **1-2A**—general, stratigraphic, and structural; and **1-2B**—common earth-material types. Major divisions of geologic time are defined in **Table 1-3**; and common terms used in geomorphology and physical geography are defined in **Table 1-3**. Definitions of terms used in hydrology and hydrogeology are included in **Table 1-5**; and sources of published information on hydrogeology-related topics the MBR are listed in **Table 1-6**.

In the **Figure 1-7**, the Mesilla, El Parabién, and Southern Jornada GW Basin (MeB, EPB, and SJB) boundaries are in green, violet, and orange, respectively). Surface-watershed divides are shown by solid blue lines. Thin, blue lines show the approximate pre-development

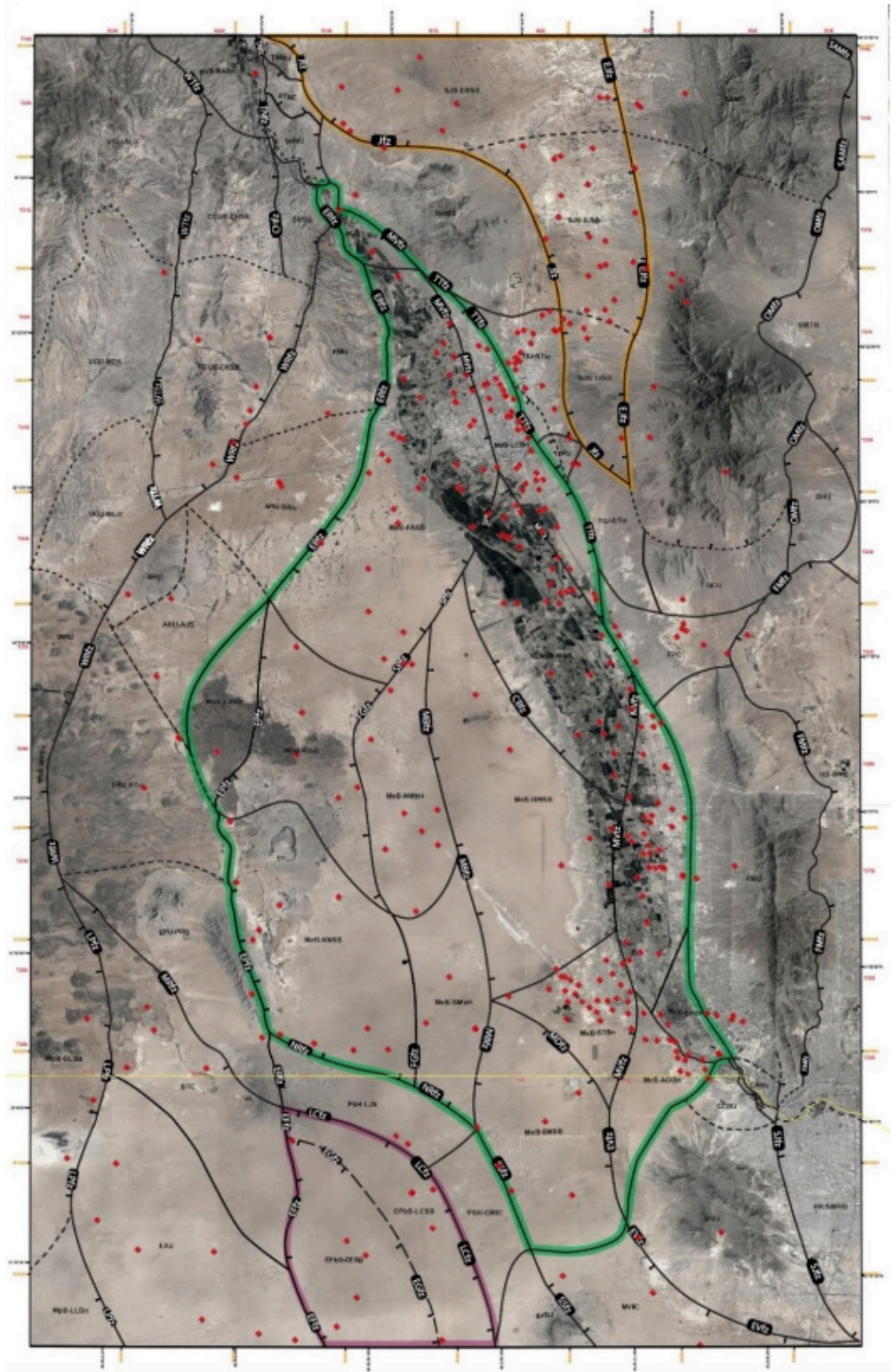


Figure 1-6. Index map showing locations of the 397 Key Wells (red dots) that were the primary sources of subsurface hydrogeologic/geohydrologic information used in the WRRI Study Area (Fig. 1-2; cf. TBL. 1 Excel® spreadsheet in Hawley et al. 2021). 2018 Google earth® image base.

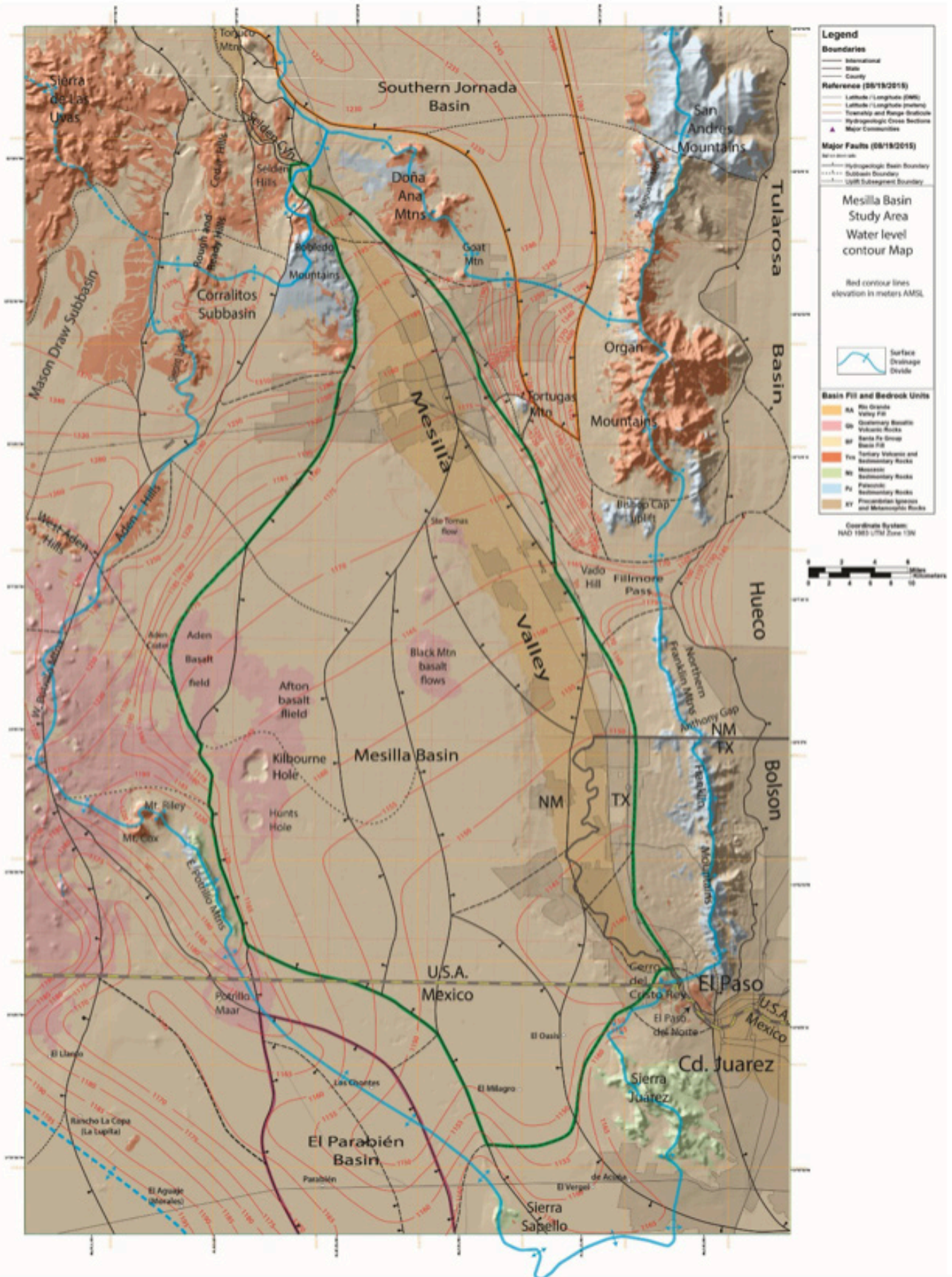


Figure 1-7. Index map to major geohydrologic features of the WRR Study Area (Fig. 1-2).

(~pre-1976) potentiometric-surface altitude at 5, 10 and 30-m contour intervals. The dashed blue line with arrows in the map's SW corner is the approximate divide between EPN-directed underflow and underflow to El Barreal.

1.6. The Rio Grande Rift Tectonic Province and Santa Fe Group Basin Fill

In simplest geologic terms, the Rio Grande rift is a subcontinental-scale product of Earth crustal extension (**Tbl. 1-1**; Chapin and Seager 1975, Keller and Cather 1994, Hudson and Grouch 2013). This tectonic feature comprises a series of deep structural basins and flanking fault-block ranges or volcanic highlands. The rift's general north-south trend is marked by valleys and canyons of the Rio Grande that extend across New Mexico from Colorado's San Luis Basin headwaters area to the lower end of the Hueco Bolson in western Trans-Pecos Texas. Most of the SFG basin fill is sedimentary, but igneous-intrusive and interbedded-volcanic rocks are locally present (Connell 2008, Hudson and Grouch 2013).

Almost all rift-basin deposits are included in the Santa Fe Group (SFG). The only exceptions are Middle- to Late-Quaternary sediments and volcanics that postdate incision of the canyons and valleys of the present throughgoing fluvial system, which was initiated about 750 ka. Basin-flanking bedrock uplifts in the EPN-MBA include the Franklin Mountains and Sierra de Juárez on the east, and the East Potrillo Mountains on to the west (**Fig. 1-8**). Thousands of meters of aggregate displacement has occurred in the past 25 to 30 Ma, and at least 1,000 m of SFG basin fill have accumulated in structurally deepest part of the MeB.

During early stages of Mesilla Basin and Hueco Bolson filling (about 30-10 Ma), closed-topographic basin (endorheic) conditions existed (*cf.* **Fig. 1-9**). As a result, ephemeral-lake plains (e.g., barreals, alinas) formed the dominant basin-floor depositional environments; and lower SFG deposits are fine-grained sediments, which form *aquitards* or *aquicludes*, but never significant *aquifers* in terms of either produced-groundwater quantity or quality (**Tbl.1-5**). Correlative SFG piedmont-slope deposits, coarse- or medium-grained, are also of relatively low permeability due to moderate to strong cementation. Productive upper SFG aquifers are dominated by deposits of an ancestral Rio Grande (ARG) fluvial system that formed about 5 Ma.

The ARG's headwaters were in south-central Colorado; and it terminated in a fluvial-deltaic complex in the still endorheic Hueco Bolson-Los Muertos Basin region (**Fig. 1-1**; *cf.* **Figs. 3-4** and **3-5**).

1.7. Background on Hydrogeologic Controls on GW Flow and Chemistry in the B&R Province

Hydrogeologic investigations of aquifers and groundwater-flow systems in the B&R province can be approached from several vantage points. Emphasis here is on hydrogeologic controls on *subsurface-water* flow and chemistry in a multi-component complex of *geologic* (i.e., solid-earth)-*material* units that typify aquifer systems throughout the Basin and Range (B&R) physiographic province (*cf.* Maxey 1968, Eakin *et al.* 1976, Mifflin 1968 and 1988, Hibbs *et al.* 1997, Hawley *et al.* 2000 and 2001, Kennedy *et al.* 2000, Hibbs and Darling 2005). *Subsurface Water* is defined in terms of the degree of saturation of available pore-space or fracture openings in the geologic-material media. It comprises two distinctive hydrologic units that are separated by a dynamic *water table* or *potentiometric surfaces*: (1) a largely unsaturated "vadose zone," which may contain disconnected bodies of saturated earth material; and (2) an underlying *saturated* or *phreatic* zone, where *aquifers* comprise another truly dynamic framework component (e.g., Meinzer 1923 [p. 5]; Helm 1982, 1984a-b, West 1996; Burbey and Helm 1999, Sheng *et al.* 2003, Bell *et al.* 2008).

In order to develop a truly functional hydrogeologic-framework model, however, factors related to the *movement* of *subsurface water* must be added to the *geologic-material* and RG-rift structural classes. From a 0.75 Ma time perspective (**Tbl. 1-3**; **Fig. 1-8**), the ultimate driving force for the *movement* of *subsurface water* relates to the highly variable nature of 1) Rio Grande-Rio Bravo discharge in a series of valleys and canyons, and 2) GW (underflow)-recharge contributions from pluvial lakes in topographically closed basins that have or once had hydraulic linkage to the throughgoing fluvial system.

As schematically illustrated in **Figure 1-9** (Hibbs *et al.* 1997), the terms *closed* and *open* are used in this study primarily in a topographic and/or hydrographic context and in reference to the surface flow into, through and from intermontane basins (*cf.* endorheic *vs.* exorheic in **Tbl. 1-5**). The terms *undrained*, *partly drained*, and *drained*, on the other hand, refer to basin types with groundwater-flow regimes that involve intrabasin and/

or interbasin movement. *Phreatic* and *vadose*, respectively, indicate saturated and unsaturated-partly saturated subsurface conditions. *Phreatic playas* (with bordering springs and seeps) are restricted to floors of *closed* basins

(*bolsons* or *bolsones*) that are *undrained* or *partly drained*. As defined by Hibbs and Darling (2005) *vadose playas* occur in both *closed* and *open, drained* basins.

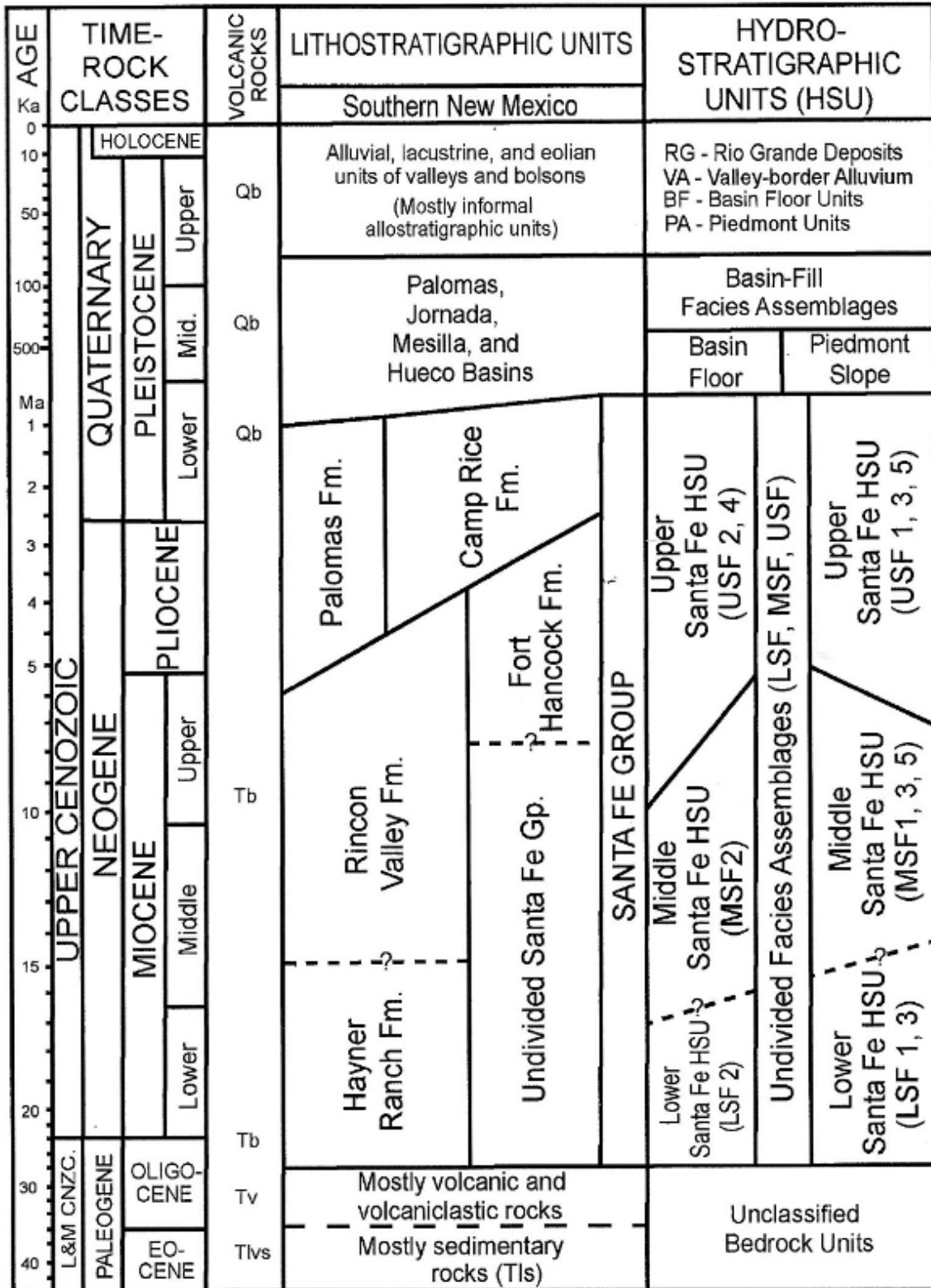


Figure 1-8. (modified from Hawley *et al.* 2009, Fig. 6). Correlation diagram of major Time-Rock classes, and lithostratigraphic and Hydrostratigraphic Units of Cenozoic Age in the southern Rio Grande-rift region of New Mexico, Texas, and Chihuahua (*cf.* Tbl. 1-2). Bedrock units: Qb–Quaternary basalt, Tb–Tertiary mafic volcanics, and Tv–older Tertiary intermediate and silicic volcanics, and associated plutonic-igneous and sedimentary rocks (*cf.* Tbl. 1-3).

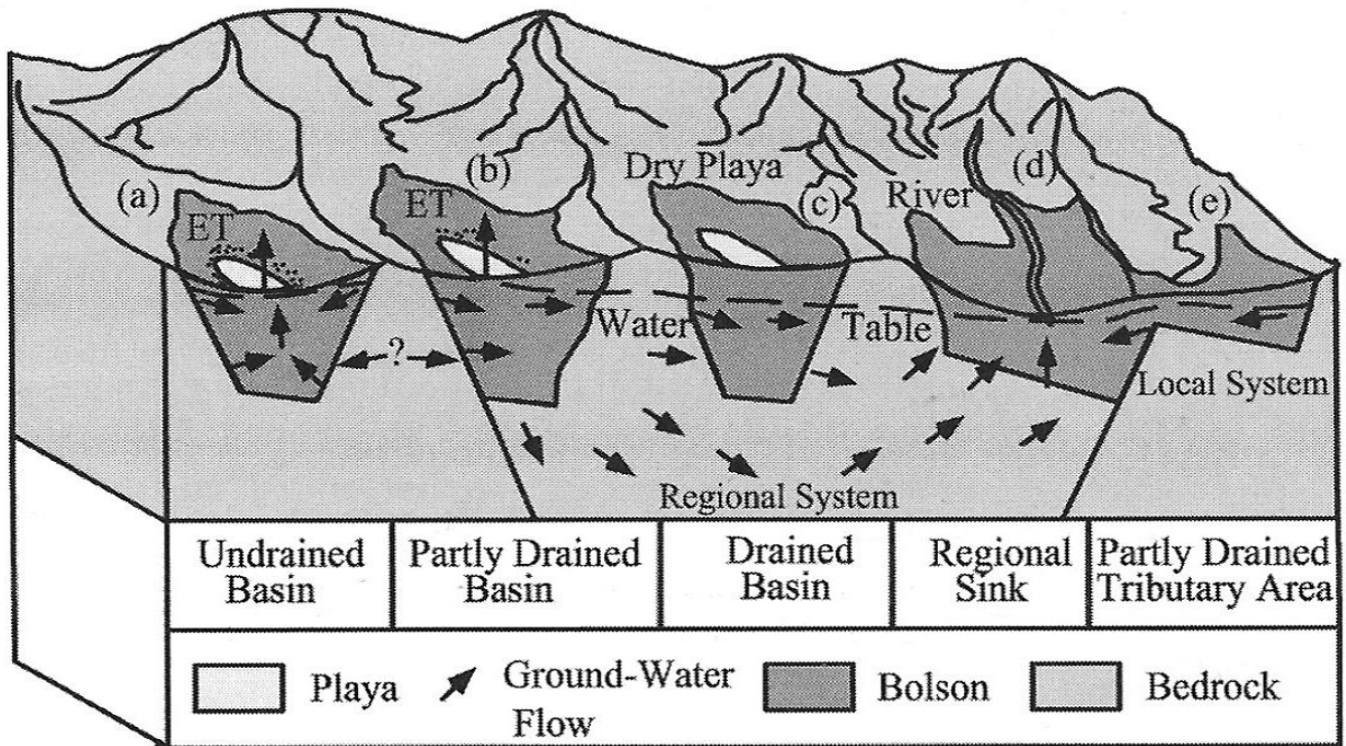


Figure 1-9. (modification of Hibbs *et al.* 1997 [Fig. 1.6] by Kennedy *et al.* 2000 [Fig. 3-2]; reproduced with NM Geological Society, Inc. permission).

The Figure 1-9 is a schematic block diagram that illustrates basic hydrogeologic framework and groundwater-flow system interrelationships in a group of topographically *closed* and *open* (*endorheic* and *exorheic*) intermontane basins, most of which have a linked regional GW-underflow component. There are 5 basin categories: (a) undrained basins with phreatic playas, (b) partly drained basins with phreatic playas, (c) drained basins, (d) regional sinks, and (e) complex-topographic, partly drained tributary basin areas.

Bedrock terranes of the basin-bordering mountain blocks are the primary source areas for basin fill aquifer recharge; and in most places, they form effective barriers to interbasin GW flow. Recharge to basin-fill aquifers occurs by the mechanisms: mountain front, mountain block, and tributary (Kernodle 1992, Hogan *et al.* 2004, Stonestrom *et al.* 2007, Tillman *et al.* 2015, Eastoe and Towne 2018, Eastoe and Wright 2019). In the first case, a small fraction of the precipitation falling on bedrock highlands contributes to the groundwater reservoir along basin margins, primarily at the upper-piedmont termini of major highland drainage basins (Maxey and Eakin 1949, Anderholm 2000, Waltemeyer 2001, Naus 2002, Scanlon 2004). “Mountain-block” recharge is the process where a significant component of precipitation percolates deeply into bedrock of a highland area and

emerges into the basin fill primarily as a subsurface-flow component (*cf.* Feth 1964; Wasiolek 1995, J. Wilson and Guane 2004, Manning 2011). Tributary recharge, where the groundwater reservoir is replenished along losing reaches of larger streams, is the major recharge process in the parts of the Mesilla and Juárez/El Paso Valleys (Kernodle 1992, Nickerson and Myers 1993, Nickerson 1998, Teeple 2017). Under predevelopment conditions, groundwater discharge in the EPN-SMBR occurred mainly through 1) contributions to gaining reaches of the Rio Grande/Bravo system, 2) inter-basin subsurface flow, 3) flow from seeps and springs, 4) evapotranspiration from basin- and valley-floor wetlands (e.g., *phreatic playas* and *cieneegas*), and 5) evaporation from open-water bodies.

RG-rift tectonic features, such as interbasin and intrabasin boundary faults and flexures, also play a significant role in GW-flow dynamics (Hawley *et al.* 2021-Part 7). GW production from most consolidated rocks of the region is limited to low-yield fracture zones, which occur in a wide variety of bedrock types including clastic-sedimentary, igneous intrusive and extrusive, and metamorphic rocks (Hawley *et al.* 2021, **TBL. 2**). Mountain blocks dominated by dissolution-prone carbonate and gypsiferous sedimentary units form local recharge sources for saline and/or geothermal

groundwater in the Mesilla Basin Region, and deserve further study (Witcher *et al.* 2004, Hawley *et al.* 2009, Kubicki *et al.* 2021). The only exception are basaltic rocks and silicic tuffs that immediately underlie or are locally interlayered with SFG basin fill. Unlike many Basin and Range areas of eastern Nevada and Trans-Pecos Texas, however, there are no extensive bodies of transmissive carbonate rocks that can provide effective conduits for large regional GW-flow systems (e.g., Mifflin 1968, Maxey 1968, Winograd and Thordarson 1975, Mifflin and Hess 1979, Harrill and Prudic 1998, Sharp 2001).

Short- and long-term climatic changes obviously have had substantial impacts on the water-resource availability in this arid to semiarid region (Allen 2005, Rango 2006, Allen *et al.* 2009, Gutzler 2005 and 2020, Creel 2010, Phillips *et al.* 2011, Jasechko *et al.* 2015, Meixner *et al.* 2016, Overpeck and Udall 2020, Paskus 2020, Bennett *et al.* 2021). As noted in **Part 3**, climatic conditions during the cooler and wetter, glacial-pluvial intervals of Middle and Late Pleistocene were substantially different than the arid/semiarid conditions of the Holocene Epoch (past 11,000 yrs. [ka]). While very large quantities of fresh to slightly saline water are stored in the basin-fill aquifer system, ongoing research demonstrated that most groundwater in storage is at least 11 ka and was recharged during the last glacial/pluvial stage of the Late Pleistocene Epoch (~29 to 11 ka; *cf.* Plummer *et al.* 2004, Sanford *et al.* 2004, Scanlon 2004, Darling *et al.* 2017, Teple 2017).

1.8. The 2007 Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP)

WRI hydrogeologic investigations since 2006 have been designed to integrate binational aspects of such activities with appropriate parts of the Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP, Alley 2013). The program originated in U.S. Public Law 109-448, which was signed by President George W. Bush on December 22, 2006 as the United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Act (US-MX TAA, 2006). The act (S.214-1) authorizes: “The Secretary of the Interior to cooperate with the States on the border with Mexico and other appropriate entities in conducting a hydrogeologic characterization, mapping, and modeling program for priority transboundary aquifers, and for other purposes.”

USGS TAAP investigations include Andrew Teple’s (2017, Fig. 14) map of the “potentiometric-

surface developed from mean winter water-level altitudes (November 2010 through April 2011) measured in wells completed in the Santa Fe Group aquifers in the Mesilla Basin study area ... (**Fig. 1-10**)” The contour interval is 20 feet (~5.9 m); and “inferred groundwater flow paths” are shown. Even though the map does not extend into Mexico, the direction of GW flow at the International Boundary is eastward toward its underflow discharge zone in the shallow alluvial-aquifer system at the lower end of the MeV. (**Fig. 1-7**). The scope of Transboundary hydrogeological investigations described in NM WRI TRC 263 (Hawley *et al.* 2021) conforms to Sections 1 and 4 of the “Act,” which specifically involves the process of “systematically assessing priority transboundary aquifers” in the “Hueco Bolson and Mesilla aquifers underlying parts of Texas, New Mexico, and Mexico; ...” From a hydrogeologic perspective, the primary WRI-Scope of Work objectives is outlined in **Tasks 2** and **4** in the “Updated U.S. Joint Work Plan for Mesilla Basin/Conejos Médanos (11/30/2010, p. 3-6):” **Task 2** - Binational bibliography compilation (Hawley *et al.* 2021-**APNDX. B**); and **Task 4** - Hydrogeologic-framework characterization.

1.8.1 TAAP-TASK 2 ACTIVITY

Task 2 exemplifies basic TAAP theme of multidisciplinary and multi-institutional database sharing, and involves compilation of published information, in an annotated-bibliographic format, on Transboundary aquifer systems in a large binational region that extends beyond the WRI Study Area into surrounding parts of Chihuahua, New Mexico and Trans-Pecos Texas. Work on Task 2 was initiated in 2007 and led by Drs. Hawley (NM WRI) and Granados Olivas (UACJ). Initial collaborating institutions include the UACJ-Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, New Mexico and Texas USGS Water Science Centers, the Texas A&M University (TAMU) El Paso AgriLife Research Center, and the University of Texas at El Paso (e.g., Granados Olivas *et al.* 2009 and 2012, Hawley and Granados Olivas 2012).

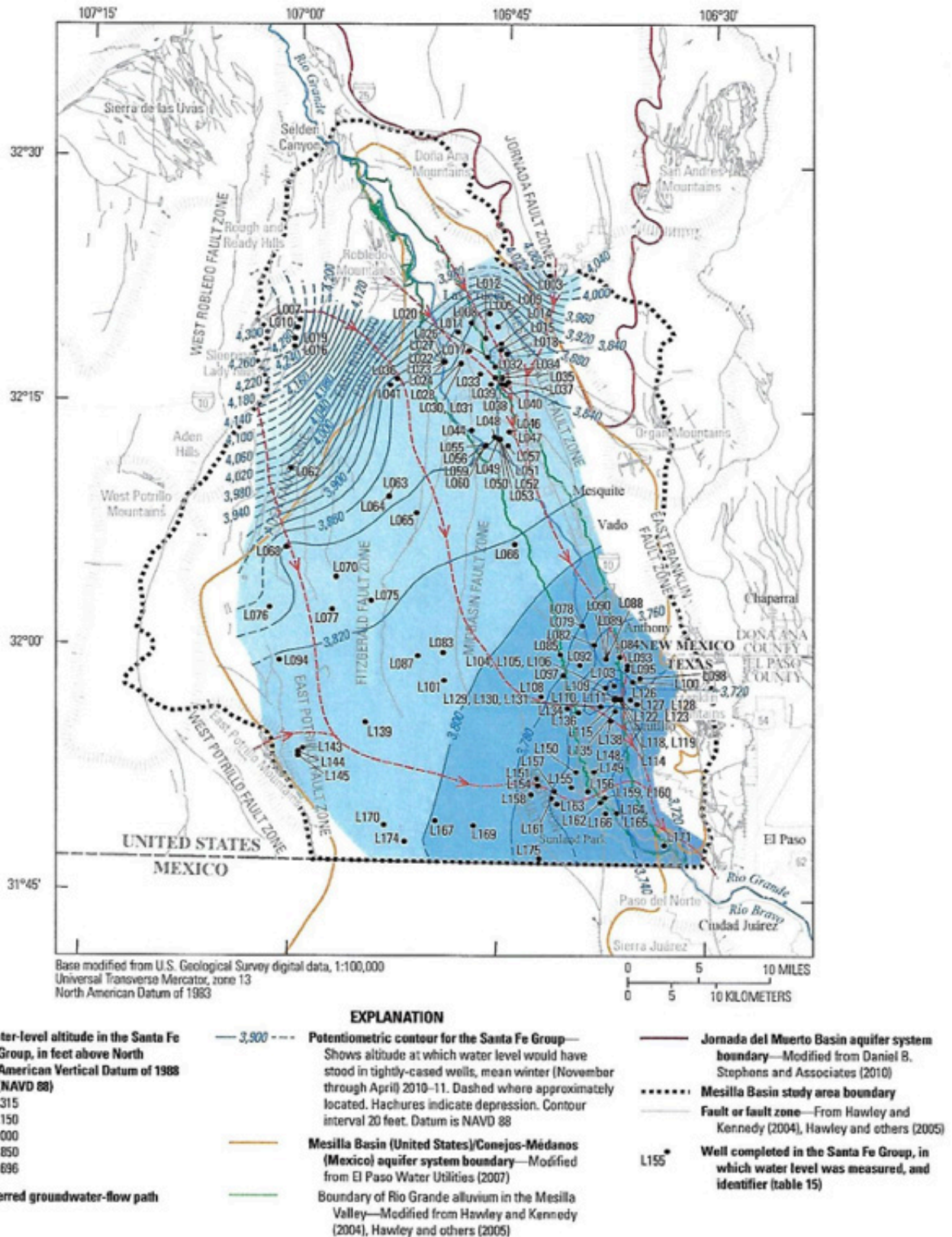


Figure 1-10. (Teple 2017, Fig. 47). Potentiometric-surface map, with inferred GW-flow paths, developed from mean winter 2010–11 water-level altitudes measured in wells completed in the MeB SFG aquifer system of Doña Ana County, NM and El Paso County, TX. Contour interval 20 ft (5.9 m). (cf. Fig. 1-7).

The ongoing annotated-bibliography compilation has been a major **TAAP-Task 2** activity, with more than 1910 entries as of June 2021. Source-document topical categories, each with a special alpha-numeric cross-referencing code, include: bibliographies and reviews; historical documents; environmental and geologic settings; basic hydrogeologic concepts; GIS/remote sensing and land-use planning; regional geohydrology; basin to local-scale aquifer systems (hydrogeology, hydrochemistry, geophysics, groundwater-flow models, and paleohydrology). Short explanatory annotations (English/Spanish) will be created for specific references where needed; and the MS Word format is designed to facilitate bibliographic conversions using EndNote® software.

1.8.2. TAAP-TASK 4 ACTIVITY IN THE SOUTHERN MESILLA BASIN REGION

The untimely death of Dr. Bobby Creel in February 2010 coincided with a major curtailment of federal and state funding support for the TAAP due to the “Recession of 2008-2009.” Loss of Dr. Creel’s seasoned and dynamic leadership in both state-wide and regional WRI programs led to unanticipated interruptions in availability of essential GIS-laboratory and related cartographic services, and resultant delays in completion of the **Task 4** hydrogeologic investigations that were originally designed to be an integral component of ongoing numerical-modeling efforts at the Regional USGS Water Science Centers in New Mexico and Texas (e.g., Hansen *et al.* 2018). Even without adequate funding and interagency support significant progress has been in **Task 4** completion (e.g., Hawley *et al.* 2021-**CHAPTERS 3 to 7**).

Prior to the onset of **TAAP Task 4** research activity, no binational effort had been made to acquire the hydrogeologic information needed for adequate understanding of the Chihuahua-sourced GW-flow systems that might contribute a significant amount of recharge to transboundary aquifers of southeastern Mesilla Basin and Mesilla Valley area (*cf.* Hawley *et al.* 2000, 2001, 2005, 2009; Witcher *et al.* 2004; Kubicki *et al.* 2021). This is in striking contrast to the many binational, multi-institutional collaborative geological and geophysical investigations in the MBR that date back to the 1960s (*cf.* **Tbl. 1-6**).

Figures 1-11 and 1-12 are index maps of the northern Chihuahua-New Mexico-West Texas border region south of 32° N latitude that show the locations of aquifer-management units and surface watersheds

The border of the WRI Study Area (**Fig. 1-3**) is in black; and the Mesilla and El Parabién groundwater (GW) Basins are outlined in green and red, respectively. Bold-red dots within the white oval show locations of 23 production wells in the new Ciudad Juárez Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMASCJ) well field. The boundaries of the “Acuífero Conejos-Médanos (ACM)” and the “Zona Hidrogeológica de Conejos Médanos” are shown with dash-dot gray and yellow lines, respectively (INEGI 2012). The blue line shows the southern Mesilla Basin’s surface-watershed boundary; and the dashed-blue line shows the general position of the GW-underflow divide between ENE-directed flow toward the Lower Mesilla Valley and EPdN, and westward flow toward the El Barreal ephemeral-lake plain in the Bolsón de Los Muertos. The approximate maximum extent of pluvial-Lake Palomas is shown in light blue.

Figure 1-12 is a more-detailed index map to an informally-named, ~17,000 km² “International Boundary Zone (IBZ). It is located between the 31° and 32° N Parallels and the 106°30' and 108° W Meridians; and it extends westward from the Hueco Bolson to the lower Mimbres River and Rio Casas Grandes basins near Puerto Palomas, Chihuahua. The extent of increased aquifer-system development now occurring in the southern part of the WRI Study Area west of Ciudad Juárez and Sierra de Juárez is shown in detail in **Figure 1-13**. The west to east light-yellow line marks the location of the new Border Wall (*cf.* **Fig. 6-2**). Black and white dots within the orange oval show producing-well locations in the new JMASCJ well-field; and the 42-inch water-transmission line that connects it with central Ciudad Juárez is shown with a red-solid and dashed line. GW production is also increasing at nearby locations: (1) Foxconn complex south of the San Jerónimo-Santa Teresa Port of Entry; (2) Santa Teresa Industrial Park, and (3) near the UPRR Intermodal Terminal and Refueling Station (**Figs. 1-2, 1-10 and 1-11**; Pacheco 2008 and 2012).

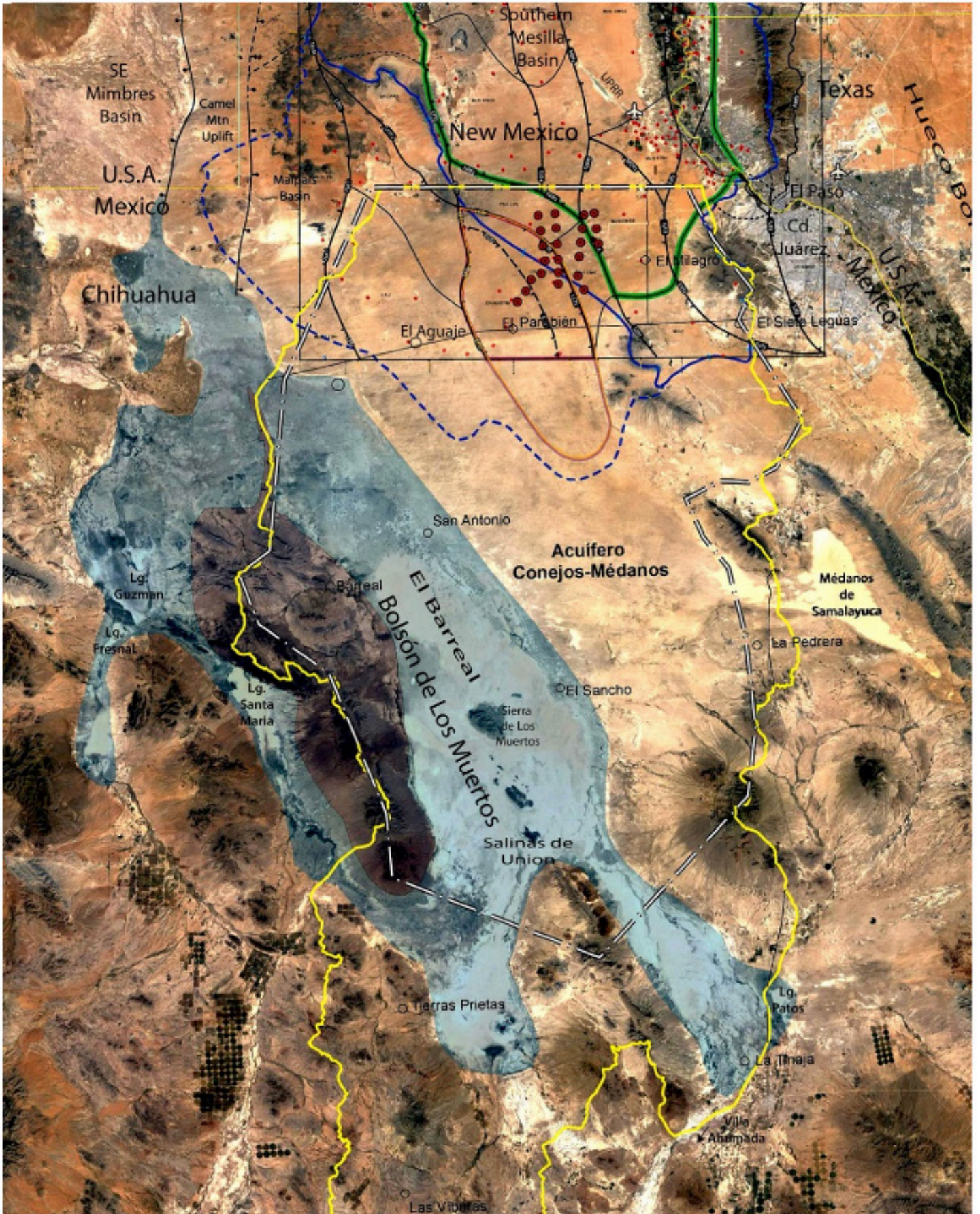


Figure 1-11 Index map for major aquifer-management units and watershed boundaries in the Chihuahua-New Mexico-West Texas border region south of the 32° N Parallel. Swanson Geoscience LLC compilation on 2018 Google earth® image base.

1-11, the NM WRRRI Study Area boundary is in black; and the Mesilla and El Parabién GW Basins are outlined in green and red, respectively. Bold-red dots within the white oval show locations of 23 production wells in the new JMASCJ well field. Boundaries of the “Acuífero Conejos-Médanos” and the “Zona Hidrogeológica de Conejos Médanos” are shown with dash-dot gray and yellow lines, respectively. The southern Mesilla Basin

boreholes used in compilation of Hawley and others (2021 TABLE 1, *cf.* **Fig. 1-10**). Locations of production wells in the new JMASCJ well field are shown with bold-red dots in a white oval show (**Figs. 1-11** and **1-13**). Blue-gray shading shows the maximum extent of Lake Palomas during its Late-Pleistocene high stands (**Figs. 1-3** and **1-11**). The southern Mesilla Basin surface-watershed boundary is in solid blue; and the dashed



Figure 1-12 Index map for the provisional “International-Boundary Zone (IBZ)” between the 31° and 32° N Parallels (*cf.* **Fig. 1-7**). Swanson Geoscience LLC compilation on 2018 Google earth® image base.

surface-watershed boundary is in blue. The dashed-blue line shows the general position of the GW-underflow divide between flow toward the Lower Mesilla Valley, and flow toward the El Barreal lake plain in the Bolsón de Los Muertos. The approximate extent of pluvial-Lake Palomas at its Late Pleistocene 1,210-m amsl high stands is shown in blue.

In the Figure 1-12, the W-E yellow line marks the new Border Wall location (*cf.* **Fig. 6-2**). The southern WRRRI Study Area is within the black rectangle; and the Mesilla and El Parabién groundwater (GW) Basins are outlined in green and red, respectively. The ACM and ZHGCM boundaries are shown, respectively, by dash-dot pink and bold-yellow lines (**Fig. 1-10**; INEGI 2012). Small red dots show locations of wells and deep-

blue line marks the approximate southwestern border of the Mesilla Basin Transboundary GW-flow system. Most of the segment SE of the Camel Mountain Uplift forms the present-day divide between NE-directed underflow toward the lower Mesilla Valley, and SW-directed underflow toward the ephemeral-lake plain of El Barreal in the Bolsón de los Muertos.

Twenty-three of the field’s production-well sites are shown in the Figure 1-13 with black and white dots in the red oval (**Figs. 1-11** and **1-12**). The W-E light-yellow line marks the location of the new Border Wall (*cf.* **Fig. 6-2**). The white rectangle outlines the southern part of the Study Area; and the southern and northern parts of the Mesilla and El Parabién GW Basins are shown in green and beige, respectively.

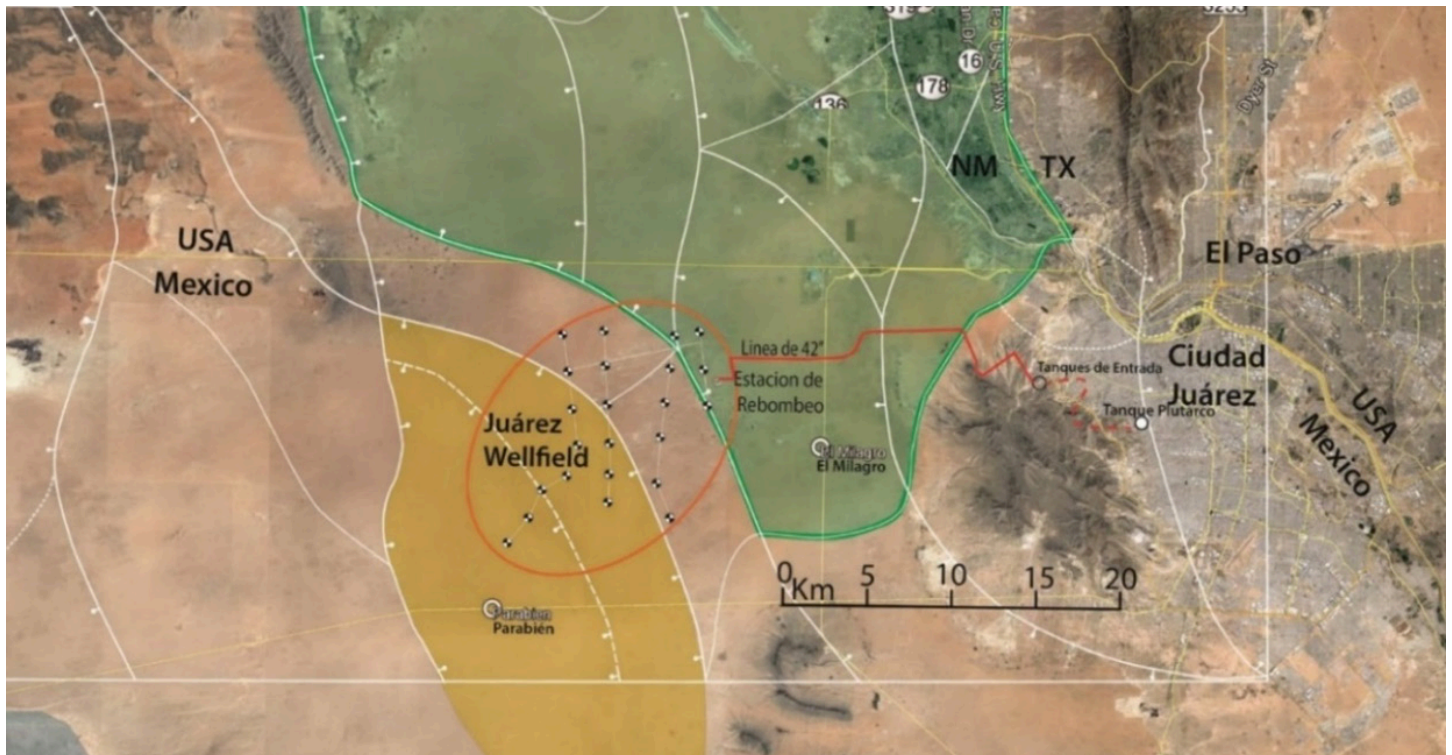


Figure 1-13 Detailed index map for the new JMASCJ well field and the 42-inch (~1.1 m) water-transmission line (red-solid and dashed) that connects it with central Ciudad Juárez. Swanson Geoscience LLC compilation on 2017 Google earth® image base.

1.9. A Remaining Problem in Hydrogeologic-Boundary Definition

A special challenge faced in binational investigations relates to resolving problems in hydrogeologic-boundaries definition in a geopolitical environment that is not yet conducive for effective collaborative research. One major remaining problem is illustrated in **Figure 1-14**, which is a facsimile copy of Figure 1 in USGS Scientific Investigations Report 2017-5028 (Teeple 2017). This index map shows locations of inferred interlinked aquifer systems in the Jornada del Muerto, Mesilla, and Conejos-Médanos basin complexes as they have been defined in recent U.S interagency studies (e.g., EPW-ND, IBWC 2010, Sheng *et al.* 2013).

The map of the Mesilla Basin (US)/Conejos-Medanos (Mex.) aquifer system (**Fig. 1-14**) was designed only for early-stage TAAP activity at a time when the NM WRRI just was beginning to update the Mesilla Basin hydrogeologic-framework model of Hawley and Kennedy (2004); and it was never intended to be a *template* for subsequent more-detailed characterization of Transboundary aquifer systems. Unfortunately, the following statements in the Introduction” to “U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report

2017–5028 (Teeple 2017, p. 3)” indicate that continued use of the 2007-vintage map has led to perpetuating a serious misunderstanding of basin-scale aquifer extent and GW-flow dynamics in the “Mesilla Basin (U.S.) / Conejos-Médanos (Mexico) aquifer system (*cf.* **Parts 7.6 and 7.7**):”

The hydrogeologic units of the U.S. part of the aquifer system consist of the Rio Grande alluvium and the underlying hydrogeologic units of the Santa Fe Group in and near the Mesilla Basin in Dona Ana County, New Mexico, and El Paso County, Texas....

The Mesilla Basin aquifer system in the United States and the Conejos-Medanos aquifer system in Chihuahua, Mexico, are hydrologically one aquifer system with no natural boundaries separating them. . . .

The Mesilla Basin/Conejos-Medanos aquifer system ¹⁰ is one of the largest rechargeable groundwater systems by total available volume in the Rio Grande Basin region of the United States and Mexico (Alley, 2013), . . . The Rio Grande has been identified as a major source of

10 The hydrogeologic, geophysical and hydrochemical information presented in NM WRRI Technical Completion Report (TCR) 363 (Hawley et al. 2021) and its appendices demonstrates that the “Mesilla Basin” and “Conejos-Médanos” aquifer systems are definitely not “hydrologically one aquifer system with no natural boundaries separating them.”

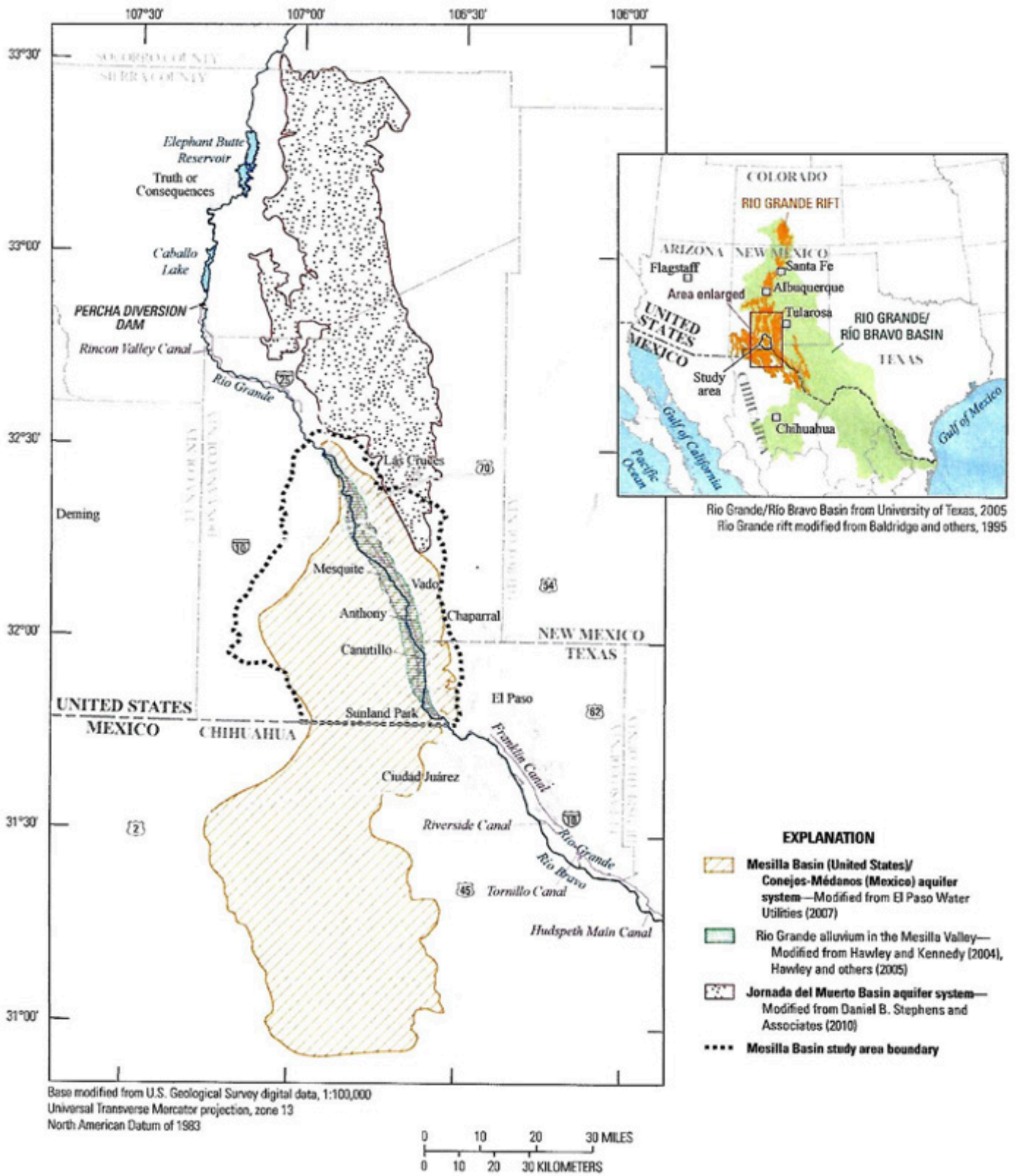


FIGURE 1-14 (Teeple 2017, Fig. 1). Index map in USGS Scientific Investigations Report 2017-5028 showing locations of inferred-interlinked basin-fill aquifer systems in the Jornada del Muerto, Mesilla, and Conejos-Médanos basin complexes of the southern RG-rift tectonic province in the Mesilla Basin-EPdN region (*cf.* EPW-ND, IBWC 2010, Sheng *et al.* 2013; Figs. 1-1, 1-3 and 1-10).

recharge to the aquifer system ¹¹ in the form of seepage losses from the river-bed to the Rio Grande alluvium in parts of the Mesilla Valley...in New Mexico ...

2. Background on the Concept of Groundwater Sustainability

W.M. Alley, T.M. Reilly, and O.L. Frank (1999) of the U.S. Geological Survey (USGS) describe the utility of “concept of ground-water sustainability” as follows:

Perhaps the most important attribute of the concept of ground-water sustainability is that it fosters a long-term perspective to management of ground-water resources. Several factors reinforce the need for a long-term perspective. First, ground water is not a nonrenewable resource, such as a mineral or petroleum deposit, nor is it completely renewable in the same manner and time frame as solar energy. Recharge of ground water from precipitation continually replenishes the ground-water resource but may do so at much smaller rates than the rates of ground-water withdrawals. Second, ground-water development may take place over many years; thus, the effects of both current and future development must be considered in any water-management strategy. Third, the effects of ground-water pumping tend to manifest themselves slowly over time. For example, the full effects of pumping on surface-water resources may not be evident for many years after pumping begins. Finally, losses from ground-water storage must be placed in the context of the period over which sustainability needs to be achieved. Ground-water withdrawals and replenishment by recharge usually are variable both seasonally and from year to year. Viewing the ground-water system through time, a long-term approach to sustainability may involve frequent temporary withdrawals from ground-water storage that are balanced by intervening additions to ground-water storage [*cf.* Alley and Leake 2004, Alley and Alley 2017].

Subjective terms like groundwater (GW) *sustainability* only provide a conceptual starting pointing in the complex processes involved in evaluation of the anthropogenic factors that impact GW-resource

11 Santa Fe Group (SFG) aquifers in the “Acuífero Conejos-Médanos (ACM)” have not received significant amounts of recharge from an entrenched RG Valley since the early part of the Late Pleistocene (estimated herein at ≥ 350 ka; *cf.* Part 4.6). On the other hand, underflow discharge from the northern part of the “ACM” GW-flow system has been a significant source of recharge to the “Rio Grande alluvium” and underlying (SFG) basin fill at the lower end of the Mesilla Valley (*cf.* Figs. 1-8, and 1-10 and 1-12).

development, especially the negative effects of “GW mining” at a time of demonstrable global climate change (e.g., Overpeck and Udall 2020, Siegel 2020; *cf.* **Part 2.5**). It is also important to note that most *sustainability* models are based on the premise that only water of “fresh” quality (i.e., $<1,000$ mg/L total dissolved solids [tds]) is being considered. Groundwaters in very productive aquifers of arid semiarid temperate regions, however, are commonly brackish with salinities in the 1,000 to 5,000 mg/L tds (Stanton et al 2017; *cf.* **Part 8.2**) ¹².

2.1. “The Tragedy of the Commons” from “Introduction to Hydrogeology” (Deming 2002, p. 22, 24):

The **tragedy of the commons** is the tendency to deplete and ultimately destroy a resource that has a common ownership. The concept was first developed by Garrett Hardin in his 1968 [*Science*] article, *The Tragedy of the Commons*. Hardin used the example of a pasture that is shared by herdsmen. Each herdsman will graze as many cows as possible, as each added cow enriches him further. This system works so long as the load imposed by the cumulative burden of all herdsmen does not exceed the carrying capacity of the pasture. At that point, Hardin (1968) wrote, “the inherent logic of the commons remorselessly generates tragedy.” The logic of the commons is that each individual is logically compelled to add further to the exploitation of the pasture, because altruistic sacrifice is not rewarded. If a herdsman were to withdraw cows from the common pasture, it would still be overwhelmed by other individuals less altruistic moving further cows onto the pasture. The only logical course for each herdsman to follow is to add still more cows to the pasture, and ultimately the common resource is ruined for all. The lesson of the tragedy of the commons is that a shared or common resource such as groundwater or surface water must be regulated by law or it may be destroyed. Alternatively, resources held in common may be sold to individuals. Individual ownership provides an economic motivation for the preservation of a resource.

12 Stanton and others (2017, Tbl. 1), define two classes of “brackish groundwater” (BGW): slightly saline—1,000-3,000 mg/L tds; and moderately saline—3,000 to 10,000 mg/L tds. Economically producible brackish groundwater (BGW) in the fresh to slightly saline quality range (~300 to 3,000 mg/L tds) is regarded as a definite asset rather than a liability in ongoing NM WRRRI studies (e.g., EPW-ND, TWDB 2010 and 2015).

TABLE 1-5: Definitions of Hydrogeologic and Hydrologic Terms.

Aquifer: A *saturated* geologic unit that is permeable enough to transmit significant quantities of water under ordinary hydraulic gradients (Deming 2002, p. 429).

Aquiclude: A rock layer that completely excludes fluid flow through it. Geologic aquicludes are rare (Deming 2002, p. 429).

Aquitard: A stratum that transmit quantities of water that are very significant for a variety of geologic problems, but is inadequate for supplying economic quantities of water to wells (Deming 2002, p. 429).

Cienegas: Perennial or intermittent wetlands located in places where the zone of saturation intersects an undissected valley- or basin-floor surface.

Closed basin (geohydrolog.): Basin with topographic closure (*cf. endorheic*), which may be *undrained, drained, or partly drained* (Hibbs and Darling 2005)

Drained basin (geohydrolog.): *Closed [endorheic-] basin* with GW underflow discharge to contiguous *endorheic* or *exorheic* basins (Hibbs and Darling 2005)

Groundwater: The part of *subsurface water* that is in the *saturated zone* (Neuendorf *et al.* 2005, p. 286); *subsurface* aqueous fluid, either saline or fresh (Deming 2002, p. 433).

Groundwater recharge: The process involved in addition of water to the *saturated zone*, naturally by infiltration from surface sources, or artificially spreading or injection (Neuendorf *et al.* 2005, p. 538).

Hydrology: The study of the occurrence and movement of water at and beneath the surface of the Earth, the properties of water, and its relationship with living and material components of the environment (Hornberger *et al.* 2005, p. 282).

Hydrogeology [also Geohydrology]—(1) The [geo-] science that deals with *subsurface waters* and related geologic aspects of surface waters... (Neuendorf *et al.* 2005, p. 311). (2) The branch of *hydrology* which studies underground fluids and their interaction with solid geologic materials (Deming 2002, p. 433).

Hydrostatic Level: The level to which water will rise in a well under its full [hydrostatic] pressure head. It defines the *potentiometric surface* (Neuendorf *et al.* 2005, p. 313).

Hydrostatic Pressure: The pressure exerted by the water at any given point in a body of water (Neuendorf *et al.* 2005, p. 313)

Hydrostratigraphic units [HSUs]: Mappable, primarily intermontane *basin-fill* deposits that are grouped on the basis of *lithofacies* composition and position in lithostratigraphic as well as time [chrono-] stratigraphic contexts (Hawley *et al.* 2001). (*See: stratigraphy, lithofacies assemblage*)

Lithofacies assemblages [LFAs]: Genetically related sedimentary deposits that are defined primarily on the basis of grain-size distribution, mineralogy, sedimentary structures, and degree of post-depositional alteration. **LFAs** are the primary components of *hydrostratigraphic units (HSUs)*, and have distinctive geophysical, geochemical and hydrologic attributes. (Hawley *et al.* 2001).

Mountain-block recharge: The process where a significant component of precipitation percolates deeply into bedrock of a highland area and emerges into the basin fill primarily as a subsurface-flow.

Mountain-front recharge: The process where a small fraction of the precipitation falling on bedrock highlands contributes to the groundwater reservoir along basin margins.

Open basin (geohydrolog.): Drained *exorheic* basin with no topographic closure (Hibbs and Darling 2005)

Partly drained basin (geohydrolog.): Basin with topographic closure (*cf. endorheic*) that contributes some GW underflow discharge to contiguous *endorheic* or *exorheic* basins (Hibbs and Darling 2005)

Phreatic Water: A term that was originally applied to only to the water that occurs in the upper part of the saturated zone under water-table conditions (syn. of *unconfined groundwater*) (Neuendorf *et al.* 2005, p. 489)

Potentiometric Surface: A surface that depicts the distribution of hydraulic heads in a *confined aquifer*. The water level in a well/piezometer penetrating the *confined aquifer* defines that surface (Hornberger *et al.* 1998, p. 286).

Saturated Zone: A region of the subsurface where pores are completely filled with water; it is bounded at the top by the water table (Hornberger *et al.* 1998, p. 287).

Subsurface Water: A non-specific term commonly applied to all water below the land surface.

Tributary recharge: The process where a significant component

Underflow: (1) Movement of groundwater . . . through a subsurface stratum. (2) The rate of discharge of groundwater through a subsurface conduit (Neuendorf *et al.* 2005, p. 696)

Undrained basin (geohydrolog.): *Closed [endorheic-] basin* with central *phreatic playa (sink)*, and no GW underflow discharge to contiguous *endorheic* or *exorheic* basins (Hibbs and Darling 2005)

Vadose zone: The zone in soils or rocks between the Earth's surface and the *water table*; pores are partly filled with water and partly filled with air (Hornberger *et al.* 1998, p. 291).

Water Table: A surface separating the *saturated* and *unsaturated* zones . . . , [that is] defined as a surface at which the fluid pressure is atmospheric (Hornberger *et al.* 1998, p. 292).

TABLE 1-6: Selected Sources of Published Information (post-1960) that Relates to the Hydrogeology of the Binational Southern Mesilla Basin (MBR) Region.

<p>A. Published information on the hydrogeologic framework of basin-fill aquifers in the United States part of the southern MBR has four primary sources:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Government documents on the geology and groundwater condition in the southern Mesilla GW Basin (e.g., Leggat <i>et al.</i> 1962, W. King <i>et al.</i> 1971, C. Wilson <i>et al.</i> 1981, Hawley and Lozinsky 1992, Nickerson and Myers 1993, and Nickerson 2006).2. Surficial-geologic mapping at a detailed-reconnaissance level, with limited deep-borehole control (e.g., Hoffer 1976, Dyer 1989, Drewes and Dyer 1993, Seager <i>et al.</i> 1987, Seager 1995, Collins and Raney 2000, and Hoffer 2001).3. Reconnaissance-level geophysical surveys (gravity and seismic), with limited deep-borehole control (e.g., Daggett and Keller 1987 and 1995, Adams and Keller 1993, and Klein 1995).4. Reconnaissance-level geothermal-resource surveys, with some deep-borehole-log control (e.g., Henry 1979, Henry and Gluck 1981, Henry and Price 1985, and Snyder 1986). <p>B. Available published information on the hydrogeologic framework of basin-fill aquifers in the part of the MBR Chihuahua has five primary sources:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Geological and geophysical field investigations of a reconnaissance nature published by Mexican federal agencies, universities and binational geoscientific societies, with facsimile copies of some reports included in APPENDIX D (e.g., Guerrero 1969, Hawley 1969, Tovar <i>et al.</i> 1978, Cantú-Chapa <i>et al.</i> 1985, SGM 1985, Araurjo-Mendieta and Casar-González 1987, Limón-González 1986, Márquez-Alameda 1992, Zwanzinger 1992, Monreal and Longoria 1999, Lawton 2004, Seager 2004, Carciumaru 2005).2. Map-based reports on the geology and hydrogeology of northern Chihuahua by Mexican Federal agencies, primarily the Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH) and Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática (INEGI) published between 1982 and 2012 (e.g., INEGI 1983a-b, 1999, 2012; <i>cf.</i> IBWC 2010). The INEGI (1983b) data base for 17 wells inventoried in 1982 provided a source of information on aquifer type, static water level, and water chemistry that was essential for 1) the compilation of Hawley and others (2021) TABLE 1 and PLATE 4 and 2) overall hydrogeologic-framework-model development (<i>cf.</i> SRH 1988 and Gutiérrez-Ojeda 2001).3. Reports with maps on the geology and geomorphology of Chihuahua by universities located in both Mexico and the United States, with some investigations involving collaboration with U.S. federal and state agencies. Most were published between 1969 and 1993 (e.g., Bell 1963, Berg 1969, Córdoba 1969a-b, Webb 1969, Córdoba <i>et al.</i> 1970, Reeves 1965 and 1969, Flores-Mata 1970, Schmidt 1973, Lovejoy 1976a and 1979, Schmidt and Marston 1981, Gómez 1983, Chavez 1986, Dyer 1987 and 1958, Hoover <i>et al.</i> 1988, Reyes Cortés 1992, Schmidt 1992, Drewes and Dyer 1993, Haenggi 2001 and 2002, Granados-Olivas 2000).4. Reports on oil and gas exploration drilling, which in this case only involved one deep borehole in the Study Area, the 16,218-ft (4.943-m) Pemex No. 1-Moyotes Well (Thompson <i>et al.</i>, 1978, Tovar <i>et al.</i> 1978).5. Three 1:50,000-scale—15 x 20-min. topographic maps (INEGI Cartas topográficas) that cover the area between the International Boundary and 31°30' N latitude, and 106°30' and 107°30' W longitude: Hoja Nos. H13A25-Ciudad Juárez, H13A24-Los Chontes, and H13A23-Nuevo Cuauhtémoc. Even with a minimum-contour interval of 10 m and general absence of ephemeral drainageways on the nearly level basin floors, these maps still allowed approximate delineation of major hydrographic boundaries, particularly where supplemented by Google earth® imagery. <p>C. Published information on the geologic framework of the southern MBR that is based on work in both nations includes reports on oil and gas exploration, geophysical surveys (gravity and seismic) and hydrogeology (e.g., Morrison 1969, Lovejoy 1976b, Hawley 1978, Thompson <i>et al.</i> 1978, Woodward <i>et al.</i> 1978, Gries 1979 and 1980, Thompson 1982, Hibbs <i>et al.</i> 1999, Jiménez and Keller 2000, Hawley <i>et al.</i> 2000 and 2005, Hoffer 2001b, Heywood and Yager 2003, Lawton 2004, Seager 2004, Eastoe <i>et al.</i> 2008, Hawley <i>et al.</i> 2009, Lucas <i>et al.</i> 2010, Averill and Miller 2013, Hibbs <i>et al.</i> 2015).</p>

2.1.1. EXCERPT FROM “THE TRAGEDY OF LAW AND THE COMMONS”—ROBERT GLENNON, MORRIS K. UDALL PROFESSOR OF LAW AND PUBLIC POLICY, UNIVERSITY OF ARIZONA

So, it is with groundwater. The doctrines of capture and reasonable use encourage exploitation of a common-pool resource. The legal rules governing groundwater use reward rational economic individuals by assuring them that the biggest pump wins. Rivers, springs, lakes, wetlands, and estuaries around the country face an uncertain future because most states have separate legal rules for regulating surface water and groundwater. For surface water, riparian law or the prior appropriation doctrine governs; but for groundwater, either a different system of prior appropriation or the doctrines of capture or reasonable use prevail.

Each proposal offers an immediate yet temporary fix to a larger problem. These alternatives are Band-Aids that may prevent an infection from getting worse, but they are not cures for the disease. They instead allow us to ignore the inescapable reality that our uses of water are not sustainable over the long term (Glennon, 2002, “Water Follies, Chpt. 15, p. 210-211; cf. Hardin 1968)

2.1.2. ASSOCIATED PRESS REPORT RAISES ALARMS OVER ARIZONA’S WATER SUPPLY (ASSOC. PRESS 2019, p. A4):

TUCSON, Ariz.—A new report by an Arizona State University think tank [Kyl Center for Water Policy] says its questionable whether Arizona can find enough water to replenish aquifers for pumping to new homes in fast-growing suburban areas without access to the Colorado River. . . .

The report warns that some suburbs of Tucson and Phoenix will struggle to find enough water to keep growing without damaging aquifers by overpumping groundwater. According to the report, the result could be land subsidence, including ground fissures, lower water quality and even the possibility of wells drying up [cf. Carpenter 1999].

And it said there’s a prospect of further hiked water rates for homeowners and financial problems for a three-county agency responsible for finding renewable water supplies for further development in Pinal County located between the two metro areas.

The report suggests that the landmark 1980 Groundwater Management Act is environmentally unsustainable and requires an overhaul. . . .

University of Arizona law professor Robert Glennon, who has written two books about water supply issues, said the new report’s authors “convincingly demonstrate that it’s a broken system that will cause great economic and personal hardship if the legislature and DWR [AZ Department of Water Resources] don’t act to implement their recommendations [cf. Davis 2019, 2020a-d].”

2.2. Groundwater Mining

Groundwater mining refers to “the process, deliberate or inadvertent, of extracting groundwater at a rate so in excess of the replenishment that the water level declines persistently, threatening exhaustion of the supply or at least the decline of pumping levels to uneconomic depths (Neuendorf *et al.* 2005, p. 286).”

2.2.1. GROUNDWATER MINING IN ARID AND SEMIARID REGIONS

A global perspective on groundwater mining in “dry areas” is provided by Dr. Shmuel Mandel (1919-2005) of the Center for Groundwater Research at the Hebrew University, Jerusalem (1979, p. 439):

In 1975 the late G.B. Maxey¹³ and the author were engaged in studies of groundwater mining. A collection of case histories revealed that overexploitation of groundwater is a very common practice, especially, though not exclusively, in dry areas. Generally, with very few exceptions, overexploitation develops unintentionally and is only belatedly recognized. Available data refer to areas where attempts are being made to rationalize groundwater mining and to plan rescue schemes [These] data are probably indicative of a problem that will become acute, on a global scale, within the next two or three decades, unless the present trends in groundwater development are reversed. . . .

2.2.2. MINING OF INTERNATIONALLY SHARED AQUIFERS (OCTAVIO E. CHÁVEZ, 2000)

[p. 238] **The El Paso-[Cd.] Juárez Case:** For centuries the river and shallow wells had been the source of water in the region. With the turn of the century, the growing urban centers along the Rio Grande, where the river becomes the international boundary, started increasingly to depend on groundwater. The primary source of the region’s groundwater is the aquifer called Hueco Bolson, which is being depleted at a dramatic rate. Both communities are mining the same source; however, Ciudad Juárez faces the biggest challenges since it currently depends on the Hueco Bolson for 100 percent of its water supplies. . . .

[p. 239] **Water Sources**—The region’s three main sources of water are the Rio Grande and two aquifers, the Hueco Bolson and the Mesilla Bolson. The Hueco Bolson extends south from the New Mexico/Texas state line to the Sierra Juárez . . . From the Sierra Juárez, the Hueco Bolson turns southeast to Indian Hot Springs. The Hueco

13 Dr. George Burke Maxey was John Hawley’s dissertation research advisor (cf., Hawley 1962, Hawley et al. 1961, Hawley and Wilson 1965). He established the State of Nevada’s Desert Research Institute’s Hydrology Program in 1961 (e.g., Maxey and Shamberger 1961), and was the recipient of the 1971 Geological Society of America O.E. Meinzer Award for his paper “Hydrogeology of Desert Basins (Maxey 1968, Hackett 1972).”

Bolson has a connection with the Tularosa Bolson on the north. This aquifer is truly shared by the two countries, and it is the key source of water for the city of El Paso, Ciudad Juárez, and military installations and smaller cities in New Mexico, Texas, and Mexico. The Mesilla Bolson is a renewable aquifer west of El Paso that is also shared with the state of New Mexico. Historically, the urban areas have exploited high quality groundwater while the region's farmers have relied on the surface waters of the Rio Grande, managed downstream of Elephant Butte Dam by a complex system of international treaties and interstate compacts [Fig. 1-2; Parts 6.4-6.8].

2.3. Realities Facing Long-Term GW-Resource Development in the EPN-MBA

In the context of long-term GW-resource “sustainability,” and considering the complexity of the *hydrogeological* and *geopolitical realities*, the problems addressed in this chapter demand serious binational attention. Local hydrogeologic conditions have the following basic attributes: Except for valley-floor seepage losses from the Rio Grande/Bravo fluvial system (large, but intermittent), and localized recharge from bordering mountain ranges (small and seasonal), the GW reserves in the MB-EPNA are replenished from three primary sources: (1) Rio Grande Project (RGP, Fig. 1-4) irrigation return flow—since 1916; (2) treated municipal wastewater; and (3) underflow contributions from GW stored in basin-fill and bedrock aquifers in contiguous intermontane-basin and mountain areas. In the latter instance most of the GW stored in SFG basin fill is old, has quality in the 500 to 3,000 mg/L tds range, and has not received a significant amount of perennial recharge since end of the Pleistocene Epoch (Tbl. 1-3; cf. Fig. 5-3).

Ever-increasing disruption of RGP-water deliveries also reflects the contemporary *realities* of 1) global climate change and seasonal shifts in temperature and precipitation maxima; 2) accelerating water-user demands throughout the RG watershed upstream from EPdN; 3) increasing competition between I-Ag and M&I users for the limited fresh-water reserves; 4) interstate-compact and binational-treaty obligations for equitable sharing of surface- and subsurface-water resources; and 5) ubiquitous challenges facing the effective protection of both surface- and subsurface waters from anthropogenic pollution.

2.4. Impacts of Climate-Change on Water-Resource Availability in Western North America

The following prescient inferences on regional hydrologic impacts of climate change and global warming in western North America are based on early computer modeling of Earth-atmospheric conditions by UNM Earth & Planetary Science Professor David S. Gutzler, Ph.D. (2005, p. 277):

A computer model simulation of atmospheric conditions 18,000 years ago, during the last ice age, is compared with an ensemble of simulations of future climate warmed by increasing greenhouse gases. We consider whether the ice age simulation and the future “global warming” simulation present opposite climate anomalies in New Mexico compared to current climatic conditions. Not surprisingly, this turns out to be the case for temperatures in both winter and summer (colder 18,000 BP, warmer in the 21st Century). Simulated winter precipitation also exhibits opposite departures relative to current conditions: the ice age simulation shows more precipitation, consistent with a larger meridional temperature gradient across North America, whereas the global warming simulation is drier. Summer precipitation, however, is decreased relative to the current climate in both the ice age and the warmer climate. The combination of wet winters and cold summers in the Pleistocene is consistent with the existence of large lakes in Southwest North America at that time. If the future climate simulation holds true, with drier conditions in both winter and summer, then New Mexico could face quite difficult hydrological conditions that herald persistent drought [cf. Hurd *et al.* 1999 and 2006, Rango 2006, Creel 2010, Gutzler and Robbins 2011, Chavarria and Gutzler 2018, Davis 2019, Ward *et al.* 2019, Gutzler 2020, Paskus 2020, Bennett *et al.* 2021].

Present-day confirmation of the scale of “Climate change and aridification of North America” is offered by 2007 Nobel Laureate, Johnathan Overpeck of the University of Michigan, and Bradley Udall, Senior Water and Climate Scientist at Colorado State University (2020-PNAS):

In the southwest United States and adjacent Mexico, the implications [of climate change] are dire for water security and ecosystems. More severe extreme heatwaves and dust storms are also already occurring, and these and other impacts of aridity will only increase until the cause is halted. Across North America, greater aridity is being offset with increased groundwater use, but this strategy has limits in the many places, such as the Southwest and the High Plains, where groundwater use exceeds recharge and is thus unsustainable [cf. Konikow and Leake 2014, Meixner *et al.* 2016, Bryan 2020 and 2021, Davis 2020a-d, Paskus 2020, Williams *et al.* 2020, Bennett *et al.* 2021].

3.Regional Physiographic and Geomorphic Setting

physiographic province—A region in which all parts are similar in basic geologic structure and climate, and which has consequently a relatively uniform geologic history; a large region whose pattern of major relief features or landforms differs significantly from that of adjacent regions. Provinces are commonly subdivided into “sections.” Adapted from Neuendorf *et al.* 2005, p. 490; *cf.* Fenneman and Johnson 1946, Hawley 1969 and 2005).

3.1. Mexican Highland Section of the Basin and Range Physiographic Province

Intermontane basins of the Basin and Range (B&R) province–Mexican Highland section (MHS) have three major landscape components: piedmont slopes, basin floors, and river valleys. Piedmont slopes comprise 1) narrow erosional surfaces (rock pediments) adjacent to mountain fronts, and 2) broad fan-piedmont surfaces formed by coalescent alluvial fans, or by alluvial slopes without distinctive fan morphology (Gile *et al.* 1981). The central parts of basin are commonly very large in comparison to the size of flanking mountain uplifts and their proximal piedmont slopes. They include extensive remnants of relict fluvial-deltaic plains constructed by the Pliocene–Early Pleistocene Ancestral Rio Grande (ARG; *cf.* **Figs. 3-1, 3-4, 3-5** and **6-2**; Hawley 1975). Basin floors comprise a variety of landforms depending on 1) whether or not a given basin has topographic closure, and 2) the regional climate/geomorphic-process setting. Basin-floor landforms in endorheic basins include alluvial plains that terminate in ephemeral-lake plains (e.g., barreals, playas and sinks; **Figs. 1-1, 1-8, 1-10** and **3-1**; **Tbl. 1-5**).

Figure 3-1 (Hawley *et al.* 2009, Fig. 10) is a schematic depiction of major Quaternary-landscape features of the Mesilla Basin region (MBR; **Fig. 1-2**). Valley and canyon reaches of the Rio Grande-Rio Bravo that developed during Middle and Late Pleistocene time are in yellow. The stipple patterns show approximate basin-floor areas inundated by the deepest Late Pleistocene stages of pluvial lakes Palomas in NW Chihuahua and Otero in the central Tularosa Basin (**Fig. 1-1**). Pink shading shows the approximate extent of the Ancestral Rio Grande (ARG) distributary drainage network that spread out from a trunk-ARG system in the Palomas Basin in Pliocene and early Pleistocene time (*cf.* **Figs. 3-4** and **3-5**; Mack *et al.* 1997, and Connell *et al.*

2005 [FIG. 11]). Remnants of the Early Pleistocene ARG fluvial-deltaic plain form parts of the “La Mesa geomorphic surface” of Ruhe (1964) and Gile (1967) (*cf.* **Part 3.4.2**).

In the Figure 3-1, the approximate area covered by the Ancestral Rio Grande (ARG) distributary drainage network that spread out from a trunk-ARG channel system in the Palomas Basin is in pink (Connell *et al.* 2005 [FIG. 11]). The deeply entrenched middle- to late-Quaternary Rio Grande-Rio Bravo Valley is in yellow. The stipple pattern shows approximate areas occupied by the deepest stages of two Late Pleistocene pluvial lakes: Palomas (NW Chihuahua)-about 3,000 mi² (7,770 km²) and Otero (NM)-about 745 mi² (1,930 km²). Remnants of the Early Pleistocene ARG fluvial-deltaic plain comprise parts of the “La Mesa geomorphic surface” of R.V. Ruhe (1964).

In a 2008 *Historical Note* for the Journal *Ground Water*, John Hawley and Michael Kernodle (p. 511) recognized the early seminal contributions by Cyrus F. Tolman (1873-1942) on the close relationship between the region’s groundwater geology and its Basin and Range province geomorphic setting:

Based on early field observations throughout the B&R region,¹⁴ C.F. Tolman (1909) greatly refined [R. T.] Hill’s ([1996 &] 1900) *bolson* concept by making the fundamental hydrogeologic distinction between depositional environments in aggrading intermontane basins with topographic closure (*bolsons*) and those that are *open* in terms of both surface and subsurface flow (*semibolsons*). He, and later Kirk Bryan (1938), recognized three basic lithofacies-assemblage classes in a continuum of closed and open intermontane-basin fills. Piedmont-slope lithofacies assemblages (e.g., coalescent alluvial-fans) occur along the margins of both basin types, while basin floors in closed [endorheic] systems include deposits of alluvial channels and flats that grade to terminal playa-lake plains [e.g., barreals/barrials]. In marked contrast, floors of [exorheic] *semibolsons* with surface-flow outlets include deposits of through-going fluvial systems that may or may not be deeply incised. Tolman is probably most noted as the author of the first “Ground Water” textbook (1937); but his early distinction of *bolson* vs. *semibolson* hydrogeomorphic systems was later realized in better defined conceptual models of Basin and Range ground water flow regimes (e.g., Eakin *et al.* 1976, Mifflin 1988, Hawley and Kernodle 2000, Hibbs and Darling 2000 [*cf.* Deming 2002, p. 414]).

14 Ezequiel Ordóñez (1867-1950), former director of the Instituto de Geología at the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), used “Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras” as the name for the “extension of the Basin and Range Province” into Mexico (1936 [p. 1289]; *cf.* Ordóñez 1942, Tamayo 1968 [p. 52-53]).

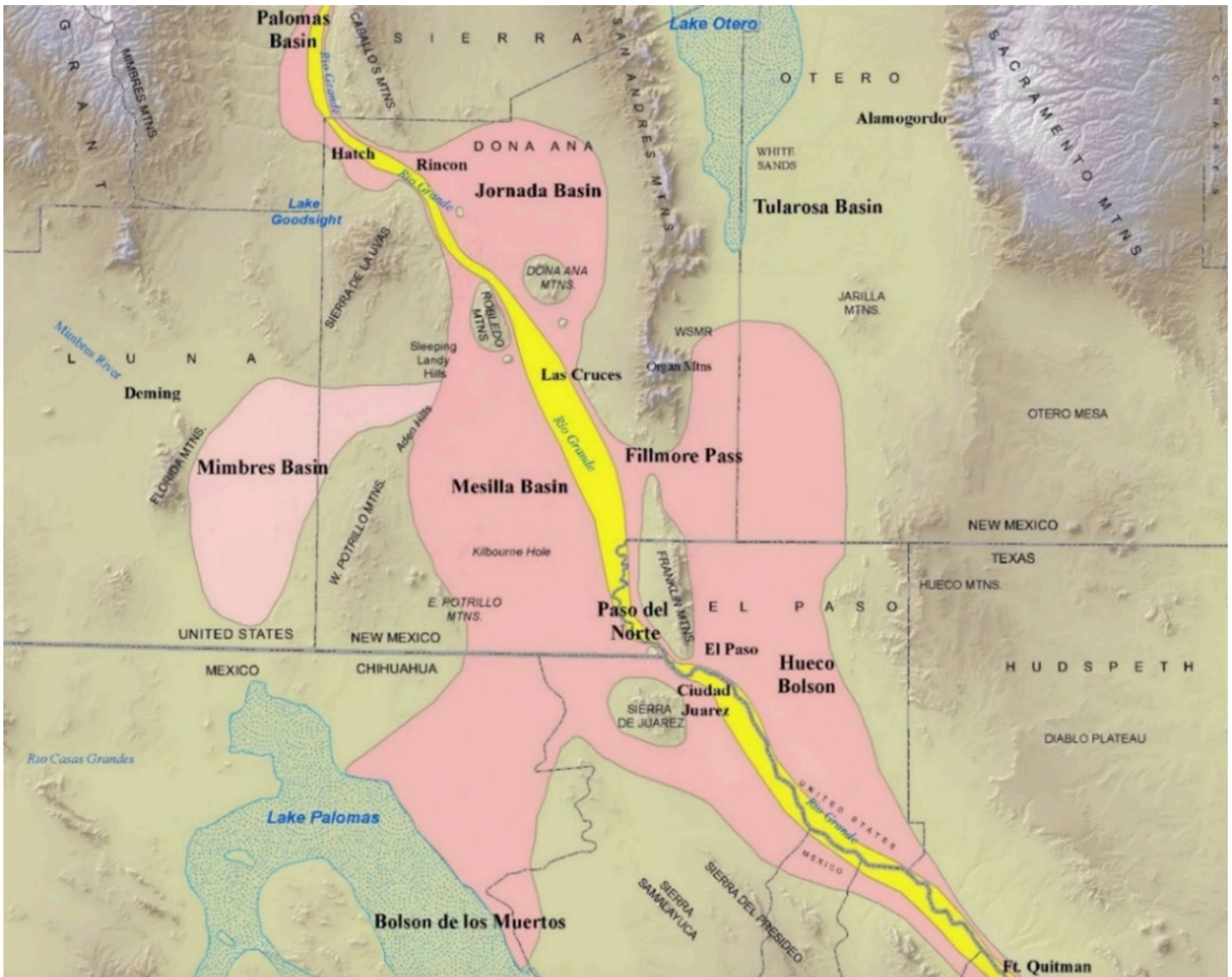


Figure 3-1: (Hawley *et al.* 2009, Fig. 10). Schematic depiction of major Quaternary-landscape features of the Mesilla Basin region (*cf.* **Figs. 1-3** and **1-4**). USGS-DEM base.

Figure 3-2 and **Table 3-1** (Hawley 1969, Fig.1 and Tbl. 1) illustrate the first detailed classification of “geomorphic features of northwestern Chihuahua. . .” The information was developed in 1968 and 1969 as part of soil-geomorphology and groundwater-resource research program in northwestern Chihuahua that was co-sponsored by the Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH), and the UDSA-Soil Conservation Service (SCS-now NRCS; *cf.* **Part 7.3**). As noted in **Part 1.1 (Fig. 1-4)**, most of the MBR is in the Mexican Highland section (MHS) of the Basin and Range (B&R) physiographic province, which includes the informally named the International Boundary Zone

(IBZ) in WRI Transboundary Aquifer Assessment Program (TAAP) hydrogeologic studies that were initiated in 2007 (**Figs. 1-4, 1-11** and **1-12; Part 1.6**).

EXPLANATION

Localities		3	Sierra de La Compana		
A	La Ascensión	4	Sierra de Carcay		
B	Buenaventura	5	Sierra de La Catarina		
C	Carretas Pass	6	Sierra del Cristo		
Ch	Chihuahua City	7	Sierra Cumbres de Majalca	12	Ranges Designated in Figure 1 and Text
Co	Columbus, N. M.	8	Sierra de Juárez		Continental Divide
Cu	Cuauhtémoc	9	Sierra del Nido		
CG	Nuevo Casas Grandes	10	Sierra del Presidio		
CJ	Colonia Juárez	11	Sierra de La Samalayuca		
D	Delicias	12	Sierra de San Joaquin		
EP	El Paso-Juarez	13	Sierra de San Luis		Other Ranges
ES	El Sauz	14	Sierra de San Pedro		
Ga	Galeana	15	Sierra de Santa Rita		Sierra Madre/Basin and Range Province Boundary
Gu	Guerro	16	Sierra de Las Tunas		
GM	Gran Morelos				
J	Janos				
LIC	Llano de Carretas	Lake Plains (elevation in meters)			
Ma	Madera	LBa	Laguna Babicora	△ 2868	Elevations of Major Peaks in Meters
Mo	Moctezuma	LBu	Laguna Bustillos		
MS	Médanos de Samalayuca	LC	Laguna <u>del Cuervo (de las Hormigas)</u>		
P	Las Palomas	LE	Laguna Encinillas		
SI	Santa Isabel	LG	Laguna de Guzman		
SM	San Miguel de Babicora	LM	Laguna de Los Mexicanos		Basin and Range Section Boundaries
VA	Villa Ahumada	LLM	Laguna de Los Moscos		
		LP	Laguna de Los Patos		Tour Route
		LS	Laguna de Santa Maria		
		L'Ta	Laguna Tarabillas		
		L'Ti	Laguna Tildio		
Mountain Ranges					
1	Sierra de La Breña				
2	Sierra de La Calera				

Figure 3-2b: Explanation of names and symbols on Figure 3-2a (edited facsimile copy of the explanation for FIG. 1 in Hawley 1969, with NM Geological Society, Inc. permission). "Tour Route north or 32°N is Mexico Federal Highway 2.

TABLE 3-1: (edited facsimile copy of Hawley 1969, TBL. 1; with NM Geological Society, Inc. permission). Geomorphic "CHARACTERISTICS OF [Major] PHYSIOGRAPHIC UNITS" in Northwestern Chihuahua and Adjacent Areas (105° to 109° W. Longitude, and 28° to 32° N. Latitude; cf. Fig. 3-2a, b).

TABLE 1. CHARACTERISTICS OF PHYSIOGRAPHIC UNITS IN NORTHWESTERN CHIHUAHUA AND ADJACENT AREAS (107° to 109° W. Longitude, 28° to 32° N. Latitude)

PHYSIOGRAPHIC UNIT	SIERRA MADRE OCCIDENTAL	MEXICAN BASIN AND RANGE SECTION	
		BOLSON SUBSECTION	BABICORA-BUSTILLOS
Total Area (Km ²)	31,000	107,500	25,000
Area of Internal Drainage/Total Area (%)		70	29
Area of Ranges/Total Area (%)		19	37
Percentage of Ranges Composed of:			
Mainly carbonate sedimentary rocks	<0.2	35	<0.3
Mainly rhyolitic and andesitic volcanics	>99.6	61	>99.7
Mainly igneous intrusive rocks	<0.2	<2	
Mainly basalt (Quaternary?)		<3	
Percentage of Basin Areas in Active Dunes		>0.5	
Percentage of Basin Areas in Playas (Barrials)		2.5	<2
Percentage of Total Area Below 1220m. (4000 ft.)	9	15	0
Percentage of Total Area Above 1830m. (6000 ft.)	54	2.4	97.5
Percentage of Total Area Above 2440m. (8000 ft.)	5.5	<0.02	3.5
Highest Elevation in Meters (Feet)	3103(10,180)	2602(8532)	2978(9774)
Lowest Elevation			
Basin Floor		1150±(3770±)	1980±(6490±)
River Valley floor	550(1800)	850(2785)	1600(5250)
Range in Mean Annual Precipitation (mm)	<400->1100	<150->400	<300->600
Range in Mean Annual Temperature (°C)	<10-20	15-20	10-18
Range in Aridity Index ($I = \frac{P}{T+10}$)	15-50	<5->15	10-30

3.2. Hydrology of an “Exotic River:” The “Rio Grande del Norte” (Northern Rio Grande-Rio Bravo)

A defining characteristic of the Historic record of discharge of the northern Rio Grande-Rio Bravo (Rio Grande del Norte) between the Española Basin and the lower Hueco Bolson (near Fort Quitman) is its high variability, both in terms of annual and seasonal values, and river-channel/shallow-aquifer hydraulic-connectivity (e.g., Richardson *et al.* 1972, Mueller 1975, Peterson and J. Wilson 1988, Frenzel and Kaehler 1992, Nickerson and Myers 1993, Nickerson 1998, USGS 1965 and ND, Western Water Assessment [WWA] 2009, Harris 2012, Lehner *et al.* 2017). Since no-flow channel reaches are common, the river in the MBR is more properly classed as an intermittent stream rather than as a perennial one.

The following review by historian and former NM WRRRI Publications Editor, Linda H. Harris succinctly describes discharge-variability of the “Rio Grande del Norte,” and its tristate/binational geopolitical implications with respect to both surface- and subsurface-water “conservation:”

A Grand River (Linda Harris, 2012, p. 229-230):

The very nature of water makes it an elusive subject at best. Because it honors only geologic boundaries and the laws of hydrology, water can complicate man’s most reasoned attempts at regulation. That is particularly true in this corner of the Southwest where El Paso and New Mexico share common hydrological resources. The region receives some 8 inches of precipitation a year, mostly during July and August. Early on, farmers had laid claim to the surface waters of the Rio Grande for irrigation, leaving cities like El Paso and Las Cruces forced to depend upon groundwater aquifers for their municipal needs. When the river runs low, farmers also tap into the aquifers for supplemental irrigation.

Although El Paso’s legal battle was over rights to groundwater in New Mexico, the Rio Grande and its underflow dominate the overall water supply picture. The river, which begins as snowmelt, winds its way through the San Luis Valley in southern Colorado, pure and blue as the sky. By the time it reaches the border between New Mexico and Texas [and Chihuahua], the river, slowed by silt, is the color of milk chocolate. At El Paso it angles southeast until it reaches the Gulf of Mexico, a meandering 1,800-some miles from its headwaters in Colorado. While today’s Rio Grande hardly lives up to its “grand river” title (the flow of the Colorado River is 17 times greater), it reins as the region’s only renewable water supply.

For most of its history the region’s most important river also has been [its] most unpredictable. Historically

the Rio Grande was a shallow meandering river during the winter. But heavy spring snowmelt and summer storms could quickly send the river overflowing its low banks, creating a floodplain as much as five miles wide in parts of the Mesilla Valley. During the flood of 1865, the Rio Grande dramatically altered its course through the valley. During the flood, the river cut a new course west of Mesilla, leaving the village situated on the river’s east bank. El Paso experienced a similar boundary shift in 1867 when the flooding Rio Grande changed its course and moved south into Mexico. The new channel created an island, known as the Chamizal, between the old river border and Mexico. The Chamizal boundary dispute was finally settled in 1963 when both nations signed an agreement dividing the land between them [*cf.* Part 6.7].

Every ten summers or so, the river also ran dry, with droughts sometimes lasting several months. The drought of 1879 was so severe that farmers in Las Cruces abandoned some 2,500 acres of farmland for lack of irrigation water. Demands on the river had increased so much following the Civil War that by 1880, farmers were irrigating nearly every piece of farmland along the Rio Grande in Colorado and New Mexico. By the 1890s, upstream irrigators were taking so much water from the river that farmers downstream in the Mesilla and El Paso valleys as well as in Mexico sued for a guaranteed share of the Rio Grande [*cf.* Part 6.4]. In order to allocate the shares, the U.S. Bureau of Reclamation started the Rio Grande Project [Fig. 1.4], which furnishes irrigation water for about 178,000 acres of land. Part of the project included Elephant Butte Dam, which was completed in 1916 to store water for downstream users [Kelley *et al.* 2007]. Below Elephant Butte and Caballo dams, the Rio Grande now follows a course laid out by the Bureau to control flooding [Glover 2018]. Also, because of its importance to the region’s economy and the number who share its supply, the water is released from the reservoirs according to treaty obligations to Mexico, provisions of contracts entered into between the irrigation districts in the Rio Grande Project, and other legal and legislative mandates [*cf.* Part 6.8; Pacheco 2020].

According to Clyde S. Conover of the USGS-Water Resources Division (1954, p. 16):

The flow of the Rio Grande in [the Rincon-Mesilla Valley] area in summer is maintained principally by releases from Elephant Butte and Caballo Reservoirs and in the winter by return drainage flow. Prior to the [1916] construction of Elephant Butte Dam the river was often dry for months at a time. Slichter (1905, p. 21) states that there was no water in the Rio Grande below El Paso for 9 months prior to August 25, 1904.

“Historian-anthropologist Neal Ackerly (1999, 2000) has taken two approaches in obtaining reasonable approximations the long-term fluctuations in Rio Grande discharge. In the first, Ackerly (1999) relied primarily on Historic narratives of onsite and remote observers, with the latter including an 1811 third-hand

account by Baron Alexander von Humboldt about a (≥ 50 “leagues” [~ 210 km]) reach of the river centered near EPdN that “became dry [for several weeks]” in 1752 (1999, p. 27).” Ackerly’s second (2000) approach used of tree-ring records, here the 1480 to 1964 “Fort Wingate series,” with some calibration provided by 1896 to 1964 “San Marcial gauging station data;” and he uses extended tree-ring records as “proxy data” in order to learn more “about long-term variability” in Rio Grande flow (2000, p. 1; *cf.* WWA 2009, Sandoval Solis 2011, Van West *et al.* 2013, Lehner *et al.* 2017). According Ackerly (1999, p. 27-28):

The technical name for what is being described here is an “exotic” river in which flows typically diminish with distance from headwaters and/or ones in which surface flows periodically disappear beneath the bed of the river, only to reappear some distance downstream when (typically) impermeable subsurface dikes force water up toward the surface of the river’s bed [*cf.* **Part 7.6**].

In short, the Rio Grande did not always flow every year and certainly did not flow in the same amounts from year to year. Equally important, not all portions of the Rio Grande contained water even during the same year; instead, surface flows ceased in some parts of the river while other parts of the river continued to have surface water.

3.3. Valleys and Canyons of the Rio Grande-Rio Bravo Fluvial System

The Rio Grande-Rio Bravo fluvial system in the EPN-MBA traverses one bedrock constriction or “narrows” and two valley sections in bordering RG-rift basins: The Mesilla Valley (MeV) in the eastern Mesilla Basin, EPdN, and the El Paso/Juárez Valley in the western Hueco Bolson. The existing river-valley/canyon landscape is the product of the middle- to late-Quaternary valley/canyon incision, widening, and partial back-filling in a section of the RG-rift that extends from the Albuquerque Basin to the Presidio Bolson (*cf.* **Figs. 1-1 to 1-5; Parts 3.6 and 4.5**).

The 1990-1992 USGS numerical “simulation of ground-water flow in the Mesilla Basin” included an assumption, based on 1898-1904 measurements by W.T. Lee (1907 (p. 32) of a pre-Elephant Butte Dam average river flow through Selden Canyon of 700 cfs (625.54 m^3/a ; (Frenzel and Kaehler 1992, p. C38). However, peak discharge during floods in 1904 and 1905 in the San Marcial-El Paso reach of the river ranged from 122.33×10^6 m^3/d (50,000 cfs) at San Marcial (10/11/1904) to 58.72×10^6 m^3/d (24,000 cfs) at El Paso (6/12/1905). Post-Rio Grande Project (RGP-Elephant Butte Dam)

average-annual discharges at the Caballo and American (EPdN) Dams have been reported, respectively, at about 75,558 and 44,446 hm^3/a . Maximum daily discharge has usually been less than 142 to 383 m^3/s (5,000-10,000 cfs) since dam completion and the onset of RGP operations in 1915 (<http://water.usgs.gov/nm/nwis/sw>).

3.3.1. MESILLA VALLEY OF THE RIO GRANDE

The head of the Mesilla Valley (MeV) of the Rio Grande is at Leasburg Dam, which is located at the mouth of Selden Canyon near the site of Fort Selden (1865-1890) and the Village of Radium Springs (**Fig. 1-5**). The dam (crest alt. 1,207 m) was constructed in 1908; and it is one of the oldest irrigation-diversion structures on the river (Julyan 1996, p. 201). The area of its upstream watershed is about 72,520 km^2 and includes parts of Colorado’s San Luis Basin and Southern Rocky Mountains physiographic province. The MeV is 100 km long, and as much 8 km wide (**Figs. 1-3 and 1-5**). Valley floor area, including the river channel and floodplain, is about 557 km^2 , or 55,687 hectares. The floodplain is 90-110 m below adjacent parts of the West Mesa fluvial-deltaic plain of the Ancestral Rio Grande (ARG—La Mesa geomorphic surface, **Fig. 3-1**). The valley-floor altitude decreases from about 1,207 m at Leasburg dam to about 1,135 m at the head of EPdN near Courchesne Bridge and Anapra; and average floodplain gradient is about 0.001 (1 m/km).

Much of the valley floor is continues to be used for intensive-irrigation agriculture (Bulloch and Neher 1980, Wilson *et al.* 1981, Peterson *et al.* 1984, Frenzel and Kaehler 1992, Esslinger 1996, Walton *et al.* 1999, SSURGO 2002/2003, Tillery *et al.* 2009, USBOR 2011). As such, it is occupied by a network of canals, ditches, laterals, and drains that now effectively replace much of the floodplain’s initial hydrologic function in terms of recharge to, storage in, and discharge from the MeV’s shallow-aquifer system (Fig. 3-3). Key historic-baseline documents on the fluvial geomorphology and soils of the RG Valley floor include: (1) “Maps of Mesilla Valley, showing various known river channels: (U.S. Reclamation Service 1914);” and (2) the 1912 USDA Bureau of Soils “Soil Survey of the Mesilla Valley, New Mexico-Texas (Nelson and Holmes 1914).” The latter map shows details of soil-texture classes to a depth of about 1.83 m (6 ft), and printed on a 1:63,360 scale, 2-ft (0.61 m) contour interval plane-table topographic base. It should also be noted that most of the 1912 water-table was within 1.83 m of the floodplain surface.

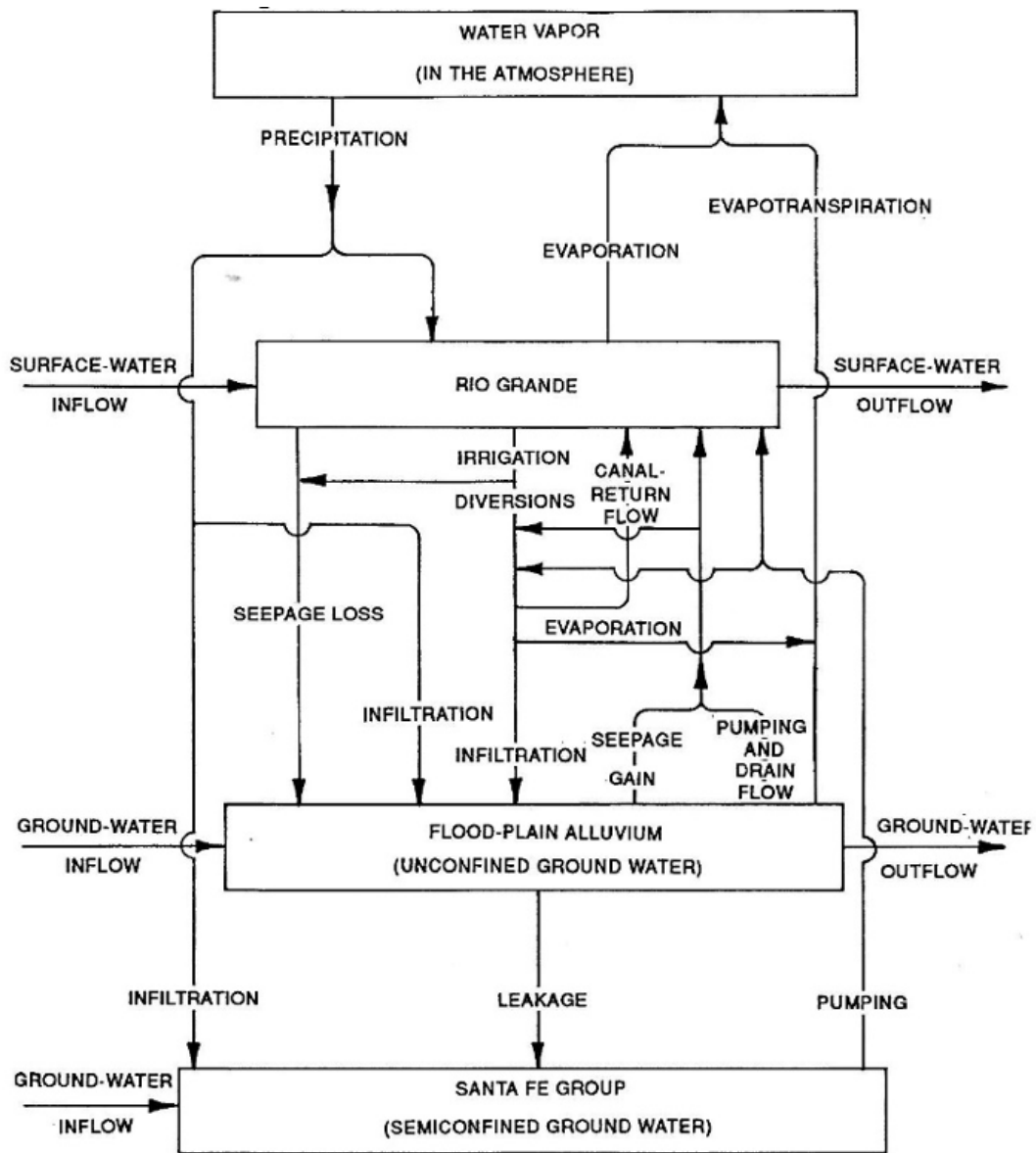


Figure 3-3: (Nickerson and Myers 1993, FIG. 10). Generalized surface and shallow-subsurface circulation of water in the Rio Grande channel and floodplain area of the inner Mesilla Valley.

3.3.2. EL PASO DEL NORTE OF THE RIO GRANDE-RIO BRAVO

El Paso del Norte (EPdN) or the “El Paso Narrows” is the short (~6.5-km) canyon reach of the Rio Grande that links the lower MeV with the El Paso Valley/Valle de Juárez in the westernmost Hueco Bolson (**Figs. 1-3** and **1-7**). The head of EPdN is located near Anapra and the Courchesne [Bridge] gaging station; and it is immediately downstream from the Lower MeV area that includes the discharge zone for the pre-development binational-regional GW-flow (*cf.* **Figs. 1-3** and **1-5**). EPdN is incised in Cretaceous and Tertiary bedrock units of the Cerro Cristo Rey Uplift and Campus-Andesite Hills (**Part 7.2**; *cf.* Darton 1933-Sheet 18 [**Fig. 7-1**], Collins and Raney 2000, Seager *et al.* 1987).

River-channel altitude decreases from about 3,725 ft (1,135 m) amsl near Courchesne Bridge to 3,705 ft (1,126 m) amsl at the western edge of Hueco Bolson, with an average down-valley gradient of about 0.003. Minimum river-channel/floodplain width is less than 330 ft (100 m), and maximum thickness of alluvial fill (RA) is about 80 ft (25 m; Slichter 1905). The last interval of canyon incision occurred during the Late Pleistocene-Wisconsinan Glacial Stage sometime between 29 and 12 ka. Downstream from EPdN the “rectified” Rio Grande/Bravo channel forms the International Boundary (Mueller 1975).

3.4. Chihuahuan Desert Ecoregion

In terms of present-day climate and biogeography, much of the B&R Mexican Highland Section below altitudes of about 1,525 m is part of the arid to semiarid Chihuahuan Desert ecoregion (Schmidt 1979 and 1992, Van Devender 1990 and 1995, Douglas *et al.* 1993, Metcalfe *et al.* 1997 and 2002, Campos-Enriquez *et al.* 1999). Jorge Tamayo (1968, p. 162) included much of the Chihuahuan Desert in his “Chihuahuan-Potosinense Provincia biótica.” Ecoregions are dynamic geomorphic entities, which are sensitive to changes in atmosphere/hydrosphere-related processes that have periodicities in the decadal to multi-millennial range (Omernik 2004). Unlike the relatively fixed temporal boundary criteria for physiographic or tectonic provinces, their transitional borders are determined by subcontinental-scale climatic, hydrographic, and biogeographic conditions with an ever-increasing anthropogenic component (*cf.* Gutzler 2005 and 2020). It is also essential to note that accelerating global-scale climate and associated regional-environmental changes

during the past century have probably already marked the end of the well-documented glacial-interglacial cycles of Quaternary Period (i.e., past 2.6 Ma; **Tbl. 1-3**; *cf.* **Tbl. 4-2** and **Fig. 1-8**). If so, a new (post-Holocene) *Anthropocene* Epoch of Geologic Time of uncertain duration and character is well underway¹⁵; and planning horizons for prudent water-resource management are now in the multi-decade range, both in arid/semiarid basins of the American Southwest, and elsewhere!

Under present-day vegetative-cover conditions, desert-scrub flora occupy a much-larger part of the Chihuahuan Desert landscape than do grasslands (York and Dick-Peddie 1969). Prior to large-scale introduction of livestock after the Civil War, however, grasslands appear to also have been a major Middle Holocene to Historic land-cover component (Buffington and Herbel 1965, Herbel and Gile 1973, Gile and Grossman 1979, Gile *et al.* 1981, Dick-Peddie 1993, Monger *et al.* 2009). In striking contrast with climate/vegetative-cover conditions of the Middle- to Late-Holocene Chihuahuan Desert, Late Pleistocene glacial maxima in the B&R-MHS were characterized by greater cool-season snow-fall and less-intense warm-season (monsoon-type) precipitation, with significantly lower evapotranspiration in both upland and lowland terrains (e.g., Gile *et al.* 1981, R. Barry 1983, Smith and Street-Perrott 1983, Spaulding and Graumlich 1986, Betancourt *et al.* 1990, Ortega-Ramírez *et al.* 1998, Metcalfe *et al.* 2002, Palacios-Fest *et al.* 2002, Allen 2005, Wagner *et al.* 2010, Jasechko *et al.* 2015, Eastoe and Towne 2018). This relatively short interval of geologic time occurred in the mid- to later-part of the marine oxygen-isotope stage (OIS) 2, which lasted from about 29 to 11.7 ka (Lisiecki and Raymo 2005, M. Walker *et al.* 2018; *cf.* Stein *et al.* 2006, Fig. 2; **Fig. 1-8**).

Montane-forests extended to lower altitudes in many but not all terrains; and the desert-shrub and grassland communities of Chihuahuan Desert’s central-basin plains were replaced by savanna-type grasslands analogous to those now present on the semiarid to subhumid Southern High Plains (Spaulding and Graumlich 1986, Van Devender 1995, Monger *et al.* 1998, Nordt 2003, Pazzaglia and Hawley 2004, Hall 2005, Holliday and Miller 2013). The resulting increases in effective precipitation and much-lower evapotranspiration during the mid- to late-Quaternary

¹⁵ According to Zalasiewicz and 26 others (2021, Fig. 2) exponential increases in atmospheric CO₂, CH₄, and NO₃⁻ level occurred almost simultaneously in about 1950 (*cf.* **Tbl. 1-3**).

glacial-pluvial intervals of the past 0.75 Ma led, in turn to vegetative cover and surface- and subsurface-water flow conditions that were conducive to: (1) river-valley incision and widening, (2) soil formation on stable geomorphic surfaces; and (3) flooding of low-lying parts of the endorheic Bolson de los Muertos and Tularosa Basins of large intermittent to perennial pluvial-lakes (**Figs. 1-1, 1-11, 1-12 and 3-1**; cf. **Part 7.7**).

Basin-floor surfaces that were inundated by pluvial-Lakes Palomas and Otero during the most-recent glacial/pluvial interval of the Late Quaternary Period are now the sites of very large ephemeral-lake (*aka* playa-lake) plains and associated sand-dune complexes (**Figs. 1-1, 1-11, 1-12, and 3-1**). The latter include El Barreal-Salinas de Unión and the Médanos de Samalayuca dune field in the Bolsón de los Muertos area, and Lake Lucero-Alkali Flats and White Sands in the central Tularosa Basin (cf. **Part 7.6.2**; Meinzer and Hare 1915, Kottowski 1958b, Hawley 1969, Morrison 1969, Reeves 1965 and 1969, Schmidt 1973 and 1992, Schmidt and Marston 1981, Hawley *et al.* 2000 and 2009, Castiglia 2002, Lucas and Hawley 2002, Allen 2005, Castiglia and Fawcett 2006, Allen *et al.* 2009, Love *et al.* 2020).

3.4.1. BOLSÓN DE LOS MUERTOS

The endorheic Bolsón de los Muertos (BdLM) is of special interest in this study because of two basic hydrogeologic functions: (1) The BdLM forms the terminal *sink* for the Mexican Highland Section's four major streams—the Rios Cases Grandes, Santa Maria, and Carmen, and the Mimbres River (**Figs. 1-4 and 3-1**); and (2) during the last glacial pluvial interval, it was also the primary recharge area for the southeastern MeB's Transboundary aquifer system (**Figs. 1-7 and 1-11**; cf. Hawley *et al.* 2021, **Part 3.3.1**; Darton 1916, Schmidt 1973, Hawley *et al.* 2000, Hawley and Kennedy 2004 [p. 74-75]). The upper Rios Casas Grandes and Santa Maria drainage basins also extend into the Sierra Madre Occidental province; and the upper Mimbres River watershed is in the Datil-Mogollon Section of the Transition Zone province (**Fig. 1-4**).

C. C. Reeves (1969, p. 147) named the “Bolsón de los Muertos” after Sierra los Muertos, a small outlier of Lower Cretaceous sedimentary and Tertiary igneous-intrusive rocks that is located in the south-central part of El Barreal (**Fig. 1-1, 1-4 and 1-11**; INEGI 1983c; ~3,440,300m N/310,500m E). The name, however, has only been formally used in a few publications on the geography of the State of Chihuahua (e.g., (Schmidt 1973 and 1979, Márquez-Alameda 1992), According to Schmidt (1992, p. 64):

El Bolsón de los Muertos, a menos de 75 kilómetros al suroeste de Ciudad Juárez, es la playa [barreal/salina] mas grande en el estado y en Mexico. . . La superficie actual de la playa [El Barreal] contigua cubre 1,245 km², su longitud de norte a sur es de 69 kilómetros y tiene poco mas de 24 kilómetros de ancho. . .

3.4.2. PLUVIAL-LAKE PALOMAS AND SALINAS DE UNIÓN

During the cooler and wetter intervals of the Wisconsinan-Late Pleistocene, which occurred episodically between about 29,000 and 11,700 yrs. ago, parts of the BdLM and contiguous lowland areas below a present altitude of about 1,210 m were inundated by pluvial-Lake Palomas (Reeves 1965 and 1969, Castiglia and Fawcett 2006). Its high-stand surface area, shown with light-blue shading on **Figures 1-1 and 1-11**, is estimated to have been at least 7,500 km² (Hawley 1993, Hawley *et al.* 2000). By way of comparison, the present areal extent of Lake Erie is about 25,745 km². The hydrographic basin of pluvial-Lake Palomas and its ephemeral-lake remnants [barreals-lagunas-salinas] includes the entire present watersheds of the Rios Cases Grandes, Santa Maria, and Carmen, and the Mimbres River. Its land-surface area of at least 65,000 km², is comparable the 72,520 km² drainage basin of the Rio Grande above Leasburg Dam (alt. 1,207 m; USGS 2017).

The primary geochronologic and paleohydrologic interpretations of Lake Palomas history that are presented in Hawley and others (2021) **Part 3.3.2** are based on detailed (MS-thesis) field research by Peter Castiglia (2002) in the Laguna [El] Fresnal, Guzman, and Santa María subbasins of the Lake Palomas basin (**Fig. 1-12**). Well-preserved fossil clams (*Pyganodon grandis*) that Castiglia discovered in high-level beach-ridge deposits of the Lagunas Fresnal and Santa María subbasins proved to be ideal for ¹⁴C age determinations. This allowed him, and UNM graduate-research advisor Peter Fawcett to establish a relatively precise chronology of Holocene and latest Pleistocene “lake-level variation” that 1) applies throughout the Los Muertos Basin region, and 2) documents the close correlation of Early to Middle Holocene episodes of increased precipitation with pluvial-lake high stands. According to Castiglia and Fawcett (2006, p. 113-114):

In Laguna El Fresnal, a partially eroded beach ridge composed predominately of poorly sorted fine-grained sands to gravels is preserved at an elevation of 1,210 m... This high shoreline (beach ridge I) can be found in all other subbasins as a wave-cut bench marking a change

in slope above the playa margins. No pelecypods were found in the sediment exposures of this shoreline, and no reliable age could be obtained. Based on its position and degree of preservation, however, beach ridge I must be older than the lower shorelines and is probably late Pleistocene in age [*cf.* Palacios-Fest *et al.* 2002].

The only present-day shallow-subsurface discharge area for the Bolsón de los Muertos groundwater-flow system is located at Salinas de Unión in the lowest part of the basin south of El Barreal (altitude $\leq 1,180$ m). Following extensive field- and aerial reconnaissance in the middle 1960s, C.C. Reeves (1969) provided this summary of the local geohydrologic and hydrochemical setting of the pluvial-Lake Palomas-Salinas de Unión area (p. 153-154):

Because the basin of pluvial Lake Palomas has always been closed, surrounded by volcanics, and was the terminal reservoir for at least three large rivers [Casas Grandes, Santa Maria, and Mimbres], it satisfies several of the requisites listed by Smith (1966) for accumulation of continental salines. The high, abandoned shorelines show that evaporation of vast quantities of water took place and the bordering volcanics and stream influents from these terranes have undoubtedly supplied the salts.

Salines la Unión S. A., with general offices in Villa Ahumada, has been producing sodium sulfate for several years at Salinas about 27 miles [43.5 km] northwest of Villa Ahumada [Figs. 1-1, 1-4, 1-11 and 3-2a]. Production is from confined brines of 13° Beaume which rise to nearly the playa surface, are concentrated by evaporation, and then pumped to concrete evaporation pits. The brine is then pumped, after additional concentration by solar evaporation, over an ammonia cooler which causes precipitation of the sodium sulfate. Production of several tens of thousands of tons per month is easily attained (personal communication, R. C. Ponsford, Jr.).

Extent of the Salinas sodium sulfate deposit is not known; however, waters in other areas show high concentrations of various ions necessary for other salt deposits. Because of the resemblance of the basin of pluvial Lake Palomas to Searles Lake, California [Smith 1966], one may suggest that exploration for continental salines will be highly successful in certain areas of the basin.

3.5. The Ancestral Northern Rio Grande (ARG) and La Mesa Geomorphic Surface

Pliocene-Early Pleistocene development of the ARG system upstream from the canyons in the Trans-Pecos Texas-Big Bend region (Fig. 1-4) has been the product of fluvial-geomorphic processes in two transitional physiographic and tectonic settings: (1) a Southern Rocky Mountains headwaters area that was partly glaciated during the Early Pleistocene; and (2) a distal semiarid to arid endorheic-basin interior (*cf.* Connell *et*

al. 2005, Fig. 11). During an interval of at least three million years, denudation of the ARG basin upstream from the present Caballo Dam site contributed enormous quantities of sediment and water to the two major southern rift-basin groups that were linked by the Fillmore Pass Corridor between the Organ and Franklin Mountains: the Southern Jornada-Mesilla-El Parabién-Los Muertos group on the west, and the Tularosa Basin-Hueco Bolson group on the east (Figs. 1-1, 1-4 and 3-1; *cf.* Figs. 3-4 and 3-5; Connell *et al.* 2005 [Fig. 11c], Mack *et al.* 2006, Hawley *et al.* 2009 [Pl. 1, p. 30-33]).

3.5.1. THE ARG DISTRIBUTIVE FLUVIAL SYSTEM (DFS) AND LAKE CABEZA DE VACA

Much of the present MBR landscape outside of the valleys of the Rio Grande-Rio Bravo system comprises remnants of the (La Mesa) fluvial-deltaic plain constructed by the Ancestral Rio Grande (ARG) during final stages of SFG deposition (~0.75 Ma, Tbl. 1-3; *cf.* Fig. 1-8). Figure 3-4 is a schematic depiction of the approximate area where fluvial and fluvial-deltaic deposits of the ARG form the dominant Upper SFG basin-fill component. This portrayal of the ARG's terminal "distributive-drainage network" is based on a conceptual model of Rio Grande drainage-basin evolution developed by Hawley (1975), and Connell and others (2005) that used the J.R.L. Allen (1965, Fig. 1) system of fluvial "drainage net" classification. According to Connell and others (2005, p. 130, FIG. 11):

Drainage of the [Ancestral] Rio Grande can be considered in terms of the contributive and distributive drainage nets of Allen (1965), where drainage is collected through a contributive network of tributary streams, transferred through a trunk river, and eventually emptied across a distributive drainage network. Headwater basins contain tributaries that form the up-stream contributory (or contributory) section. The San Luis, Española, and Albuquerque basins represent the northern contributory section, defined by the presence of rather large tributary drainages that feed into the main-stem ancestral Rio Grande. A relatively short trunk section is present where drainage is confined within narrow and elongate half-graben basins containing few large tributaries. The Socorro, San Marcial, Engle, and Palomas basins generally represent the central trunk-river section and contain deposits typical of half-graben basins; however, this trunk-river distinction is not clear everywhere. The southern distributary system is recognized by repeated occupation of adjacent basins by the axial river across relatively low-relief topographic (and structural) divides. Below the Rincon area (between Truth or Consequences

and Las Cruces, ...), the river forms a quasi-distributary drainage pattern that episodically spills laterally into adjacent basins (Mack *et al.*, 1997).

The network of fluvial distributaries that spread out from its apex area at the end of a “trunk” or axial ARG channelbelt in the Palomas Basin NW of Hatch is in dark and light pink; and a secondary ARG spill-out fluvial fan in eastern Mimbres Basin is in light pink on **Figure 3-4**. Numbers in Ma show million-year age ranges of distributary networks based on information available in 2008 (*cf.* Mack *et al.* 1996 and Mack *et al.* 2009). This distributary network terminated in fluvial-deltaic transition zones that bordered a large complex of intermittent to perennial lakes that UTEP Geology Professor W.S. Strain (1966, 1971) collectively named “Lake Cabeza de Vaca (LCdV)” in honor of Álvaro Núñez Cabeza de Vaca, leader of the first Hispanic party that traversed the MBR in 1535 (Adorno and Pautz 1999).

The ARG “distributive drainage network” shown in **Figure 3-4** is representative of early efforts to describe a very common depositional environment in “continental sedimentary basins.” It was designed to more accurately portray the very large watersheds of the paleo-Lake Cabeza de Vaca’s five major contributing ancestral-river systems: ARG, Mimbres, Casas Grandes, Santa Maria, and Carmen (*cf.* Hawley 1975, Fig. 2). Most of the Upper SFG was deposited by ARG fluvial and fluvial-deltaic distributaries that terminated in the three most actively subsiding southern RG-rift depressions: Tularosa Basin, Hueco Bolson, and Bolsón de Los Muertos (**Figs. 1-1** and **1-3**). Of these, only parts of the Mesilla Basin and Hueco Bolson is now connected with the through-going Rio Grande/Bravo system in terms of both surface and subsurface flow (Bedinger *et al.* 1989, Hawley *et al.* 2009 and 2021).

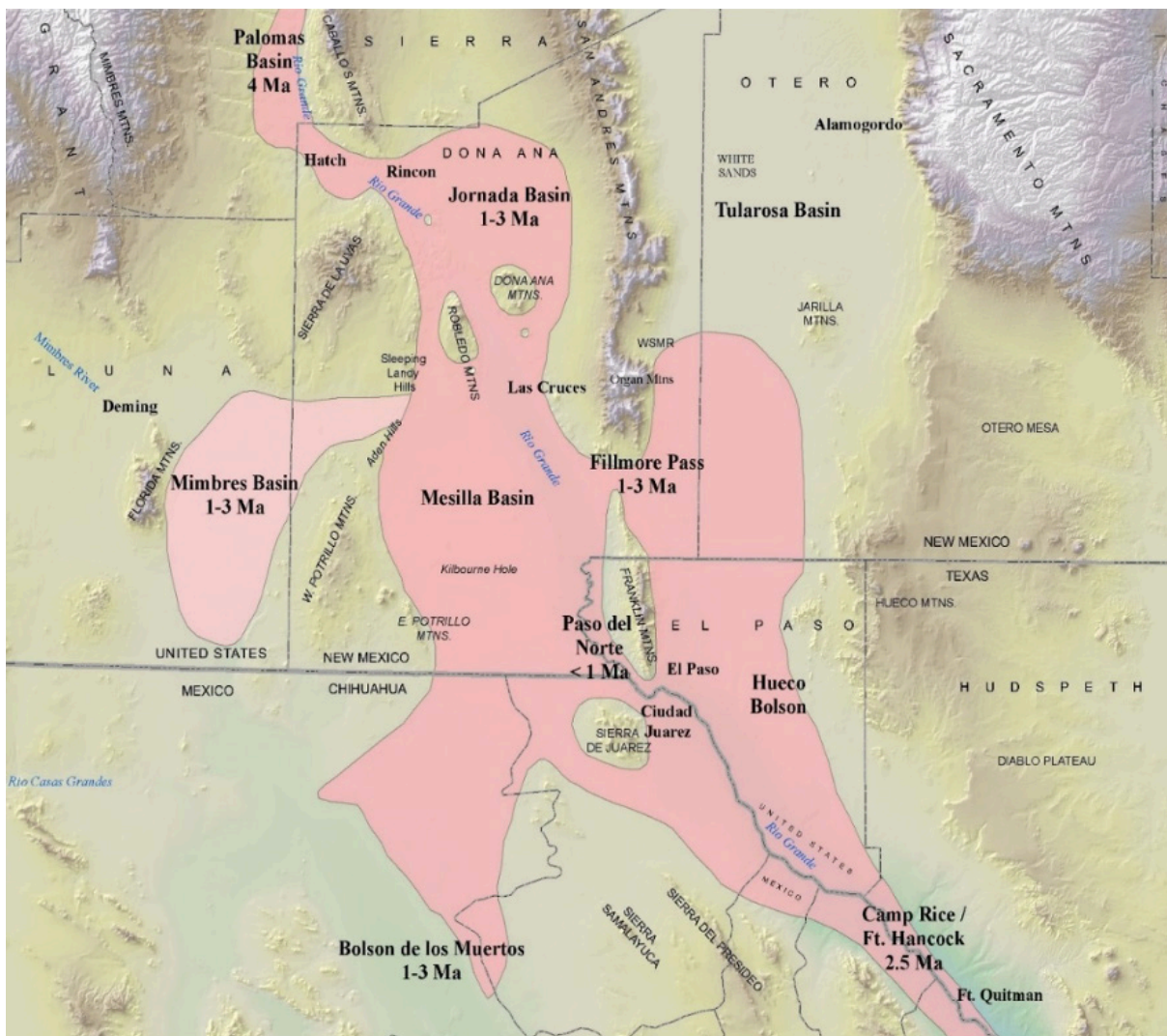


Figure 3-4: (Hawley *et al.* 2009, Fig. 9). Schematic depiction of the approximate area where fluvial and fluvial-deltaic deposits of the Ancestral Rio Grande (ARG) form the dominant Upper SFG basin-fill component. USGS DEM-base.

This portrayal of the ARG's terminal "distributive-drainage network" (Figure 3-4) is based on a conceptual model of Rio Grande drainage-basin evolution developed by Hawley (1975), and Connell and others (2005) that used the J.R.L. Allen (1965, Fig. 1) system of fluvial "drainage net" classification (cf. Fig. 3-1 and 3-5). The primary distributary-channel network that spread out from an apex at the end of an axial ARG channelbelt in the Palomas Basin NW of Hatch is in dark pink; and a secondary ARG spill-out fluvial fan in eastern Mimbres Basin is in light pink. Million-yr. (Ma) age ranges of major distributary channelbelts are based on geochronologic information available in 2008. The network terminated in fluvial-deltaic transition zones that bordered the paleo-Lake Cabeza de Vaca (LCdV) system of Strain (1966). The latter occupied basin-floor areas below a present altitude of about 1,235 m in the Hueco Bolson and Bolsón de Los Muertos (Strain 1971, Gustavson 1991). ARG fluvial-plain remnants preserved in the present landscape comprise parts of the "La Mesa geomorphic surface" (Gile *et al.*, 1981).

The type of distal fluvial-deltaic system that occurs in the Mesilla Basin region (Figs. 1-1 and 3-4) is now defined as a "distributive fluvial system (DFS)" (e.g., Davidson *et al.* 2013, and Nichols 2015). Weissmann and others (2011, p. 327) describe the basic genetic and compositional features of a DFS in the following selection from a review paper titled "Alluvial facies¹⁶ distribution in continental sedimentary basins—distributive fluvial systems:"

Fluvial depositional patterns in modern continental sedimentary basins from different tectonic settings are dominated by distributive fluvial systems (DFSs). A review of satellite imagery from over 700 modern continental sedimentary basins from different tectonic and climatic settings shows that rivers on DFSs are generally not confined to valleys and have a clear apex from which active and abandoned channelbelts radiate outward to form a positive topographic feature centered on this apex. Channels have no tributaries on the DFSs and commonly decrease in size downstream on the DFSs due to bifurcation, infiltration, and evaporation. In contrast, fluvial systems in sedimentary basins that are confined within a valley, such as those held between adjacent or opposing DFSs [e.g., channel and floodplain deposits of the inner RG Valley], incised into the DFSs, or that lie in an axial position in a basin, typically have less area for floodplain development and display coarse-

grained dominated facies... Because sediments deposited in continental sedimentary basins are those that constitute the rock record, this work suggests that many of the fluvial rocks observed may have formed in DFSs [e.g., HSUs USF2/MSF2-LFAs 1-3; Part 4.2]...

British sedimentologist Gary Nichols' description of DFSs in a paper on "Stratigraphic architecture of fluvial distributive systems in basins of internal drainage (2015, p. 1)" applies directly to the ARG deposits of MBR (Fig. 3-4, Tbl. 3-2):

Stratigraphic models of fluvial successions tend to focus on the 'incised valley' model, which assumes that a marine base level exerts a strong control on the distribution of sandstones deposited by river channels. However, not all rivers flow to the sea and in basins of internal drainage there is no control exerted on river profiles by fluctuations in marine base level. Internal drainage [endorheic] basins are the sites of approximately half of the actively depositing fluvial systems today ... In relatively humid endorheic basins, a deep basin-center lake may act as a partial downstream control on fluvial successions. However, in temperate through to arid settings, rivers terminate in a shallow, perhaps ephemeral lake, dry out on an alluvial plain or interfinger with aeolian environments. In these settings the level of the downstream termination is related to aggradation in the basin, which is itself determined by sediment supply via the rivers. The fluvial system, its depositional patterns, and the stratigraphic architecture are hence controlled by just discharge and sediment supply. A distributive fluvial pattern seems to be dominant in modern and modern and ancient endorheic basins. The fluvial successions formed by these systems in endorheic basins have a fundamentally different architecture to the 'incised valley fill' model commonly used in fluvial stratigraphy.

The 2018 Google earth® image base for **Figure 3-5** facilitates a more detailed, but still schematic portrayal of 1) the inferred maximum extent of LCdV, 2) the primary and secondary apex-area, and distributary-channelbelt components of the DFSs associated with the five major ancestral rivers that flowed into the LCdV basin, and 3) the distal parts of the major fluvial-deltaic distributaries that terminated in the paleo-lake's BdLM subbasin. The general position of ARG distributary channels between Fillmore Pass and Fort Quitman in the Hueco Bolson is also schematically shown on **Figure 3-4**. **Table 3-2** provides summary explanations of the **a (a1-a10)** to **e (e1-e3)** series of alpha-numeric symbols on **Figure 3-5**, which also shows general locations of the primary channelbelt of the four major streams that still discharge in the BdLM area: Rios Mimbres (USA), Casas Grandes, Santa Maria, and Carmen (**Figs. 1-4, 1-11 and 3-2a**).

¹⁶ While the distinction between "alluvial" and "fluvial" processes is rarely clear, the former is most often associated with ephemeral and intermittent streams, and the latter relate to perennial streams or rivers (cf. J.R.L. Allen 1965, Schumm 1965, Bull 1977, Leeder 1998).

The iterative process of designing **Figure 3-5** included use of information from the following sources: (1) initial biostratigraphic work of Strain (1966); (2) reconnaissance field studies by Hawley (1975, Fig. 2); (3) detailed geologic mapping by Seager and others (1987) and Seager (1995); (4) detailed basin-fill stratigraphic

The Mesilla GW Basin is shown in green in the Figure 3-2. ARG deposits in the Upper SFG Hydrostratigraphic Unit (HSU-USF2) comprise a large part of the region's most-productive aquifer system (**Figs. 4-1** and **4-2**, and **Tbl. 4-2**). Explanations of symbols for general positions of distributive-fluvial

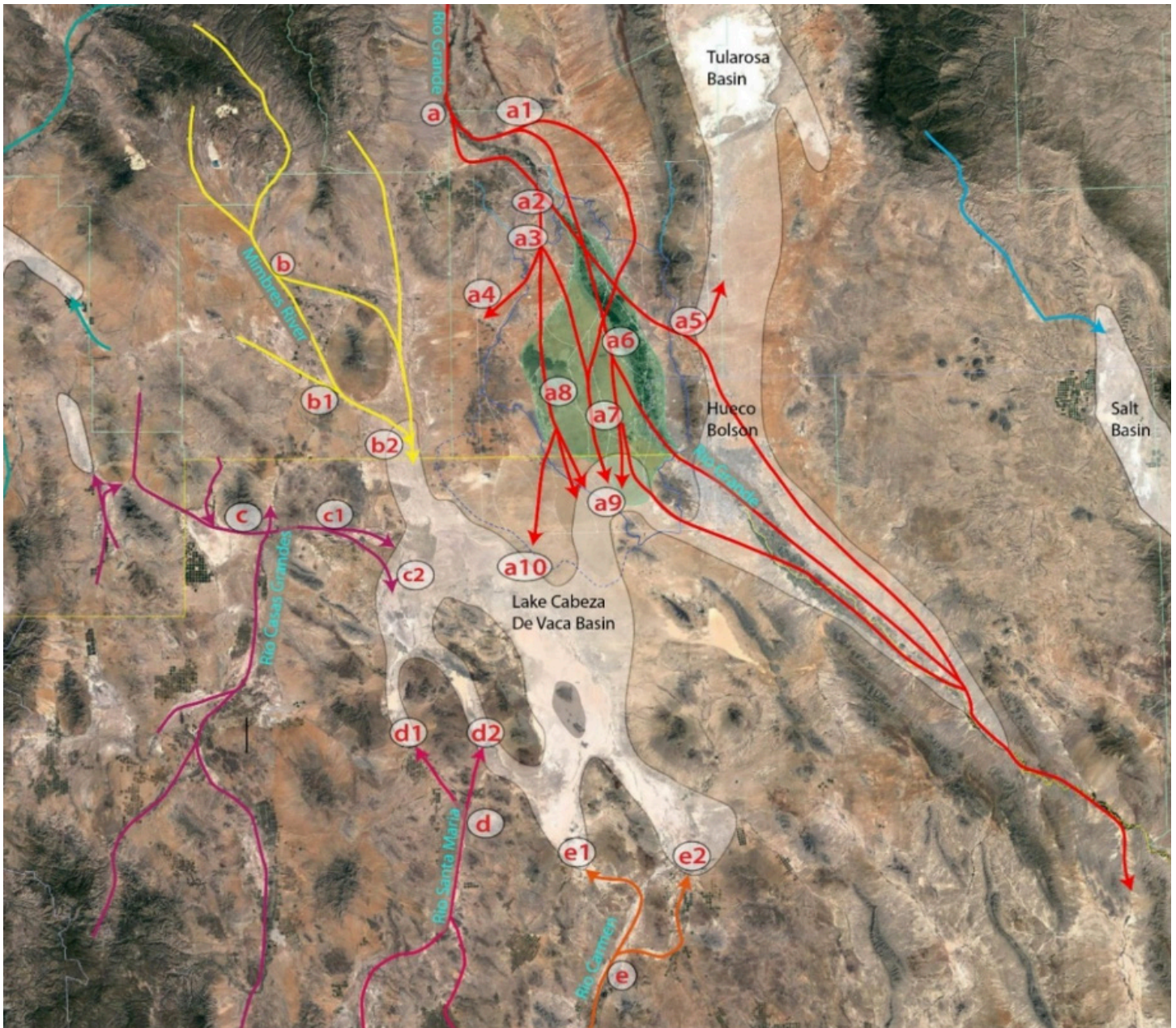


Figure 3-2: (adapted from Hawley 1975, Fig. 2). Pliocene and Early Pleistocene depositional setting of the Ancestral Rio Grande (ARG) distributive fluvial system (DFS-red lines) that terminated in the Lake Cabeza de Vaca (LCdV) complex of W.S. Strain (1966, 1971). Swanson Geoscience LLC compilation on 2018 Google earth® image base.

studies by Gustavson (1991); (5) basin-fill stratigraphic and tephrochronologic studies by Mack and others (1996 and 1997); (6) detailed geologic mapping by Collins and Raney (2000); and (7) hydrogeologic-map and cross-section compilations by Hawley and Kennedy 2004, and Hawley and others 2009.

system (DFS)-apices, ancestral-river channelbelt-segments, and LCdV fluvial-deltaic termini are in **Table 3-2**. The Rios Casas Grandes (violet), Santa Maria and Carmen (pink and orange), and the Mimbres River (yellow) remain as the major surface- and subsurface-flow contributors to ephemeral lake-plain remnants of

pluvial-Lake Palomas: Lagunas Guzman, Santa Maria and Patos, and El Barreal-Salinas de Unión. Only small parts of the Mesilla Basin and Hueco Bolson have surface-flow connection with Rio Grande at present (Figs. 1-4 and 3-1; Hawley 1969, Hawley *et al.* 2000).

Figure 3-2: Explanation of alpha-numeric symbols on Figure 3-2 for Plio-Pleistocene distributive-fluvial systems (DFSs) of ancestral rivers with fluvial-deltaic termini in the Paleo-Lake Cabeza de Vaca complex (LCdV) and Bolson de los Muertos (BdlM).

a. APEX AREA OF THE ANCESTRAL RIO GRANDE-CAMP RICE FM DFS (ARG-CRDFS—RED LINES)

- a1. Eastern Rincon Valley head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the Southern Jornada Basin.
- a2. Upper Selden Canyon head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the central and eastern Mesilla Basin area.
- a3. Lower Selden Canyon head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the western Mesilla Basin area.
- a4. Cedar-Corralitos Basin head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the northwestern Mesilla and northeastern Mimbres Basin areas.
- a5. Fillmore Pass head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the western Tularosa Basin and northwestern Hueco Bolson area.
- a6. South-central Mesilla Basin head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the El Parabién Basin-Paso del Norte area.
- a7. Southeastern Mesilla Basin head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the El Parabién Basin, Méndez-Vergel Corridor, and southwestern Hueco Bolson area.
- a8. Southwestern Mesilla Basin head of the ARG-CRDFS distributary-channel complex in the El Parabién Basin and the northeastern LCdV-BdlM.
- a9. South-central termini of ARG-CRDFS fluvial-deltaic distributaries in the northeastern LCdV-BdlM.
- a10. Southwestern termini of ARG-CRDFS fluvial-deltaic distributaries in the northwestern LCdV-BdlM.

b. APEX AREA OF THE ANCESTRAL RIO MIMBRES-UPPER GILA Gp DFS (ARM-UGDFS—YELLOW LINES) IN THE NORTHERN LCdV-BDLM

- b1. Southeastern Mimbres Basin head of the ARM-UGDFS fluvial-deltaic distributaries.
- b2. Southern termini of ARM-UGDFS fluvial-deltaic distributaries in the northern LCdV-BdlM.

c. APEX AREA OF THE ANCESTRAL RIO CASAS GRANDES-BOCA GRANDE DFS (ARCG-BGDFS—VIOLET LINES) IN THE NORTHWESTERN LCdV-BDLM

- c1. Head of ARCG-BGDFS fluvial-deltaic distributaries in the northwestern LCdV-BdlM
- c2. Eastern termini of ARCG-BGDFS fluvial-deltaic distributaries in the northwestern LCdV-BdlM.

d. APEX AREA OF THE ANCESTRAL RIO SANTA MARIA DFS (ARSG-DFS—PINK LINES) IN THE SOUTHWESTERN LCdV-BDLM

- d1. Eastern termini of ARSM-DFS fluvial-deltaic distributaries south of Laguna Santa Maria.
- d2. Western termini of ARSM-DFS fluvial-deltaic distributaries south of Laguna Fresnal

e. APEX AREA OF THE ANCESTRAL RIO CARMEN DFS (ARC-DFS—ORANGE LINES) IN THE SOUTHEASTERN LCdV-BDLM

- e1. Eastern termini of ARC-DFS fluvial-deltaic distributaries in the southeastern LCdV-BdlM near Villa Ahumada and Laguna Patos.
- e2. Western termini of ARC-DFS fluvial-deltaic distributaries northwest of Carrizal in the southeastern LCdV-BdlM

3.5.2. LA MESA GEOMORPHIC SURFACE

Remnants of ARG DFS and associated Upper SFG deposits are a major landscape component in the MBR. As shown in **Figures 3-4** and **3-5** the southwestern part of this vast fluvial-deltaic plain includes most of the MeB's West Mesa section; and it extends southward across El Parabién GW Basin (EPB) to the northeastern edge of the Los Muertos (RG-rift) Basin in north-central Chihuahua (**Figs. 1-1, 1-11** and **1-12**; *cf. Fig. 6-2*). The West Mesa part of the plain in the United States has an area of about 1,300 km²; its average southward slope rarely exceeds 0.0005; and the land-surface altitude ranges from about 1,310-1,120 m (*cf. Hawley et al. 2021-PLS. 5e to 5l and 5p to 5s*). The extent and approximate age range of an "ancient Rio Grande" fluvial system in the Mesilla-Jornada Basin region was initially recognized by Willis T. Lee (1907). Lee also introduced the term "La Mesa" in reference to the MeB-West Mesa area (**Figs. 1-5** and **3-1**; and he correctly inferred "that the ancient Rio Grande flowed through the Jornada and La Mesa into the interior basin of Mexico, and that in comparatively recent geologic time changes occurred which turned it out of its [West Mesa] valley and away from the interior [Los Muertos] basin toward the Gulf of Mexico (p. 22)." A number of other workers have also used "La Mesa" as a specific name for the Mesilla GW Basin's West Mesa area in their maps of Doña Ana County (e.g., Dunham 1935, Sayre and Livingston 1946, and Kottlowksi 1958a and 1960). According to Conover (1954, p. 15):

The plain west of the Mesilla Valley that extends southward from near Las Cruces into Mexico is known as La Mesa. It is similar to the Jornada del Muerto in many respects. Its altitude at its northern end is approximately the same as the southern end of Jornada del Muerto, and the two formed a single plain previous to the excavation of the Mesilla Valley. La Mesa has a width of 20 miles [32 km] or more and is undissected and devoid of surface drainage. It contains several broad, shallow depressions (Lee 1907, p. 10). The slope of La Mesa is southward ..., slightly more than 2 feet to a mile ...

During early-stage Desert Project research on surficial-geology and soil-geomorphic relationships for the USDA-SCS, R.V. Ruhe (1964) and Hawley (1965) proposed that the term "La Mesa" be redefined as the "La Mesa geomorphic surface," which would be used only as a name for the constructional top of Upper SFG-ARG deposits in the MBR (**Figs. 3-1** and **3-4**, *cf. Hawley et al. 2021-Part 3.7.2*). ARG fluvial-deltaic deposits in the MeB-West Mesa area have a thin veneer of eolian sand in most places; and the plain contains

hundreds of shallow depressions of complex deflational, fluvial and/or structural origin (Gile 1966 and 1967, Gile *et al.* 1981, Seager *et al.* 1987, Seager 1995). Several prominent fault scarps, a variety of volcanic-vent features and locally extensive basalt flows of Pleistocene age also disrupt or cap the La Mesa surface (Seager *et al.* 1987, Seager 1995, Dunbar 2005, *cf. Hawley et al. 2021-APNDX. F3-4* and *F7*).

The complex mixture of thin eolian and fluvial deposits that is associated with the La Mesa geomorphic surface form the parent materials for a wide variety of calcic soils with profiles that are usually less than ten feet (3 m) thick (Gile 1961, Gile *et al.* 1966, Gile 1967, Gile and Grossman 1979, Gile *et al.* 1981 and 1995, Monger *et al.* 1991). Zones of soil-carbonate (primarily calcite) accumulation are at least partly-indurated; and common names used for this pedogenic feature in the North American West include: caliche, *caliche muy duro*, and pedogenic calcrete (*cf. Flores Mata 1970, Gile and Grossman 1979, Machette 1985, Monger et al. 1991, Gile et al. 1995; Hawley et al. 2021-APNDS. F3-4* and *F7: Pls. F7-1c to 1f*). The dominant pedogenic mechanism for soil-carbonate accumulation involves downward movement from upper-soil horizons by eluvial/illuvial and solution/precipitation processes. In advanced stages, it results in complete cementation and disruption of the initial soil parent-material matrix (*cf. Hawley et al. 2021- APNDX. F7-1*). There is a direct correlation of geomorphic-surface age, and the morphological complexity and thickness of associated zones of soil-carbonate accumulation. Dust-trap data and bulk-precipitation analyses also demonstrate that atmospheric additions have made a significant contribution to/pedogenic processes here and in many other arid to subhumid temperate regions (Junge and Werby 1958, Feth and Whitehead 1964, Hoidale *et al.* 1967, Gile *et al.* 1981, Reheis *et al.* 1995, Monger *et al.* 2009, McFadden 2013). Near-surface, saturated-zone processes have not played a significant role in the above-described mechanisms of soil-carbonate accumulation.

4. Geologic-Framework Components of Rio Grande Rift Basins and Bounding Bedrock Uplifts

4.1. Background

The inherent complexity and deep-seated nature of the major structural components of Rio Grande rift basins and their bordering bedrock uplifts requires that hydrogeologic characterization of basin-fill deposits and

rift-structural boundaries be based on a wide variety of direct and indirect methods of surface and subsurface investigation (e.g., detailed mapping, borehole-sample logging, and geophysical and geochemical surveys; *cf.* **PL 1** series and **PL 5**). Former Head of the UTEP Geophysical Laboratory, Dr. G.R. Keller describes some aspects of this multi-disciplinary process in a seminal 2004 review paper titled, “Geophysical constraints on the crustal structure of New Mexico (p. 450):”

Seismic reflection, gravity, and drilling data have delineated the many large, deep basins that form the upper crustal expression of the [RG] rift. Initially, the primary emphasis was on gravity studies (e.g., Cordell, 1976, 1978; Ramberg *et al.*, 1978; Birch, 1982). However, the petroleum industry has released a considerable amount of seismic reflection data for research purposes, and [a] series of papers that focus on the [RG-] rift basins and include many seismic reflection profiles is [cited] in Keller and Cather (1994). In general, the basins are asymmetrical and more complex structurally than their surface expression would suggest [*cf.* **Part 3.6**; Jiménez and Keller 2000].

One the major complexities of RG-rift relates to the fact that it is superimposed on large-scale elements of pre-existing Earth-crustal structures. This is well illustrated in geologic maps and satellite images of the southern RG-rift region, which show the marked shift in general basin and range trends near the 32nd N Parallel from N-S to NW-SE (e.g., **Figs. 1-1, 1-4, and 4-1**). According Wichita State University Geology Professor, John Gries, Ph.D. (1979, p. 107):

Rio Grande Rift structures are superimposed on a wide variety of older tectonic styles. In Colorado and northern New Mexico rift structures are associated with upthrusts and folds common to the Laramide Rocky Mountain structural provinces. Farther south [in the MBR], the trend of rift structures intersects the eastern part of the Basin and Range tectonic province (Chapin and Seager, 1975). South into northern Chihuahua the pre-rift structural style changes markedly. The [NNW-SSE trending] Chihuahua Trough existed as a narrow depositional basin from at least Late Permian through Late Cretaceous between the Diablo Platform in present-day Trans-Pecos Texas and the Aldama Platform in west-central Chihuahua [*cf.* **Fig. 4-1**, Gries 1980]. DeFord and Haenggi (1972) describe 4000 to 5000 meters of [Jurassic and] Middle Cretaceous [strata]. This includes an indeterminate thickness of [Jurassic] evaporites. Most of the knowledge of the evaporite units comes from sparse subsurface data. PEMEX's Cuchillo Parado No. 1 encountered 2,326 meters of evaporite before being abandoned—still in evaporites. The units were 80% halite, 5% gypsum, 1% anhydrite, and 14% claystone and limestone (Ramirez and Aceveda, 1957, p. 665-666). Because the hole was drilled on an evaporite-

cored anticline, little idea can be obtained of pre-flowage thickness ¹⁷.

4.1.1. MAJOR HYDROGEOLOGIC SUBDIVISIONS AND RG-RIFT STRUCTURAL-BOUNDARIES IN THE WRRI STUDY AREA

G.R. Keller's (2004) observation that RG-rift basins are “more complex structurally than their surface expression would suggest” is supported by the large body of published information on subsurface conditions in the MBR (e.g., Seager *et al.* 1987, Seager 1995 and 2004). Much of this information is synthesized in the hydrogeological maps and cross-sections Hawley and others (2021) **PLATES. 1 to 7**. **Figure 1-2** shows the locations of major hydrogeologic subdivisions and rift-structural-boundary features in the WRRI Study Area (**Fig. 1-3**). The Mesilla GW Basin (MeB) is in blue shades, and the Mesilla Valley of the Rio Grande is in dark blue. El Parabién and Southern Jornada GW Basins (EPB and SJB) are in pink and light green, respectively. Acronyms for hydrogeologic-subdivision categories, including fault zones (lines with bar and ball symbols), are listed in **Tables 4-1 and 4-2 [TBLS. 2 and 3]**. Major basin-scale features of the hydrogeologic framework fall into three categories with respect to basic RG-rift structure:

1. Subbasins (SB)—the primary hydrogeologic subdivisions of GW basins, which are associated with the deepest structural depressions and thickest SFG aquifer zones.
2. Highs (H)—deeply-buried, structurally positive bedrock terranes in central parts of GW basins
3. Benches (Bn)—areas of transition central GW basins and bordering bedrock uplifts with respect to both basin-boundary structure and basin-fill lithofacies composition.

¹⁷ Plastic behavior of halite starts about 300°C, which suggests that high-angle displacements of sub-evaporite rocks is not carried through to the surface because of large-scale flowage of the evaporites.

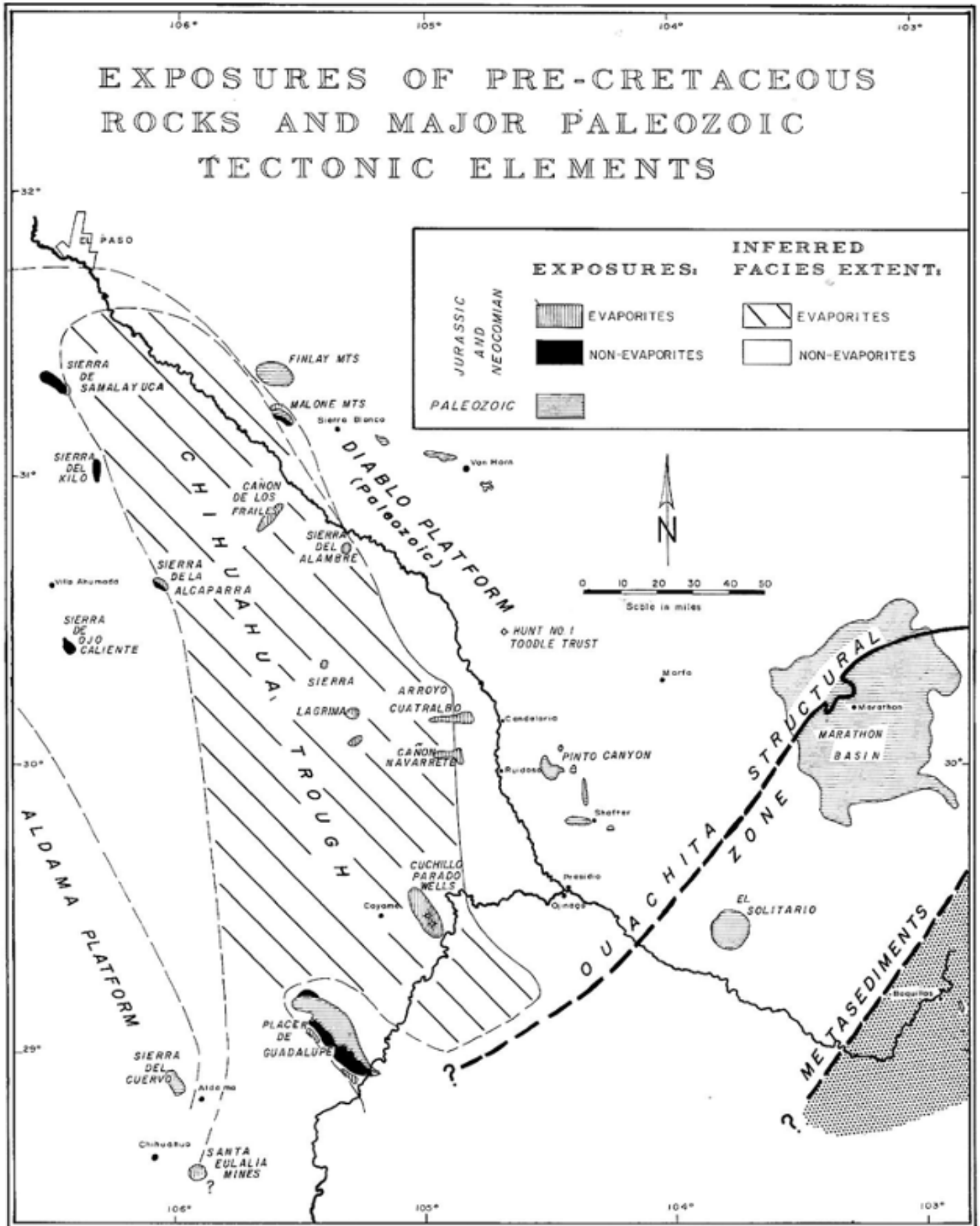


Figure 4-1 (facsimile copy of Gries 1980, Fig. 1; reproduced with NM Geological Society, Inc. permission). Major exposures of pre-Cretaceous rocks, outline of Chihuahua Trough (Jurassic) evaporite basin, major Paleozoic tectonic features of northeastern Chihuahua and Trans-Pecos Texas, and location of parts of the Rio Grande/Bravo and Conchos fluvial systems.

TABLE 4-1 Names and Acronyms of Hydrogeologic Subdivisions on Fig. 4-2.

ACRONYM	RIO GRANDE (RG) VALLEY AND CANYONS (NARROWS)	
EPdN	El Paso del Norte (Cyn)	
MeV	Mesilla Valley	
SCyn	Selden Canyon (Cyn)	
EPJV	El Paso-Juárez Valley	
ACRONYM	MESILLA GW BASIN (MeB)	SUBDIVISION (AREA in km²)
MeB-ACBn	Mesilla Basin	Anthony-Canutillo Bench (138)
MeB-AfSB	Mesilla Basin	Afton Subbasin (180)
MeB-AOBn	Mesilla Basin	Anapra-Oasis Bench (72.7)
MeB-BMSB	Mesilla Basin	Black Mountain Subbasin (353)
MeB-EABn	Mesilla Basin	East Aden Bench (70.7)
MeB-EMSB	Mesilla Basin	El Milagro Subbasin (203)
MeB-FASB	Mesilla Basin	Fairacres Subbasin (382)
MeB-KNSB	Mesilla Basin	Kilbourne-Noria Subbasin (278)
MeB-LBic	Mesilla Basin	Leasburg Inflow Corridor (25.4)
MeB-LCBn	Mesilla Basin	Las Cruces Bench (97.5)
MeB-MSB	Mesilla Basin	Mesquite Subbasin (228)
MeB-NMbH	Mesilla Basin	North Mid-Basin High (143)
MeB-SMbH	Mesilla Basin	South Mid-Basin High (121)
MeB-STBn	Mesilla Basin	Santa Teresa High (89.5)
MeB-SPoc	Mesilla Basin	Sunland Park Outflow Corridor (33.4)
ACRONYM	OTHER GW BASINS (B)	SUBDIVISION
EPB	El Parabién Basin (N-part—Drains to MeB)	
EPB-EESB	El Parabién Basin	El Espejo Subbasin (158)
EPB-LCSB	El Parabién Basin	Los Chontes Subbasin (126)
HB	Hueco Bolson (W-edge—Receives inflow from MeB through EPdN)	
HB-NWSB	Hueco Bolson	Northwestern Subbasin
HB-NWSB	Hueco Bolson	Southwestern Subbasin
MbB	Mimbres Basin (No-flow boundary with MeB; surface and subsurface flow to Los Muertos Basin (LMB—Bolsón de los Muertos)	
MbB-WPBn	Mimbres Basin	West Potrillo Bench
MpB	Malpais GW Basin (E-edge—connects with BTC, MbB, and LMB)	
MpB-GLSB	Malpais Basin	Guzmans Lookout Subbasin (SB)
MpB-LLBn	Malpais Basin	La Laguna Bench (Bn)
RVB	Rincon Valley GW Basin (Drains to MeB through SCyn)	
RVB-BASB	Rincon Valley Basin	Bignell Arroyo Subbasin (47.2)
RVB-TNoc	Rincon Valley Basin	Tonuco Outflow Corridor (5)
SJB	Southern Jornada GW Basin (Drains to MeB and RVB)	
SJB-ERSB	Southern Jornada Basin	Experimental Range Subbasin (264)
SJB-ILSB	Southern Jornada Basin	Isaacks Lake Subbasin (164)
SJB-TvSB	Southern Jornada Basin	Talavera Subbasin (68.2)
SWTB	Southwestern Tularosa Basin	
ACRONYM	UPLAND GW BASIN	SUBDIVISION
CCUB	Cedar-Corralitos Upland Basin (UB)	
CCUB-CHSB	Cedar-Corralitos	Cedar Hills Subbasin (96.2)
CCUB-CRSB	Cedar-Corralitos	Corralitos Ranch Subbasin (205)
ACRONYM	INTERBASIN HIGH (IBH)	SUBDIVISION
PSH	Potrillo-Sapello High (163)	
PSH-LJS		La Joya Sector (93.5)
PSH-CMIC		Chontes-Milagro Inflow Corridor (69.5)
		(EPB-LCSB to MeB-EMSB)

ACRONYM	INTERBASIN UPLIFT (U)	SUBDIVISION
AHU	Aden Hills Uplift	
ARU	Aden-Robledo Uplift	
ARU-AdS	Aden-Robledo Uplift	Aden Sector (S)
ARU-SRic	Aden-Robledo Uplift	South Robledo Inflow Corridor (145)
BCU	Bishop Cap Uplift	
BHU	Black Hills Uplift	
CAHU	Campus-Andesite Hills Uplift	
CCRU	Cerro del Cristo Rey Uplift	
CMU	Camel Mountain Uplift	
DAMU	Doña Ana Mountains Uplift	
EAU	El Aguaje Uplift (310)	
EPU	East Potrillo Uplift	
EPU-BTic	East Potrillo Uplift	Brock Tank Inflow Corridor (227)
EPU-PRS	East Potrillo Uplift	Potrillo-Mt. Riley Sector (S)
FMU	Franklin Mountains Uplift	
OMU	Organ Mountains Uplift	
RMU	Robledo Mountains Uplift	
SAMU	San Andres Mountains Uplift	
SHU	Selden Hills Uplift	
SJU	Sierra Juárez Uplift	
SSU	Sierra Sapello Uplift (41)	
TMU	Tonuco Mountain Uplift	
TtU	Tortugas Uplift	
TtMU	Tortugas Uplift	Tortugas Mountain Uplift (U)
TtU-NTic	Tortugas Uplift	North Tortugas Inflow Corridor (63.5)
TtU-STic	Tortugas Uplift	South Tortugas Inflow Corridor (59.2)
UGU	Uvas-Goodsight Uplift	
UGU-SLU	Uvas-Goodsight Uplift	Sierra de las Uvas (U)
UGU-MDS	Uvas-Goodsight Uplift	Mason Draw Sector (S)
UGU-MLic	Uvas-Goodsight Uplift	Muzzle Lake Inflow Corridor (ic, to the Mimbres Basin-MbB)
ACRONYM	INTER-BASIN GROUNDWATER-FLOW CORRIDORS	
BTC	Border Tank Corridor (214)	
	(Malpais Basin to El Parabién Basin underflow)	
ETNC	East Tonuco Corridor (13.5)	
	(Jornada Basin to Rincon Valley Basin underflow)	
FPC	Fillmore Pass Corridor (73.7)	
	(Mesilla Basin-Hueco Bolson—potential inter-basin underflow)	
MVIC	Méndez-Vergel Corridor (115)	
	(possible Hueco Bolson to Mesilla Basin underflow)	

TABLE 4-2 Names and Acronyms for Boundary-Fault Zones* on Figure 4-2.

Map-Unit Acronyms and Names	Bordering Hydrogeologic-Map Subdivisions (Fig. 4-2,
	Tbl. 4-1)
Southern Jornada Basin (SJB)	
West Side	
Jfz—Jornada fz (A1, B2, C1)*	ERSB/SDMU-ETC-DAMU, ILSB/DAMU, TSB/TtU
East Side	
EJfz—East Jornada fz (A3, B3, C2)	ERSB/SAMU, ILSB/OMU, TSB/OM
Mesilla Basin (MeB)	
MeB Border	
West Side (N to S)	
ERfz—East Robledo fz (A1, B1, C2)	LBic/RMU, FASB/RMU—ARU-RS
EPfz—East Potrillo fz-S (A1, B1, C1-2)	KNSB/EPU-BTic, KNSB/EPU-PRS
NRfz—Noria fz (A3, B3, C2, C4)	KNSB/PSH-LJS, SMBH/PSH-LJS
SSfz—Sierra Sapello fz (A3, B3, C3-4)	EMSB/PSH-CMIC
East Side (N to S)	
MVfz—Mesilla Valley fz-N (A3, B3, C2)	LBic/DAMU,
TTfz—Tortugas fz (A3, B3, C2)	LCBn/DAMU, LCBn/TtU, LCBn/FPC
MVfz—Vado Hill Segment (A3, B3, C2)	MSB/FPC
MeB Interior (Intra-Basin)	
North and West of Mid-Basin High (MBH)	
MVfz—Mesilla Valley fz-C (A3, B4, C2)	FASB/LCBn
SPfz—San Pablo fz (A3, B3, C2)	FASB/MSB, FASB/BMSB, FASB/NMBH
FGfz—Fitzgerald fz (A2, B2, C2)	AfSB/NMBH, KNSB/SMBH
EPfz—East Potrillo fz-N (A2, B4, C2)	AfSB/EABn
East of Mid-Basin High (MBH)	
MVfz—Mesilla Valley fz-S (A3, B4, C2)	MSM/ACBn, BMSB/ACBn, STBn/ACBn, STH/
CBfz—Chamberino fz (A2, B2, C3)	AOBn
MBfz—Mid-Basin fz (A3, B3, C4)	MSB/BMSB
MDfz—Mastodon fz (A1, B2, C2)	BMSB/NMBH, BMSB/SMBH, EMSB/SMBH
EVfz—El Vergel fz-N (A3, B4, C2)	EMSB/STBn
	EMSB/AOBn
El Parabién Basin (EPB)	
West Side	
EFfz—El Faro fz (A2, B4, C1)	LCSB/BTC
East Side	
LCfz—Las Cuates fz (A2, B2, C1)	EESB/BTC, EESB/EAU
El Parabién Basin Interior (Intra-Basin)	
EGfz—El Girasol fz (A2, B2, C2)	EESB/LCSB
*Qualitative Fault-Zone Attributes.	
A. Plio-Pleistocene (<5 Ma) Fault-Zone Activity: A1. High, A2. Moderate, A3. Low	
B. Fault-Zone Topographic Definition: B1. High, B2. Moderate, B3. Low, B4. Buried	
C. Fault-Zone Subsurface Definition (e.g., borehole and/or geophysics):	
C1. High, C2. Moderate, C3. Low, C4. Deeply Buried	

4.1.2. EL PARABIÉN GW BASIN (EPB) AND THE POTRILLO-SAPELLO HIGH (PSH)

Figures 4-2a and **4-2b** (Jiménez and Keller 2000, Figs. 6 and 7) show a more-detailed interpretation of the “extent of the main [Rio Grande] rift basins in the [USA-Mexico] border region . . . based on the integrated analysis of gravity, drilling, geologic, and remote-sensing data.” Identification of the heretofore unrecognized El Parabién Basin by Alberto Jiménez and G.R. Keller (2000) is of special significance with respect to Transboundary-aquifer characterization. The El Parabién RG-rift basin essentially coincides with the El Parabién GW Basin (EPB) as delineated in **Figures**

1-1, 1-3, and **4-2.** It has no surface expression due burial by about 200 m of Upper SFG-ARG deposits (*cf.* **Figs. 4-5** and **4-6** [III-III]).

In the Figure 4-3a are shown EPM-East Potrillo Mountains, SdS-Sierra de Sapello, SSam-Sierra Samalayuca, and SdP-Sierra del Presidio. Profile A-red line (**Fig. 4-3b**); El Parabién Basin-red outline; and Pemex Moyotes No. 1 test well-blue circle (Hawley *et al.* 2021-Part 5.6.4). The buried structural high between the “El Parabién and Conejo Medanos Basins” is provisionally named the Potrillo-Sapello High herein (Hawley *et al.* 2021-Part 6.4.1).

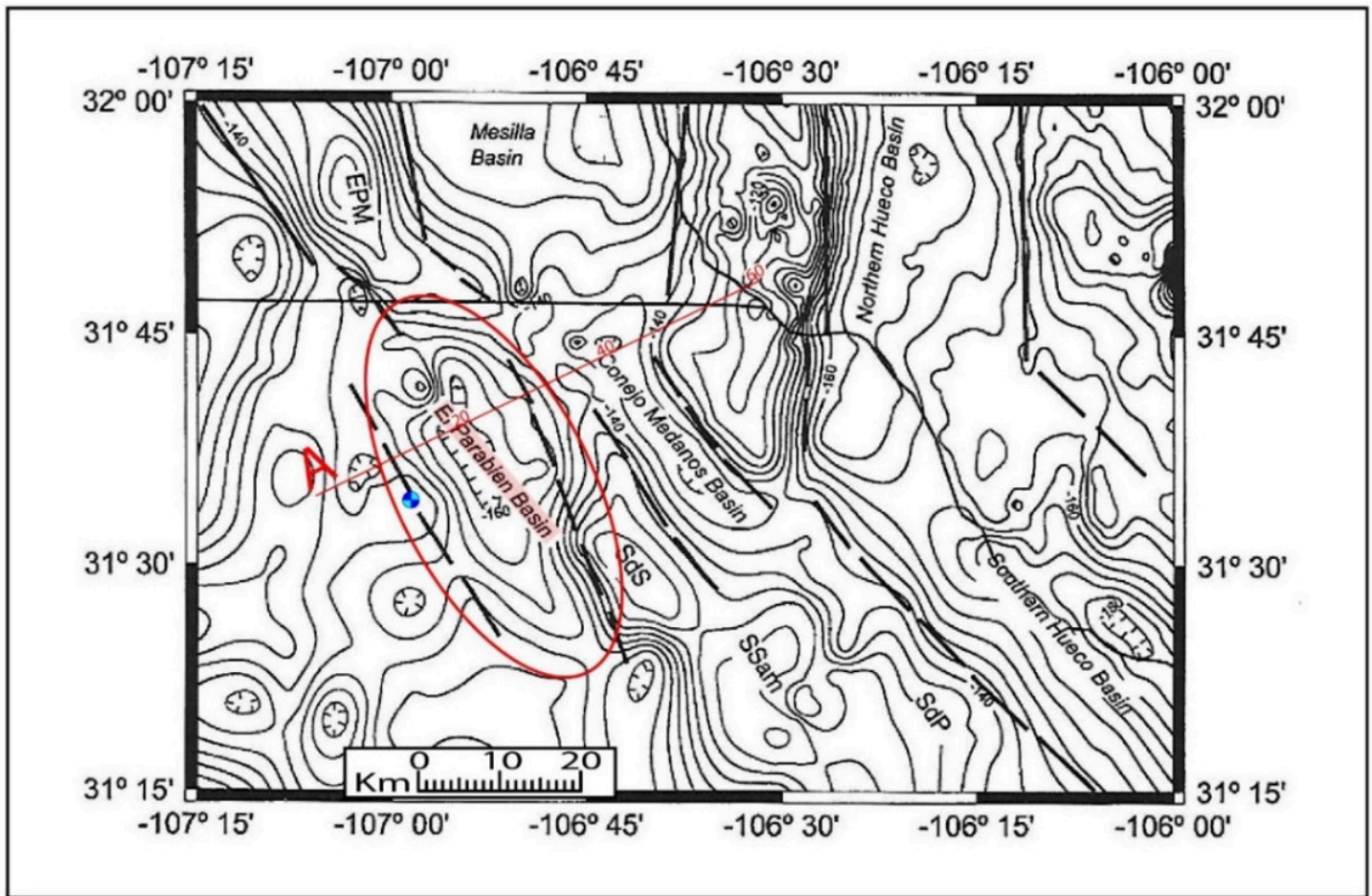


Figure 3-2: (adapted from Hawley 1975, Fig. 2). Pliocene and Early Pleistocene depositional setting of the Ancestral Rio Grande (ARG) distributive fluvial system (DFS-red lines) that terminated in the Lake Cabeza de Vaca (LCdV) complex of W.S. Strain (1966, 1971). Swanson Geoscience LLC compilation on 2018 Google earth® image base.

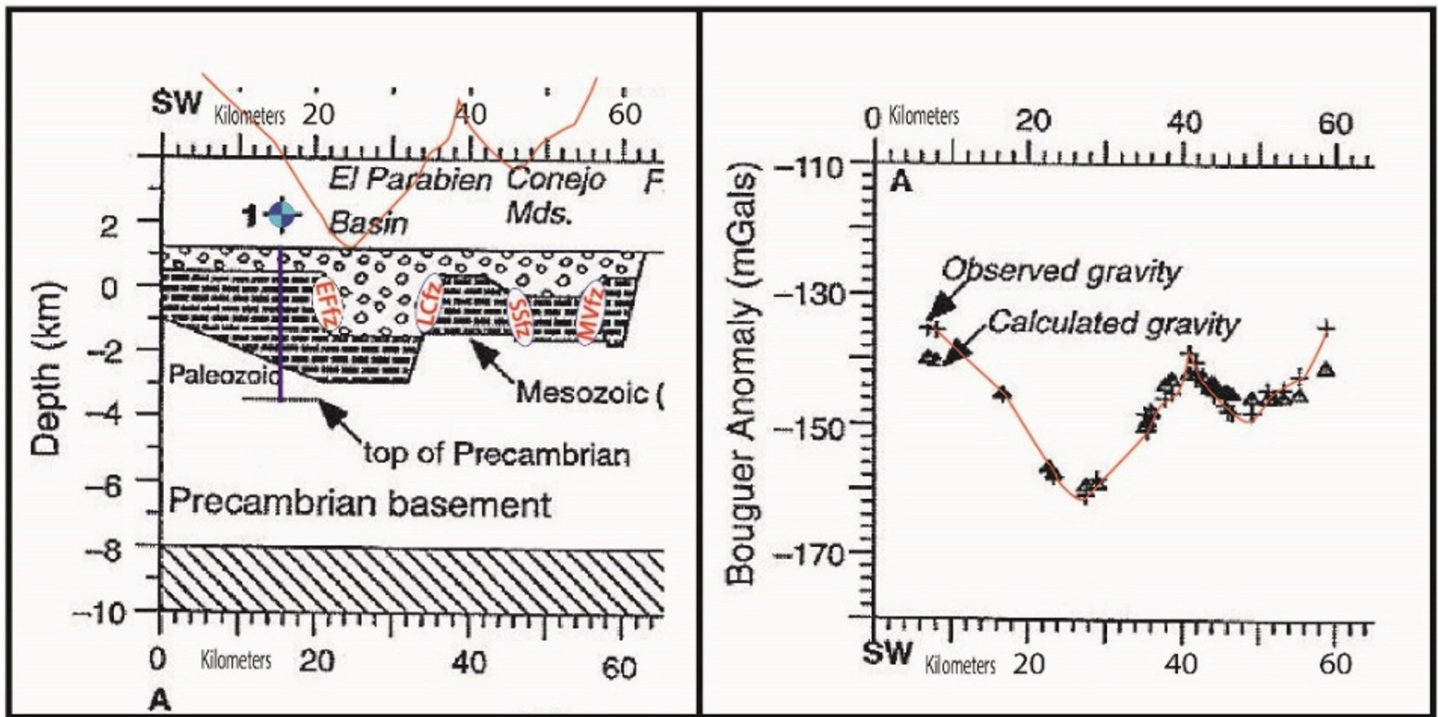


Figure 4-3b: (modified from Jiménez and Keller (2000, Fig. 6; with NM Geological Society, Inc. permission). Western part of computer-model gravity profile A-A', with schematic geologic section (left), and Cenozoic Laramide and RG-rift basin fill shown by open polygons. Location of Profile A-A' (red line) on **Fig. 4-3a**, and Pemex Moyotes No.1 marked w-blue circle (cf. Thompson *et al.* 1978, Tovar *et al.* 1978).

Figure 4-3a (Jiménez and Keller, 2000, Fig. 7) is a Bouguer isostatic-residual gravity map (4 milligal contour interval) with an interpreted extent of major RG-rift basins in the border region that is “based on the integrated analysis of gravity, drilling, geologic, and remote-sensing data.” EPM-East Potrillo Mountains, SdS-Sierra de Sapello, SSam-Sierra Samalayuca, and SdP-Sierra del Presidio. Profile A-red line. The thin-red line shows the location of gravity profile A-A' (**Fig. 4-3b**); and the red oval marks the general outline of the El Parabién GW Basin (EPB). The small blue circle shows the location of the deep Pemex Moyotes No. 1 exploration well (Thompson *et al.* 1978, Tovar *et al.* 1978). **Figure 4-3b** (modified from Jiménez and Keller, 2000, Fig. 7) is the western part of gravity Profile A-A' (red line, right and left); and schematic geologic section (left), with Cenozoic Laramide and RG-rift basin fill shown by open polygons. To minimize vertical exaggeration, regional RG-rift structure was modeled at a mid-crustal depth. The small blue circle marks the approximate site of the deep Pemex Moyotes No.1 oil test well (cf. Thompson *et al.* 1978, Tovar *et al.* 1978). Fault-zone (fz) acronyms are EFfz-El Faro, LCfz-Los

Cuates, SSfz-Sierra Sapello, and MVfz-Mesilla Valley).

The El Parabién (GW) Basin (EPB) is separated from the southern end of the MeB by the provisionally named Potrillo-Sapello High (PSH), a buried structural feature connecting the East Potrillo Mountains and Sierra Sapello that has a 300-m of SFG basin fill in most places (**Figs. 1-3** and **4-3a, b**). Recognition of both feature is based primarily on analyses of gravity-survey data, most of which was collected by the UTEP Geosciences Department and Pan American Center for Earth & Environmental Sciences. According to Jiménez and Keller (2000, p. 80-82):

Gravity data provide an economical source of information on earth structure. In the Rio Grande rift, gravity data have contributed significantly to the, location of normal faults, definition of basement structure, and delineation of basin geometry (e.g., Cordell, 1978; Ramberg *et al.*, 1978; Daggett *et al.*, 1986; Adams and Keller, 1994). The negative anomalies are associated with basin fill that has low density, while the positive anomalies are associated with uplifts (Decker and Smithson, 1975). In the deepest portions of the basins, the thickness of Cenozoic sediments typically ranges from 2 to 3 km based on gravity modeling; and removing the negative effects of the basins shows that there is a positive 3D-mgal gravity

anomaly along the southern Rio Grande rift ...

The region of primary interest is situated immediately west of Ciudad Juarez. The definition and investigation of the gravity lows in this area was the chief aim of this study. These gravity lows correspond to a series of basins west of the El Paso-Ciudad Juarez metropolplex that may contain important water resources [p. 80]...

Relatively low gravity values (-160 to -170 [milligals]) obtained in the El Parabién Ranch area indicate the presence of a deep basin containing sedimentary fill with a thickness of 2.2 km [SFG/TIs¹⁸]. Here we name this feature as the El Parabién basin [p. 81-82, Figs. 6 and 7]

...

The relatively shallow structural depression between the PHS and Sierra Juarez was informally named the “Conejo Medanos Basin” by Jiménez and Keller (2000, Fig. 7; **Fig. 4-3a**). This small feature includes much of the MeB-Milagro Subbasin and the Méndez-Vergel Inflow Corridor that are located beneath broad topographic depression that separates the Sierras de Juárez and Sapello (**Fig. 4-2, Tbl. 4-1**; R. Chávez 1986, Drewes and Dyer 1993). From a binational GW-resource perspective, it is important to note that Jiménez and Keller found no geophysical evidence for a major “deep” GW basin in the Chihuahua part of their study area. According to Jiménez and Keller (2000, p. 82):

A significant point from a water-resources point of view is that the gravity anomalies show that the Mesilla Basin is separated from basins in Mexico by a structural high. In addition, the basins in Mexico are relatively small in areal extent suggesting that deep ground-water resources are limited [e.g., the entire JMASCJ well-field area].

4.2. Deep-Seated Structural Relationships and Bedrock-Stratigraphy

Block diagrams like **Figure 4-4** are schematic illustrations that are designed to portray major structural and stratigraphic components of the uppermost Earth crust in three dimensions (3-D). This diagram shows provisional interpretations of available information on deep-subsurface conditions in the southern Rio Grande (RG) rift area of New Mexico, Texas, and Chihuahua. Inferences on subsurface relationships are based on interpretations of 1) borehole logs of oil & gas-exploration wells, 2) gravity and seismic geophysical-survey, and 3) detailed maps (e.g., Woodward *et al.* 1978, Seager and Morgan 1979, Seager *et al.* 1987,

Seager 1995, Collins and Raney 2000, Jiménez and Keller 2000, Hawley *et al.* 2005).

Initial compilation scale was 1:100,000, with no vertical exaggeration (VE); and the diagram’s base elevation is 25,000 ft (7.6 km) bmsl. Its geographic position is shown on an oval-shaped section of 2017 Google earth® image, which allows portrayal of the surrounding landscape features of the Basin & Range province-Mexican Highland section (**Figs. 1-1, 1-4, 3-2a**). An explanation of bedrock and basin-fill hydrostratigraphic units is on **Table 4-3**, which also serves as an explanation for stratigraphic units in **Figures 4-5** and **4-6**. The International Boundary aligned north-facing panel extends across the southern MeB between the East Potrillo Uplift (late Tertiary) and the Cerro del Cristo Rey igneous-intrusive center (early Tertiary). The west-facing panel of extends across the East Potrillo-East Robledo fault system, which forms the western edge of the MeB. The blue shading at the southern edge of the Google earth® image basemap shows the approximate area of the northeastern Los Muertos Basin below was inundated by 1,210-m amsl high stands of pluvial-Lake Palomas between about 29,000 to 12,000 years ago (*cf.* **Fig. 1-11** and **Part 3.3.2**).

In the **Figure 4-4**, major RG-rift stratigraphic and structural features are portrayed schematically to a base elevation of 7.6 km (25,000 ft) bmsl, with the Eocene Cristo Rey igneous-intrusive complex (red) in the upper corner. Blue shading at the right on the 2017 Google earth®-image base map covers a NE Los Muertos Basin area below an altitude of 1,210-m amsl that was inundated during deep stages of pluvial-Lake Palomas between about 29 to 12 ka (*cf.* **Figs. 1-3, 1-8, 1-11** and **1-12**).

18 SFG/TIs: Most of the “sedimentary fill” is here interpreted as a pre-SFG Laramide-basin deposit of Early Cenozoic Age (*cf.* Tbls. 1-2A and 1-3).

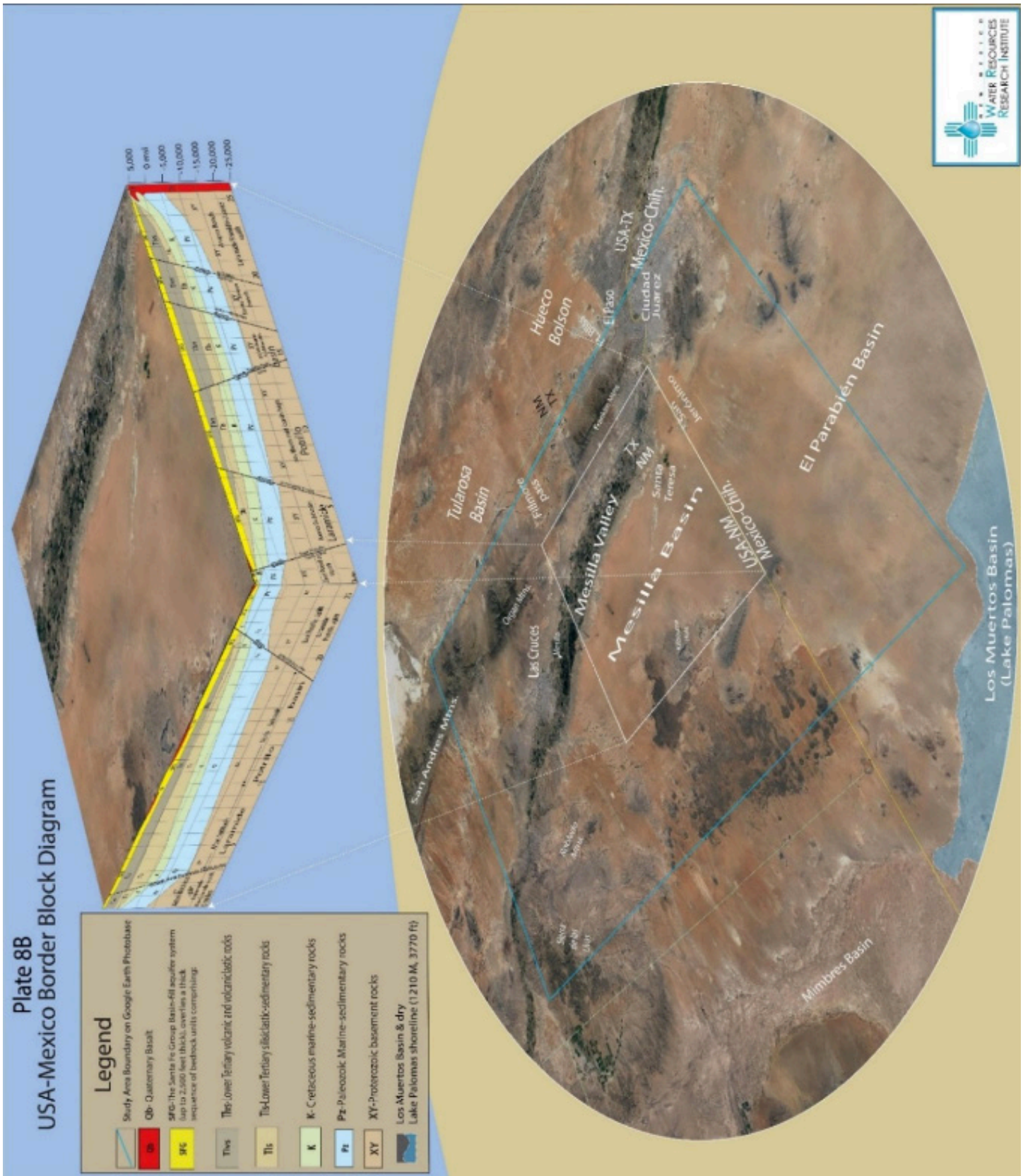


Figure 4-4: (Northeast-facing block diagram of the southern Mesilla Basin, with its southern panel at the International-Boundary. The Study Area is outlined in blue; and the map-symbol explanation is on **Table 4-3**. Swanson Geoscience LLC compilation.

TABLE 4-3: (Explanation of the Stratigraphic Units on Figures 4-4 to 4-6.

Post-SFG HSUs-not shown. Includes alluvial deposits of the inner Rio Grande Valley (**RA**), and thin, but locally extensive basaltic volcanics (**Qb**). Mostly middle to late Quaternary age **SFG**

SFG Santa Fe Group Hydrostratigraphic Units (HSUs)-Undivided.

Middle to Lower Tertiary Igneous Extrusive/Intrusive and Non-marine Sedimentary Rocks

Tba Basaltic andesite volcanic rocks—late Oligocene; lava flows and vent-zone units, with interlayered mudstones, sandstones and conglomerates (*cf.* **Tmrs**)

TmCH Cedar Hills vent zone. N-S aligned series of flow-banded rhyolite domes and feeder conduits intruded into the Cedar-Corralitos Upland Basin stratigraphic sequence—Oligocene

TmLC Lanark Complex—Intermediate to silicic igneous-intrusive complex that forms central part of the Northern Mid-Basin High and is buried by at least 1,500 ft (455 m) of SFG basin fill—Oligocene (*cf.* Hawley et al, 2021, **PLS. 2, 5i and 5q**; Phillips-Sunland oil test: Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 237; Clemons 1993)

Tmi Intermediate to silicic (felsitic) plutonic rocks in the Organ and Dona Ana Mountains, and Mt. Riley-Cox and **TmLC** areas, including monzodiorite to syenite stocks—Oligocene and Late Eocene (Seager *et al.* 1987, Clemons 1993, Seager 1995)

Tmrs Silicic pyroclastic and volcanoclastic rocks—Oligocene; mainly rhyolite and latite ashflow tuffs and tuffaceous sandstones, with some capping basaltic-andesite flows (**Tba**)

Tlvs Volcanoclastic sedimentary rocks, andesitic to dacitic flows and breccias in exposed in uplifts flanking much of the northern and central Study Area. The unit is about 3,880 ft (1,183 m) thick in the Mobile-Grimm oil test (Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 180; Clemons 1993).

Tls Mostly siliciclastic sedimentary rocks, sandstones, mudstones and conglomerates with minor or no volcanoclastic constituents—lower Eocene and Paleocene. The unit is about 7,000 ft (2,134 m) thick in the Mobil-Grimm oil-test well (Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 180). An inferred correlative sequence of siliciclastic rocks is at least 1,000 ft (330 m) thick in the Pemex-Moyotes oil-test well (Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 397; Thompson *et al.* 1978, Jiménez and Keller 2000)

Mesozoic Sedimentary Rocks-Mostly Marine, and Commonly Structurally Deformed

K Lower Cretaceous marine rocks undivided. Sandy to shaly limestone, coquina limestone, silty shale, calcareous sandstone, and limestone-pebble conglomerate, with local gypsite interbeds; approximately 1550 to 2200 ft (470-670m) thick exposed in the Sierras Juárez and Sapello and Cerro Cristo Rey. 1,050 ft (320 m) penetrated in the Grimm oil-test well (Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 180). In the Pemex-Moyotes oil-test well, the Lower Cretaceous section is 5,512 ft (1,680 m) thick (Hawley et al, 2021, **PL. 5s, TBL.1:** no. 397)

J Jurassic marine rocks-undivided: limestone, shale, gypsite; and possibly halite beneath the southeastern part of the Study Area; present in the shallow subsurface but not exposed in Sierra Sapello. A 3,380 ft (1,130 m) thick Jurassic section was penetrated in the Pemex-Moyotes oil-test well between Permian (**P**) and Lower Cretaceous (**K**) rocks (Hawley et al, 2021, **TBL. 1:** no. 397)

Paleozoic Sedimentary Rocks-Mostly Marine, and Commonly Structurally Deformed

Pz Paleozoic rocks, Pzu/Pzl-undivided

Pzu Upper Paleozoic (Pennsylvanian and Permian) rocks-undifferentiated: primarily limestone and redbed mudstones, with shale, sandstone and gypsite

Pzl Middle and Lower Paleozoic rocks-undivided: Middle Paleozoic (Devonian and Mississippian) —primarily limestone, with shale. Lower Paleozoic (Cambrian-Ordovician-Silurian)—primarily limestone and dolomite, with thin basal sandstone

Proterozoic (Precambrian) Rocks

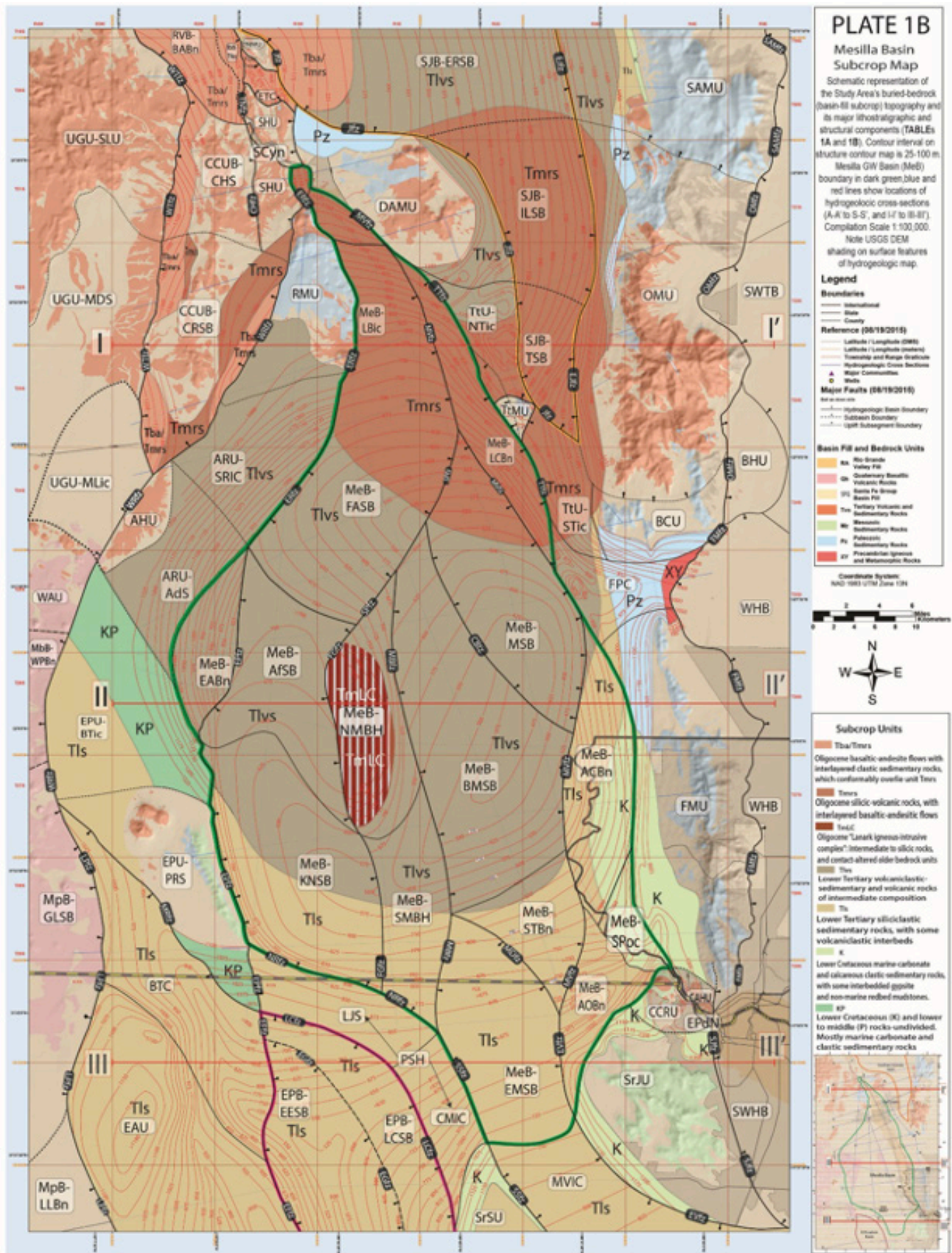


Figure 4-4: (Northeast-facing block diagram of the southern Mesilla Basin, with its southern panel at the International-Boundary. The Study Area is outlined in blue; and the map-symbol explanation is on **Table 4-3**. Swanson Geoscience LLC compilation.

4.3. Primary Hydrogeologic Components of “the Bottom of the Aquifer”

“..., but as yet there is no ‘comprehensive agreement on groundwater,’ and transboundary aquifers such as the Hueco Bolson and the Mesilla Bolson are subject to uncontrolled, unregulated withdrawals under which neither country is assured of either a secure supply or a fair share. Rather we have the law of ‘he who pumps fastest’, or the rule of ‘we’ll race you to the bottom of the aquifer’ subject only to general principles of international law... Surely this is speculation of the worst kind (Utton 1983, p. 26; *cf.* Hawley 2020).”

Figure 4-5 schematically portrays the topography, and primary stratigraphic and structural components of the bedrock terrane that is buried by Upper Cenozoic basin-fill deposits in the NM WRRI Study Area (*cf.* **Figs. 1-8, 4-2 and 4-4**). The boundaries of the Mesilla and El Parabién GW Basins (MeB and EPB) are in green and violet, respectively; and explanations of chronostratigraphic- and hydrostratigraphic units in **Figures 4-4 to 4-6** are in **Tables 1-3 and 4-3**. The variable structure-contour interval on the buried bedrock surface is 25-, 50-, 100-m amsl. West to east red lines crossing the southern part of **Figure 4-5** show the locations of geologic cross sections II-II' and III-III' on **Figure 4-6**, which have been designed illustrate basic geologic (stratigraphic and structural) relationships to depth of about 3 km (10,000 ft) below msl. Section II-II' crosses the central MeB area that includes the deeply buried Lanark intrusive complex (TmLC) that forms much of the Mid-Basin High (MeB-MBH); and Section III-III' show general subsurface relationships in an area located about 5 mi (8 km) south of the International Boundary.

Figures 4-5 and 4-6 represent the first effort to create an approximation of 1) the basal topography of the RG-rift basin fill, and the maximum depth of associated aquifer¹⁹ systems in the NM WRRI Study Area (**Fig. 1-3**; *cf.* Utton 1983, p. 26). They are based on a synthesis of all available geological and/geophysical information (published and unpublished) that has been acquired by the John Hawley since the start of his work in the MBR in late 1962. Both illustrations were designed to help address the “*white map syndrome*” problem as originally described by Octavio Chavez (2000; **Part 1.1**).

In the **Figure 4-5**, the variable-contour interval is 25-, 50-, and 100-m amsl. Mesilla and El Parabién

GW Basin (MeB and EPB) boundaries are in green and violet, respectively. W-E red lines show locations of geologic cross-sections II-II' and III-III' (**Fig. 4-6**). The Lanark igneous-intrusive complex (TmLC) forms the core of the Northern Mid-Basin High (MeB-NMBH, II-II') has a maximum subcrop area of ~84 km².

4.4. Stages of Rift-Basin Evolution and Santa Fe Group (SFG) Deposition

4.4.1 EARLY AND MIDDLE STAGES OF BASIN FORMATION AND SFG DEPOSITION

Earth-crustal extension, with differential displacement (including rotation) of basin and mountain blocks, and associated igneous activity are the primary deep-seated processes that are reflected in the composition of SFG aquifer systems throughout the RG-rift tectonic province. During early stages of basin filling, the initially separate Mesilla-El Parabién-Los Muertos and Hueco-Tularosa basin groups received a major influx of fine- to medium-grained sediments from nearby upland areas that had been sites of Laramide uplift and basin formation, as well as late Eocene and Oligocene volcanic activity (Henry and Price 1985, Clemons 1993, Seager and Mack 2004, Seager *et al.* 1997, Lawton 2004, Mack 2004, Seager 2004). It is here inferred that the Mesilla-El Parabién-Los Muertos rift-structural trend probably served as the primary terminal-discharge site for regional surface- and subsurface-water flow during the entire period of SFG deposition, and possibly even earlier during the Paleocene-Eocene (Laramide) interval (**Tbls. 1-2A and 1-3**).

In contrast with the high-relief basin-boundary terrain of the present landscape, uplifts like the Robledo and East Potrillo Mountains had little or no significant topographic expression until the later part of Miocene Epoch (5 to 10 Ma). High-relief basin-border areas during Late Oligocene to mid-Miocene stages of SFG deposition appear to have been limited to the Organ and Doña Ana calderas, the Mount Riley-Cox intrusive center, Sierra de las Uvas, and parts of the San Andres, Franklin, and Sierra Juarez ranges (**Fig. 1-3, cf. Figs. 4-4 to 4-6**). According to this early rift-development interpretation, the dominant lower and middle SFG depositional environments comprised alluvial and ephemeral-lake plains, with down-wind eolian sand tracts on eastern-basin fringes. Because of their deep burial in most parts of the region, Formation-rank lithostratigraphic names have not been assigned to the

¹⁹The dynamic top of an aquifer is the potentiometric surface or water table (Fig. 1-9; Tbl. 1-5).

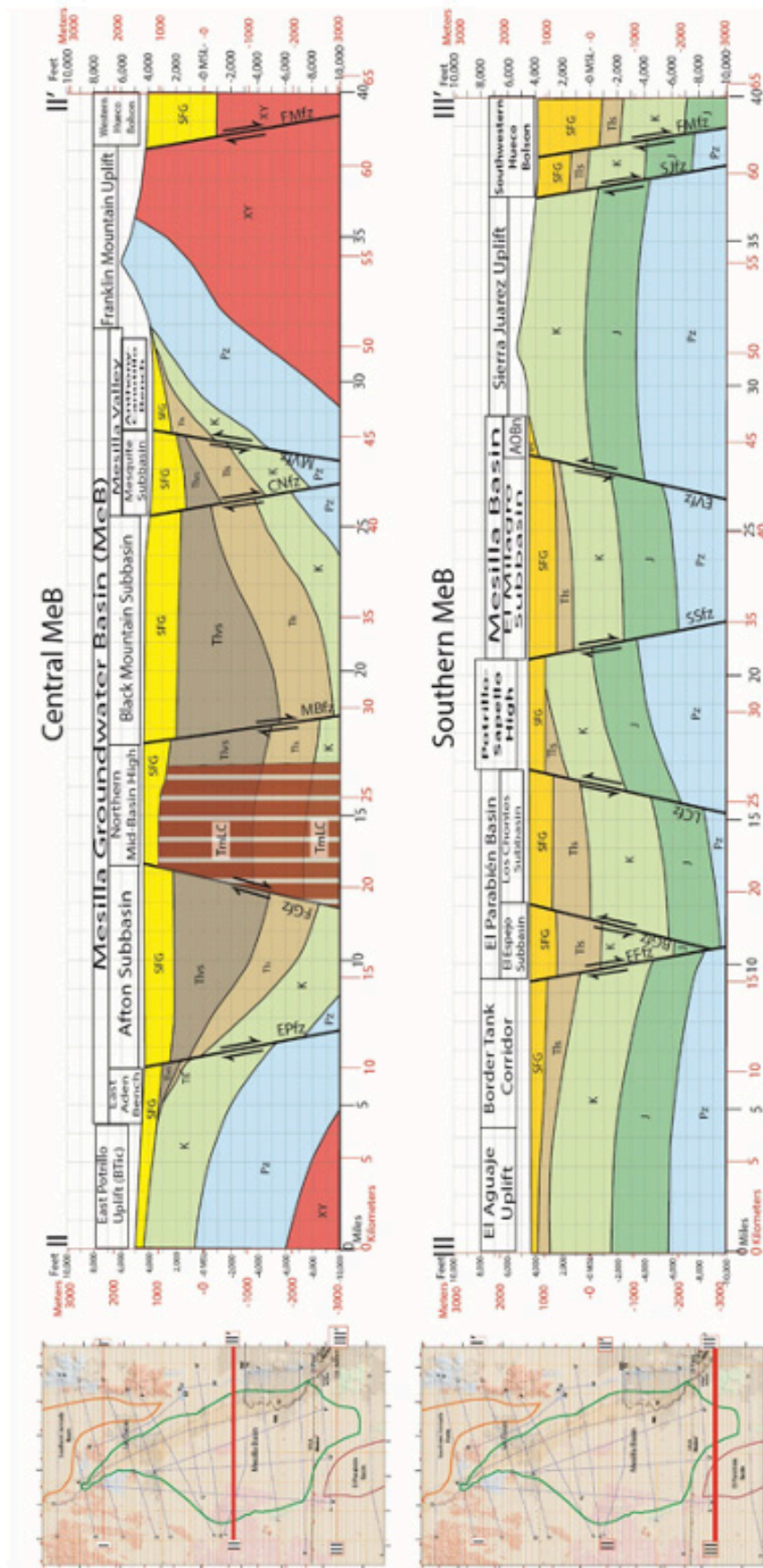


Figure 4-6: Two schematic hydrogeologic cross sections that show representative, RG-rift stratigraphic and structural features in the central and southern part of the Study Area. Section base elevation is 10,000 ft (3 km) below mean sea level (bmsl), and vertical exaggeration (VE) is about 2.5. Section locations shown on **Figure 4-5**, with stratigraphic-unit explanations are on **Table 4-3**. Swanson Geoscience LLC compilation.

lower and middle parts of the SFG in the Mesilla GW Basin (e.g., Hayner Ranch and Rincon Valley Fms: **Fig. 1-8**).

The most distinctive lithofacies type in the lower SFG deposits of the eastern MeB comprises thick deposits of well-sorted, fine to medium sand that forms a very productive “deep-aquifer” zone beneath the eastern Mesilla Valley floor in the southeastern MeB (Hawley and Kennedy 2004, *cf.* Hawley *et al.* 2021- 6.3.5). However, the nature of their role as active parts of the present-day GW-flow regime remains enigmatic (*cf.* Hawley *et al.* 2021, **7.2.1**). The unit was first identified by Leggat and others (1962) in the EPWU-Canutillo well field and later by Wilson and others (1981) beneath the central Mesilla Valley area (*cf.* Cliett 1969, W.E. King *et al.* 1971, Hawley 1984, Cliett and Hawley 1996). These partly consolidated sediments, which are as much as 600 ft (183 m) thick in the EPWU Canutillo Well-Field area, have long been interpreted as ancient dune-field deposits that have present-day analogs in the Great Sand Dunes of Colorado’s San Luis Basin, and the Médanos de Samalayuca (**Figs. 1-1, 1-4, 1-11, 1-12, and 3-2a**).

Most of the Middle SFG was deposited during middle- to late-Miocene time when maximum differential movement occurred between the central rift-basin blocks and flanking mountain uplifts. In the Mesilla Basin east of the present location of the MeV, the primary basin-fill component of the Middle SFG comprises coarse-grained fan-piedmont alluvium derived from the rapidly rising southern Organ and Franklin uplifts (**Fig. 1-3**). The developing Robledo and East Potrillo Uplifts contributed similar piedmont-alluvial facies to westernmost parts of the Mesilla Basin during the Late Miocene. Beneath the MeB’s broad West Mesa area, however, the predominant Middle SFG lithofacies is a thick sequence of interbedded sand and silt-clay beds also forms the basin’s most extensive aquifer zone. The unit is locally as much as 1000 ft (305 m) thick (Hawley *et al.* 2021-Pls. 3f, 4a-d, 5c); and analyses of driller and sample logs suggest a major component intertonguing of distal-piedmont-slope and basin-floor facies, with the latter including interbedded playa-lake, alluvial-flat, and eolian deposits.

4.4.2. LATE-STAGE RIFT-BASIN DEVELOPMENT AND CULMINATION OF SFG DEPOSITION

All major structural components of the basin and bedrock uplifts of the present regional landscape had formed by Late Miocene time (10 to 5 Ma), with

the Robledo and East Potrillo uplifts being the most recent to emerge as prominent mountain landforms (Seager and Mack 1994, Seager *et al.* 2008). There is no stratigraphic or geomorphic evidence, however, to suggest that surface-drainage systems exited the Mesilla Basin region during the 20 to 25 Ma interval of Lower and Middle SFG deposition. Early basins in the southern RG-rift region appear to have existed as a slowly aggrading, poorly integrated group of structural depressions until a sediment-loaded Ancestral Rio Grande (AGR), with headwaters in the Southern Rocky Mountains, entered the Palomas Basin as early as 5 Ma (Mack 2004, Connell *et al.* 2005, Mack *et al.* 2006 and 2009, Hawley *et al.* 2009, Koning *et al.* 2018). ARG deposits of Early Pleistocene Age mark the culmination of SFG basin-fill deposition throughout the southern New Mexico border region (**Part 3.4**; *cf.* Hawley *et al.* 1969, Gile *et al.* 1981, Mack *et al.* 2006; **Figs. 3-4 and 3-5**).

4.5. Middle- to Late-Quaternary Evolution of the Rio Grande-Rio Bravo Fluvial System

Uplift of the Organ-Franklin-Sierra de Juárez mountain chain and subsidence of the Mesilla and Hueco RG-rift basins in the early part of the Pleistocene Epoch, between 1 and 2.6 Ma, resulted in a short-lived shift of ARG fluvial-deltaic distributaries into parts of the southern MeB and EPB that include three lowland areas: (1) EPdN, between the Franklin Mountain and Cerro Cristo Rey uplifts; (2) the Méndez-Vergel Corridor of Hawley and others (2021 [Fig. 1-9]) between the Sierras de Juárez and Sapello; and (3) the broad fluvial-deltaic plain west of Sierra de Sapello that extends southward to the Bolsón de los Muertos (**Figs. 1-3, 1-12 and 3-1**).

Details of the tectonic and fluvial-geomorphic processes involved in integration of the ancestral Upper Rio Grande with a Lower Rio Grande [Bravo] system that connected glaciated parts of the Southern Rocky Mountain province with the Gulf of Mexico have yet to be worked out (Connell *et al.* 2005, Ruleman *et al.* 2019). Nonetheless, the river has occupied its present valley and canyon positions for at least the past 0.75 Ma (**Tbl. 1-3; Fig. 1-8**). Middle- to Late-Quaternary entrenchment of the river’s valleys and canyons during full-glacial parts of glacial-interglacial cycles resulted in diachronous cessation of Santa Fe Group deposition throughout the RG-rift province (Pazzaglia and Hawley 2004, p. 429; Connell *et al.* 2005 [Fig. 11c],

W. Galloway 2005, Mack *et al.* 2006). Ongoing field USGS field investigations in the Rio Grande's Southern Rocky Mountain headwaters region, moreover, now demonstrate that the Rio Grande basin in Colorado was not integrated with downstream reaches in north-central and southern New Mexico until after about 430,000 years ago (Machette *et al.* 2013, Ruleman *et al.* 2019). The triggering event was caused by abrupt overflow of Paleo-Lake Alamosa in the San Luis Basin of south-central Colorado (Machette *et al.* 2013).

The following observations by Hawley and Kottowski (1969, p. 98) are especially relevant with respect to the latest stage of deep river-valley and canyon incision in the MBR (**Fig. 1-1**):

Information from well drillers, examination of cuttings from several wells, and review of published information on local ground-water conditions (Sayre and Livingstone, 1945; Conover, 1954; Leggat *et al.*, 1963) indicate that the late Quaternary river deposits extend no more than 25 meters below the floodplain level. This depth represents the approximate thickness of unconsolidated sediments over [Eocene andesitic] bedrock at the International Dam Site [**Fig. 6-3**] in El Paso Canyon (Slichter, 1905) and over Tertiary volcanics and sediments in the lower Selden Canyon area.

The timing of Late Pleistocene pluvials and interpluvials is in close agreement with the age ranges of glacial and interglacial intervals currently recognized in the Upper Rio Grande basin of the Southern Rocky Mountain province (*cf.* Armour *et al.* 2002, Pazzaglia 2005). Moreover, the fluvial-geomorphic genetic sequence of river-valley/canyon evolution conforms closely with the 3-stage sequence initially described by Stanley Schumm (1965, p. 790-792): (1) excavation of the axial valley and at least the lower segments of tributary valleys during waxing and full-glacial intervals, (2) deposition during waning glacial and early interglacial times, and (3) relative stability during the remainder of a given interglacial interval.

4.6 Introduction to the Paleohydrology of an Interlinked Pluvial-Lake Palomas—El Paso del Norte GW-Flow System

One the major contributions of WRRI-coordinated hydrogeologic research in the MBR has been better documentation that episodic river-channel incision in the Lower MeV-EPdN area had a major impact on the behavior of the pluvial-Lake Palomas-sourced regional GW-flow system that terminated in the shallow RG-alluvial aquifer zone at the lower end of the MeV (**Figs.**

1-7, 1-11 and 1-12; cf. Parts 6.4.2 and 6.4.3). Lake drainage by the process of GW (underflow) discharge to the Transboundary aquifer system is associated with Lake Palomas high-stand levels between 1,200 and 1,210 m amsl at times when the altitude of the MeV the head of EPdN was in the 1,111 to 1,135 m amsl range (*cf.* Hawley *et al.* 2021: **PLS. 5o, 5k and 5l**). As first stated by Kennedy and Hawley (2003, p. 181):

During major glacial-pluvial intervals of the Late Quaternary, a complexly linked system of intermontane basin lakes and through-going streams dominated the geohydrologic setting the Paso del Norte region of southern New Mexico, Trans-Pecos Texas, and Chihuahua, Mexico. [The] Hydrogeologic setting and fluctuating paleoclimatic conditions were the major controls on size and permanence of lakes and streams in [what is] now [the] arid to semiarid Chihuahuan Desert region of the Basin and Range—Mexican Highland section. Bolson complexes of the region have both *open* and *closed* topographic components, but many *closed* subbasins are *partly drained* hydrologic systems with groundwater inflow and outflow links with adjacent areas [*cf.* **Part 4.1.1**]. The entrenched Rio Grande/Bravo fluvial system formed the regional discharge zone or *sink* for large amounts of surface and subsurface flow during much of the Middle and Late Quaternary.

The Mesilla and El Paso/Juárez Valleys of the Rio Grande/Bravo (1,090-1,175 m [amsl]) bisect the floors of the Los Muertos-Guzman-Santa María and Tularosa-Hueco bolson complexes (1,175-1,210 m), which are the sites of the region's two largest pluvial lakes, Palomas (Chihuahua) and Otero (New Mexico). At highest (Wisconsinan) stages, Lakes Palomas and Otero had areas of at least 7,500 and 2,000 km², respectively. Linked *closed* basins with smaller pluvial lakes include the Playas-Basilio and Hachita-Moscós basins that drain to the Rio Casas Grandes Valley of northwestern Chihuahua [Hawley *et al.* 2000; Kennedy *et al.* 2000]. Watersheds (~3,000-m max elev.; 63,700 km² area) contributing to Lake Palomas include highlands bordering the northern Sierra Madre Occidental (Rios Casas Grandes, Santa Maria and Carmen headwaters) and southeastern ranges of the Datil-Mogollon—Transition Zone province (Mimbres River source). . . [**Figs. 1-4 and 3-2a**]. In many places, major shoreline features with good age control are visible on LANDSAT imagery; and advanced GIS technology enables basin-scale paleohydrologic and hydrogeologic reconstructions.

Groundwater-flow regimes have been materially affected by episodic valley/canyon incision during at least four Middle- to Late-Pleistocene glacial-pluvial intervals in the southern New Mexico border region's two major through-going river systems, the Gila River and the Rio Grande (**Fig. 1-4**). Emphasis here is on the parts of the Bolson de los Muertos and central Tularosa Basin that were occupied by pluvial-Lakes Palomas

and Otero during the middle- to later-part of marine oxygen-isotope stage (OIS) 2, which lasted from about 29 to 11 ka (Lisiecki and Raymo 2005, and Stein *et al.* 2006,

With respect to hydrogeologic-framework controls on groundwater flow and chemistry in the MBR, Mid- to Late- Pleistocene river-valley/canyon entrenchment produced an almost complete reversal in the dominant southward-directed GW-flow system of Pliocene and Early Pleistocene time, a process first recognized by W.T.Lee in 1907 (p.22). From a regional hydrogeologic-framework perspective, the post-SFG valley/canyon incision has resulted in overall drainage of aquifers in contiguous endorheic intermontane basins of the MBR (Hawley and Kennedy 2004, Hawley *et al.* 2009; Hawley *et al.* 2021, Part 3.9 and 7.6.2).

The general potentiometric-surface configuration and GW-flow boundary positions shown on **Figures**

1-7 and **1-12** illustrate how saturated parts of the Upper SFG-ARG distributary fluvial system (DFS, **Fig. 3-4**) now function as an enormous system of high-permeability drains that deliver large volumes of underflow recharge to the shallow aquifer systems of the inner-MeV in the area between La Union and EPdN (**Figs. 1-3** and **3-11**). In addition, such deposits serve as very efficient conduits for transport from residual GW reservoirs in the Study Area's Transboundary Aquifer system that were periodically replenished by underflow discharge from pluvial-Lake Palomas and precursor intermittent to perennial lakes during Middle- to Late-Pleistocene pluvial intervals (*cf.* Hawley *et al.* 2021-Parts 7.2.2 and 7.6).

4.7. Summary of Major Stages of Hydrogeologic-Framework Development During the Past 30 Million Years (Table 4-4)

TABLE 4-4: Major Stages of Hydrogeologic-Framework Development During the Past 30 Million Years of Cenozoic Time (*cf.* Tbl. 1-3 and Fig. 1-8).

1. Deposition of the Late Oligocene to Mid-Miocene, Lower Santa Fe Group (SFG) deposits in endorheic, early-stage RG-rift basins. Partly-consolidated, sand-dominant eolian and piedmont-alluvial facies are the primary components of deep aquifers that are presently known to occur beneath the east-central MeV.
2. Deposition of the Mid- to Late-Miocene, Middle SFG basin fill in actively subsiding RG-rift basins during a transitional period of Upper RG drainage-basin evolution from endorheic to early-stage exorheic. Thick, partly-consolidated, sand-dominant eolian and alluvial/fluvial facies of the Middle SFG Hydrostratigraphic-Unit (MSF2) are the primary aquifer-system components beneath the central and southern parts of the MeB.
3. Deposition of Pliocene and Lower Pleistocene, Upper SFG basin fill during an interval marked by presence of an Ancestral Rio Grande (ARG) fluvial-deltaic system that terminated in endorheic paleo-lake basins of the Hueco Bolson-Mesilla Basin-Bolsón de los Muertos region. Sand-dominant ARG fluvial facies of Hydrostratigraphic-Unit USF2 are the primary aquifer-system component beneath the north-central part of the MeB.
4. The Mesilla Valley (MeV) is part of series of deep canyon and valleys cut by the Rio Grande during at least four major intervals of fluvial erosion that correlate with Pleistocene glacial/interglacial cycles. Valley and canyon incision began about 0.75 Ma soon after integration of a through-going river that discharged in the Gulf of Mexico, and had its headwaters in the southern Rocky Mountain region (**Part 4.5**).
5. Intervals of river-valley/canyon entrenchment coincided with major mid- to late-Pleistocene glacial-interglacial cycles with 100 to 150 ka periodicity, which are generally correlative with cyclic formation of large pluvial lakes in adjacent parts of the endorheic Palomas and Los Muertos RG-rift basins. Conversely, interglacial stages, like the present Holocene Epoch (past 11 ka) are characterized by partial alluvial backfilling of inner river-valley/canyon areas; and they are generally coeval with intervals of ephemeral-lake plain formation aggradation in neighboring endorheic basins.
6. The final interval of deep, RG-valley/canyon incision occurred during the last full-glacial stage (~12 to 29 thousand years ago). At that time the river-channel in the Sunland Park-Courchesne Bridge reach was about 25 m lower than it is now (alt. ~1106 m amsl); and the water table altitude at the northeast edge of pluvial-Lake Palomas about 60 km to the southwest was about 1,210 m amsl (**Part 7.7**).
7. By the Early Holocene interglacial stage, however, discharge and sediment-load conditions in all but the river's headwaters reaches were no longer conducive significant incision of the valleys and canyons of Middle and Lower Rio Grande/Bravo system; and the river's channel/floodplain base level (its associated water table) has remained in an essentially quasi-equilibrium (graded) position for at least the last 9,000 years.

Accelerating global-climate and associated regional-environmental changes may have already signaled the end of the well-documented glacial-interglacial cycles of the Quaternary Period, and the beginning of the "Anthropocene Epoch." If so, planning horizons for water-resource management are now in the multi-decade range (e.g., Davis 2020f-i, Overpeck and Udall 2020, Siegel 2020, Williams *et al.* 2020, Brannen 2021, Davis 2021b-c, Zalasiewicz *et al.* 2021; *cf.* **Table 1-3**; Hawley *et al.* 2021-APNDX. E4).

5. Basin-Scale Hydrogeologic Framework Composition

A system for hydrogeologic-framework classification of intermontane-basin deposits that was initially developed by the NM Bureau of Geology & Mineral Resources (NMBGMR) in cooperation with the WRI and USGS in the 1980s, and has been subject to series of subsequent refinements. It is designed primarily for “basin-scale” hydrogeologic-framework characterization (here ~1:100,000) of SFG basin-fill and river-valley alluvial-fill deposits, and has three primary *geologic-material* components:

1. Sedimentary Lithofacies-Assemblages (LFAs) in SFG basin-fill and river valley-fill deposits
2. Hydrostratigraphic Units (HSUs) comprising an LFA or LFA-combination that are designed for both surface and subsurface mapping of basin- and valley-fill deposits.
3. Bedrock-lithologic, and structural boundary components of interbasin RG-rift uplifts, and intra-basin areas.

The Lithofacies Assemblage and Hydrostratigraphic Unit (*LFA* and HSU) classification system has been designed as a relatively simple, semi-quantitative tool for interpretation of how basin-scale geohydrologic systems are influenced by 1) sedimentary-facies distribution in sequences of hydrostratigraphic mapping units, and 2) bedrock- and structural boundary conditions (Hawley *et al.* 2021- PLS. 1, 2, 5 and 7). It facilitates systematic organization of large amounts of information with wide variation in quality and scale. State-of-practice GIS methodology now allows graphical display of hydrogeologic-framework elements in 3-D formats so that basic information and inferences on geohydrologic attributes (e.g., hydraulic conductivity, transmissivity, and anisotropy) may be transferred to basin-scale numerical models of GW-flow and hydrochemical systems (*cf.* Siegel 2008, Siegel and Hinchey 2019; Hawley *et al.* 2021-APNDX A2). The *LFA*-HSU classification scheme has already been used in other “alluvial basins” of the RG-rift region (e.g., Hawley and Haase 1992, Thorn *et al.* 1993, Kernodle *et al.* 1995, Hawley and Kernodle 2000, Hawley *et al.* 2000, McAda and Barrow 2002, Plummer *et al.* 2004, Hawley *et al.* 2009).

5.1. Lithofacies Assemblages (LFAs)

Lithofacies Assemblages (*LFAs*) form the basic hydrogeologic-framework components. *LFA* classes are defined primarily on the basis of grain-size

distribution, mineralogy, sedimentary structures, and degree of post-depositional alteration. Inferred environments of deposition form the secondary basis for facies-assemblage definitions (**Tbl. 1-5**). The general distribution pattern of the major *LFAs* in intermontane-basin fill of the RG-rift province are schematically portrayed on **Figure 5-1**. *LFAs* have distinctive geophysical, geochemical and hydrologic attributes, and they provide a mechanism for showing the distribution patterns of a wide range of aquifer- and vadose-zone conditions on hydrogeologic cross sections and isopleth maps (Hawley *et al.* 2021-PLS. 5 and 7). Basin and river-valley fills are subdivided into thirteen major assemblages (*LFAs 1-10 and a-c*), which are ranked in decreasing order of aquifer-production potential (**Fig. 5-1, Tbl. 5-2**). *LFAs* represent four major intermontane-basin depositional environments: basin floors (*1-3, 9, 10, c*), piedmont slopes (*5-8*), river-valley floors (*a1-a3*), and river-valley borders (*b*). *LFA 4* primarily comprises partly-cemented eolian sand deposited in deeply buried dune-field complexes that are analogs of the present-day Médanos de Samalayuca (**Figs 1-11 and 1-12**).

5.2. Hydrostratigraphic Units (HSUs)

“A hydrostratigraphic unit may represent an entire [litho-] stratigraphic unit, a portion of a stratigraphic unit, or a combination of adjacent stratigraphic units with consistent hydraulic properties” (Giles and Pearson 1998, p. 322; *cf.* Maxey 1964). Based on distinctive *LFA* compositions and well-defined lithostratigraphic-sequence positions, HSUs provide the primary mechanism for hydrogeologic mapping of RG-rift basin deposits (**Fig. 1-8** [right column]; *cf.* Hawley and Kernodle 2000, Hawley and Kennedy 2004, and Hawley *et al.* 2021-APNDX. A). Even-numbered alphanumeric codes (e.g., HSU’s USF2 and MSF2) designate SFG deposits composed of basin-floor *LFAs* (*1-3, 9-10*); and odd-numbered HSU codes refer piedmont-slope *LFAs* (*5-9*); e.g., USF1).

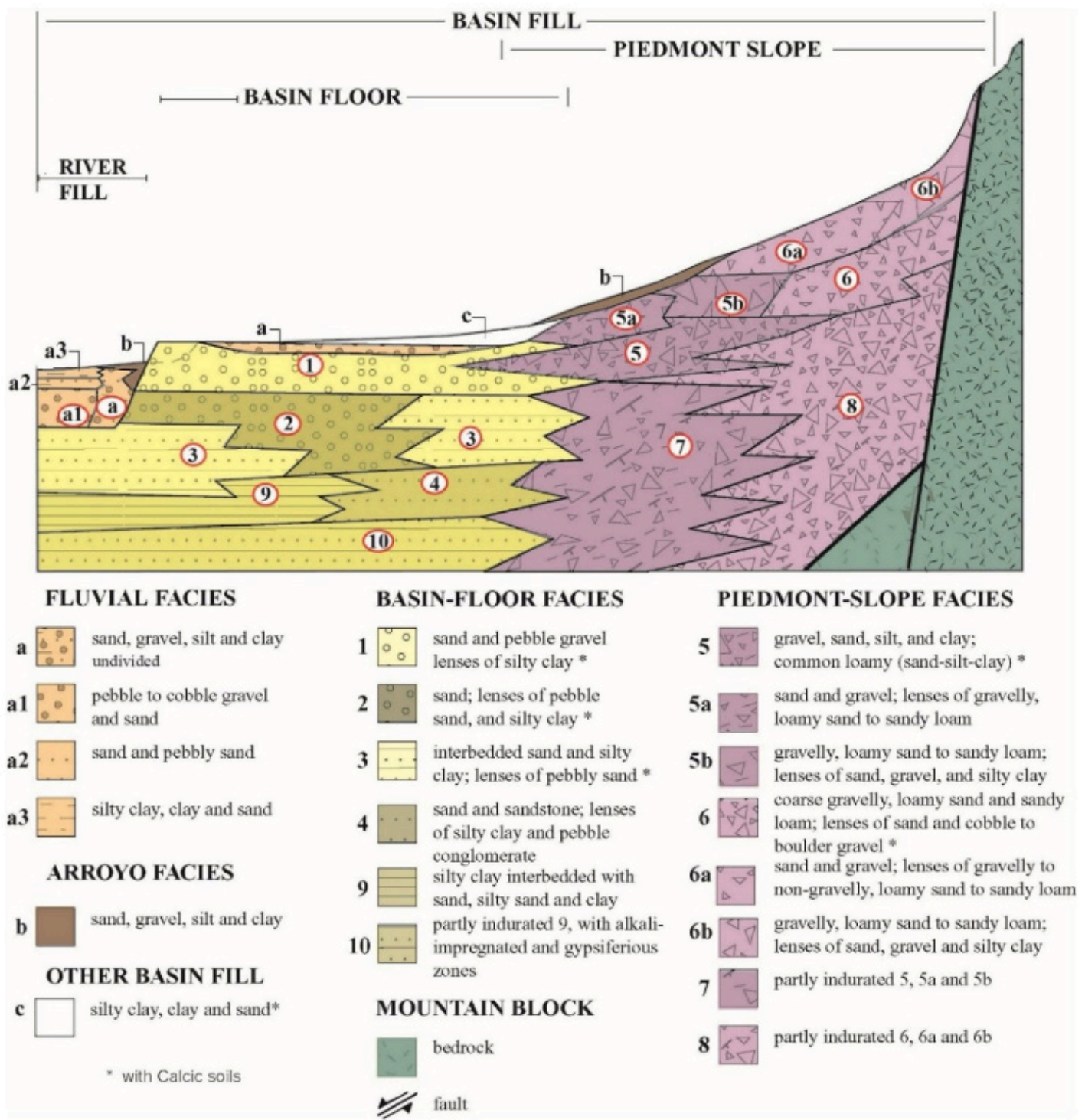


Figure 5-1: (Modified from Hawley and Kernodle 2000). Schematic distribution patterns of major Lithofacies Assemblages (LFAs) in intermontane-basin and river-valley fills of the Rio Grande rift province (See **TbIs. 5-1** and **5-2**. Note that LFAs 2 and 3 are the primary components of saturated parts of Upper and Middle Santa Fe Hydrostratigraphic Units (HSUs) USF2 and MSF2 (**Figs. 5-2** and **5-3**).

TABLE 5-1: (modified from Hawley and Kernodle 2000). Summary of depositional settings and dominant textures of major lithofacies assemblages (*LFA*s) in Santa Fe Group basin fill (1-10) and Rio Grande Valley fill (a-c) in the intermontane basins of the RG-rift province. See **Figure 5-1**, and **Tables 5-2** and **5-3**.

Lithofacies	Dominant depositional settings and process	Dominant textural classes
1	Basin-floor fluvial plain	Sand and pebble gravel, lenses of silty clay
2	Basin-floor fluvial, locally eolian	Sand; lenses of pebbly sand and silty clay
3	Basin-floor, fluvial-overbank, fluvial-deltaic, and playa-lake; eolian	Interbedded sand and silty clay; lenses of pebbly sand
4	Eolian, basin-floor alluvial	Sand and sandstone; lenses of silty sand to clay
5	Distal to medial piedmont-slope; alluvial fan	Gravel, sand, silt, and clay; common loamy (sand-silt-clay)
5 ^a	Distal to medial piedmont-slope, alluvial fan; associated with large watersheds; alluvial-fan distributary-channel primary; sheet-flood and debris-flow secondary	Sand and gravel; lenses of gravelly, loamy sand to sandy loam
5b	Distal to medial piedmont-slope, alluvial fan; associated with small steep watersheds, debris-flow, sheet-flood, and distributary-channel	Gravelly, loamy sand to sandy loam; lenses of sand, gravel, and silty clay
6	Proximal to medial piedmont-slope, alluvial-fan	Coarse gravelly, loamy sand and sandy loam; lenses of sand and cobble to boulder gravel
6 ^a	Like 5 ^a	Sand and gravel; lenses of gravelly to non-gravelly, loamy sand to sandy loam
6b	Like 5b	Gravelly, loamy sand and sandy loam; lenses of sand, gravel, and silty clay
7	Like 5	Partly indurated 5
8	Like 6	Partly indurated 6
9	Basin-floor-alluvial flat, playa, lake, and fluvial-lacustrine; distal-piedmont alluvial	Silty clay interbedded with sand, silty sand, and clay
10	Like 9, with evaporative processes (paleophreatic)	Partly indurated 9, with gypsiferous and alkali-impregnated zones
a	River-valley, fluvial	Sand, gravel, silt, and clay
a1	Basal channel	Pebble to cobble gravel and sand (like 1)
a2	Braided plain, channel	Sand and pebbly sand (like 2)
a3	Overbank, meander-belt oxbow	Silty clay, clay, and sand (like 3)
b	Arroyo channel and valley-border alluvial-fan	Sand, gravel, silt, and clay (like 5)
c	Basin floor, alluvial flat, ienega, playa, and fluvial-fan to lacustrine plain	Silty clay, clay, and sand (like 3, 5, and 9)

TABLE 5-2: (modified from Haase and Lozinsky 1992). Summary of major sedimentary properties that influence groundwater-flow and aquifer-production potential of Lithofacies Assemblages (*LFA's*) 1 to 10 in Santa Fe Group basin fill. See **Figures 5-1** and **5-2**, and **Table 5-1**.

Lithofacies	Ratio of sand plus gravel to silt plus clay ¹	Bedding thickness (meters) ²	Bedding configuration ²	Bedding continuity (meters) ³	Bedding connectivity ⁴	Hydraulic conductivity (K) ⁵	Groundwater production potential
1	High	>1.5	Elongate to planar	>300	High	High	High
2	High to moderate	>1.5	Elongate to planar	>300	High to moderate	High to moderate	High to moderate
3	Moderate	>1.5	Planar	150 to 300	Moderate to high	Moderate	Moderate
4	Moderate to low*	>1.5	Planate to elongate	30 to 150	Moderate to high	Moderate	Moderate
5	Moderate to high	0.3 to 1.5	Elongate to lobate	30 to 150	Moderate	Moderate to low	Moderate to low
5a	High to moderate	0.3 to 1.5	Elongate to lobate	30 to 150	Moderate	Moderate	Moderate
5b	Moderate	0.3 to 1.5	Lobate	30 to 150	Moderate to low	Moderate to low	Moderate to low
6	Moderate to low	0.3 to 1.5	Lobate to elongate	130 to 150	Moderate to low	Moderate to low	Moderate to low
6a	Moderate	0.3 to 1.5	Lobate to elongate	30 to 150	Moderate	Moderate to low	Moderate to low
6b	Moderate to low	0.3 to 1.5	Lobate	<30	Low to moderate	Low to moderate	Low
7	Moderate*	0.3 to 1.5	Elongate to lobate	30 to 150	Moderate	Low	Low
8	Moderate to low*	>1.5	Lobate	<30	Low to moderate	Low to moderate	Low
9	Low	>5	Planar	>150	Low	Very low	Very low
10	Low*	>5	Planar	>150	Low	Very low	Very low

¹ High >2; moderate 0.5-2; low <0.5
² Elongate (length to width ratios >5); planar (length to width ratios 1-5); lobate (asymmetrical or incomplete planar beds).
³ Measure of the lateral extent of an individual bed of given thickness and configuration.
⁴ Estimate of the ease with which groundwater can flow between individual beds within a particular lithofacies. Generally, high sand + gravel/silt + clay ratios, thick beds, and high bedding continuity favor high bedding connectivity. All other parameters being held equal, the greater the bedding connectivity, the greater the groundwater production potential of a sedimentary unit.
⁵ High 10 to 30 m/day; moderate, 1 to 10 m/day; low, <1 m/day; very low, <0.1 m/day.
 *Significant amounts of cementation of medium to coarse-grained beds (as much as 50%).

TABLE 5-3: (modified from Hawley and Kernodle 2000). Summary of major sedimentary properties that influence groundwater-flow and aquifer-production potential of Lithofacies Assemblages *a* to *c* in post-SFG river-valley and basin fills. See **Figure 5-1** and **Table 5-1**.

Lithofacies	Ratio of sand plus gravel to silt plus clay ¹	Bedding thickness (meters) ³	Bedding configuration ²	Bedding continuity (meters) ³	Bedding connectivity ⁴	Hydraulic conductivity (K) ⁵	Groundwater production potential
a	High to moderate	>1.5	Elongate to planar	>300	High to moderate	High to moderate	High to moderate
a1	High	>1.5	Elongate to planar	>300	High	High	High
a2	High to moderate	>1.5	Planar to elongate	150 to 300	Moderate to high	Moderate	Moderate
a3	Moderate to low	>1.5	Planar to elongate	30 to 150	Moderate to high	Moderate to low	Moderate to low
b	Moderate to low	0.3 to 1.5	Elongate to lobate	<300	Moderate	Moderate to low	Moderate to low
c	Low to moderate	0.3 to 1.5	Elongate to lobate	30 to 150	Low	Low	Low

¹ High >2; moderate 0.5-2; low <0.5
² Elongate (length to width ratios >5); planar (length to width ratios 1-5); lobate (asymmetrical or incomplete planar beds).
³ Measure of the lateral extent of an individual bed of given thickness and configuration.
⁴ Estimate of the ease with which groundwater can flow between individual beds within a particular lithofacies. Generally, high sand + gravel/silt + clay ratios, thick beds, and high bedding continuity favor high bedding connectivity. All other parameters being held equal, the greater the bedding connectivity, the greater the groundwater production potential of a sedimentary unit.
⁵ High 10 to 30 m/day; moderate, 1 to 10 m/day; low, <1 m/day; very low, <0.1 m/day.

Refinement of HSU definitions has an iterative process, which started in the 1980-s, with updates occurring during each study phase. Upper, Middle, and Lower Santa Fe HSUs (USF, MSF, LSF) form the primary aquifer zones in the Mesilla Basin region; and they correspond roughly to the Camp Rice, Fort Hancock, Rincon Valley, and Hayner Ranch lithostratigraphic subdivisions of the Santa Fe Group (**Fig. 1-8**). Identification and correlation of lithostratigraphic units in the deeper subsurface, however, remains a significant problem in many parts of the MBR; hence the informal status of Hydrostratigraphic Unit names.

Distribution of HSUs and their primary *LFA* components in basin-fill deposits of the WRRRI Study Area (**Fig. 1-3**) is schematically depicted in fence-diagram array of 19 hydrogeologic cross sections in Hawley and others (2021-PL. 5a to 5s [AA' to SS']). Dominant sedimentary facies in the Upper Santa Fe HSU are basin-floor *LFA*s 1-3 and piedmont-slope *LFA*s 5 and 6 (**Fig. 5-1**, and **Tbls. 5-1** and **5-2**). Ancestral Rio Grande (ARG) deposits (*LFA*s 1 to 3) in HSU-USF2 form a major part of the MBR's most productive aquifer systems, particularly in terms of available fresh and slightly saline (brackish-BGW) water (e.g., 300-3,000 mg/L tds range; Stanton *et al.* 2017, **Tbl. 1**). *LFA*s 1 to 3 in HSU-USF2 also comprise optimum reservoir material for managed aquifer-recharge (MAR) projects in both the phreatic and vadose zones.

Basin-floor *LFA*s 3 and 9 are normally present throughout the SFG section in central topographically *closed* basin areas, particularly in HSUs LSF and MSF2; and sandy eolian deposits in *LFA*s 2 and 4, are significant lower- and middle-SFG components in the eastern (leeward) parts of the southern Mesilla Basin. HSU-MSF is characterized by three *LFA*s: (1) basin-floor *LFA*s 3 and 9, (2) piedmont *LFA*s 5-8, and (3) the transitional (mainly eolian) *LFA* 4. It is only a major aquifer where fine- to medium-sand layers are a dominant component of *LFA* 3. Because of their fine-grained matrix, partial induration, and local presence of evaporite minerals, the dominant *LFA*s 7-10 in HSU-LSF are never aquifers (*cf.* **Fig. 5-1**, and **Tbls. 5-1** and **5-2**). The other major class of Hydrostratigraphic Units comprises channel and floodplain deposits of the Rio Grande-Rio Bravo fluvial system (HSU-RA/*LFA a*) and its larger arroyo tributaries (VA, VAY/*LFA b*). Thin (<100ft, 30m) HSU-RA/*LFA a*) deposits of Late Quaternary age form the most-productive shallow alluvial aquifers (**Fig. 5-1**, and **Tbls. 5-1** and **5-3**).

Figure 5-2 (page-size reproduction of Hawley *et*

al. 2021-PL. 5i to 5l and 5s [panel]) comprises five transverse (W-E) hydrogeologic sections (I-I' to L-L' and S-S') that span the northern and central parts of the International Boundary Zone (IBZ-**Fig. 1-12**). Cross-section base is mean sea-level (msl) and VE is 5x; and section-line locations are shown on inset Study Area index maps (**Fig. 1-3**). The blue line in the upper part of each section shows the approximate pre-development potentiometric-surface altitude (**Fig. 1-7**). Santa Fe Group (SFG) basin fill is shown with yellow shading, with lighter hues indicating best groundwater-production potential in progressively younger parts of the Santa Fe HSU sequence (USF/MSF/LSF). Underlying bedrock units (in order of increasing age, **Tbl. 4-1**), comprise Tlvs-Eocene volcanoclastic, epiclastic and volcanic rocks of intermediate composition (gray); Tli-Eocene igneous-intrusive rocks of intermediate composition (red); Tls-Lower Tertiary siliciclastic sedimentary rocks (tan); K-Cretaceous marine sedimentary rocks (light green); Pzu/Pzl-Paleozoic marine sedimentary rocks (dark and light blue); and XY-Proterozoic igneous and metamorphic rocks (brown).

In the **Figure 5-2**, the blue line in the upper part of each cross section shows the approximate pre-development potentiometric-surface altitude (*cf.* **Fig. 1-7**). Santa Fe Group (SFG) basin fill is shown with yellow shading, with lighter hues indicating better groundwater-production potential (**Fig. 1-8**). Underlying bedrock units (**Tbl. 4-1**), in order of increasing age, comprise Tlvs-Eocene volcanoclastic, epiclastic and volcanic rocks of intermediate composition (gray); Tli-Eocene igneous-intrusive rocks of intermediate composition (red); Tls-Lower Tertiary siliciclastic sedimentary rocks (tan); K-Cretaceous marine sedimentary rocks (light green); Pzu/Pzl-Paleozoic marine sedimentary rocks (dark and light blue); and XY-Proterozoic igneous and metamorphic rocks (brown).

Mesilla Basin Transverse Cross Sections Group I-I' to S-S'

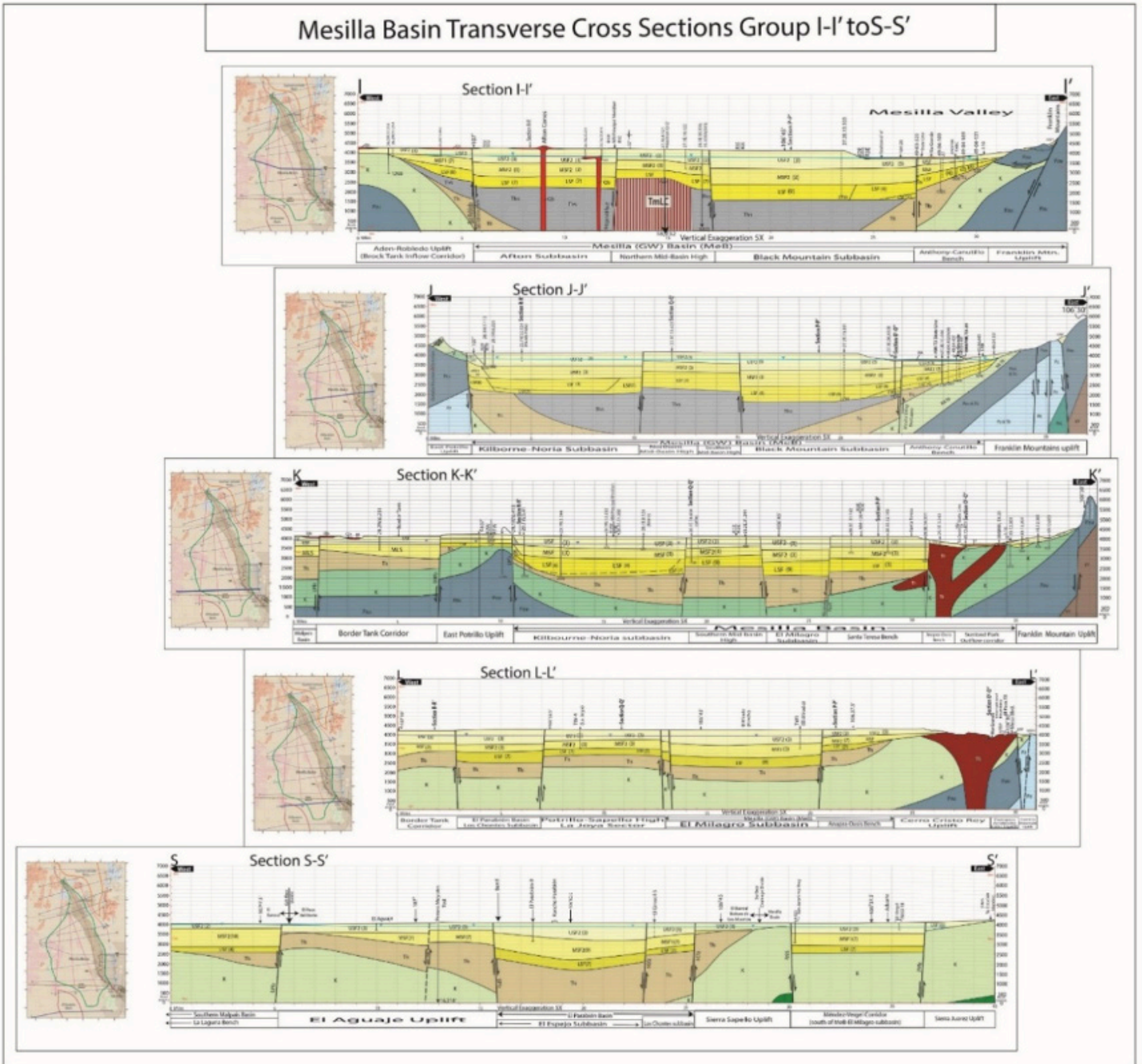


Figure 5-2: (page-size reproduction of Hawley *et al.* 2021-PL, 5i to 5l and 5s [panel]). Transverse (W to E) hydrogeologic cross-sections I-I' to L-L' and S-S' span the northern and central parts of the International Boundary Zone (IBZ-Fig. 1-11). Section base is mean sea-level (msl) base and VE is 5x; and section locations are shown on inset index maps (Fig. 1-3).

6. Background on Binational Groundwater “Governance”

History is the most dangerous field of study in [United States] American society... Since the written history of the Southwest began in 1540, what of the Hispanic personalities who came before our 19th Century [Anglo-American] heroes . . . ? Can the American historical record do justice to such a diverse history? ... If someone writes documented history that proves to be “unpopular,” should he be labeled a revisionist? ²⁰

In terms of “Geopolitics and Binational Collaboration for Water Sustainability.” primarily emphasis of this paper has been on the 20th Century onset of large-scale GW-resource developments that closely followed the introduction of petroleum-based energy technology that allowed 1) the drilling of deep-water wells and use of diesel/gasoline-power pumps; and 2) modern rail and automotive transportation. Prior to the 1880s, however, human endeavors in the EPN-MBA were sustained by the surface waters of the Rio Grande-Rio Bravo fluvial system (Gregg 1844, Powell 1952, Sonnichsen 1968, Weber 1982 and 1992, Dailey 2021). Socio-economic affairs became much more complex, however, following the arrivals of three major steam-railroad lines in the early 1880s in El Paso (TX) and El Paso del Rio del Norte ²¹: The Southern Pacific Railroad (SPRR) in May 1880, the A.T. & Santa Fe RR in 1881, and the Mexican Central Railway in 1884 (Sonnichsen 1968 [p. 227-231], Julyan 1996). The following sections (**Parts 6.1-6.5**), however, deal primarily with the geopolitics of the acquisition of land, natural resources (including water), and people by conquest between 1598 and 1853.

20 Rubén D. Sálar Márquez (2004) “Epic of the Greater Southwest (p. viii).”

21 The Mexican Central Railway, founded in Massachusetts in 1880, began operation between Mexico City and El Paso del Rio del Norte in March 1884. It provided connections between the Mexican capital and the Southern Pacific Railroad, Texas & Pacific Railway, and the AT& Santa Fe Railway. https://en.wikipedia.org/wiki/Mexican_Central_Railway. During the *French intervention in Mexico* (1862-1867), the Republican forces of President Benito Juárez (1858-1872) stopped temporarily at El Paso del Norte before he established a Government-in-Exile in Chihuahua (City)... In 1888, El Paso del Norte was renamed in honor of Benito Juárez (1806-1872). https://en.wikipedia.org/wiki/Benito_Juarez.

6.1 Early Accounts of El Rio del Norte and Related Water-Resource Uses—1598 to 1817

6.1.1. THE ANTONIO DE ESPEJO EXPEDITION INTO NEW MEXICO—JANUARY 1583

Excerpt *from* Diego Pérez de Luxán’s Account (Hammond and Rey, 1966, p. 170-171):

ON THE WAY, THE SPANIARDS FOUND SOME SALINES OF VERY GOOD WHITE ROCK SALT, AND ON THE OPPOSITE BANK MANY MOUNTAINS WITH-ORES

We left this place on the fifteenth [1/1583] and went five leagues [in the present Lower El Paso Valley/Valle de Juárez]. Midway we found some salines of white rock salt, wonderful beyond comparison, and very plentiful. On the opposite bank of the river there are many mountains with quantities of ores [Franklin and Organ Mtns]. We did not go to them because it was late and we were unable to cross the river. We stopped at some pools which we named Las Salinas.

We set out from Las Salinas on the sixteenth and traveled five leagues till we reached a pool formed by the river when it overflows its banks. We named it El Charco de San Antonio. We left this place on the nineteenth and in five leagues came to the said river to camp at a spot which we named Las Vueltas del Rio [future site of El Paso], because here it starts to wind as far as the settlements [Middle Rio Grande pueblos]. Leaving this locality on the twenty-first of the month, we continued five leagues to a prominent place overlooking the river [Cerro del Cristo Rey?]. This we named La Barranca de las Vueltas [El Paso del Norte].

THE SPANIARDS LOCATED A STRAND WITH SALINES

We set out from this place on the twenty-second of January [1583] and went five leagues to a spot we named La Playa de las Salinas. These were the first salines that we saw along this river [in the lower Mesilla Valley].

We left La Playa de las Salinas on the twenty-third and traveled four leagues to a place we named La Ciénega Helada, a marsh formed by the river. It was frozen so hard that it was necessary to break the ice with bars and picks in order to get drinking water. We took our horses to the river to water.

A MOUNTAINOUS DISTRICT WITH LARGE VEINS FOR MINING

Leaving La Ciénega Helada on the twenty-fourth of the said month [1/1583] and going five leagues, we came to a place on the river which we named El Frontón de las Minas, because on the way half a league before reaching this spot, there is a mountainous district containing large veins [Organ Mtns.]. These mines we did not assay. During this entire trip we never met any people, although

we found numerous traces of them and many abandoned rancherías.

From this place, on the twenty-sixth, we traveled three leagues up the river. Starting with that day's march, we went straight toward the north, that is, the direction from which the Del Norte flows. We halted at an arm of this river which we named Los Humos, because there were many smoke columns on a high sierra [Organ Mtns.] on the opposite side of the river.

6.1.2. FIRST "DIVINE MANDATE" FOR TERRITORIAL AND IDEOLOGICAL EXPANSION (PÉREZ DE VILLAGRÁ (1610 [1962, F.D. HODGE, ED., AND GILBERTO ESPINOSA, TRANS.]; HAMMOND AND REY 1953, P. 95; MOORHEAD 1954, P. 18; SONNICHSEN 1968, P. 15-16; CF. PART 6.3)

The mighty river flowing swiftly by was such a pleasing sight that its turbulent waters seemed to us a calm and placid lake with scarcely a ripple to disturb its peaceful surface [4/30/1598]. Its bountiful waters teemed with many fish, and we easily caught a great number. The hunters then shot a large number of ducks and geese ... We built a great bonfire and roasted the meat and fish, and then all sat down to a repast the like of which we had never enjoyed before.... The Governor himself addressed the crowd and described the experience of the main body of travelers. He praised them for their endurance and promised them a day of rest for everybody....

The momentous event is marked and consecrated by a Thanksgiving ceremony: a solemn high mass is celebrated with everyone in attendance then with the soldiers donned in shining armor for the occasion, on horseback and in military formation, Don Juan de Oñate reads the official act of possession which begins:

In the name of the most holy Trinity and of the eternal Unity, Deity and Majesty, God the Father, the Son, and the Holy Ghost ... and in honor of His most holy and venerable Mother, the holy Virgin Mary, our Lady, Gate of Heaven, Ark of the Covenant, in whom the manna of heaven, the divine rod of justice and His law of grace and love were placed, as the Mother of God, sun, moon, north star, the Guide and Advocate of all human kind ... and in the name of the most blessed Saint Francis, image of Christ, God in body and soul, His royal ensign and patriarch of the poor whom I adopt as my patrons, advocates, and intercessors that they may intercede with God himself, that all my thoughts, deeds, and actions may be directed to the service of His infinite majesty to increase the number of the faithful and the extension of the holy Mother church, and to the service of the most Christian of kings, Don Philip, our lord, pillar of the Catholic faith....

Be it known that I, Don Juan de Oñate, Governor, Captain General, and Adelantado [*frontier*-province governor] of New Mexico, and of its kingdoms and provinces, as well as those in its vicinity and contiguous thereto, as the settler and conqueror thereof, by virtue of the authority of the king, our lord, hereby declare that:

Whereas, by virtue of my appointment ... and, whereas I desire to take possession of this land this 30th day of April, the feast of the Ascension of our Lord, in the year fifteen hundred and ninety-eight, through the person of Don Juan Perez de Donis, clerk to his majesty, secretary of this expedition, and to the government of said kingdoms and provinces.

Therefore, in the name of the most Christian king, Don Philip, the second of that name, and for his successors.... I take possession, once, twice, and thrice, and all the times I can and must, of the actual jurisdiction, civil as well as criminal, of the lands of the said Rio del Norte, without exception whatsoever, with all its meadows and pasture grounds and passes.

6.1.3. "BEGINNING OF THE REAL SETTLEMENT OF THE EI PASO VALLEY" BY "REFUGEES" FROM THE "1680 PUEBLO REVOLT" (SONNICHSEN 1968, P. 33-34):

In [early] October [1680], with cold weather coming on, [Gov.] Otermín was forced to make a decision. Following a universal muster intended to account for all the refugees and a great council to discuss what was to be done, he received a petition from all the people in camp asking that they be allowed to move across the river to the vicinity of the convent «because of the many dangers and inconveniences which beset them at La Salineta [in the lower Mesilla Valley].” The next day the Governor granted this request. It was the beginning of the real settlement of the El Paso Valley [Hackett 1942, p. cvii-cxvi].

The influx of those two thousand hungry, disorderly refugees was, of course, a terrible thing. The mission had existed for some twenty years and the Franciscans had things well in hand with gardens, orchards, and herds of cattle for themselves and a reasonable number of dependents and visitors, but there was not enough of anything for two thousand additional people. Something had to be done, however, and something was done.

Before long they had been sorted out and settled in three new towns below the mother church. Farthest to the south the Governor established his headquarters at a place he called the Real de San Lorenzo (after the saint on whose day the revolt broke out). It was six [~15 mi/24 km] leagues from the original settlement. Five priests were stationed there and Father Ayeta let them take his portable altar on its cart “as being more decent [Hackett 1942, v. 8, p. 215].” The site of San Lorenzo [near San Elizario; cf. Fig. 6-1] was already a historic spot, for it was “at the place where the wagons arrive on the outward trip” - the spot where the river turned east and where the caravans left the Valley to strike out across the sand dunes [Médanos de Samalayuca] on

their way south [Moorhead 1958, p. 18; Hughes 1914, p. 310]. It was near, perhaps on, the spot where Oñate had taken possession of New Mexico for his God and King [*cf.* **H2.1.2**]. The other two communities - San Pedro de Alcantara [near Socorro del Sur, **Fig. 6-1**] and El Santísimo Sacramento [near Ysleta del Sur] were spaced two leagues [~5 mi/8 km] apart toward El Paso.

Each family constructed its own house of “sticks and ranches,” a type of building still observable in the El Paso neighborhood and still called a *jacal*. The houses in San Lorenzo were said to be “built in an orderly manner” but to the colonists, some of them accustomed to a considerable degree of comfort, they must have seemed grim enough [Hackett 1942, v. 8, p. 215; Hughes 1914, p. 316].

6.1.4. EXCERPT FROM “WATER WARS DURING OUR TERRITORIAL YEARS” IN “100 YEARS OF WATER WARS IN NEW MEXICO—1912-2012” (JOHN W. HERNÁNDEZ, 2012, P. 19-20):

Is Our Hispanic Ancestry a Root Source of Our Water Wars?

While not the fundamental problem, the answer is probably, yes. Our heritage of Iberian customs, in the management of scarce water resources, is certainly a contributing factor in our apparent tendency toward water conflicts. One look at the snow-capped mountains and arid, fruitless plains of Andalucía is enough to convince a New Mexican that, yes, this is where many of us came from, followed by an unvoiced certainty that water practices that were used in Spain came with us to New Mexico.

It should be noted that some parts of Spain followed slightly different water codes than others. Some regional differences prevailed. As southern Spain was the last stronghold of the Moors, we probably also inherited some of their customs and technology in designing and managing the early community ditches in New Mexico, the acequias, that were the backbone of much of the farming in our territorial days.

Elements of Spanish and Moorish practices that made it into New World water codes included: the ownership of water in a river belonged to the general public for their free use; the rights of existing water users to divert water from a stream were protected; the rights to use water were tied to the land where application was made; canal systems belonged to those who built them, and right-of-way to ditch for construction and maintenance was guaranteed; these ditch owners annually prescribed their own rules for scheduling cleaning and maintenance of the ditch and the times, amounts, and methods of water diversions from the acequia to farm fields; water use was limited to beneficial purposes; and limits were placed on upstream diversions to that which was absolutely needed. In some areas, constraints were

probably imposed on developments of springs, seeps, and shallow groundwater.

6.1.5. EL PASO DEL RIO DEL NORTE IN 1817.

EXCERPTS FROM REPORT OF FATHER JUAN RAFAEL RASCÓN TO BISHOP JUAN FRANCISCO DE CASTAÑIZA (DENNIS DAILEY, ED. AND TRANS., 2021, P. 4-7):

To the Most Excellent Dr. Don Juan Francisco Marqués de Castañiza

October 28, 1817

Most Excellent Sir,

In fulfillment of Your Excellency’s official letter dated September 9, last month, which instructed me to prepare a brief report regarding the points that were asked of me in the aforementioned letter, with the goal of determining the area of the diocese, insofar as it is known, I pass along to your excellency accounts that I have at hand, and with information supplied by old and trustworthy persons of this place.

The circumference of this curate of the town of Our Lady of Guadalupe of the Pass of the Northern River (el Paso del Rio del Norte) forms a trapezoidal figure of five leagues, more or less, containing on the surface of this plane the houses, vineyards, orchards and lands that the inhabitants cultivate. The land is watered by the abundant Río del Norte, to the south of whose banks is situated this aforementioned town, and its latitude is judged to be 32 or 33 degrees. Regularly in the month of May, great flows of the river occur when the snows melt on the mountain slopes and give rise during this time to strong, annual floods that wash away the pickets and dam, which at the cost of innumerable hardships and public works are repaired each year on a sandy foundation with woven branches filled with loose stones and bound together with ropes. It’s a shame that so much work is required in the most precious season, abandoning or suspending cultivation of the vineyards and crops for the repetitious, common work of dam, bridge, etc.

The longitude [size] of the settlement, or diameter from east to west, is two consecutive leagues, in the west from the house where the lieutenant governor of this jurisdiction lives, to the house called “of Gallegos” in the eastern portion and where the bridge, ..., is the point that divides this curate from the mission, or town, of San Lorenzo, currently administered by Friar Ysidoro Barcenilla.... In the opposite direction [NW] there are no neighboring settlements. In the southeast, this settlement ends with the houses of Don Bernadino Borrego, Maldonado, and the Villeros. On the hill named Aranda is the dividing line of these lands and those of the mission of the Pueblo of Senecu [founded after the 1680 Pueblo Revolt; *cf.* Hackett 1942] ..., and the Indians of the pueblo annexed to this curacy are the owners of the fields that lie in that direction.

The latitudinal diameter [size/width] measures one and one half leagues, which is inhabited from north to south, from the banks of the river, or the Playa district,

to the home of Benancia García, or the hills to the south, and within the aforesaid limits there are no neighboring settlements until you reach the Presidio of Carrizal, a distance of more than 30 leagues [120 km to the S near Villa Ahumada].

To the northeast [NW], this town ends at the homes named Largo, the widow Guadalupe, and the house of Romano Portillo, and in this same direction [though EPdN], at a distance of about two leagues, are the [Lower Mesilla Valley] campsites known as Salineta [salt beds], where the livestock of the inhabitants and the horse herds of soldiers and civilians are pastured. There are many groves all along the banks of the river and excellent flat, open spaces and river bends for settlements and fields [in the Mesilla Valley], principally in the place called Bracito [now Brazito], where currently Don Juan Antonio García de Noriega lives ²². For going on two years he has plowed fields contiguous to those that this community worked three years ago for the use of the Apache Indians, with the goal of persuading them to take an interest in working and staying put, which has been in vain as they cannot accustom themselves to work. From this town [El Paso] to Bracito is 18 leagues and in the surrounding hills, as well as in the Organ Mountains, so famous for serving as the refuge of the Apache Indians in time of war, they say there are abundant veins of copper, iron, a little silver, and a lot of lead...

The mining town of Santa Rita del Cobre is further to the west, measuring about 70 to 80 leagues from this Pueblo and they say it is inhabited by about 400 souls. The climate is cold. In civil matters, it is subject to the military commander of the Janos Presidio, ... [cf: Fig. 6-1]. To go to this mining town, and similarly to Bracito [Brazito], one has to cross the Rio del Norte by a bridge, and only when the strong floods wash it away, the crossing of the river becomes difficult.

The number of souls in this curacy [all in the upper Juárez Valley], that live within the circumference stated in part one, exceeds 4,300, including military personnel and Indians, commonly referred to as being from the Pueblo annexed to the community.... The civil government is under the control of a political and military lieutenant governor, presently the veteran lieutenant Don José Ordaz, whose jurisdiction extends to the four neighboring towns that are situated in a line one after the other, called the Real de San Lorenzo and its charge the Pueblo of Senecu, the Pueblo of Ysleta, and Socorro where the Reverend Father Fray Jose Gonzales resides, who also administers Ysleta. And all these towns, including this one present Cd. Juárez] are the ones that make up the entire jurisdiction of El Paso. Adjacent to Socorro is the presidio of San Elcario [today San Elizario]. This pueblo and said presidio are at the edge of the inhabited places that are situated along the banks of the river and beyond these places there are no more, except at great distance, and for this reason during the times when the Apache enemies rise up, one cannot travel except in convoy. During the present time these said Apaches are at peace and they freely and continually wander through all the

towns, visiting all the homes in search of food, but always with their weapons at hand.

The climate of this town of El Paso (and almost the same can be said for nearly all the neighboring towns) is extreme in heat and cold, according to the season. It hardly rains and if it weren't for the benefits of irrigating from the river, some years, like the present one, there would be no produce. For this reason, there is no pasture that is not irrigated by the river. The ground is commonly sandy and full of dunes and in some parts clay. Within the circumference referred to, there are some lakes, ponds or pools. The homes of the inhabitants are in great confusion with interposition of the orchards, groves, and the fields of maize, wheat, beans, cotton, and so forth, to such extent that in times of plague the spiritual administration is very difficult because of the lack of order and communication between homes and for the shortage of bridges that require one to go out of the way in order to cross the irrigation canals.

Also, it is worth noting that when the snows melt, or when it rains, the roads are filled with many large puddles and mud so that during those times a great number of the faithful are not able to attend mass because they do not live near the church, or they have to walk a lot. The land is shown to be very fertile and fruitful, and capable of producing a variety of crops, provided that the art, the industry and protection are applied....

The parish church of this place was founded in the year 1662 by the minister Fray García de San Francisco. It is located in the highest part of the settlement, ... And it is the place that is safest, or free from risk of some extraordinary flood of the river, like that which two years ago caused great damage to the church, orchards and houses of the neighboring towns....

May God protect the important life of Your Excellency, El Paso de Rio del Norte, October 28, 1817... [cf: Moorhead, 1958, "New Mexico's royal road, trade and travel on the Chihuahua Trail;" Weber, D.J., 1992, "The Spanish frontier in North America"].

Historical Note on Brazito, NM (Julyan, 1996, 49):

BRAZITO ([Mesilla Valley] settlement; 5 mi S of Las Cruces). The Spanish *brazito* means "little arm, or tributary;" and the name of this Hispanic settlement on the Rio Grande has been attributed to "arms," or branches, of the river marshlands near the site, though the name also has been interpreted to mean "little bend on the river." As early as 1776 the locality was called *Huerta* (Spanish, "orchard") *de los Brazitos*. About 1822 the *Brazito Land Grant*, extending 8 miles along the Rio Grande S. of Las Cruces, was made to Juan Antonio García [de Noriega]... [On] Christmas Day 1846, occurred the only battle of the Mexican War to be fought in NM. Col. Alexander W. Doniphan and his Missouri Volunteers defeated a force of 1,200 Mexicans here and went on to occupy El Paso prior to advancing on Chihuahua.

22 See following Historical Note on Brazito, NM.

6.2. ¡Viva La Independencia!

6.2.1. DAVID J. WEBER (1982, P. 4-5)

In the spring of 1821, a stunning piece of news moved quickly north... A Spanish officer, Agustín de Iturbide, had declared Mexico's independence from Spain...

On September 8, a few days after Tucson acted, residents of El Paso del Norte also took the oath of allegiance [to the new nation]. Since 1680 El Paso had occupied the strategic spot some 1,200 miles north of Mexico City where the Rio Grande sliced its way through two mountains. The small center of the town stood on the site of today's Ciudad Juarez, on what is now the Mexican side of the river, but in 1821 the jurisdiction of New Mexico extended farther south and embraced the town. El Paso and outlying communities supported over 8,000 people. Nearly all lived in a narrow band along the river where a dam and irrigation canals watered fields of wheat and corn as well as orchards and vineyards. Compared to other frontier communities, the *paseños* seemed prosperous. When compared to cities in the interior of Mexico, on the other hand, El Paso and all of the communities on the northern frontier seemed poor indeed...

6.2.2. JAMES O. PATTIE (1831, P. 102)—OCTOBER 23-28, 1826

I know not, whether to call the Paso del Norte, a settlement or a town. It is in fact a kind of continued village, extending eight miles on the river. Fronting this large group of houses, is a nursery of the fruit trees, of almost all countries and climes. It has a length of eight miles and a breadth of nearly three. I was struck with the magnificent vineyards of this place, from which are made great quantities of delicious wine. The wheat fields were equally beautiful, and the wheat of a kind I never saw before, the stalks generally yielding two heads each. The land is exceedingly rich, and its fertility increased by irrigation...

6.2.3. JOSIAH GREGG (1844, P. 272-273)—SEPTEMBER 9-15, 1839

We were still some sixty miles above Paso del Norte [9/9/1839], but the balance of the road now led down the river valley or over the low bordering hills. During our journey between this and El Paso we passed the ruins of several settlements, which had formerly been the seats of opulence and prosperity, but which have since been abandoned in consequence of the marauding incursions of the Apaches.

On the 12th of September [1839] we reached the usual ford of the Rio del Norte, six miles above El Paso; but the river being somewhat flushed we found it impossible to cross over with our wagons. The reader will no doubt be surprised to learn that there is not a single ferry on this 'Great River of the North' till we approach

the mouth. But how do people cross it? Why, during three-fourths of the year it is everywhere fordable, and when the freshet season comes on, each has to remain on his own side or swim, for canoes even are very rare. But as we could neither swim our wagons and merchandise, ..., our only alternative was to unload the vehicles, and ferry the goods over in a little 'dugout' about thirty feet long and two feet wide, ...

This river even when fordable often occasions a great deal of trouble, being, like the Arkansas, embarrassed with many quicksand mires. In some places, if a wagon is permitted to stop in the river but for a moment, it sinks to the very body. Instances have occurred when it became necessary, not only to drag out the mules by the ears and to ... haul out the wagon piece by piece—wheel by wheel.

On the 14th we made our entrance into the town of *El Paso del Norte*, which is the northernmost settlement in the department of Chihuahua...

The valley of El Paso is supposed to contain a population of about four thousand inhabitants, scattered over the western bottom of the Rio del-Norte to the length of ten or twelve miles. These settlements are so thickly interspersed with vineyards, orchards, and cornfields, as to present more the appearance of a series of plantations than of a town: in fact, only a small portion at the head of the valley, where the *plaza publica* and parochial church are located, would seem to merit this title. Two or three miles above the *plaza* there is a dam of stone and brush across the river, the purpose of which is to turn the current into a dike or canal, which conveys nearly half the water of the stream, during a low stage, through this well-cultivated valley, for the irrigation of the soil. Here we were regaled with the finest fruits of the season: the grapes especially were of the most exquisite flavor. From these the inhabitants manufacture a very pleasant wine, ...

6.3. Second "Divine Mandate" for Territorial and Ideological Expansion (cf. 6.1.1)

With respect to the absence of equitable sharing of both land and any type of natural resource between the two nations, the geopolitical setting of collaboration vs. confrontation dates back to the 19th Century era of Continental-scale U.S. territorial expansion (cf. Merry 2009). John L. O'Sullivan (1813-1895) captures the Anglo-American "Manifest Destiny" mindset in his 1845 newspaper "essay" calling for the United States to admit the Republic of Texas into the Union (https://en.wikipedia.org/wiki/John_L._O'Sullivan):

Because of concerns in the Senate over the expansion of the number of slave states and the possibility of war with Mexico, the annexation of Texas had long been a controversial issue. Congress had voted for annexation early in 1845, but Texas had yet to accept, and opponents were still hoping to block the annexation. O'Sullivan's

essay urged that “It is now time for the opposition to the Annexation of Texas to cease.” O’Sullivan argued that the United States had a divine mandate to expand throughout North America, writing of ‘our manifest destiny’ to overspread the continent allotted by Providence for the free development of our yearly multiplying millions [cf. O’Sullivan 1839].”

The “divine-mandate” mindset of the *Anglo-American (Second Conquest) era* is also described by historian George P. Hammond (1896-1993) in his Foreword to the 1965 reprint edition of James Madison Cutts (1847, p. ii) “The conquest of New Mexico and California, by the forces of the United States, in the years 1846 & 1847:”

The 1840’s found the nation at the peak of its power and its faith in its ultimate “Manifest” destiny. Exuding assurance and self-confidence, the United States recognized no obstacle to the achievement of that goal. The year 1846 became the “Year of Decision,” because its neighbor, Mexico, as heir of Spain, claimed much of the same territory by right of discovery, if not actually by right of occupancy, and had no intention of surrendering that right....

The clash that ensued between Mexico and the United States marked a collision of irresistible ideas and forces. President James K. Polk, spokesman for the free nation, championed the right of the pioneers to make beneficial use of the lands and resources of the West. General Antonio Lopez de Santa Anna of Mexico, a master in the art of political leadership, saw in the situation an opportunity for self-advancement, as well as a patriotic duty to protect the borders and possessions of his country... [Merry (2006, p. 238-251), and Sonnichsen (1968, p. 109-123)].

6.3.1. FIRST BINATIONAL “COLLABORATION:” THE 1850-1856 BOUNDARY SURVEY

Paula Rebert, Ph.D., introduces her 2001 book- “La Gran Línea: Mapping the United States–Mexico Boundary, 1849-1857”- with this quote in a June 23 1856 letter from “First Engineer Francisco Jiménez, Mexican Boundary Commission, to Lieutenant Nathaniel Michler, U.S. Boundary Commission:”

Trabajaran con la buena armonia e inteligencia, que siempre ha reinado entre nosotros y ... formaran un plano tan exacto como interesante de la gran línea astronómica que les esta confiada.

They will work with the good harmony and understanding that has always prevailed between us and ... make a map as accurate as [it is] interesting of the great astronomical line that is entrusted to them.

Paula Rebert (2001, p.1) also includes this observation from a 12 December 1850 report from Astronomer Amiel W. Whipple to U.S. Boundary

Commissioner John R. Bartlett (1850 to 1853; cf. Bartlett 1854, James 1969, Mueller 2000):

Boundaries, when definite, are always marked upon the earth’s surface by natural features, such as mountains or streams, or else by specific lines or curves; such boundaries when projected upon a map are easily understood.

Unfortunately for the 1850-1856 cartographers, much of the boundary line west of EPdN crosses Chihuahua and Sonoran Desert basin terrains where “natural features, such as . . . streams,” are either absent or very indistinct, and where prominent uplands commonly have north-south trends. Rebert further notes (p. 1) that “The boundary had its painful [geopolitical] beginning in the U.S.-Mexican War [of 1846-1848], which was brought to an end with the Treaty of Peace, Friendship, Limits, and Settlement, signed at Guadalupe Hidalgo, 2 February 1848.” The boundary-location disputes of 1848-1856 were exacerbated by 1) serious cartographic errors made in 1847 by New York map publisher John Disturnell in the 7th edition of the Mapa de los Estados Unidos de Méjico; and 2) its use in the negotiations that produced the Treaty of Guadalupe Hidalgo (cf. Rebert 2002, p. 3-7; also Rittenhouse 1965 [p. 9-13], and James 1969). Key elements of the Disturnell Map controversy are illustrated on a regional map compilation by NM Highway Department geologist, Harold L. James (1969, Fig. 6-1).

The “task of surveying and marking the line” in less than six years was truly challenging considering the geopolitical dynamics of the time, which included: (1) Both nations had a succession of Presidents, with opposing partisan agendas; and (2) The “1848 Treaty” boundary-line controversy was not resolved until the signing of the “Treaty of 1853” (aka, “The Gadsden Treaty” in the U.S., and the “Tratado de la Mesilla” in Mexico-Rebert 2001, p. 11). Rebert (2002, p. 27) summarizes many of the challenges that the teams of surveyor-astronomers and topographic-mappers from both nations faced in their truly collaborative endeavor that resulted in successful completion of 3,200-km (~2000-mi) boundary survey of mostly *terra incognita*:

In the task of surveying and marking the line, the U.S. and Mexican commissions used similar methods. In general, both commissions divided the work between astronomers, who determined the latitude and longitude from astronomical observations at points along the line, and topographers, who investigated the forms of landscape features and ascertained their locations relative to the astronomers’ positions. The surveying procedures of the two commissions differed primarily

in emphasis. The U.S. commission stressed astronomical determinations for rapid location of the line, while the Mexican commission emphasized triangulation and topographical mapping and limited astronomical observations.

The U.S. approach to the survey was based on a plan devised by Emory. En route to California, Emory drew up a comprehensive plan for the boundary survey that included astronomy, topography and demarcation of

the line, and auxiliary scientific activities. The location of the line would depend upon astronomy. He reasoned that “the most rigid mode of operating would be to cover the whole ground by triangulation; but the expense and the time required by this method, exclude it from consideration. The next method in order of accuracy, and that which presents itself as the only practicable one, is to base the entire work on astronomical determinations of latitude, longitude and azimuth.”

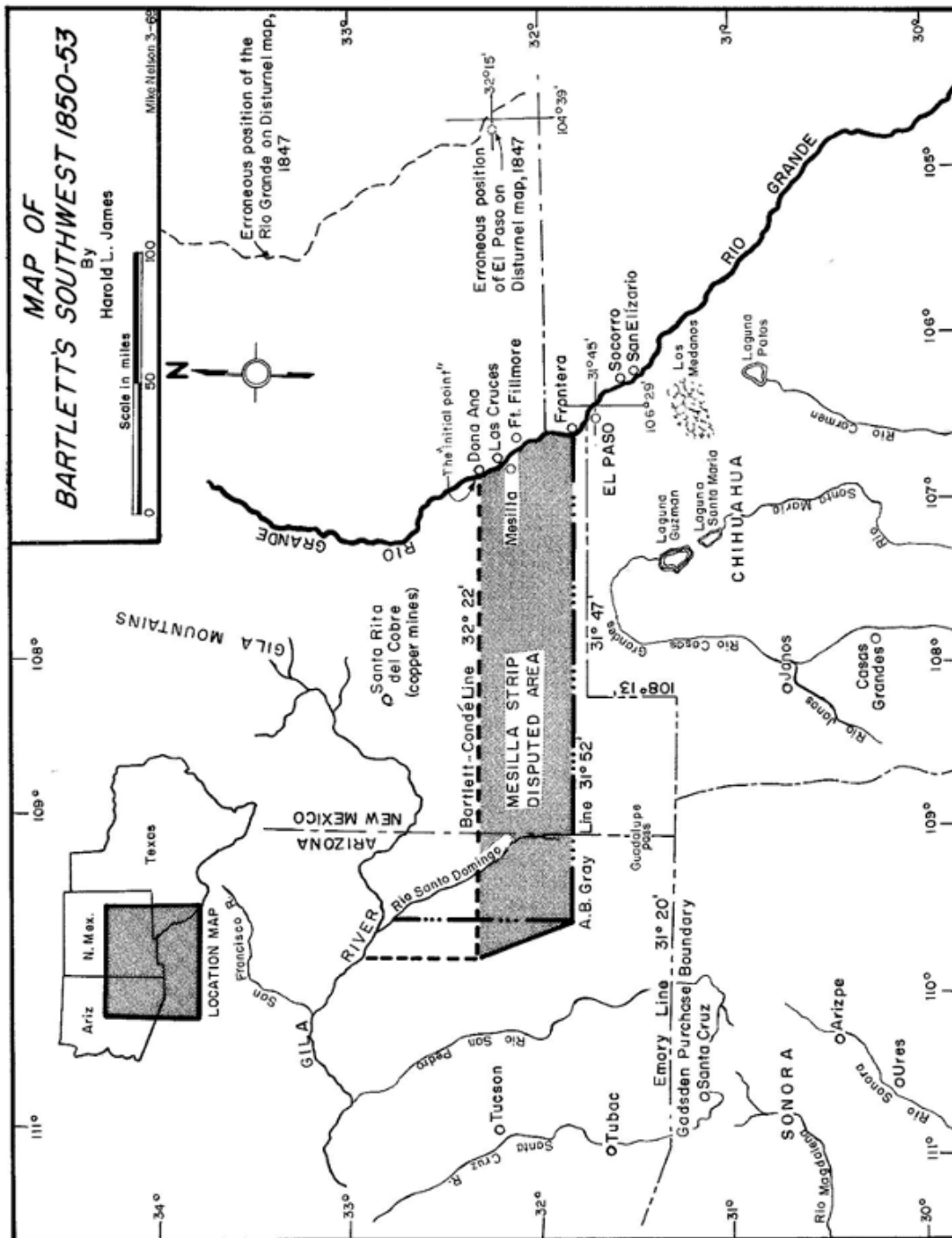


Figure 6-1. Map of John R. “BARTLETT SOUTHWEST 1850-53” compiled by NM Highway Department, geologist Harold L. James (1969, p. 44; cf. Bartlett 1854, Rittenhouse 1965, Rebert 2002 [p. 3-8, 103], 2005 [p. 81-82]). Reproduced with NM Geological Society, Inc. permission.

The essence of the Boundary Survey's major scientific accomplishments is captured in this selection from Paula Rebert's 2005 review paper in "Terrae Incognitae—the Official Publication of The Society for the History of Discoveries:"

The U.S.-Mexico boundary *Report* was published in two massive volumes, sometimes in three, and its contents make up an encyclopedia of the Southwest. It presents not only the results of the boundary survey, but also the results of the scientific investigations connected with the survey. There are essays on the geography of the region and the Indians who lived in it; articles on geology, paleontology, meteorology, magnetism, minerals, and plant distribution; and vast catalogs of the plants, animals, and fossils that the boundary commission's collectors gathered for study by scientists who eagerly awaited the specimens. The *Report* contains three maps, including a general map of the West, a geological map, and a map of magnetic observations.... Although at least some of the boundary maps were originally planned for publication with the *Report*, Congress did not provide funds and they were never published (Rebert 2005, p. 76).

6.3.2. "LA GRAN LINEA" REVISITED, AND THE 2019 BORDER WALL

Figure 7-2 is a low-elevation aerial photograph of the new Border Wall and its service roadway where they

cross the Mesilla Basin-EPdN section of "La Gran Línea." The fall-2019 photo covers adjacent parts of Doña Ana County, NM, and Municipio de Juárez, Chihuahua. It was provided to the NM WRRRI by PBS-New Mexico in Focus—Our Land (with special thanks to Laura Paskus and Kevin Bixbey, *cf.* Bixby and Smith 2020). The International Boundary and photo location are shown with a dashed, gray and yellow line on **Figure 1-11**. The viewpoint is near the 107° W. Meridian; and the northern rim of the Late Pleistocene Potrillo Maar-volcanic crater is in the foreground (*cf.* **TbIs. 1-1 and 1-2**; Hoffer 2001a). El Paso del Norte (aka El Paso Narrows) of the Rio Grande/Bravo occupies the "water gap" between the southern Franklin Mountains and Sierra Juarez, which are on the eastern horizon. About 45 km of 9.14 m, steel-bollard Wall extends between Potrillo Maar and the head of EPdN near Cerro del Cristo Rey (**Fig. 6-1**; *cf.* **Fig. 1-2**; Banerjee et al 2018, Attanasio and Galvan 2019, Spagat 2020, D'Ammassa 2021).

This Fall 2019 view of a typical Chihuahuan Desert landscape in the Figure 6-2 is eastward across the southern Mesilla Basin floor from near the 107° W Meridian. The basin-floor surface is a large remnant of the Early Pleistocene fluvial-deltaic plain of the



Figure 6-2. Low-level aerial photograph of the new 9.14 m, steel-bollard Border Wall that crosses the Mesilla Basin along the 31° 47' N Parallel (courtesy of PBS-New Mexico in Focus—Our Land).

Ancestral Rio Grande (cf. Figs. 1-11 and 1-12). The north rim of the Potrillo Maar volcanic crater (Tbl. 1-2) is in the foreground; and the Franklin Mountains and Sierra [de] Juárez flank El Paso del Norte on the eastern horizon.

The basin-floor terrain depicted on **Figure 6-2** typifies a northern Chihuahuan Desert landscape of 19th and 20th Century. Most of the area is a remnant of the fluvial-deltaic plain constructed by the Early Pleistocene ARG, which terminated in the Bolson de los Muertos area of north-central Chihuahua between 0.75 and 5 Ma (**Figs. 3-3 and 3-4; Tbl. 1-2**). This basin-floor landform predates development of the deep canyons and valleys of the throughgoing Rio Grande/Rio Bravo fluvial system with headwaters in the Southern Rocky Mountains. ARG deposits form the primary component of the most-productive basin-fill aquifer systems in the Mesilla Basin region (**Figs. 3-4, 3-5, and 5-1; Tbls. 5-1 and 5-2**). Descriptions made in 1854 by A.B. Gray, Texas Western Railroad-Survey and the Emory Boundary-Survey parties offer further documentation that there has been little significant change in the land-surface cover in the past 166 years:

It was a light sunny morning on about the 10th of March [1854]. We could distinctly hear the church bells in El Paso ringing out their joyous peals.... It was the last of civilization that we would see for many a long mile. We started out across the desert, a treeless, sandy plain interspaced here and there with little hillocks of sand, and a sparse vegetation of brush and dwarf mesquite that abounds in the valley of the Rio Grande [e.g., **Figs. 1-11 to 1-13 and 6-2**; cf. Gile 1966]. Each man packed his canteen with a quart of water and in the ambulance there was a ten gallon keg full for the four mules. We took a southwest course for the extreme end of a chain of mountains [Sierra Alta?] that we could dimly see in the distance, about eighty or ninety miles away. Between us and the far distant mountains there was nothing but this desolate plain (Reminiscences of Peter R. Brady, in L.R. Bailey, ed., 1963, p. 187)

Brady's recollections were confirmed by more-detailed contemporary observations by the Emory party who traversed nearly the same part of the MB-EPDN during their survey of the 31 °47' N parallel Boundary Line (Rebert 2005, p. 81-82; **Figs. 1-11, 6-1 and 6-2**):

Sketch No 1 [by Survey-Artist John E. Weyss] is titled, "View of the initial point of the boundary line on the Rio Bravo del Norte-looking west." From a high point, it looks across the valley of the Rio Grande toward a boundary monument on the river and a background of mountains with a tiny flag atop one of the peaks. Emory's note says, "The flag indicates the point where the line crosses the mountain known as the "Muleras [Cerro

(del) Cristo Rey]." Map "No. 29" shows the boundary as a line tracing the 31 °47' N parallel, beginning at the Rio Grande and running west across a heavily hachured area labeled "Muleras."

Continuing west, the boundary on the map crosses an open area dotted with symbols for sand and gravel, rises over a scarp, and runs on across an open plain. Boundary monument no. 2 is shown deep in the Muleras Mountains and monument no. 3 is placed at the edge of the scarp. Emory's note continues as follows: "Directly west of [the Muleras], the line crosses a very sandy valley, supposed to be a former bed ²³ of the Rio Grande, and strikes the table land (some 200 feet above the river) about three miles from the initial point. Here sketches Nos. 2 and 3 were taken, looking respectively east and west.... Emory says that "*Sketch No.2* is a back view, looking towards the initial point, again showing where the line crosses the Muleras mountain, and also, in the back-ground, the mountains near Franklin, east of the river..."

Sketch No.3 shows a flag in the foreground, a vast plain stretching away into the distance, a solitary peak far away in the center of the horizon, and a distant mountain range [East Potrillos, **Fig. 1-2**] on the horizon at the right. Emory notes that it is "a view taken at the same point as No.2; that is, where the line first strikes the table-land, but in the direction of the line westward. The line here leads over an apparently endless level table-land [Mesilla Basin floor], which is very sandy and generally without grass, but thickly covered with dumps of bushes and small sand-hills four or five feet high [mesquite coppice dunes of Gile *et al.* 1981, Fig. 34]. On the horizon, exactly in the line, is visible the top of an isolated mountain, serving beautifully as a natural monument. The mountains seen on the right hand are the "Sierra del Potrillo [East Potrillo Mtns]."

6.4. First Recognition of a Shared Surface-Water Resource: United States and Mexico, January 1907, Convention between the United States and Mexico on Equitable Distribution of the Waters of the Rio Grande. PROCLAMATION by the President of the United States of America (United States and Mexico, 1907, p. 1):

Whereas a Convention between the United States of America and the United States of Mexico, providing for the equitable distribution of the waters of the Rio Grande for irrigation purposes, and to remove all causes of controversy between them in respect thereto, was concluded and signed by their respective Plenipotentiaries at Washington on the twenty-first day of May, one thousand nine hundred and six. [The] original of which Convention being in the English and Spanish languages, is word for word as follows:

The United States of America and the United States of Mexico, do hereby recognize the existence of an Ancestral Rio Grande (ARG) west of the Mesilla Valley (cf. Figs. 3-1, 3-4 and 3-5; Part 7.2 [Fig. 7-1, Darton 1933]).

States of Mexico being desirous to provide for the equitable distribution of the waters of the Rio Grande for irrigation purposes, and to remove all causes of controversy between them in respect thereto, and being moved by considerations of international comity, have resolved to conclude a Convention for these purposes and have named as their Plenipotentiaries:

The President of the United States Of America [Theodore Roosevelt], Elihu Root Secretary of State of the United States; and The President of the United States of Mexico, His Excellency Señor Don Joaquin D. Casasus, Ambassador Extraordinary and Plenipotentiary of the United States of Mexico at Washington; who, after having exhibited their respective full powers, which were found to be in good and due form, have agreed upon the following article [*cf.* Follett 1898, Hundley 1966]...

Article I of the “Convention” also specified that (Kelley *et al.* 2007, p. 538):

After the completion of the proposed storage dam ²⁴ near Engle, New Mexico, and the distributing system auxiliary thereto, and as soon as water shall be available in said system for the purpose, the United States shall deliver to Mexico a total of 60,000 acre-feet of water annually in the bed of the Rio Grande at the point where the head works of the Acequia Madre, known as the Old Mexican Canal, now exist above the city of Juárez, Mexico.

6.5. The Rio Grande Project (Clyde Conover 1954, p. 17):

The Rio Grande Project (RGP) of the [US] Bureau of Reclamation includes most of the valley lands of the Rio Grande in New Mexico and Texas from Caballo Dam southward to a point about 40 miles [64.4 km] below El Paso, a distance of about 130 miles [209 km] (**Fig. 6-3**). From Caballo Dam to Selden Canyon, a distance of about 30 miles [48 km], the Rio Grande flows in the Rincon Valley, ... Below Selden Canyon the valley floor widens into the Mesilla Valley, which extends about 55 miles [88.5 km] southeastward to “The Pass [EPdN],” 4 miles [6.4 km] above El Paso.... The El Paso Valley [Valle de Juárez] extends about 90 miles [145 km] southward from El Paso ..., but only the upper 40 miles [64.4 km] is included in the Rio Grande Project.

The water for the Rio Grande Project is stored in Elephant Butte Reservoir, which has a capacity of 2,197,600 acre-feet [2,711 hm³], and in Caballo Reservoir, which has a capacity of 345,870 acre-feet [426.6 hm³], about 28 miles [77 km] below Elephant Butte Dam. Water released from Caballo Reservoir is diverted into canals in the Rincon Valley, ...; in the Mesilla Valley ...; and in the El Paso Valley by the American Dam, about 3 miles [4.8 km] northwest of El Paso. Water for the Mexican side of the El Paso Valley, generally referred

to as the Valle de Juárez, is diverted at the International Dam, about 2 miles [3.2 km] below the American Dam.

6.6. The IBWC Rio Grande Canalization Project (Andrea Glover, IBWC, 2018, p. 63)

The levees [between Caballo Dam and El Paso] are owned, constructed, and maintained by the United States Section of the International Boundary and Water Commission (originally named International Boundary Commission (IBC) but name was changed to International Boundary and Water Commission with the Treaty of 1944 [*cf.* Sandoval Solis, 2011]). The levees, river, and floodplain fall under International Boundary and Water Commission’s (IBWC) Rio Grande Canalization Project. The project extends along the Rio Grande from Percha Dam, just south of Caballo Dam in Sierra County, to American Dam and Canal in El Paso, TX [**Fig. 1-2**]. These levees exist because of a treaty with Mexico [**Part 6.4**]. The Convention of 1906 (34 Stat. 2953) requires that the United States (US) deliver an annual appropriation of water to Mexico at their Acequia Madre headgates in El Paso, TX (IBC, 1936, p. 2) and while the US Government owns Elephant Butte and Caballo Dams, prior to the Canalization Project they did not own the river channel. Measuring treaty water deliveries was almost impossible because of private water diversions along the 125 river mi (201 km) in the US.

The unregulated flows also allowed Mexico to sometimes exceed their allotment (IBC, 1936, p. 3). Public Resolution No. 648, Act of June 4, 1936, authorized the canalizing of the Rio Grande from Caballo Dam, NM, to El Paso, TX. Construction began on January 15, 1938 and was completed in February 1943 . . . The project was meant to establish a normal flow and flood channel confined between parallel levees sized to carry the estimated maximum flood flows (IBC, 1935, p. 5). When the initial project was complete, 125.92 mi (202.6 km) of levee were constructed, almost 3300 ac (1334 ha) of floodway were leveled, the river was shortened by approximately 10 mi (16 km), and 7395 ac (2993 ha) of land were acquired at a total project cost of \$2,996,052 (Baker, 1943, p. 4, 18, and 32).

6.7. The 1963 U.S.-Mexico “Chamizal Convention” and Beyond

From a long-term “geopolitical” perspective setbacks in binational collaboration in studies of transboundary aquifers have only been temporary since ratification of the “Chamizal Convention” of August 1963 (www.ibwc.gov/Files/ChamizalConvention1963.pdf). This treaty resolved a long-term Rio Grande/Bravo, International Boundary problem at El Paso and Ciudad Juárez. As reported by Dr. Jerry Mueller in “Restless River – International Law and the Behavior of the Rio Grande

²⁴ Elephant Butte Dam was completed on May 13, 1916 (Kelley *et al.* 2007).

(1975, p. 99-104):”

[p. 99] Article 1 of the 1963 Treaty provided for a relocation of the River in a 4.3-mile cement-lined²⁵ channel between El Paso and Juarez, on an axis determined in Minute No. 214 of the International Boundary and Water Commission. The Chamizal Channel, with a discharge capacity of 24,000 c.f.s., opened in 1968 and became a fixed reach of the international boundary...

[p. 103-104] In order to implement the Chamizal Treaty, it was necessary for the United States Government to purchase 743.54 acres of land, or slightly more than a square mile, of south El Paso. Nearly 85 percent of this area, 630.38 acres, was transferred directly to Mexico in the fall of 1967. The remaining 15 percent, 113.16 acres, was required for the Chamizal Channel, a port of entry, relocation of the Texas and Pacific, Santa Fe, and Southern Pacific Railroads, and the relocation of a principal irrigation canal. These property acquisitions alone cost the United States more than 27 million dollars... Additional tens of millions have been spent in relocating public facilities of the affected zones, in constructing bridges and the Chamizal Channel, and in building an ultra-modern port of entry and customs complex at the Cordova crossing. At present, a multi-laned divided highway shuttles visitors between El Paso and the PRONAF commercial center of east Juarez via the Cordova route, crossing the [new] Chamizal Channel and the inconspicuous dry bed of the pre-1968 Rio Grande.

As illustrated in recent (mainly 2016-2021) events, major communication setbacks are primarily due to political conditions, which sadly can reverse the *polarity* of binational *progress* at intervals as brief as four years in the United States and six years in Mexico. On the other hand, binational collaboration on *Earth-science* and related geotechnical concerns between research universities, and scientific and professional societies has always been very productive. This point is emphasized throughout the paper, as well as in many illustrations and a large number of cited references (*cf.* **Tbl. 1-6**).

6.8. New Mexico Water Law (1912) and the Interstate Rio Grande Compact (1938)

6.8.1. NEW MEXICO STATE CONSTITUTION (TESSA T. DAVIDSON, J.D., 1998, p. 35):

... Water was placed in a unique category in our Constitution - something that cannot be said of lumbering, coal mining, or any other element or industry. The reason for this is of course too apparent to require elaboration. Our entire state has only enough water to supply its most urgent needs. Water conservation and preservation is of utmost importance. Its utilization for

maximum benefits is a requirement second to none, not only for progress, but for survival.

6.8.2. THE 1938 RIO GRANDE COMPACT (KEVIN FLANNIGAN 2007, p. 518-519):

The Rio Grande Compact, an interstate agreement that apportions waters of the Rio Grande between the states of Colorado, New Mexico, and Texas, was executed in 1938 and became effective in 1939. Under the Compact, New Mexico is allowed to consume on average roughly twice as much water as Colorado and three times as much as Texas. New Mexico's share includes the amount of water it is entitled to consume between the Colorado-New Mexico state line and the Otowi gage, the amount in the Middle Rio Grande valley between Otowi gage and Elephant Butte Reservoir (including all tributary inflow and San Juan-Chama Project water), and the amount in the Elephant Butte Irrigation District below Elephant Butte in the Lower Rio Grande [*cf.* Littlefield 2000 (p. 21-28); Ortega-Klett 2000 (p. 17)].

6.9. Contemporary Geopolitical Realities in Binational Water-Resource Management

Groundwater has been out of sight and out of mind. Mexico would like another 60,000 acre-feet of surface water, and if we do not reach an agreement with Mexico, what is to prevent them from taking it underground, under the table? None of us have any security in this border region. Doña Ana County, El Paso, Chihuahua—we have a game without rules. We have not been able to secure our groundwater relations. We delay reaching agreement and settling our groundwater arrangements with Mexico at our peril. We must move forward on that [,] although politically it is almost impossible.

That is all in the vein of saying that we happen to be in one of those special areas which is crisscrossed with political boundaries, and contains the transboundary situation. So we have to work extra hard at trying to seek, share, manage, cooperate, and plan together. . . [*cf.* Chávez 2000, Székely 2010, Hathaway 2011].²⁶

The following selection from a Natural Resource Journal article titled “Institutional Alternatives for Mexico-U.S. Groundwater Management (Hayton 1978a)” succinctly captures much of this paper's central theme. It is taken from a presentation by City University of New York Professor, Robert Hayton* at a “Symposium on U.S. – Mexican Transboundary Resources (La Joya, CA, 1977),” which was published in the Natural Resources Journal (1978, v. 18, p. 201-202, with underlining for emphasis; *cf.* R.E. Clark 1978, and Hayton 1978b):

Existing treaty arrangements between Mexico and the United States have failed to take into account, at least expressly, both ground-water aquifers astride the

25 ~7-km [reinforced-concrete]-lined.

26 Prof. Albert E. Utton (1996, p. ix; *cf.* Utton and Atkinson 1979, 1981, 1983, Utton 1994).

international boundary and the influence that surface waters and ground waters have on each other as a result of the normal functioning of the hydrologic cycle. Such an omission is not at all surprising. Failure to consider the underground environment was characteristic of virtually all agreements on inter-jurisdictional waters until very recent times. National law, worldwide, has also only more recently manifested an informed awareness on the part of legislators and judges of the functioning of hydrosystems generally and the behavior of ground water in particular [cf. Utton and Atkinson 1979 and 1981, Utton 1983].

Efforts to optimize the utilization of available water resources in the face of increasing demand pressures have led to intensive investigations and, consequently, to more widespread appreciation of the hydrologic cycle in most parts of the world. The deteriorating quality of most supplies has provided additional emphasis on the resolution of water management problems in which rational development, use, and conservation of underground water have become major factors. However, until a few years ago ground water was, almost everywhere, relegated to separate and, from the managerial point of view, neglected treatment. This is not a forum where this proposition need be elaborated. Nor does the history of Mexico-United States relations with respect to the water resources shared by the two nations require review. Suffice it to say that, seen from a universal perspective, the record of cooperation and collaboration between these two sovereign states, though not without its more difficult periods, is an outstanding one.

The boundary and water relations of few international neighbors compare favorably with those maintained by the United States and Mexico. Yet, the international commission was set up in 1889 and given its present form and mission in 1944, when its name was changed to the International Boundary and Water Commission [IBWC], United States and Mexico. There was at that time little understanding of the behavior of underground water, geologists and geographers excepted. On the contrary, ignorance was gross. In the United States we are still plagued today with the spurious propositions about ground water that were propagated by ingenuous- and ingenious-counsel and became part of common law doctrine through the precedent established by misinformed judges. Practitioners and judges in “civil law” countries are not often inhibited by prior case determinations; nonetheless, Mexican officials and interested parties similarly lacked knowledge of the physical and chemical dynamics of the “underground environment.”

In both countries the period of fantasy is largely behind us, though there are those remaining who have not yet taken time to learn. Not only is there widespread dissemination of hydrogeological fundamentals, but greatly increased attention is now devoted to water problems at the highest levels. And basin-wide, integrated management of the resource is accepted, at least in principle ²⁷.

/. Hydrogeology-Related Studies of Transboundary Aquifers

7.1. Early Geologic Investigations in Northwestern Mexico

The Porfirio Diaz regime’s encouragement of active U.S. involvement mineral-resource development in northern Mexico led to reconnaissance geologic studies that provide some groundwater-resource information, especially in upland-area mining districts in Chihuahua and Sonora (e.g., Hill 1891, 1892a and b, 1896, 1900; Burrows 1909). Political and social unrest between 1911 and 1928, however, was not conducive to any type of natural-resource investigation (Tompkins 1934, Clendenen 1961, Lister and Lister 1966, Wasserman 2015 and 2017). Subsequently there was a major resurgence in interest not only in hard-rock mineral exploitation, but also in regional geologic mapping. Ezequiel Ordóñez (1867-1950), then Director of the UNA-Instituto de Geología was involved in many such efforts (e.g., 1936 and 1942).

The 1938 monograph by American biogeographer Donald Dilworth Brand (1905-1984) on the “Natural Landscape of Northwestern Chihuahua” remains the most comprehensive English-language description of that region’s geomorphology. It is based on 1929-31 and 1935-36 field studies; and it includes short, but very informative summaries of previous work by Mexican, American, and European geologists and geographers, as well as detailed descriptions of biota, notes on climate, and astute geomorphological observations.

7.2. Pioneering Hydrogeologic Investigations in the United States Part of the Mesilla Basin Region

Nelson Horacio Darton (1865-1948) of the USGS covered an enormous geographic and geologic-topical area (Darton 1916, 1928a-b; Darton *et al.* 1933; Deming 2002, p. 98-99). His contributions to Late Cenozoic geology included formally naming the Ogallala formation (1899, 1905). He also pioneered the use of subsurface-mapping methods in his hydrogeologic characterization of Mimbres basin aquifer system (1916); and he recorded the most recent time (1905-1906) when Mimbres River flow almost reached the US-Mexico border in the southeastern Mimbres Basin University of New York, Hunter College. Senior Law Partner at Stannage and Hayton; Rapporteur on International Ground-Waters- International Committee Arbitration (ILA); Member on International Water Law.

27 Robert D. Hayton (1922-1910), Professor of Law and Political Science, and Dean of Graduate Studies at the City

of the RG rift (Darton 1916, p. 111; *cf.* **Fig. 1-12**).

Darton compiled the first reconnaissance geologic map of the U.S. part of the southern Mesilla Basin area in his 1933 “Guidebook of the Western United States—Part F. The Southern Pacific Lines (USGS Bull. 845, Sheet 18; **Fig. 7.1**).” In this seminal work, Darton utilizes previous hydrogeologic information collected by USGS geologist Willis T. Lee (1864-1926) on the first water wells drilled for steam-locomotive supply (Lee 1907, Tbl. 5; **Tbl. 7.1**). The following description of the EPdN-southern MeB area is from Darton’s (1933, p. 131-133) “rail-log” of the Southern Pacific [now Union Pacific] route west of El Paso:

From El Paso westward to Tucson the Southern Pacific Railroad has two lines—one going by way of Deming and Benson [present UPRR] and the other (former El Paso & Southwestern Railroad [now abandoned]) by way of Columbus and Douglas [now route of NM Hwy. 9]. Leaving El Paso, the north line of the railroad follows the north [NE] bank of the Rio Grande for some distance, with Mexico in plain view on the opposite bank. In about 1 mile [1.5 km] a large smelter is passed, and in 2 miles a cement plant, near which are large quarries in limestones (of Comanche or Lower Cretaceous age) in a downfaulted block at the south end of the Franklin Mountains. It is the presence of this rock and a mass of intrusive [Campus Andesite] porphyry that cause the [EPdN] constriction of the river valley at El Paso (Spanish, the pass). At the entrance of this pass the railroad crosses the river into New Mexico and skirts the north side of Cerro de Muleros [Cristo Rey], a high ridge which lies mostly in Mexico...

The Cerro de Muleros [Cristo Rey] consists of a mass of limestone, shale, and sandstone of [Lower] Cretaceous age penetrated and tilted by a large mass of [Eocene andesite] porphyry. The lower or quarry limestone in this succession is well exposed in the first railroad cut west of the river. It is overlain by nodular and slabby limestones and shales containing large numbers of Washita fossils and grading upward in to a thick mass of dark shale in which there are deep cuts extending to and beyond Brickyard siding. This shale is extensively worked for brick, hollow tile, etc., on the west bank of the river below the 2 railroad bridges... (*cf.* Lovejoy 1976, Lucas *et al.* 2010)

Just above Anapra siding [1,179 m; pop. 27], where north [main SPRR] and south [now abandoned] lines are close together and joined by switches to be used in case of necessity, the railroad grade ascends the terrace of valley fill [Upper SFG], the edges of which margins the Rio Grande Valley in a long line of steep slopes. The top is attained near Strauss siding [present Santa Teresa Industrial Part, alt. 1,253 m]. Along the upgrade are many fine exposures of gravel and sand of which the terrace is composed. This material was deposited by the Rio Grande at an earlier stage of its history, when it flowed west of the Cerro de Muleros [Cristo Rey] and another high range

to the south [Sierra de Juárez] and emptied into Guzman [Los Muertos] Basin in Chihuahua, Mexico. This was before its present course was developed through the “pass” at El Paso [*cf.* Lee 1907, p. 10] ...

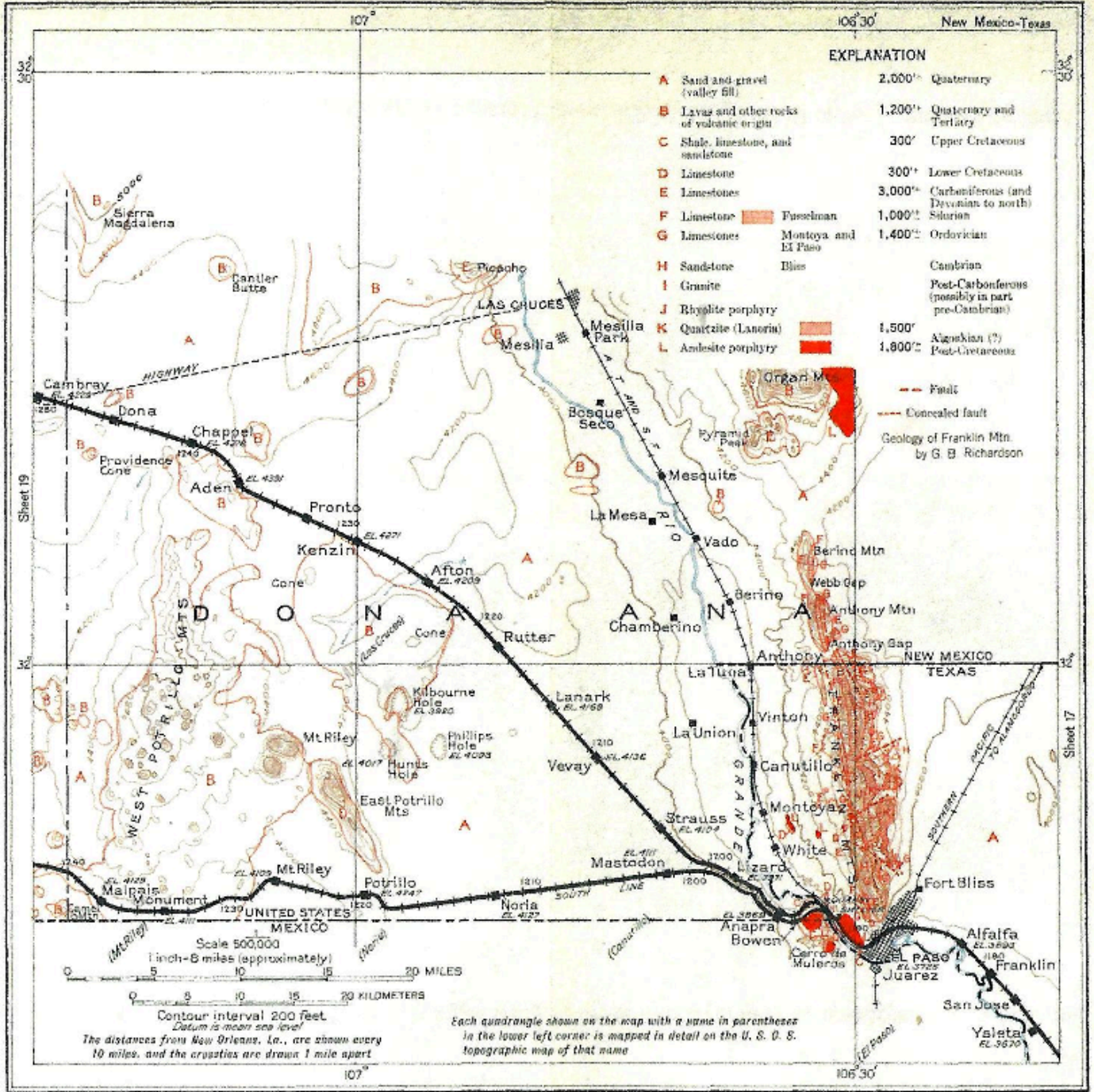
From Strauss siding the railroad goes northwest over the wide alluvial plain [La Mesa surface, **Fig. 6-2**] that extends entirely across the southwestern part of New Mexico... The northerly trend of the railroad in this area is taken to avoid the large rugged area of volcanic rocks [basalt flows] of the West Potrillo Mountains and its extension to the north.

The thick body of [ARG] sand and gravel underlying the plain has been drilled for water at several points along the railroad. A boring at Lanark [alt. 1,270 m; pop. 40] passed through (390 m of beds, all supposed to be [SFG] valley fill but possibly including some underlying Tertiary or Cretaceous strata [Lee 1907, Tbl. 5; **Tbl. 7-1**]. It found water which rises approximately to the level of the Rio Grande Valley, 15 miles [13 km] east...

7.3. Initiation of Comprehensive Hydrogeologic Investigations in Chihuahua

The first comprehensive report on the hydrogeology of Mexico’s northern desert regions was compiled by Luis Blásquez (1959) of the UNAM, Instituto de Geología. He presented detailed (*Spanish-language*) summaries of then-available information on physiography (with climate data), extent of surficial basin-fill deposits, bedrock type, geohydrology, and hydrologic-budget analyses for all major drainage basins. Of special importance to groundwater investigations throughout the US-Mexico Border region was inclusion of the basins of the Rios Casas Grandes, Carmen, and Santa Maria in the Blásquez report.

More-advanced hydrogeological and hydrochemical characterization of basin-fill aquifer systems in Chihuahua was initiated at both federal and state levels in the mid-1960s. The binational bibliographic information compiled in **Table 1-6** illustrates the scope of the hydrogeology-related investigations that have been completed in the Chihuahua-New Mexico-West Texas border region since 1960. Geomorphologic, hydrogeologic, soil-mapping aspects of this multi-disciplinary investigations are described in Hawley (1969). Development of detailed classification of “geomorphic features of northwestern Chihuahua . . .” was one of John Hawley’s early contributions to this binational effort (**Part 3.1**; *cf.* Schmidt 1973 and 1992). Initial field collaboration involved the SRH-Dirección de Agrología in Mexico and the Soil



Topography: U. S. Geological Survey quadrangle maps

WILLIAMS & HEINTZ CO., WASH., D. C.

Figure 7-1. (facsimile copy of USGS Bulletin 845, SHEET 18). First reconnaissance geologic map of the Mesilla Basin region by N.H. Darton (1933). Bulletin 845 includes detailed commentary on geology and history along 1) the mainline of the Southern Pacific (now Union Pacific) RR between the El Paso, TX and Cambray, NM area; and 2) the now abandoned SPRR route between El Paso and Malpais Siding, NM (Darton, p. 123-136, and p. 162-164). See Lee 1907 [Tbl. 7-1], Richardson 1909, Seager *et al.* 1987, Seager and Mack 1994, Seager 1995, Collins and Raney 2000, Hoffer 2001b). See **Figure 6-2** for a panoramic view along U.S./Mexico boundary east of Potrillo Station area.

TABLE 7-1. (facsimile copy of USGS Water-Supply Paper 188, Table 5.—Records of bored wells in La Mesa district (Lee 1907). Note that 3 wells (Herrington, Noria, and Potrillo) are on or near the former “El Paso and S.W. Rwy.” Route, which is now the location of NM State Highway 9. The Brock, Herrington, Lanark and Noria wells are completed in USF2-ARG deposits (*cf.* Part 3.4).

Owner.	Location.	Total depth.	Depth to water.	Power used.	Material encountered.
		<i>Feet.</i>	<i>Feet.</i>		
Henry Brock	Sec. 30, T. 25 S., R. 2 W. . .	240	221	Gasoline..	Sand and waterworn gravels.
Do	Sec. 7, T. 24 S., R. 1 W. . .	430	386	do	Do.
Do	T. 24	515	-----	-----	Clay.
Mr. Hawkins	5 miles west of Picacho Mountain.	218	170	Gasoline..	
Robert Herrington.	2 miles northwest of Noria.	435	350	do	Sand and gravel.
J. F. Kilburn	T. 27 S., R. 1 W.	^a 478	408	-----	Do.
Do	6 miles northwest of Lanark.	388	370	Gasoline..	Sand and waterworn gravel.
S. P. Rwy. Co.	Lanark	945	380	Steam	Do.
Lewis Bros.	5 miles northeast of Lanark.	365	340	Gasoline..	Sand and gravel.
J. B. Stahling	10 miles west of Lanark.	^b 460	440	-----	
Do	6 miles west of Lanark. .	350	311	Gasoline..	
El Paso and S. W. Rwy.	Potrillo	240	220	do	Sand and clay.
Do	Noria	438	358	do	Sand and gravel.

^a 170 feet in bottom of crater.

^b 200 feet in bottom of crater.

Survey Investigations Desert Project of the USDA-Soil Conservation Service with support from the UNESCO Food and Agriculture (FAO), World Soil Map Program (e.g., Flores Mata 1970, Gile *et al.* 1981). Unfortunately, this very productive investigation was terminated on January 20, 1969, due to changes in U.S. State Department policy on multi-national scientific and technical collaborations.

In the 1980s, leadership in national water-related matters was transferred from the former Secretaria de Recursos Hidraulicos (SRH) to the new Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Hawley and others (2021) provide additional information on collaborative investigations involving these agencies, as well as the Universidad Nacional Autónoma de México (UANM), and the UACJ (*cf.* SPP [Secretaria de Programación y Presupuesto] 1981; INEGI 1983a and b, 1999, 2012). Most published information from these sources used in WRRI-coordinated studies, however, has been obtained from Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) publications. Hydrostratigraphic

and hydrochemical interpretations that relate to parts of the Study Area in Chihuahua are based primarily on well construction, water-level, and GW-chemistry information collected in 1982, and initially reported in INEGI (1983b; *cf.* Hawley *et al.* 2021- TBL. 1: well nos. 359-397).

7.4 1983 La Paz and 1994 North American Free Trade Agreements

The La Paz Agreement is a “presidential-level accord that resulted from a 1983 summit meeting between President Ronald Regan and Miguel de la Madrid” in La Paz, Baja California Sur (Barry *et al.* 1994, p. 215). The Agreement took effect on Feb. 16, 1984; and it continues to provide an ideal conceptual model for binational cooperation in environmental protection and water-resource conservation. According to Woodward and Duval (1996, p. 1):

The 1983 La Paz Agreement defined the United States-Mexico border area as a corridor extending 100 kilometers

on each side of the international boundary between the two nations. From a variety of different perspectives, this somewhat pragmatic definition of the border area may have been reasonable. Recent passage of the North American Free Trade Agreement (NAFTA) and the subsequent establishment of the North American Development Bank and the Border Environment Cooperation Commission indicate the importance each country places on the U.S.-Mexico border region. NAFTA-related development has affected, and will continue to affect, the border resources we share. However, for describing and assessing the shared-water resources of the border region, the arbitrary delineation of the “border area” defined in the 1983 agreement is not sufficient; relevant hydrologic and hydrogeologic criteria must be used to delineate the extent of the border area [cf. Mumme 1994; Parcher and Hernández 2008; Parcher *et al.* 2010; Lee and Ganster 2012; Pacheco 2017a-b, 2018a-b, and 2019a-b].

7.4.1. EARLY LA PAZ AGREEMENT-BORDER XXI

PROGRAM ACTIVITY—1994 TO 1997

Effective implementation of the La Paz Agreement of 1983 did not occur until enactment of the “Integrated Environmental Plan for the Mexican-U.S. Border Area—Border XXI Program” in February 1992. This in turn stimulated the first round of Transboundary aquifer studies that continued during the next 15 years. Focus of the initial investigations in the La Paz Agreement Border XXI Program was on the Hueco Bolson area, with Mesilla Basin work being limited to the United States. Barry Hibbs, then with the Texas Water Development Board (TWDB), and Bobby Creel of the NM WRRI served as lead principal investigators; and the U.S. EPA-Region VI was the primary research-funding source (Hibbs *et al.* 1997 and 1998).

With respect to WRRI-coordinated hydrogeologic investigations in the Mesilla Basin-Hueco Bolson region, the most significant contribution was the “Transboundary aquifers and binational ground-water data base” exchange (Hibbs *et al.* 1998, TWDB 1997). Participating agencies included the International Boundary and Water Commission (IBWC), Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), and Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMASCJ). While the report by Hibbs and others (1997) contains very little subsurface information of hydrogeologic value for binational parts of the Mesilla Basin region, it does include a map and CD-ROM cover-insert with an invaluable compilation of general information on regional groundwater quality in Stiff-diagram format (**Fig. 7-2a** and **7-2b**). Four color-coded total dissolved solid (tds)-range categories are shown: blue—0 to 1,000

mg/L; green—1,000 to 3,000 mg/L; yellow—3,000 to 5,000 mg/L; and red—>5,000 mg/L.

GW quality information from the 26 wells located in Chihuahua (**Fig. 7-2a**) was taken from a large 1982 water-sample database compiled in INEGI (1983b; cf. Gutiérrez-Ojeda 2001 [p. 26]). Because there are no local highland recharge sources, it is here inferred that low-chloride (<1,000 mg/L tds) water from the seven wells located in the central part of **Figure 7-2a** had a Late Pleistocene pluvial-Lake Palomas underflow-discharge source (**Parts 3.4** and **4.6**; and **Figs. 1-7, 1-9** and **1-11**; cf. **Part 7.7**).

7.4.2. BORDER XXI PROGRAM HYDROGEOLOGIC

INVESTIGATIONS—1997 TO 2000

Reconnaissance level hydrogeologic characterization of “Trans-International Boundary Aquifers”, with emphasis Santa Fe Group (SFG) and correlative basin-fill (Gila Group) deposits in basins west of the Rio Grande rift was initiated by the WRRI with Border XXI program support (Interagency Contract X-996350-01-3; Hawley *et al.* 2000). Hydrogeologic studies in the Mesilla Basin region after 2000 were also supported by grants to the WRRI from the N.M. Interstate Stream Commission (NM ISC), Lower Rio Grande Water Users Organization (LRGWUO), USGS, and NSF/CA State University-Los Angeles (Hawley *et al.* 2001, Hawley and Kennedy 2004, Witcher *et al.* 2004, Creel *et al.* 2006, and Hawley *et al.* 2009).

In the **Figure 7-2a**, the high sodium/chloride/sulphate symbol in the middle-right is for water sampled from the Los Argüeles well in the Sierra Sapello Uplift with a reported tds of 6,020 mg/L (INEGI 1883b, pozo no. 29). The high sodium/chloride symbols in the lower center and upper left are for water sampled, respectively, in the Bolsón de los Muertos and near the East Potrillo fault zone (EPfz) in the southwestern MeB. The latter sample was from Well no. 256 (Hawley *et al.* 2021, **TBL. 1**) with reported tds of 4,770 mg/L (Anderholm *in* Frenzel and Kaehler 1992 [p. C65]).

The Hawley and others (2000) study in southwestern New Mexico Border region was the first comprehensive hydrogeologic investigation of a “La Paz Agreement” Transboundary aquifer system. It also represented an early effort to incorporate contemporary GIS and GPS technology in a hydrogeology-based characterization of Transboundary aquifers and associated GW-flow systems. The project-completion report included detailed reviews of available published information on the hydrogeology and hydrochemistry in contiguous parts

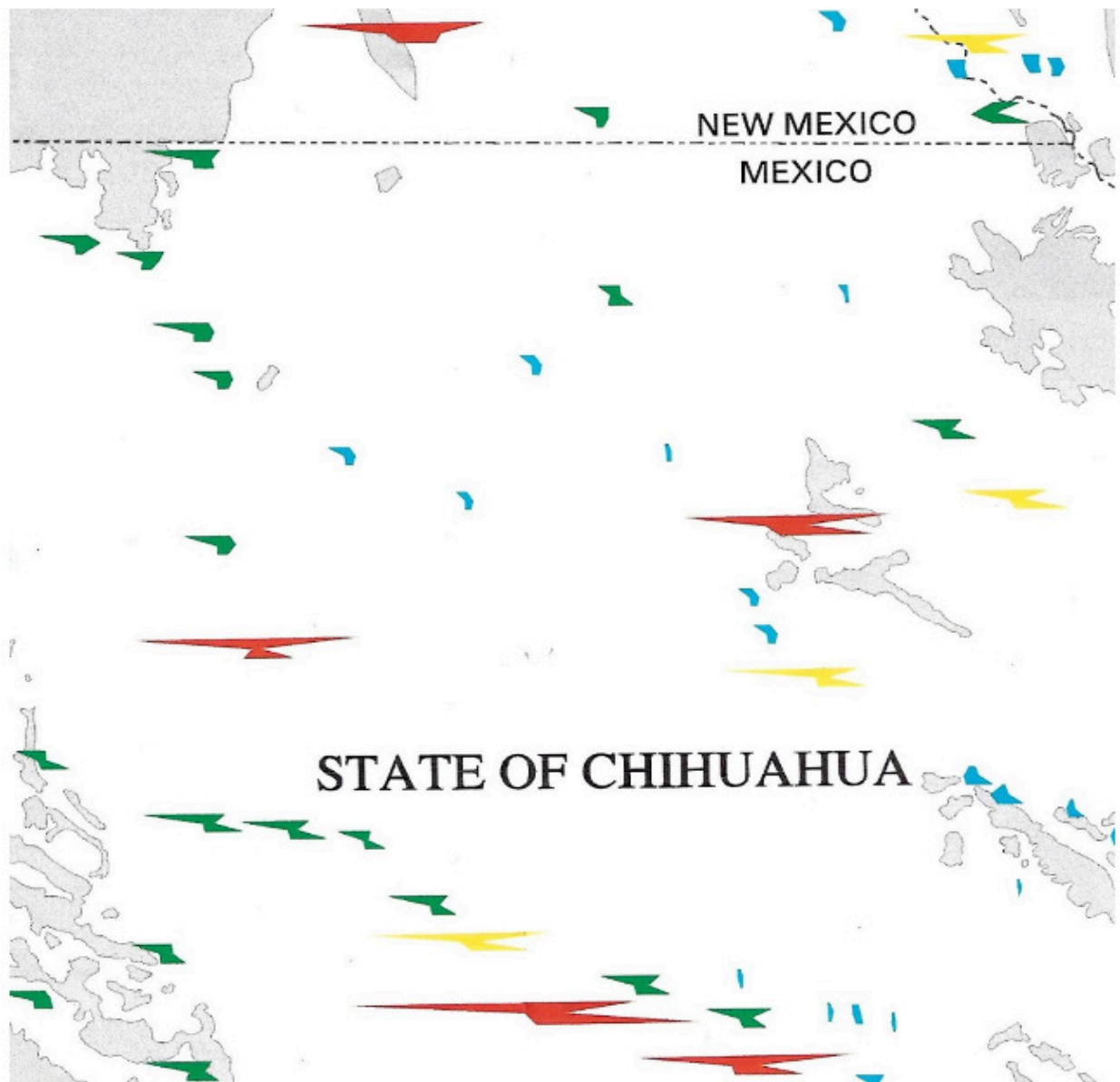


Figure 7-2a. Facsimile copy of a section of the Texas Water Development Board (TWDB), CD-ROM Stiff-diagram compilation of “Water Quality” data for the area SW of El Paso-Ciudad Juárez (Hibbs *et al.*1997). North to left, with water-quality explanation on **Figure 7-2b.**

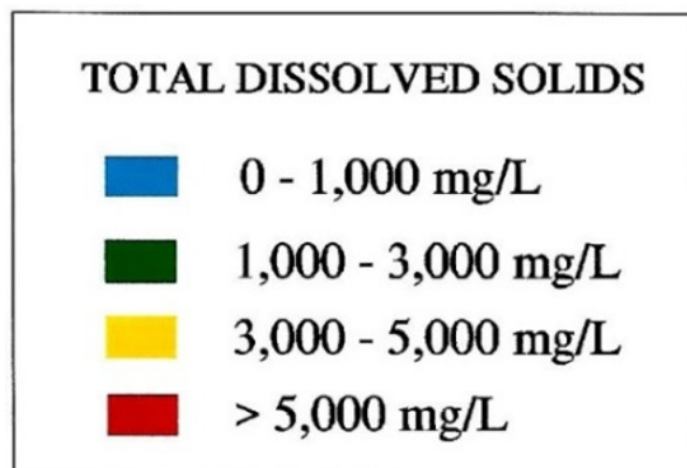


Figure 7-2b. Explanation of total dissolved solids symbols in **Figure 7-1a.**

of Chihuahua and Sonora (*cf.* Hibbs *et al.* 1999; Hibbs *et al.* 2000). Lithologic character, geologic structure, and boundary properties of major hydrostratigraphic units were schematically illustrated at map scales in the 1:250,000 to 1:500,000 range, with a cross-section network at 10x VE that extended to mean sea-level depths. The above-cited work, however, only covered parts of the WRRRI Study Area (**Fig. 1-2**) that are west of the 107° W Meridian. Accordingly hydrogeologic interpretations were made primarily on the basis of 1) Hawley's previous field work in the region, and 2) preliminary analyses of then-available borehole records and groundwater-geochemical data (e.g., Córdoba *et al.* 1969, Hawley 1969, Flores Mata 1970, INEGI 1983a and 1983b).

Of special importance, with respect to interpretation of the Mesilla Basin region's Transboundary GW-flow system are the Texas Water Development Board (TWDB) map-compilation of "Water Quality" data in Stiff-diagram format in Hibbs and others (1997; **Fig. 7-2a**), and INEG (1983b)-sourced, hydrochemical information compiled by Hibbs and others (1999), and Hawley and others (2000 [Fig. 4-8]). The **Figure 7-3** "Chloride in wells" map is representative of the latter database. Most of the sampled wells of interest are located in the southeastern-most parts of the "Mimbres Basin" in an area provisionally designated "Bolson de los Muertos."

The anomalously low chloride content and high quality of groundwater sampled in IBZ area shown in the southeastern section of the **Figure 7-3** are of special relevance in the interpretation of the Transboundary GW-flow system in the El Parabién and southern Mesilla GW Basin (EPB and MeB) area (e.g., 14.2 mg/L Cl and 596 mg/L tds, *in* Hawley and others 2021-TBL. 1: well no. 382 [INEGI 1983b, no. 26]). These occurrences, and the general presence of fresh water in the Upper/Middle Santa Fe Gp aquifer zone in the EPB and contiguous parts of the El Aguaje Uplift can only be explained by significant amounts of underflow recharge derived from pluvial-lake high stands during Late Pleistocene glacial intervals between 12,000 to 29,000-yr ago (*cf.* Hawley *et al.* 2021-TBL. 1: Wells 364, 365, 367, 368, 373, 377, 379, 380, 382, 385, 387, 389, 393 and 394; Gutiérrez-Ojeda 2001).

7.5. Background on Collaborative Hydrogeologic Investigations: 2000 to 2007

Between 2000 and 2007, investigations with a major hydrogeological component were mainly restricted

to RG-rift basin areas north of the International Boundary, and included parts of the Southern Jornada (del Muerto) Basin, Rincon Valley-Palomas Basin, and Hueco Bolson (Hawley and Kennedy 2004, Witcher *et al.* 2004, Hawley *et al.* 2005 and 2009, Hutchison 2006, Nickerson 2006). NM WRRRI TCR-332 (Hawley and Kennedy 2004, Hawley *et al.* 2005) was the first comprehensive report on the MBR's hydrogeologic framework with maps and cross sections that were compiled on a digital base. This collaborative effort also included USGS-NM Water Science Center and the NM BGMR at NM Tech. Illustrations included 1:100,000-scale maps of surface hydrogeology and basal basin-fill topography, and a 17 cross-section grid at 10x vertical exaggeration, which extended to 1,000 ft. above msl. Basic ArcGIS and Adobe-Illustrator digital formats were used, respectively, in map and cross section preparation. Borehole logs and production data for about 160 deep test and water wells provided subsurface control for the hydrostratigraphic and lithofacies interpretations (modified Excel® spreadsheet format).

Information on basin-fill aquifer systems in the Chihuahua part of the NM WRRRI TCR-332 study area was limited to acquisition of borehole records (logs and construction data) for 9 exploration wells drilled in 1988 as part of an Secretaria de Recursos Hidraulicos (SRH) "Programa de Exploración-Zona Conejos Médanos (*cf.* Gutierrez-Ojeda 2001, p. 26; SRH 1988; Hawley *et al.* 2021-TBL. 1: nos. 359-368. This invaluable database was acquired by the IBWC-U.S. Section from Mexican federal-government sources in 1989; and it was shared with the EPWU and collaborating U.S. federal and state agencies in 1989 and 1990 for informal research purposes. It could not be officially released for publication, however, until the formal signing of project agreements for interagency-enactment of the Transboundary Aquifer Assessment Act in 2009 (*cf.* **Part 1.8: TAAP**).

The original digital hydrogeologic-framework model for the Mesilla and Southern Jornada Basins was expanded in 2005 to include both the MBR south of Caballo Reservoir, and the western Hueco Bolson (Hawley *et al.* 2005, 2009). Work in the Hueco Bolson was part of a "Hydrogeologic and Water Quality Study of the Hueco Bolson Aquifer," which involved a multi-institutional team of hydrogeologists, geochemists, hydrologists, and geographic-information system (GIS) specialists. The National Science Foundation (NSF) provided funding support through an agreement

between the NMWRRI and California State University-Los Angeles (CSULA—Interagency Contract no. X7-976401-01). Collaborating institutions included the EPA- Region VI, IBWC-US), CSULA, University of Arizona-SAHRA, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez-Centro de Información Geográfica (UAJC), USGS-Water Science Centers, EPWU, and Texas Water Development Board (TWDB). NM WRRI contributions to this project were published as TCR-349 on the “Hydrogeologic framework of the binational western Hueco Bolson-Paso del Norte area, Texas, New Mexico, and Chihuahua: Overview and progress report on digital model development (Hawley *et al.* 2009; cf. Hibbs *et al.* 2015).”

Substantial progress was made between 1996 and 2006 in the hydrogeologic characterization of basin-fill aquifer systems in the Mesilla Basin region north of the International Boundary (Creel *et al.* 2006). Information in Hawley and Kennedy (2004) also includes updated interpretations of borehole-log data (sedimentological, geophysical, and geochemical) in a series of hydrogeologic cross sections that were originally developed by Hawley and Lozinsky for the USGS and the NMBM&MR (1992, Plates 2-11, Table 4). The initial fence-diagram grid of 17 cross sections in TCR-332 was expanded to 23 sections to cover the area between Rincon and Caballo Dam (Hawley *et al.* 2005: CD-ROM, Plates 4 to 6). In their analyses of GW-flow conditions in the southern Mesilla Basin area.

7.6. El Paso del Norte’s Hydrogeologic Control on Regional GW-Flow and Chemistry

Groundwater research since 2000 has recognized the key hydrogeologic role played by El Paso del Norte (EPdN) on the quantity and hydrochemistry of upwelling, deep-sourced saline water at the lower end of the Mesilla Valley (e.g., Phillips *et al.* 2003, Hogan *et al.* 2007, Doremus and Michelson 2008, Moore *et al.* 2008, Kubicki *et al.* 2021). As described in **Parts 4.3** and **7.2**, EPdN is incised in low-permeability bedrock units of the Cerro Cristo Rey Uplift and Campus-Andesite Hills (cf. **Fig. 4-5** [III-III’], **Fig. 5-4** [L-L’], and **Tbl. 4-1**; Hawley *et al.* 2021-Part 5.1.4). The following calculations illustrate this barrier’s effectiveness in limiting interbasin GW flow and forcing upwelling of a regional-flow system that has binational sources (**Part 7.7**): River-channel gradient in EPdN reach between the MeV’s lower end (1,135 m amsl) and the western Hueco Bolson (1,126 m), is ≤ 0.003 . Minimum channel/

floodplain width is about 100 m, and maximum saturated thickness of alluvial fill (RA) is about 23 m. With an estimated hydraulic conductivity (K_{hsat}) of ≤ 30 m per day, maximum underflow discharge through EPdN would approximate, or be even less than the $0.1 \text{ hm}^3/\text{yr}$ (81 ac-ft/yr , 0.11 cfs) discharge rate calculated for the EPdN American Dam site area by Slichter (1905, p. 13; **Figs. 1-11, 6-2** and **6-3**).

Figures 7-4 and **7-5** are preliminary products of NM-Interstate Stream Commission (NM ISC)-funded effort by the NM WRRI to better characterize the Paso del Norte’s hydrogeologic framework and illustrate its effects on regional GW flow and chemistry in 1) the MeB’s Lower MeV, and 2) El Paso/Juárez Valley area of the Hueco Bolson (Hawley and Kennedy 2004, Figs. 5-2 and 5-3; Hawley *et al.* 2009, FIGS. 7 and 8). **Figure 7-4** is a structure-contour map of the base of SFG basin fill in the Lower Mesilla Valley, EPdN and El Paso/Juárez Valley areas. The contour interval is 200-ft (~60-m). **Figure 7-5** is a hydrogeologic cross-section of the Rio Grande/Bravo’s Lower MeV-El Paso/Ciudad Juárez reach, with its location shown with a heavy black line on **Figure 7-4**. The base altitude of the section is 300 m amsl, and its vertical exaggeration (VE) is about 10x.

Figure 7-5 also schematically illustrates the hydrogeologic controls on recharge to the thin river-alluvial and thick SFG basin-fill aquifer systems in the western Hueco Bolson downstream from EPdN. Eastoe and others (2008) use stable-isotope data to distinguish four water types the Basin-Fill (SFG) aquifer system in the El Paso County/Ciudad Juarez part of the Hueco Bolson: “Two types [their Groups A and B] relate to recharge from the Rio Grande: pre-[Elephant Butte] dam (pre-1916) river water [Grp. B] with oxygen-18 and deuterium ($\delta^{18}\text{O}$, δD , ‰) from (-11.9, -90) to (-10.1, -82), contrasts with present-day river water [Grp. A] (-8.5, -74) to (-5.3, -56). Pre-dam water is found beneath the Rio Grande/Bravo floodplain and Ciudad Juárez, and is mixed with post-dam river water beneath the floodplain... In their Hueco Bolson example, Eastoe and others (2008, p. 746) demonstrate that “recharge to regional aquifers in alluvial basins can be dominated by stream-bed infiltration where the geology and local groundwater conditions are favorable [e.g., MeV below Selden Canyon].”

With respect to the very effective “recharge” process of “stream-bed infiltration” that has occurred for thousands of years in the Rio Grande/Bravo reach downstream from EPdN, an “unintended consequence”

Map Showing Chloride In Wells

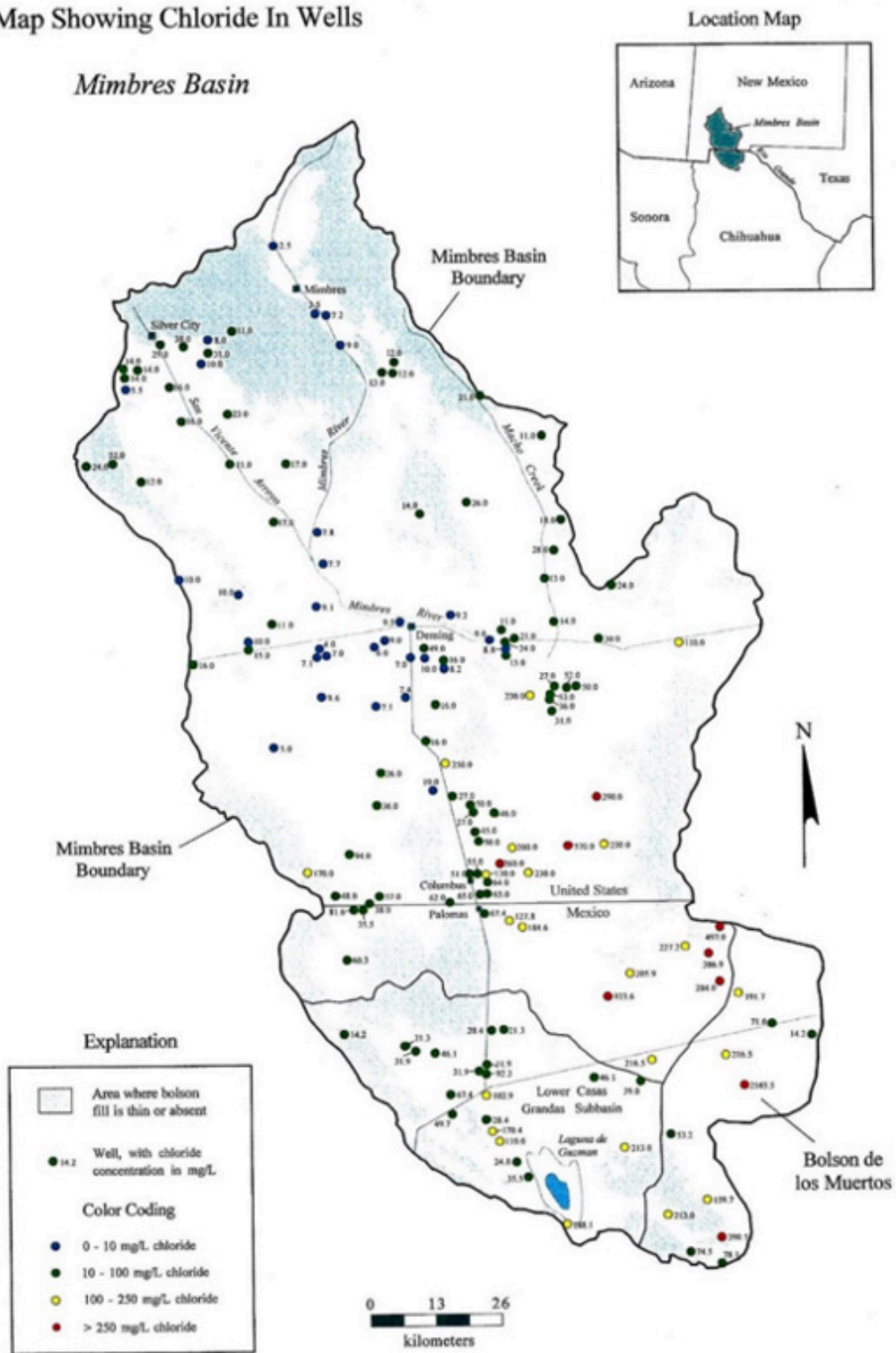


Figure 7-3. (Hawley *et al.* 2000, Fig. 4-8). Chloride concentrations (mg/L tds) of water sampled from selected wells in the Mimbres Basin and contiguous parts of the Bolson de los Muertos area (Malpais, El Parabién, and El Aguaje Uplift; *cf.* Hibbs *et al.* 1999, INEGI 1983b).

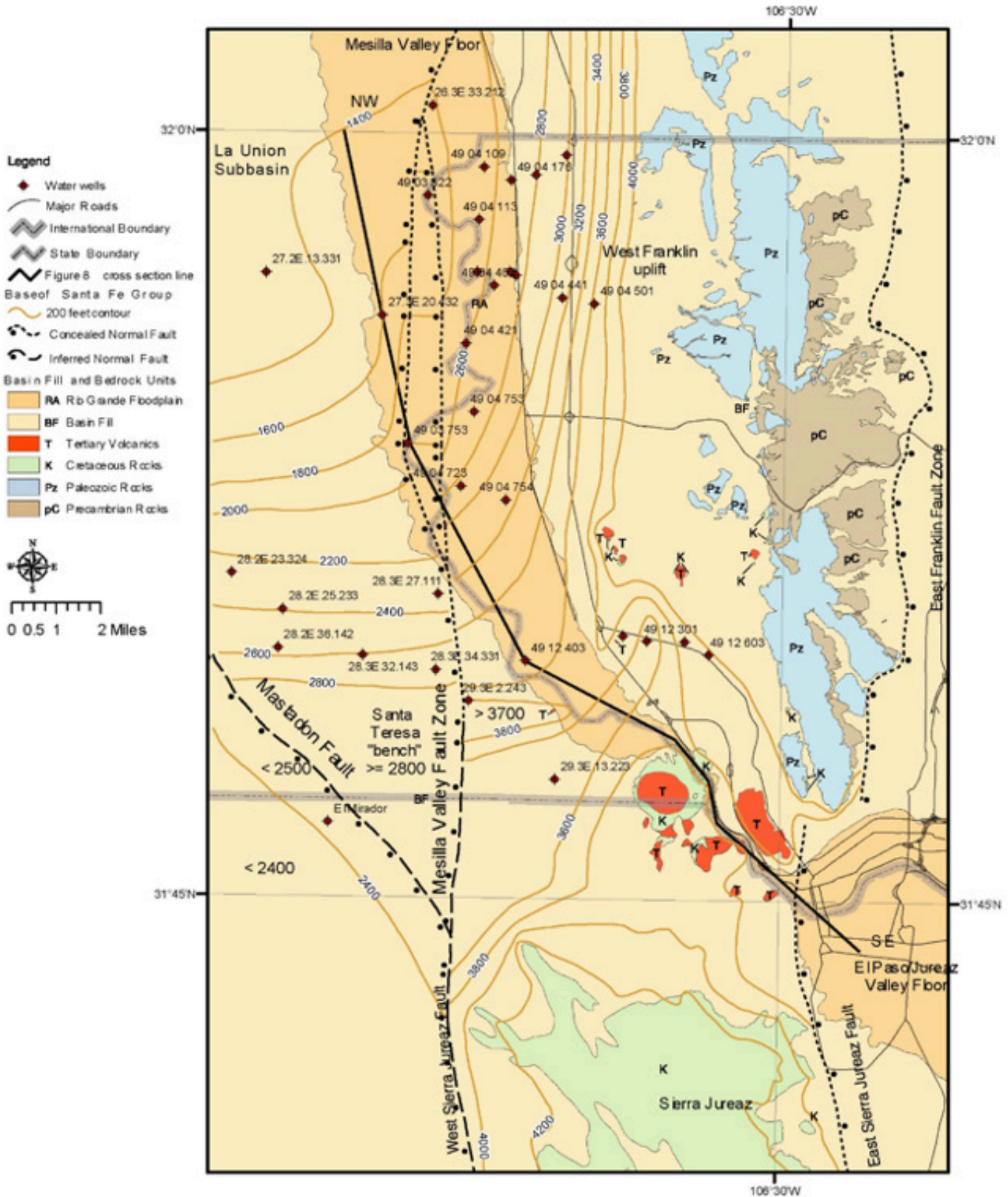


Figure 7-4. (Hawley and Kennedy 2004, Fig. 5-2). *First-generation* structure-contour map of the base of Santa Fe Group basin fill in the Lower Mesilla Valley and Paso del Norte area. Contour interval: 200-ft (60-m). Heavy black line shows location of NW-SE down-valley hydrogeologic cross-section (Fig. 7-5).

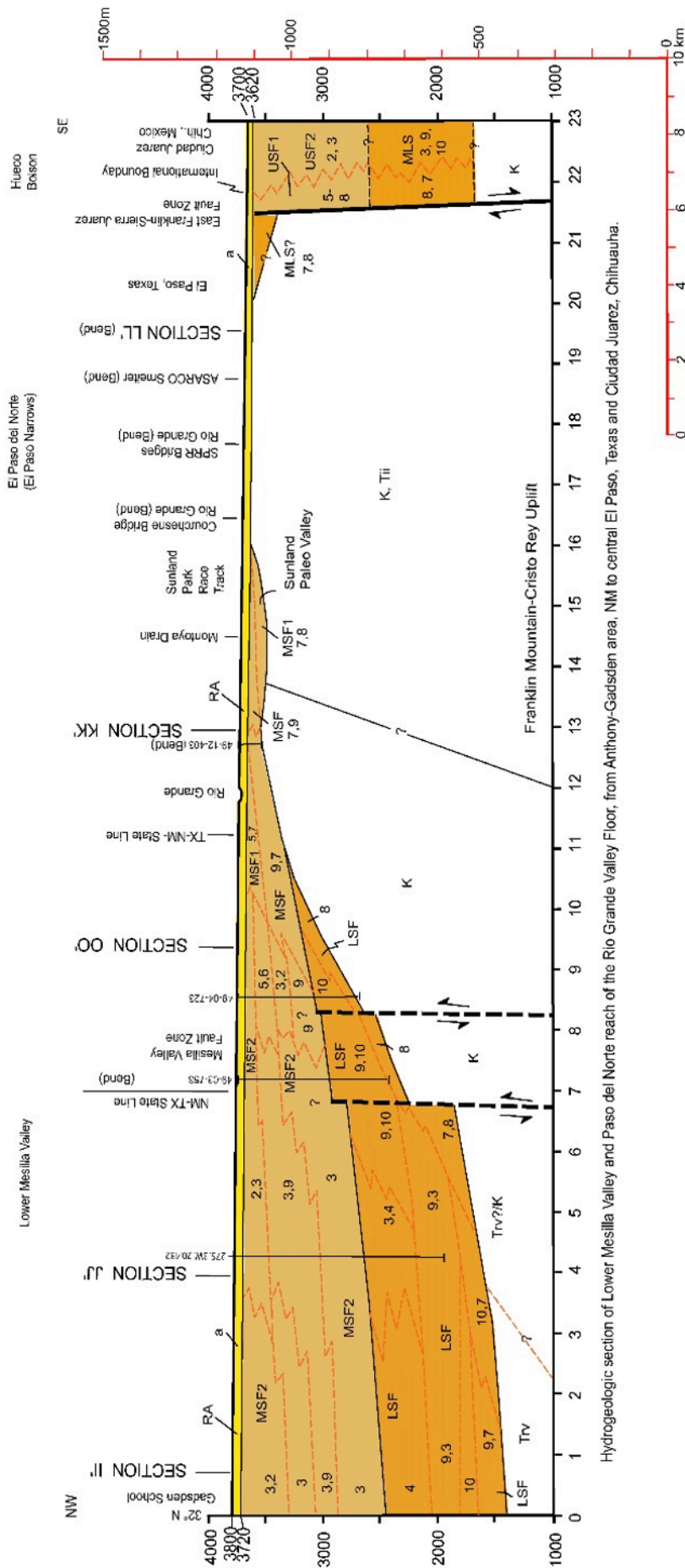


Figure 7-5. (Hawley *et al.* 2009, Fig. 8; modified from Hawley and Kennedy 2004, Fig. 5-3). Hydrogeologic cross-section of the Lower Mesilla Valley-El Paso del Norte-El Paso/Ciudad Juárez reach of the Rio Grande/Bravo Valley. VE ~10x. Heavy black line on **Figure 7-4** shows location of NW-SE cross section that extends from the 32° N Parallel to central Ciudad Juárez near the 106°30' W Meridian (*cf.* Hawley *et al.* 2021, **PLS. 5o** and **5l**).

of the “Chamizal Convention (6.2.2)” was the effective termination of the process with a concrete-lined, canalized river channel (*cf.* Mueller 1975 [p 99]. Eastoe *et al.* 2008, Hawley *et al.* 2009). Nonetheless, the hydrogeologic framework that underlies much of central Ciudad Juárez (Historic El Paso del Rio de Norte-Parts 6.1.3 to 6.3.5) is ideal for a large-scale “managed-aquifer-recharge (MAR) project that could utilize both storm-runoff from an urban/suburban watershed of about 150 km², and treated metropolitan “waste water” from variety of sources (*cf.* Figs 7.6 and 7.7). Because of existing provisions of the Rio Grande Compact between Colorado, New Mexico, and Texas, however, this “holistic” water-resource management option is not presently available in the United States part of the Rio Grande-Rio Bravo basin upstream from Caballo Dam (Fig. 1-2).

Figure 7-6 (courtesy of the UACJ Instituto de Ingeniería y Tecnología [IIT]) is a Landsat-5 color-IR Image of the binational/tristate southwestern Hueco Bolson area that includes much of Ciudad Juárez and eastern El Paso in its northern part. The eastern Sierra de Juárez is at the image’s western edge; and the lower end of El Paso del Norte (EPdN) is in its NW corner. The gray sinuous line marks the 1963 Chamizal Treaty Boundary and the concrete-lined Rio Grande/Bravo channel (Mueller 1975). The floor of the upper El Paso/Juárez Valley includes large areas of irrigated cropland (red). Remnants of Early- to Mid-Pleistocene basin floors that are underlain by Upper SFG-ARG deposits are the dominant landform south of the river valley. The dashed black line shows the approximate position of the eastern Sierra Juárez fault zone (Zona de Fallamiento); and the SW—NE solid black line marks the location of **Figure 7-7**, which is a hydrogeologic cross section that was compiled by the UACJ-IIT GIS Laboratory.

Figure 7-7 (also courtesy of the UACJ-IIT) is a schematic hydrogeologic cross-section of the Upper Valle de Juárez and-El Paso Valley (TX). The Rio Bravo/Rio Grande marks the International Boundary and the location of the reinforced-concrete-lined, 1963 Chamizal Treaty channel. The cross-section location is shown with the SW—NE solid-black line on **Figure 7-6**. Its base is mean sea-level (msl) and vertical exaggeration (VE) is about 10x. The approximate potentiometric surface is shown by a blue-dashed line with triangles. Ancestral (Rio Grande/Bravo-ARG) deposits in the Upper Santa Fe Group (USF-2) form the primary source of fresh and slightly saline (<3,000 mg/L tds) GW. Underlying SFG basin fill (MSF/LSF) is not a significant GW producer due to fine-grained texture and/or induration; and water salinity is >3,000 mg/L tds. Marine Cretaceous

bedrock units (Ku), which are exposed in the adjacent Sierra Juárez, fault-block uplift, are primarily composed of limestone, shale and sandstone with some interbedded gypsum layers (which explains much of the moderate- to high-salinity local GW conditions; *cf.* Tbls. 1-1, 1-2 and 4-1; and Figs. 4-4 and 4-5 (Section III-III’)).

In the Figure 7-6, the eastern Sierra de Juárez is at the image’s western edge; and the lower end of El Paso del Norte (EPdN) is in its NW corner. The gray sinuous line marks the (Chamizal Treaty) International Boundary and the location of the concrete-lined Rio Grande/Bravo channel. The floor of the upper El Paso Valley-Valle de /Juárez includes large areas of irrigated cropland (red). Remnants of Early- to Mid-Pleistocene basin floors that are underlain by Upper SFG-ARG deposits are the dominant landform south of the river valley. The SW—NE solid black line marks the location of **Figure 7-7**, which is near Hydrogeologic Section GD’ in Hawley and others (2009, PL. 2g). The dashed black line shows the approximate position of the eastern Sierra Juárez fault zone (Zona de Fallamiento).

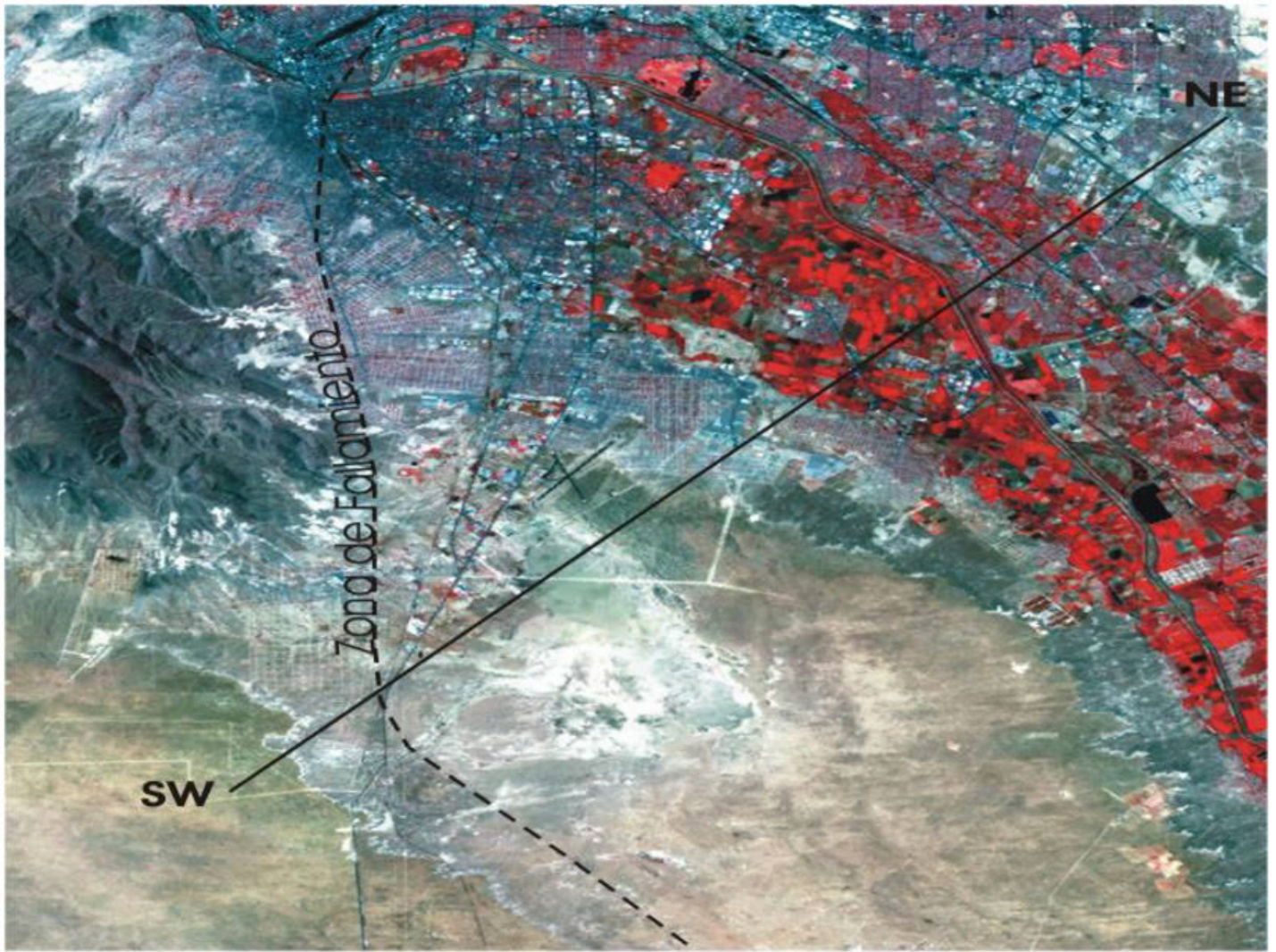


Figure 7-6. (courtesy of the Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), UACJ). Landsat-5 color-IR image (*circa* 2005) of the binational/tristate southwestern Hueco Bolson area that includes much of Ciudad Juárez and eastern El Paso in its northern part (mostly blue-gray tones).

In the Figure 7-7, section base is mean sea-level (msl) and vertical exaggeration (VE) is about 10x. The approximate potentiometric surface is shown by a blue-dashed line with triangles. Ancestral (Rio Grande/Bravo) deposits in the Upper Santa Fe Group (USF-2) form the primary source of fresh and slightly saline (<3,000 mg/L tds) GW. Underlying SFG basin fill (MSF/LSF) is not a significant GW producer due to fine-grained texture and/or induration; and water salinity is >3,000 mg/L tds. Marine Cretaceous bedrock units (Ku), which are exposed in the adjacent Sierra Juárez, fault-block uplift, are primarily composed limestone, shale and sandstone, with some gypsum (*cf.* **Tbls. 1-1, 1-2 and 4-31; and Figs. 4-4 and 4-5 [III-III']**).

7.7. Late Pleistocene GW-Flow Linkage between Lake Palomas and the Lower Mesilla Valley

Even without adequate funding support, TAAP-related hydrogeologic studies since 2006 have led to some very productive collaborations (**Part 1.5; Figs. 1-7, 1-11 to 1-13; *cf.* Granados Olivas and Monger 1999; Granados Olivas *et al.* 2001, 2006, 2009 and 2012; Hawley *et al.* 2009; Hawley and Granados Olivas 2012; Hibbs *et al.* 2015; Sweetkind 2017 and 2018; Sweetkind *et al.* 2017; Hanson *et al.* 2018; Kubicki *et al.* 2021). TAAP: Task-4 hydrogeologic investigations coordinated by the WRRI now extend far enough into Chihuahua to allow at least provisional characterization of the hydraulic linkage between pluvial-Lake Palomas and the shallow alluvial-aquifer at the lower end of the Mesilla Valley (**Figs. 1-7 and 1-10 to 1-12; *cf.* Part 1.6.2**).**

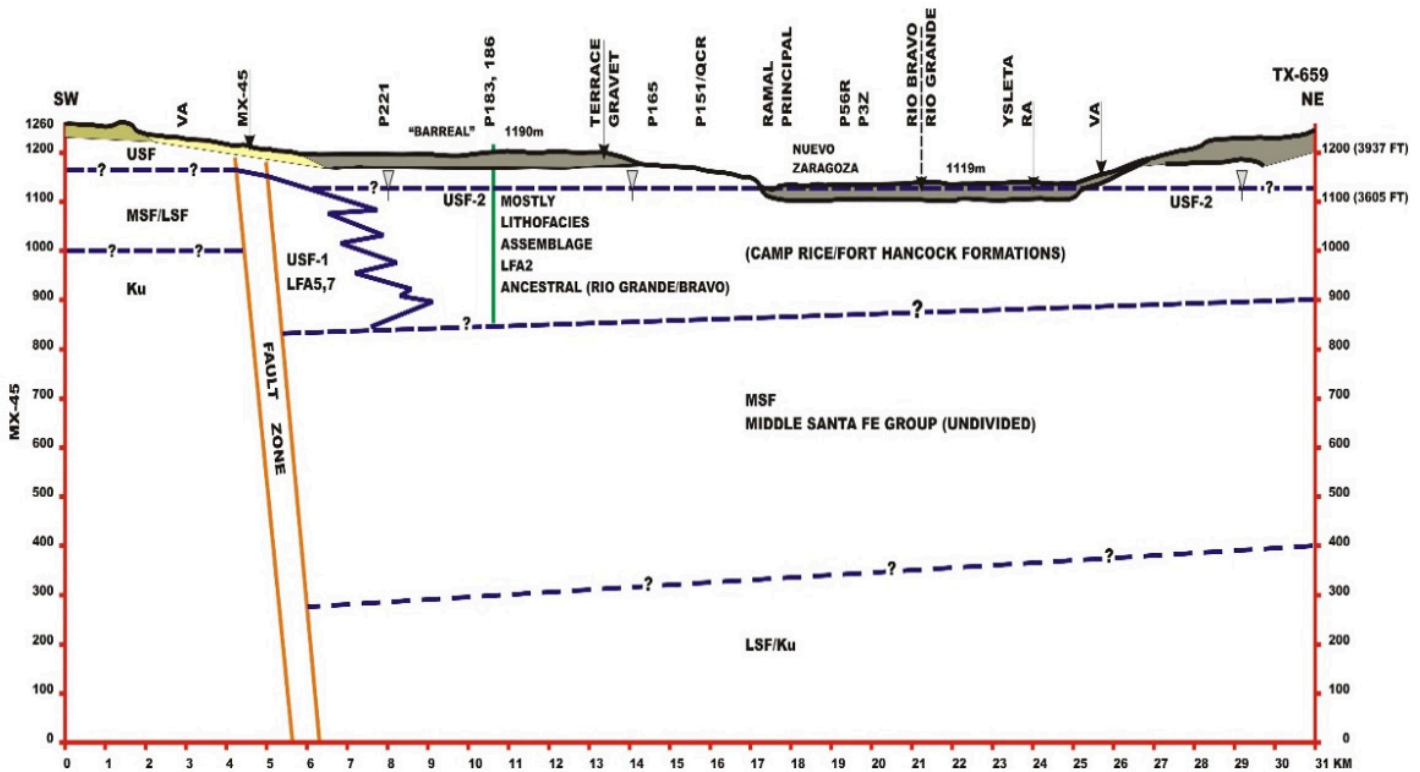


Figure 7-7. (courtesy of the Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), UACJ). Hydrogeologic cross-section of the Upper Valle de Juárez-El Paso Valley (TX), with the Rio Bravo/Rio Grande marking the International Boundary and the location of the reinforced-concrete-lined, Chamizal Treaty channel. Section location is shown with the SW—NE solid-black line on **Figure 7-6**.

Hawley and Kennedy (2004) were the first to provide hydrogeology-based evidence for a regional GW-flow system that discharged in the Lower MeV above EPdN and had its source at the northeastern edge of pluvial-Lake Palomas during its Late-Pleistocene high-stands (**Parts 1.1.2, 1.8.2 and 4.6; and Figs. 1-9, 1-10 and 1-11; cf. Castiglia and Fawcett 2006, p. 114; Hawley *et al.* 2000, p. 40; Kennedy and Hawley 2003; Witcher *et al.* 2004). According to Hawley and Kennedy (2004, p. 74-75):**

More work still must be done with respect to transboundary underflow conditions in the broad Mesilla Basin area between the bedrock uplifts formed by Sierra Juárez and Cerro de Muleros (Cristo Rey), and the East Potrillo Mountains [*cf. Figs. 1-1, 1-11, 4-4, 4-6 and 5-4, and Hawley *et al.* 2021-PLS. 5k and 5l*]. Unpublished water-level data from four 1,000-ft [300-m] test wells [drilled by the SRH in 1988] in the Mexican part of the basin shows that the pre-development (mostly pre-2000) groundwater flow in the Santa Fe Group (SFG) basin-fill is northeastward toward the Santa Teresa area (e.g., El Mirador and La Joya).

Current research on the Late Quaternary history of “pluvial Lake Palomas (Reeves 1969)” by Castiglia and Fawcett ([2006]), and Castiglia (2002) demonstrates that

the floor of Bolsón de los Muertos, and adjacent parts of the Mimbres, Casas Grandes, Santa Maria, and Fresnal basins were periodically inundated by very large and deep lakes as late as early to middle Holocene time (8,400 to 6,500 ¹⁴C yrs BP). The watershed contributing to these basin systems is about 12,650 mi². Elevations of the deep-lake stages are in the 3,940 to 3,965-ft range, or 160 to 185 ft above the “predevelopment” potentiometric surface (3,780 to 3,770 ft) in the Noria to Santa Teresa area about 30 mi to the northeast (. . . ; Wilson *et al.* 1981 [Pl. 9]). Furthermore, the floor of the Wisconsinan “Ice Age” bedrock channel of the ancestral Rio Grande at El Paso Narrows was scoured out to a depth of about 85 ft below present floodplain level (channel-base elev. of ~ 3,635 ft.). Therefore, during these Lake Palomas high stands, the northeastward gradient of (at least) the shallow part of the groundwater-flow system would have been at least 5 ft/mi [0.001], with underflow discharge to the Mesilla Valley shallow aquifer system in the Anapra, Sunland Park, [and] (lower) Santa Teresa area... (*cf. Part 4.6*)

A provisional, but still conservative estimate of the annual underflow contribution to Transboundary Aquifer Systems of the EPN-MBA during 1,210-m amsl high stands of pluvial-Lake Palomas is about 8.76

$\times 10^6 \text{ m}^3$, with high-stand intervals lasting at least 5,000 years (Hawley *et al.* 2021-Part 7.6.2). The following assumptions were used in arriving at this Darcy-equation ($Q=KIA$) based estimate:

1. A saturated thickness of about 100 m in sand-dominant ARG deposits in contiguous parts of the El Aguaje Uplift (EPU) and El Parabién GW Basin (EPD) (cf. Figs. 1-2 and 5-1 [LFA 2-3], and Fig 1-8 [HSU-USF2], and 3-5 [a10] and Tbl. 5-2).
2. A 4,000,000 m^2 cross-section area (A) of aquifer material for a 40-km contact shoreline (cf. Figs. 1-12 and 5-2 [Section S-S']).
3. An average saturated hydraulic conductivity (Khsat) of 6 m/day (21 ft/day) for sediments of primary LFA 3 composition (Fig. 5-1, Tbl. 5-2).
4. A 0.001 hydraulic gradient (I) for the GW-flow system between the eastern edge of Lake Palomas and the southern MeB, or about the same as present (Fig. 5-2-Sections K-K' and L-L').

For the at least the past 8,000 yrs., however, none of the intermittent lakes that episodically flooded parts of El Barreal-Salinas de Union plain in the Bolsón de las Muertos have reached shoreline levels that were high enough (e.g., about 1,195 m amsl) to contribute significant amounts of underflow recharge (either fresh or brackish) to the EPN-SMBR's Transboundary GW-flow system. As depicted on **Figure 1-12**, a GW-flow divide (alt. $\sim 1,210$ m) located between the El Aguaje and La Laguna well sites (near Mex. Hwy. 2) forms the present-day no-flow boundary between NE-directed underflow toward the lower Mesilla Valley and EPdN, and SW-directed underflow toward El Barreal in the northeastern Bolsón de los Muertos (**Fig. 5-2** [Section S-S']; Hawley *et al.* 2021-PL. 5s). As also shown on **Figures 1-7** and **5-3**, the respective altitudes of the predevelopment (~ 1976) water-table was 1,194 m at El Aguaje and 1,192 m at La Laguna.

By way of comparison, annual GW underflow in SFG (HSU-USF2/MSF2) basin fill beneath a section of the International Boundary between the Southern Mid-Basin High (SMBH) and the lower end of the Mesilla Valley is conservatively estimated to have been about $2.19 \times 10^6 \text{ m}^3$ prior to initial JMASCJ Well Field operation. The following assumptions were used in a provisional, Darcy-equation ($Q=KIA$) based calculation

of the annual Transboundary-underflow contribution to the shallow aquifer system of the southernmost MeV prior to 2010:

1. A 100 m saturated thickness of LFA3-dominant, HSU-USF2/MSF2 deposits that are primarily composed of ARG fluvial-deltaic facies (cf. **Figs. 3-5 [a10]** and **5-1 [LFA 2-3]**, **Fig. 1-8 [HSU-USF2]**, and **Tbl. 5-2**).
2. A 1,000,000 m^2 cross-section area (A) of aquifer material with a minimum cross-section width of 10 km (cf. **Figs. 1-3** and **5-2: Sections K-K' and L-L'**; Hawley *et al.* 2021-PL. 5k and 5l]).
3. Hydraulic conductivities (Khsats) for sediments of primary LFA 3 composition are in the 3 to 10 m/day range, with an estimated average Khsat of 6 m/day (**Figs. 5-1** and **Tbl. 5-2**).
4. A 0.001 hydraulic gradient (I) for the GW-flow system in the southernmost MeB (**Fig. 1-7**).

8 Challenges Facing and Viable Opportunities for Long-Term Development of the Shared Groundwater-Resources of The Paso Del Norte-Southern Mesilla Basin Area

8.1. Background

The residents of the EPN-SMBR (human and non-human) face two significant hydrogeologic *realities*: First, not *one drop* of “Transboundary” groundwater is aware of the fact that it lies about 100 m below 1) a 1853-1854 *virtual* geopolitical boundary and 2) a brand-new 9.14 meter steel-bollard “Wall” (**Figs. 1-12** and **6-2**); and second, except for places in or contiguous to valleys of the Rio Grande-Rio Bravo, the Santa Fe Group (SFG) aquifer system needs another glacial stage to be effectively recharged.²⁸

In the context of challenges facing and opportunities for long-term GW-resource development in the southern Mesilla Basin region, opportunities will always exist for building truly binational partnerships in addressing a variety of Transboundary water-resource

²⁸ As noted in Part 3.3, it is now possible that the 100 ka glacial/interglacial cycles of the Pleistocene Epoch have been replaced by a much-more unpredictable Global environmental regime that chronostratigraphers provisionally name the “Anthropocene” (Zalasiewicz and others, 2021, Tbl. 2; Tbls. 1-3 and 4-2).

conservation issues. This is well documented by the long history of collaborative relationships between the NM WRRI, NMSU, USGS-Water Science Centers, El Paso Water (EPW), the International Boundary and Water Commission (IBWC and CILA), the Universities of Texas at Austin and El Paso (UT and UTEP), and the Universidades Autónoma de Ciudad Juárez and México (UACJ and UNAM).

By far the most promising opportunity for water-resource *conservation* is exemplified by the substantial progress made by El Paso Water (EPW, formerly El Paso Water Utilities) in implementation of all aspects of water conservation in the El Paso metroarea of the western Hueco Bolson (**Figs. 1-3**, and **1-12**; EPW-ND). This internationally recognized endeavor is primarily the result of the vision of longtime Utilities Director, Edmund Archuleta. The program includes pioneering work in hydrogeology- and hydrochemistry-based aquifer system characterization, managed aquifer recharge (MAR) projects, municipal-wastewater reclamation, advanced desalination-technology development, management of desalination concentrate, and development of comprehensive programs of public education (e.g., Archuleta 1995, Buszka 1995, Anderholm and Heywood 2003, Heywood and Yager 2003, Granillo 2004, Sheng 2005, Hutchison 2006, Archuleta 2010).

The hydrogeologic *realities* described in this paper provide much of the baseline information that is essential for prudent, long-term management (i.e. *conservation*) of the 25 to 30 thousand hectare-meters of economically producible GW in the 300 to 3,000 mg/L tds range that is still stored in the SFG basin-fill aquifers of the southern Mesilla and northern El Parabién Basin area (between the 32°N and 31°30'N Parallels, and 106°30'W and 107°W Meridians). From the perspective of the remainder of the 21st Century much of this GW resource is stored in the most transmissive and still undeveloped parts of the Upper and Middle SFG aquifer system in the Mesilla Basin-West Mesa area between the East Potrillo Mountains, and the Lower Mesilla Valley and Sierra de Juárez (**Figs. 1-3**, **1-7**, **1-13**, **4-5** [III-III'], **5-1** to **5-3**; **Tbl. 5-2**).

The new JMASCJ well field includes parts of the southern Mesilla and northern El Parabién GW Basin (**Figs. 1-11** and **1-12**) hydrogeological conditions are ideally suited for state-of-practice desalination projects, and where de-watered spaces in partly depleted aquifer media can be refilled using best-available MAR

technology (*cf.* **Fig. 5-3**, **Part 5.2**; e.g., Archuleta 1995, EPW-ND, Hightower 2003, Sheng 2005, Hutchison 2006, Archuleta 2010, NGWA 2014, Hibbs *et al.* 2015, Gude 2016, Davis 2000e, Erlitzki and Craver 2020, Wolf *et al.* 2020). As in all too many parts of the American Southwest and Mexico, however, the JMASCJ wells were designed primarily to meet short-term needs for high GW production, and not for prudent long-term GW-resource management.

With respect to design of advanced systems of storm-water/wastewater management and aquifer recharge, work was already well underway in El Paso in the 1980s (e.g., Garza *et al.* 1980, Knorr and Cliett 1985, Knorr 1988). These early investigations have proved to be very important, because hydrogeologic conditions beneath much of the El Paso/Ciudad Juárez metroplex are ideal for a large-scale MAR projects, and there are no binational “Convention” or interstate “Compact” constraints on project implementation (**Parts 6.4** to **6.8**). Effective mechanisms for storm-water management and MAR projects, however, have yet to be developed for most of the 150 km² Ciudad Juárez urban/suburban watershed (**Part 7.6**).

8.2. Challenges and Opportunities

8.2.1. CHALLENGES

Challenges facing implementation of groundwater-resource conservation activities of an environmental and political-institutional nature will always exist in the EPN-SMBR, particularly in light of the region’s geographical setting and complex socio-political history (**Parts 6.1** to **6.4**). Circumstances contributing to uncertainty in predictions of GW-resource availability include:

1. A geomorphic setting in a Chihuahuan Desert ecoregion where the limited water resources are subject to ever-increasing anthropogenic and climatic stresses.
2. Unique impediments associated with 20th Century binational/tristate issues of a geopolitical and socio-economic nature.
3. Current lack of realistic assessments of the time and enormous-costs requirements for the subsurface investigations that must be completed prior to any implementation of large-scale GW-conservation measures that involve a) desalination of brackish water, b) desal-concentrate management, and c) “managed aquifer recharge (MAR).”

Of immediate concern in the EPN-SMBR is the rapid expansion of groundwater pumping related to 1) development the JMASCJ well field, and ever-expanding M&I activity in the binational San Jerónimo-Santa Teresa (maquiladora) area since 2007 (**Fig. 1-12**; *cf.* Pacheco 2017a-b, 2018a-b, 2019a-b; Villagran 2017a-c; Hamway 2020a and b; Pacheco 2021; Robinson-Avila 2020a-c). A significant component of the regional groundwater-flow system that discharged for millennia to the lower Mesilla Valley reach of the Rio Grande is now being intercepted by such binational M&I development of the aquifer-system.

From a hydrogeologic-framework perspective, intensive GW development (i.e. mining) is not sustainable on a multi-generational Human-time scale in any part of the southern Mesilla Basin Region west of the Mesilla Valley and El Paso del Norte. The very large estimates of fresh to moderately brackish (<5,000 mg/L tds) water in storage in the SFG aquifers of the south-central MeB suggests that one serious geotechnical problem that can occur relates to GW pumping effects on aquifer-framework properties, especially where there is some potential for land subsidence and earth-fissure formation:

Land subsidence is a gradual settling or sudden sinking of the Earth's surface due to subsurface movement of soil or rocks...

Although subsidence can and does occur on geologic time scales as a result of natural forces, in this chapter we confine our discussion to subsidence that happens on a human time scale due to human actions...

The most serious and widespread type of land subsidence is that which occurs in response to the mining of groundwater and resultant compaction of aquifers... Fluid withdrawal causes [hydraulic] head to decrease that in turn causes effective stress to increase. The response of a compressible porous medium to increases in effective stress is compaction (Deming 2002, p. 240 [*cf.* Part 2.3]).

Evaluating the potential impacts of long-term pumping effects on framework properties of partly consolidated basin-fill aquifers (such as in the southern MBR) involves recognition that the operation of groups of deeply penetrating, high-capacity wells could result in significant amounts of aquifer-media compaction/consolidation (*cf.* Helm 1982, 1984a-b, 1994, Sheng and Helm 1994, Haneberg 1995, West 1996; Carpenter 1999, Burbey and Helm 1999, Galloway *et al.* 1999; Sheng *et al.* 2003; Bell *et al.* 2008). While land-subsidence and earth-fissure phenomena associated with GW-pumping have yet to be reported in any part of the WRRRI Study Area, their future appearance in

parts of the Mesilla and Southern Jornada GW Basins that have experienced large potentiometric-surface declines is possible.

One property of the SFG basin-fill aquifer system that mitigates against significant aquifer-media compaction in the Mesilla Basin-West Mesa area north of the International Boundary is their degree of overconsolidation. The latter condition is primarily due to progressive water-table drawdown associated with Mid- to Late-Pleistocene Mesilla Valley incision (**Part 4.6**). While site-specific studies have yet to be done in the Mesilla GW Basin, initial work completed in a very similar hydrogeologic setting in the Albuquerque Basin indicates that major geotechnical problems related to aquifer-media compaction can be avoided by 1) use of hydrogeology-based criteria in well design and construction, and 2) prudent long-term well-field operation (Haneberg 1995).

Two other major challenges exist, one of which well recognized and currently being faced, and the other may take generations to be accepted as a reality. The first involves contamination of irreplaceable GW resources by ongoing irrigation-agriculture, feedlot, and municipal and industrial (M&I) activity (e.g., Teclaff 1982, Malagamba 1990, Creel *et al.* 1998, Macias-Coral *et al.* 2006, Mumme 2010, Walker *et al.* 2015, Suthersan *et al.* 2016, USEPA 2015 and 2019, Alley and Alley 2020, Hawley *et al.* 2021-**APNDX. E5.2.2**). The second involves accepting the “realities” of Global climate change in a Chihuahuan Desert ecoregion where annual GW consumption greatly exceeds annual aquifer recharge (**Part 2.5**).

8.3. Opportunities

Many more opportunities clearly remain for long-term GW-resource development, all of which must be based on a combination of hydrogeologic and geopolitical *reality*. As noted in **Part 5.2**, favorable sites for both BGW production and MAR operations are located in the southern part of MeB that is west of the MeV and northwest of the Sierra Juárez Uplift (**Fig. 5-3**: Sections I-I' to L-L' and S-S' [**Fig. 1-2**]). MAR operations have already been successfully implemented in the very similar hydrogeologic setting of the EPW's Hueco Bolson well field (*cf.* Garza *et al.* 1980, Knorr and Cliett 1985, Knorr 1988, Buszka *et al.* 1994, Sheng 2005, EPW-ND). Positive hydrogeology-related factors include:

1. The fluvial origin, sedimentary composition, and great thickness of the RG-rift basin-SFG aquifer media (Parts 4 and 5).
 2. Large quantities of fresh to moderately brackish (<5,000 mg/L tds) water stored in SFG basin-fill aquifers (Part 7).
 3. Many available locations that are ideally suited for siting facilities for reverse-osmosis (RO) membrane desalination treatment of brackish groundwater (BGW). Treatment-facility scale ranges from relatively small unit operations to the large Kay Bailey Hutchison desalination plant in the western Hueco Bolson.
 4. Optimum locations for concentrate-management operations, including Chihuahuan Desert basin sites on both sides of the International Boundary where treatment methods other than permanent disposal are feasible (Hawley et al. 2021, CHPTS. 3, 5 and 6).
 5. Optimum locations for managed aquifer recharge (MAR), with water sources that include very large quantities of treated M&I wastewater (Hawley et al. 2021, CHPTS. 3, 6 and 8).
 6. Facilities for natural-gas fueled electricity generation are already available; and the potential for future solar-energy development in this Chihuahuan Desert terrain is unlimited (Robinson-Avila 2020a-c).
- In conclusion, opportunities will always exist for building truly effective binational partnerships in addressing a variety of Transboundary water-resource *conservation* issues in the EPN-SMBR (Granados Olivas and Kretzschmar 2010, Granados Olivas 2010, Kocherga 2018). This positive prognosis is well documented by the long history of constructive multi-institutional interdisciplinary collaborations (**Tbl. 7-2, Figs. 8-1 and 8-2**



Figure 8-1. Dr. Bobby J. Creel (R), with Dr. Alfredo Granados-Olivas (C), and NM WRRI GIS Coordinator Marquita Ortiz at a February 21, 2005 progress review of Transboundary aquifer-system mapping. UACJ Department of Civil and Environmental Engineering GIS Laboratory (Hawley Geomatters photo).

“Border Lines” by Alberto Álvarez Rios ©2003

A weight carried by two weighs only half as much.

The world on a map looks like the drawing of a cow
In a butcher’s shop, all those lines showing where to cut.

That drawing of the cow is also a jigsaw puzzle,
Showing just as much how very well all the strange parts fit
together.

Which way we look at the drawing makes all the difference.

We seem to live in a world of maps.

Let us turn the map until we see clearly:

The border is what joins us, not what separates us.



Figure 8-2. Group photograph after talk by John Hawley on “Hydrogeologic-Framework Controls on Transboundary Groundwater Flow in the Mesilla Basin Region” at the April 10-11, 2019 “Binational Summit on Groundwater at the U.S-Mexico Border,” El Paso Water Tech₂O Center. From left to right: Bill Cunningham-Director of the USGS Water Mission-Earth System Process Division; Sam Fernald-Director of the NM Water Resources Research Institute; Gilbert Anaya-Chief of the Environmental Management Division, International Boundary and Water Commission (IBWC); Roberto Fernando Salmón Castelo-IBWC Mexican Section Commissioner; Jayne Harkins-IBWC United States Section Commissioner; and John Hawley. The PPT-slide on screen shows “bottom-of-the-aquifer” hydrogeologic conditions in the binational Mesilla Basin area (**Fig. 5-3**). Photo courtesy of Swanson Geoscience, LLC (4/10/2019).

Cited References (with APPENDIX B alphanumeric topical-entry codes-p. 154)

- Ackerly, N.W., 1999, The evolution of the Rio Grande, in Ortega Klett, C.T., ed., Proceedings of the 43rd Annual New Mexico Water Conference: Water Challenges on the Lower Rio Grande. New Mexico Water Resources Research Institute, Report No.310, p. 26-32. This is an excellent introduction to the historical record. (B2, B3)
- Ackerly, N.W., 2000, Paleohydrology of the Rio Grande, in Ortega Klett, C.T., ed., Proceedings of the 44th Annual New Mexico Water Conference: The Rio Grande Compact: It's the law! New Mexico Water Resources Research Institute, Report No.312, p. 113-123. (B2, B3)
- Adams, D.C., and Keller, G.R., 1994, Crustal structure and basin geometry in south-central New Mexico, in Keller, G.R., and Cather, S.M., eds., Basins of the Rio Grande rift: Structure, stratigraphy and tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 291, p. 241-255. (C2b, C4)
- Adorno, Rolena, and Pautz, Patrick C., editors and translators, 1999, Álvar Núñez Cabeza de Vaca, "Relation" of 1542," in Álvar Núñez Cabeza de Vaca: His Account, His Life, and the Expedition of Pánfilo de Narváez: Lincoln, University of Nebraska Press, 212 p. ISBN 13: 9780803264168 (B3)
- Allen, B.D., 2005, Ice Age lakes in New Mexico, in Lucas, S.G., Morgan, G.A., and Zeigler, K.E., eds., New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 18, 107-114. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (C1, I1, I2)
- Allen, B.D., Love, D.W., and Myers, R.G., 2009, Evidence for late Pleistocene hydrologic and climatic change from Lake Otero, Tularosa Basin, south-central New Mexico: New Mexico Geology, v. 31, no. 1, p. 9-25. <http://geoinfo.nmt.edu/publications/periodicals/nmg/31/n1/allen.pdf> (C1, I1, I2)
- Allen, J.R.L., 1965, A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments: Sedimentology (Special Issue), v. 5, No. 2, p. 91-191. (D1)
- Alley, W.M., ed., 2013, Five-year interim report of the United States – Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program: 2007–2012: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1059, 31 p. (A2, D1, F1)
- Alley, W.M., and Alley, R., 2017, High and Dry – Meeting the challenges of the world's dependence on groundwater: New Haven, CT, Yale University Press, 304 p., ISBN 978-0-300-22038-4 (A2, D1)
- Alley, W.M., and Alley, R., 2020, The war on the EPA – America's endangered environmental projections: Lanham, MD, Rowman & Littlefield, 287 p., ISBN 978-1-5381-3151-3. See Chapters 9 and 10: "Toxic Chemicals" and "The Forever Chemicals." (A2, D1, E2c)
- Alley, W.M., and Leake, S.A., 2004, The journey from safe yield to sustainability: Ground Water, v. 42, no. 1, p. 12–16. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x>. (A2, D1)
- Alley, W.M., Reilly, T.M., and Franke, O.L., 1999, Sustainability of ground-water resources: U.S. Geological Survey Circular 1186, 79 p. (A2, D1)
- Almada, Francisco R., 1968, Diccionario de historia, geografía, y biografía Chihuahuenses (2nd ed.): Chihuahua, México, Universidad de Chihuahua, 378 p. (A1, A2, B3, C, F3)
- Anderholm, S.K., 2000, Mountain-front recharge along the eastern side of the Middle Rio Grande basin, central New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4010, 36 p. (D2)
- Anderholm, S.K., and Heywood, C.E., 2003, Chemistry and age of ground water in the southwestern Hueco Bolson, New Mexico and Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4237, 16 p. (F2, H2)
- Araurjo-Mendieta, J. and Casar-González, 1987, Estratigrafía y sedimentología del Jurásico Superior en la cuenca de Chihuahua, norte de México: Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, v.19, no. 1, p. 6-29. (C2a, F3)
- Archuleta, E.G., 1995, Effective water planning for the Las Cruces/El Paso/Juarez area, in Ortega-Klett, C. T., ed., Proceedings of the 39th Annual New Mexico Water Conference, N.M. Water Resource Research Institute Report 290, p. 245-259. <http://wrii.nmsu.edu/pub/> (E2, F1)
- Archuleta, E.G., 2010, How cooperative planning and technology have led to successful water management in the Paso del Norte region: Journal of Transboundary Water Resources, v. 1, p. 11-30. www.wrii.nmsu.edu (E2, F1)
- Armour, J., Fawcett, P.J., and Geissman, J.W., 2002, 15 k.y. paleoclimatic and glacial record from Northern New Mexico: Geology, v. 30, no. 8, p. 723-726. (C1)
- Associated Press, 2019, Report raises alarms over Arizona's water supply: Albuquerque Journal-NATION, Sunday, October 27, 2019, p. A4. (A3)
- Attanasio, C., and Galvan, A., 2019, Work on more border wall starts on 46-mile stretch west of Santa Teresa and Arizona – Funds come through Trump executive order: Albuquerque Journal-METRO & NEW MEXICO, Sunday, August 25, 2019, p. A11. (A3)
- Averill, M.G., and Miller, K.C., 2013, Upper crustal structure of the southern Rio Grande rift: A composite record of rift and pre-rift tectonics, in Hudson, M.R., and Grauch, V.J.S., eds., New Perspectives on Rio Grande Rift Basins: From Tectonics to Groundwater: Geological Society of America Special Paper 494, p. 463-474. doi: 10.1130/2013.2494(17) (C2b, C4, F1)

- Bailey, L. R., ed., 1963, *The A. B. Gray report; survey of a route on the 32nd Parallel for the Texas Western Railroad, 1854; and including the reminiscences of Peter R. Brady who accompanied the expedition* (p. 169-227) – with Introduction and Notes by L.R. Bailey (xi-xix): Los Angeles, Westernlore Press, 240 p. See comments on EPdN reach on p. 35, 42-43, 50-60, 137,153-155, 184-185. (B3)
- Baker, W.W., 1943, Final report on the construction of the canalization feature of the Rio Grande Canalization Project: International Boundary Commission (IBC), p. 4, 16, 18, 32. See Glover 2018. (B3, E2)
- Banerjee, S., Cook, J., and Truett, S., 2018, The border wall endangers the future of humanity and nature: *Albuquerque Journal*, OP-ED Section, Sunday, August 19, 2018, p. A13. (A3)
- Barry, R.G., 1983, Late Pleistocene climatology, in Porter, S. C., ed., *Late Quaternary environments of the United States*, volume 1, *The Late Pleistocene*: Minneapolis, University of Minnesota Press, p. 390-407. (C1)
- Barry, T., Browne, H., and Sims, B., 1994, *The great divide: The challenge of U.S.-Mexico Relations in the 1990s*: New York, Grove Press, 452 p. ISBN 0-8021-1559-4. (B3, E3)
- Bartlett, J.R., 1854, *Personal narrative of expeditions and incidents in Texas, New Mexico, California, Sonora, and Chihuahua, connected with the United States and Mexican Boundary Commission during the years 1850—1853*: New York, D. Appleton and Company, 2 vols., 1130 p. [1965 reprint, Glorieta, NM, Rio Grande Press]. (B3)
- Bedinger, M.S., Sargent, K.A., and Langer, W.H., eds., 1989, *Studies of geology and hydrology in the Basin and Range province, southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste – Characterization of the Rio Grande region, New Mexico and Texas*: U.S. Geological Survey Professional Paper 1370-C. 42 p. (F2, H3)
- Bell, J.J., 1963, *Geology of the foothills of Sierra de los Pinos, northern Chihuahua, near Indian Hot Springs, Hudspeth County, Texas*: University of Texas at Austin, master's thesis, 83 p. (C2a)
- Bell, J.W., Amelung, F., Ramelli, A.R., and Blewitt, G., 2008, Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge: *Water Resources Research*, v. 44, W02427. Doi:10.1029/2007WR006152. (D1)
- Bennett, K.E., Talsma, C. and Boero, R., 2021, Concurrent Changes in Extreme Hydroclimate Events in the Colorado River Basin: *Water*, v. 13, no. 7, p. 978. DOI: 10.3390/w13070978. <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/04/210408112332.htm> (C1)
- Berg, E.L., 1969, *Geology of Sierra de Samalayuca, Chihuahua, Mexico*: New Mexico Geological Society Guidebook 20, p. 176-182. (C2a)
- Betancourt, J. L., Van Devender, T. R. and Martin, P. S., eds., 1990, *Packrat Middens: The last 40,000 years of biotic change*: Tucson, The University of Arizona Press, 467 p. (B1, C1)
- Birch, F., 1982, Gravity models of the Albuquerque Basin: Rio Grande Basin, New Mexico: *Geophysics*, v. 47, p. 1185-1197. (C4)
- Bixby, K., and Smith, D., 2020, Ongoing border wall construction has risks: *Albuquerque Journal*, OP-ED Section, Sunday, April 5, 2020, p. A11. (A3)
- Blásquez, L., 1959, *Hidrogeológica de las regiones desérticas de México*: Universidad Nacional Autónoma de México, *Anales del Instituto de Geología*, Tomo XV, 172 p. (F3)
- Brand, D. C., 1938, *The natural landscape of northwestern Chihuahua*: Albuquerque, University of New Mexico Press, 74 p. (B2, C, C1, C2a, F3)
- Brannen, Peter, 2021, The dark secrets of the Earth's deep past—The geologic record suggests that climate models are missing something truly frightening: *The Atlantic*, v. 327, no. 2, p. 60-75. (B1, C1)
- Bryan, K., 1938, *Geology and groundwater conditions of the Rio Grande depression in Colorado and New Mexico*; in [U.S.] National Resources Committee, *Regional Planning part VI—The Rio Grande joint investigations in the upper Rio Grande basin in Colorado, New Mexico, and Texas, 1936-1937*: U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., v. 1, part 2, p. 197-225. (D1, G2, I3)
- Bryan, S.M. (Associated Press), 2020, *Climatologist: Dry Areas in Southwest getting dryer—Precipitation declines as temperatures rise*: *Albuquerque Journal-METRO & NEW MEXICO*, Sunday, September 27, 2020, p. A12, A13. (A3)
- Bryan, S.M. (Associated Press), 2021, *Climatologist: Dry snow brings little relief to West—Wind, low water content diminish benefits of recent winter storms*: *Albuquerque Journal*, Tuesday, February 23, 2021, p. A1, A2. (A3)
- Buffington, L.C. and Herbel, C.H., 1965, *Vegetation changes on a semidesert grassland range*: *Ecological Monographs*, v. 35, p. 139-164. (C1)
- Bull, W.B., 1977, *The alluvial fan environment*: *Progress in Physical Geography*, v. 1, p. 222-270. (D1)
- Bulloch, H. F., Jr., and Neher, R. E., 1980, *Soil Survey of Doña Ana County area, New Mexico*: U. S. Soil Conservation Service, 177 p. (C3)
- Burbey, T.J., and Helm, D.C., 1999, *Modeling three-dimensional deformation in response to pumping of unconsolidated aquifers*: *Environmental & Engineering Geoscience*, v. 5, p. 199-212. (D1)
- Burrows, R.H., 1909, *Geology of northern Mexico*: Mining and Scientific Press, v. 99, no. 9 (whole no. 2562, 28 Aug.), p. 290-294; continued as “Geology of

- northeastern Mexico," in v. 99, no. 10 (4 Sept.), p. 324-327. (C2a, F3, G1)
- Buszka, P.M., Brock, R.D., and Hooper, R.P., 1994, Hydrogeology and selected water-quality aspects of the Hueco Bolson aquifer at the Hueco Bolson Recharge Project area, El Paso, Texas: U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 94-4092, 41 p. (E2b, F2)
- Campos-Enriquez, J.O., Ortega-Ramírez, J., Alariste-Vilchis, D., Cruz-Gática, R., and Cabral-Cano, E., 1999, Relationship between extensional tectonic style and paleoclimatic elements at Laguna El Fresnal, Chihuahua Desert, Mexico: *Geomorphology*, v. 28, p. 75-94. (C1, C2b, F3, I2)
- Cantú-Chapa C.M., Sandoval-Silva, R., and Arenas-Partida, R., 1985, Evolución sedimentaria del Cretácico Inferior en el norte de México; *Revista Instituto Mexicano del Petróleo*, v. 17, no. 2, p. 14-37. (C2a, F3)
- Carciumaru, D.D., 2005, Structural geology and tectonics of the northern Chihuahua trough: University of Texas at El Paso, doctoral dissertation, 99 p. (C2b)
- Carpenter, M.C., 1999, South-Central Arizona – Earth fissures and subsidence complicate development of desert water resources, in D. Galloway., D.R. Jones, and S.E. Ingebritzen, eds., *Land subsidence in the United States: U.S. Geological Survey Circular 1182*, p. 65-78. (D1)
- Castiglia, P.J., 2002, Late Quaternary climate history of the pluvial Lake Palomas system, Chihuahua, Mexico [M.S. Thesis]: Albuquerque, The University of New Mexico, 161 p. (I2)
- Castiglia, P.J., and Fawcett, P.J., 2006, Large Holocene lakes and climate change in the Chihuahuan Desert: *Geology*, v. 34, no. 2, p. 113-116. Seminal paper; but they still do not recognize the major contribution of Mimbres Basin/River system to pluvial Lake Palomas. (B2, C1, F3, I2)
- Castillo, R.C., Cortes, A., Morales, P., Romero, G., and Villegas, R., 1984, A survey of groundwater flow using deuterium and oxygen-18 as tracers, in Samalayuca Dunes Northern Mexico: *Revista Mexicanos de Física*, v. 30, no. 4. (F3, H2, H3)
- Chapin, C.E. and Seager, W.R., 1975, Evolution of the Rio Grande rift in the Socorro and Las Cruces areas: *New Mexico Geological Society, Guidebook 26*, p. 297-321. (C2a, I3)
- Chavarría, S.B., and Gutzler, D.S., 2018, Observed changes in climate and streamflow in the upper Rio Grande basin: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 54, no. 3, p. 644-659. (C1)
- Chávez, Octavio E., 2000, Mining of Internationally Shared Aquifers: The El Paso-Juarez Case, *Natural Resources Journal*, v. 40, issue 2 (The La Paz Symposium on Transboundary Groundwater Management on the U.S. - Mexico Border, p. 237-260. <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol40/iss2/5> (E2, E3)
- Chávez, R., 1986, Stratigraphy and structural geology of the Sierra de Sapello, northern Chihuahua, Mexico; University of Texas at El Paso, master's thesis, 167 p. (C2a)
- Clark, R.E., 1978, Institutional Alternatives for Managing Groundwater Resources: Notes for a Proposal, *Natural Resource Journal*, v. 18, no. 1 (Symposium on U.S.-Mexican Transboundary Resources, Part II), p. 153-161. Available at: <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol18/iss1/13> (E2, E3)
- Clemons, R.E., 1993, Petrographic analysis of Cenozoic-Mesozoic-Permian well cuttings from two exploration wells in south-central New Mexico: *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 203*, 28 p. (C2b, H1)
- Clendenen, C.C., 1961, *The United States and Poncho Villa: A study in unconventional diplomacy: American Historical Association, Ithaca, NY, Cornell University Press, Literary Licensing, LLC paperback, 363 p. ISBN-13:978-0944383391* (B3)
- Cliett, T., 1969, Groundwater occurrence of the El Paso area and its related geology: *New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 209-214. (F2, H1)
- Cliett, T. and Hawley, J. W., 1996, General geology and groundwater occurrence of the El Paso area, in Ortega-Klett, C. T., ed., *Proceedings of the 40th Annual New Mexico Water Conference, New Mexico Water Resource Research Institute Report 297*, p. 51-56. (F2, H1, H2)
- Collins, E. W. and Raney, J. A., 1991, Tertiary and Quaternary structure and paleotectonics of the Hueco Basin, Trans-Pecos Texas and Chihuahua, Mexico: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, *Geological Circular GC 91-2*, 44 p. (C2b, F1)
- Collins, E.W., and Raney, J.A., 1994a, Impact of late Cenozoic extension on Laramide overthrust belt and Diablo platform margins, northwestern Trans-Pecos Texas: *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Bulletin 150*, p. 71-81. (C2b, F1)
- Collins, E.W., and Raney, J.A., 1994b, Tertiary and Quaternary tectonics of the Hueco Bolson, Trans-Pecos Texas and Chihuahua, Mexico, in Keller, G.R., and Cather, S.M., eds., *Basins of the Rio Grande Rift—structure, stratigraphy, and tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 291*, p. 265-282. (C2b, F1)
- Collins, E.W. and Raney, J.A., 2000, Geologic map of west Hueco Bolson, El Paso region, Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, *Miscellaneous Map No. 40, scale 1:100,000*. (C2b, F1)

- Connell, S.D., 2008, Refinements in the stratigraphic nomenclature of the Santa Fe Group, northwestern Albuquerque Basin, New Mexico: *New Mexico Geology*, v. 30, no. 1, p. 14-35. (D1)
- Connell, S.D., Hawley, J.W., and Love, D.W., 2005, Late Cenozoic drainage development in the southeastern Basin and Range of New Mexico, southeasternmost Arizona and western Texas, in Lucas, S. G., Morgan, G., and Zeigler, K.E., eds., 2005, *New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin No. 28*, p. 125-150. (C2b, I1, I3)
- Conover, C.S., 1954, Ground-water conditions in the Rincon and Mesilla Valleys and adjacent areas in New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1230, 200 p., access at <https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1230>. (F2, G2)
- Cordell, L., 1976, Aeromagnetic and gravity studies of the Rio Grande graben in New Mexico between Belen and Pilar: *New Mexico Geological Society, Special Publication 6*, p. 62-70. (C4)
- Cordell, L., 1978, Regional geophysical setting of the Rio Grande rift: *Geological Society of America Bulletin* 89, p. 1073-1090. (C4)
- Córdoba, D.A., 1969a, Hoja Ciudad Juárez 13 R-a (3) con Resumen de la Geología de la Hoja Ciudad Juárez de Chihuahua: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Geología, Carta Geología de México, Serie de 1:100,000. Reprinted as back-cover insert in Córdoba and others, 1969. (C2a, F3)
- Córdoba, D.A., 1969b, Mesozoic stratigraphy of northeastern Chihuahua, Mexico: *New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 91-101. (C2a, F3)
- Córdoba, D.A., Wengerd, S.A., and Shomaker, J.W. (eds.), 1969, *Guidebook of the Border Region: New Mexico Geological Society Guidebook 20*, 218 p. See Road Log Section, p. 1-38. (C2a, F3)
- Córdoba, D.A., Rodríguez-Torres, R., and Guerrero-García, J., 1970, Mesozoic stratigraphy of the northern portion of the Chihuahua Trough, in *The Geologic Framework of the Chihuahua Tectonic Belt; Symposium in honor of Professor Ronald K. DeFord: West Texas Geological Society and The University of Texas at Austin*, p. 83-97. (C2a, F3)
- Creel, B.J., 2010, Research needs in the U.S. portion of the Rio Grande watershed: *Journal of Transboundary Water Resources*, v. 1, p. 31-41. www.wrri.nmsu.edu (C1, E2, E3)
- Creel, B.J., Hawley, J.W., Kennedy, J.F., and Granados-Olivas, A., 2006, Groundwater resources of the New Mexico-Texas-Chihuahua border region, in Anderson, K.S.J., ed., *Science on the Border: New Mexico Journal of Science*, v. 44, p. 11-29. (F1, H1)
- Creel, B.J., Sammis, T.W., Kennedy, J.F., Sitze, D.O., Asare, D., Monger, H.C., and Samani, Z., 1998, Ground-water aquifer sensitivity assessment and management practices evaluation for pesticides in the Mesilla Valley: *New Mexico Water Resources Research Institute Technical Completion Report 305*, 50 p., access at <https://nmwrri.nmsu.edu/tr305/>. (E2c, H2)
- Culbertson, Myles C., 2018, Remembering Charlie Crowder, who worked to build a bi-national border industrial complex: *NMPolitics.net*, 4 p. Remembering Charlie Crowder, who worked to build a bi-national border industrial complex | *NMPolitics.net* (A2)
- Cutts, James Madison, 1847, *The conquest of New Mexico and California, by the forces of the United States, in the years 1846 & 1847: Philadelphia, Carey & Hart*, 264 p. [1965 facsimile reprint, with foreword by George P. Hammond; Albuquerque, Horn & Wallace, Publishers]. (B3)
- Daggett, P. H., and Keller, G. R., 1987, Complete Bouguer anomaly map of east half of Las Cruces and northeast El Paso 1° x 2° sheets, Sheet 3, in Seager, W. R., and others, *Geology of east half of Las Cruces and northeast El Paso 1° x 2° sheets*, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, *Geologic Map 57*, scale 1:125,000. (C4)
- Daggett, P. H., and Keller, G. R., 1995, Complete Bouguer anomaly map of southwest quarter of Las Cruces and El Paso 1° x 2° sheets, Sheet 3, in Seager, W. R., *Geology of the southwest quarter of the Las Cruces and northwest El Paso 1° x 2° sheets: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Geologic Map 60*, scale 1:125,000. (C4)
- Daggett, P. H., Keller, G. R., Morgan, P. and Wen, C. L., 1986, Structure of the southern Rio Grande rift from gravity interpretation: *Journal of Geophysical Research*, v. 91, n. B6, p. 6157-6167. (C4)
- Dailey, D., 2021, Paso del Norte in 1817: From the Report of Father Juan Rafael Rascón: *Southern New Mexico Historical Review*, Volume XXVIII (January 2021), p. 1-9. <http://www.donaanacountyhistsoc.org> (B3)
- D'Ammassa, A. (Las Cruces Sun-News), 2021, Herrell calls for wall to be finished – New Mexico congresswoman leads delegation of Republican lawmakers to the border: *Albuquerque Journal*, Monday, April 14, 2021, p. A1, A2. (A3)
- Darling, B.K., Hibbs, B.J., and Sharp, J.M., 2017, Integrations of carbon-14 and Oxygen-18 as a basis for differentiating between Late Pleistocene and post-Pleistocene groundwater ages along flow paths of two West Texas bolson aquifers: *Geological Society of America 129th Annual Meeting, Abstracts with Programs*, v. 49, no. 7. ISSN 0016-7592 (H2, H3)
- Darton, N. H., 1899, Preliminary report on the geology and water resources of Nebraska west of the 103rd Meridian: U.S. Geological Survey 19th Annual Report, part 4, p. 719-785, plates 74-118. [Ogallala unit named] (D1)

- Darton, N. H., 1905, Preliminary report on the geology and underground water resources of the central Great Plains: U.S. Geological Survey Professional Paper 32, 433 p. [Ogallala unit defined] (D1)
- Darton, N.H., 1916, Geology and underground water of Luna County, New Mexico: U.S. Geological Survey Bulletin 618, 188 p. (D1, G1)
- Darton, N. H., 1928a, Geologic map of New Mexico: U.S. Geological Survey, scale 1:500,000. (C2a, F2)
- Darton, N. H., 1928b, Red beds and associated formations within New Mexico with outline of the geology of the state: U.S. Geological Survey, Bulletin 794, 356 p. (C2a, F2, G1)
- Darton, N.H., 1933, Guidebook of the western United States, Part F, The Southern Pacific Lines, New Orleans to Los Angeles. U.S. Geological Survey Bulletin 845. 304 p., 29 route maps. [West TX, and Southern NM and AZ: p. 120-160]. (B3, C2a, F2, G1)
- Davidson, S.K., Hartley, A.J., Weissmann, G.S., Nichols, G.J., and Scuderi, L.A., 2013, Geomorphic elements on modern distributive fluvial systems: *Geomorphology*, v. 180-181, p. 82-85. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.008> (D1)
- Davidson, T.T., 1998, Groundwater recharge: The legal realities of keeping the hydrologic system whole, in Herrera, E., Bahr, T.G., Ortega Klett, C.T., and Creel, B.J., eds., *Water resources issues in New Mexico: New Mexico Journal of Science*, v. 38. p. 35-53. (E2b, E3)
- Davis, T., 2019, Report: NM water stress level extremely high: *Albuquerque Journal*, Monday, August 12, 2019. https://www.abqjournal.com/1357776/report-nm-water-stress-level-extremely-high.html?utm_source (A3)
- Davis, T., 2020a, Texas, Colorado give NM the OK to use stored water – Permission for emergency use by the state last granted in the 1950s: *Albuquerque Journal*, Saturday, July 18, 2020, p. A1, A4. (A3)
- Davis, T., 2020b, Agencies look to acquire more water for minnow – Interstate Stream Commission OKs \$100K for potential lease: *Albuquerque Journal*, Friday, July 24, 2020, p. B1. (A3)
- Davis, T., 2020c, Emergency water release a short-term solution – Rio Grande in ABQ would have been dry by now, while northern NM in dire straits: *Albuquerque Journal*, Saturday, August 8, 2020, p. A8, A9. (A3)
- Davis, T., 2020d, With river on life support, water debt looms: *Albuquerque Journal*, Friday, August 14, 2020, p. A7, A8. (A3)
- Davis, T., 2020e, Cuba [NM] counts on new facility to treat its brackish water – Technology converts extracted minerals to fertilizer: *Albuquerque Journal*, Monday, August 31, 2020, p. A1, A2. (A3)
- Davis, T., 2020f, Tracking every last drop – New technology aims to get better water data to farmers: *Albuquerque Journal*, Saturday, October 10, 2020, p. A10. (A3)
- Davis, T., 2020g, Dry as a bone – 2021 to be a critically low water supply year: *Albuquerque Journal*, Saturday, November 12, 2020, p. A5. (A3)
- Davis, T., 2020h, Rio Grande Compact states jiggle duties – Nearly all of New Mexico is experiencing severe drought: *Albuquerque Journal*, Saturday, November 13, 2020, p. A8. (A3)
- Davis, T., 2020i, Deep drought persists in New Mexico: *Albuquerque Journal*, Saturday, December 19, 2020, p. A5-A6. (A3)
- Davis, T., 2021a, NM will pay farmers to stop groundwater use – Plan hopes to understand how aquifer system reacts to scenarios: *Albuquerque Journal*, Saturday, January 2, 2021, p. A1, A5. (A3)
- Davis, Theresa, 2021b, Drought-stricken NM getting little help from winter storms – Snowpack below average across state; northern mountains fare slightly better: *Albuquerque Journal*, Sunday, January 10, 2021, p. A8-A9. (A3)
- Davis, Theresa, 2021c, Rio Grande in Peril – NM water manager warn communities to prepare for bleak future: *Albuquerque Journal*, Monday, February 1, 2021, p. A8-A9. (A3)
- Decker, E. R. and Smithson, S. B., 1975, Heat flow and gravity interpretation across the Rio Grande rift in southern New Mexico and west Texas: *Journal of Geophysical Research*, v. 80, n. 17, p. 2542-2552. (C4)
- DeFord, R.K., and Haenggi, W.T., 1970, Stratigraphic nomenclature of Cretaceous rocks in northeastern Chihuahua, in *The Geologic Framework of the Chihuahua Tectonic Belt; Symposium in honor of Professor Ronald K. DeFord: West Texas Geological Society and The University of Texas at Austin*, p. 175-196. (C2a, F3)
- Deming, D., 2002, *Introduction to hydrogeology: New York, The McGraw-Hill Book Companies, Inc.*, 468 p. ISBN 0-07-232622-0 (D1)
- Dick-Peddie, W.A., 1993, *New Mexico vegetation - past, present, and future: Albuquerque, University of New Mexico Press*, 244 p. (C1)
- Doremus, D., and Michelsen, A.M., 2008, *Rio Grande salinity management – First steps towards interstate solutions: Surface Water Opportunities in New Mexico, N.M. Water Resources Research Institute*, 8 p. (E2a, H2)
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K., and Reyes, S., 1993, *The Mexican monsoon: Journal of Climate*, v. 6, p. 1665-1677. (C1)
- Drewes, H. and Dyer, R., 1993, *Geologic map and structure sections of the Sierra Juarez, Chihuahua, Mexico: U.S. Geological Survey, Miscellaneous Investigations Map I-2287, scale 1:12,500.* (C2b, F3)
- Dunbar, N.W., 2005, *Quaternary volcanism in New Mexico, in Lucas, S. G., Morgan, G., and Zeigler, K.E., eds.,*

- New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin No. 28, p. 95-106. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (C2b)
- Dunham, K. C., 1935, The geology of the Organ Mountains, with an account of the geology and mineral resources of Dona Ana County, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Bulletin 11, 272 p. (C2a, G1)
- Dyer, R., 1987, First day, Part A; Road log from El Paso/Ciudad Juárez via Villa Ahumada, El Sueco to Ciudad Chihuahua, in *Excursión Geológica, Libroto Guía de Caminos*, Sociedad Geológica Mexicana, Universidad Autónoma de Chihuahua, and the University of Texas at El Paso, p. 2-30. (C2a, F1)
- Dyer, R., 1988, Bibliography of geologic studies in northwestern Chihuahua, Mexico: El Paso Geological Society, Pub. 19, p. 173-179. (A1, F3)
- Dyer, R., 1989, Structural geology of the Franklin Mountains, West Texas, in Muehlberger, W.R., and Dickerson, P.W., Structure and stratigraphy of Trans-Pecos Texas: 28th International Geological Congress, Field Trip Guidebook T317, p. 65-70. (C2a)
- Eakin, T.E., Price, D., and Harrill, J.R., 1976, Summary appraisals of the nation's ground-water resources--Great Basin region: U.S. Geological Survey Professional Paper 813-G, 37 p. (D1)
- Eastoe, C., and Towne, D., 2018, Regional zonation of groundwater recharge mechanisms in alluvial basins of Arizona: Interpretation of isotope mapping: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 194, p. 135-145. www.elsevier.com/locate/gexplo (D2, H2, H3)
- Eastoe, C. J.; and Wright, W. E., 2019, Hydrology of mountain blocks in Arizona and New Mexico as revealed by isotopes in groundwater and precipitation: *Geosciences*, v. 9, article 461. doi:10.3390/geosciences9110461. (C1, D2, H2, H3)
- Eastoe C.J., Hibbs, B.J., Granados-Olivas, A., Hogan, J.F., Hawley, J., and Hutchison, W.R., 2008, Isotopes in the Hueco Bolson aquifer, Texas (USA) and Chihuahua (Mexico): Local and general implications for recharge sources in alluvial basins: *Hydrogeology Journal*, v. 16, no. 4, p. 737-747. (F1, H1, H2)
- El Paso Water (EPW), ND, Water Resources-El Paso Water: https://epwater.org/our_water/water_resources (E2, E2a, E2b, F2)
- Emory, W.H., 1857, Report on the United States and Mexican Boundary Survey Made under the Direction of the Secretary of the Interior: 34th Congress, 1st Session, House of Representatives, Executive Document No. 135, 2 vol., Washington, D.C., Cornelius Wendell printer [Texas Historical Association facsimile reprint (1987), 3 vols.]. (B3)
- Erlitski, R., and Craver, D. (Abstract), 2020, High-Recovery for Quick Recovery: Desalination solves multiple challenges to a community in need: Program with abstracts, Water, Energy, and Policy in a Changing Climate Conference, National Groundwater Association (NGWA), Albuquerque, NM, February 24 – 25, 2020. (E2a)
- Esslinger, G.L., 1996, Water development on the Lower Rio Grande: The Elephant Butte Project, in Ortega Klett, C.T., ed., *Reaching the Limits: Stretching the Resources of the Lower Rio Grande*, Proceedings of the 40th Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report No. 297, p. 13-19. (B3, E2, E3)
- Esslinger, G.L., 1998, Water politics in southern New Mexico: *New Mexico Journal of Science*, v. 38. p. 83-103. (E2, E3)
- Fenneman, N.M., and Johnson, D.W., 1946, Physiographic divisions of the conterminous U.S.—Get this data set: U.S. Geological Survey, accessed June 9, 2016, at <http://water.usgs.gov/lookup/getspatial?physio>. (C)
- Fergusson, Harvey, 1933, Rio Grande: New York, Alfred A. Knopf, 296 p., with index (p. i-viii) and 18 photographs (B3)
- Feth, J.H., 1964, Hidden recharge: *Ground Water*, v. 2, no. 4, p. 14-17. (D2)
- Feth, J.H., and Whitehead, H. C., 1964, Chemical composition of rain, dry fallout, and bulk precipitation at Menlo Park, California, 1957-1959: *Journal of Geophysical Research*, v. 69, p. 3319-3333. (C1, C3, D1)
- Flannigan, K.G., 2007, Surface water management: Working within the legal framework: *Natural Resources Journal*, v. 47, no. 3, p. 515-523. (B3, E2, E3)
- Flores Mata, G., 1970, Informe de Actividades, Mayo 1967-Septiembre 1970, Anexos 3: Mapa de Grandes Grupos de Suelos del Edo. de Chihuahua de acuerdo al Sistema de FAO/UNESCO/SRH, [y] Anexos 4. de acuerdo al sistema Americano de la 7a, Aproximación: Secretaria de Recursos Hidraulicos, Dirección de Agrología, Serie Estudios Publicación Numero 1. 33 p. (C3, F3)
- Follett, W.W., 1898, Rio Grande Waters—Equitable distribution of waters of the Rio Grande: Message to the President of the United States: 55th Congress, 2nd Session, U.S. Senate Document No. 229, Washington, D.C., US Government Printing Office, 289 p. (B3, D1, E3)
- Freethey, G.W., Pool, D.R., Anderson, T.W., and Tucci, P., 1986, Description and generalized description of aquifer materials in alluvial basin of Arizona and adjacent parts of California and New Mexico: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-664, 4 sheets, scale 1:500,000. (H1)
- Frenzel, P.F., and Kaehler, C.A., 1990, Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Mesilla

- Basin, Doña Ana County, New Mexico and El Paso County, Texas; with a section on Water quality and geochemistry by S. K. Anderholm: U.S. Geological Survey Open-file Report 88-305, 179 p. (H2, H3)
- Frenzel, P.F., and Kaehler, C.A., 1992, Geohydrology and simulation of ground-water flow in the Mesilla Basin, Doña Ana County, New Mexico and El Paso County, Texas, with a section on Water quality and geochemistry by S. K. Anderholm: U.S. Geological Survey Professional Paper 1407-C, 105 p. (F2, H2, H3)
- Galloway, D., Jones, D.R., and Ingebritzen, S.E., 1999, Land subsidence in the United States: U.S. Geological Survey Circular 1182, 177 p. (D1)
- Galloway, W.E., 2005, Gulf of Mexico Basin depositional record of Cenozoic North American drainage basin evolution: International Association of Sedimentologists, Special Publication 35, p. 409-423. (D1, I3)
- Garza, S., Weeks, E.P., and White, D.E., 1980, Appraisal of potential for injection-well recharge of the Hueco bolson with treated sewage effluent--Preliminary study of the northeast El Paso area, Texas: U.S. Geological Survey Open-file report 80-1106, 37 p. (E2b, F2, H2)
- Gibbard, P.L., Head, M.J., Walker, M.J.C., and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy, 2010, Formal ratification of the Quaternary System/Period and the Pleistocene Series/Epoch with a base at 2.58 Ma: *Journal of Quaternary Science*, v. 25, p. 96-102. (B1)
- Gile, L. H., 1961, A classification of ca horizons in soils of a desert region, Doña Ana County, New Mexico: *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 25, n. 1, p. 52-61. (C3)
- Gile, L.H., 1966, Coppice dunes and the Rotura soil: *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 30, p. 657-660. (C3)
- Gile, L.H., 1967, Soils of an ancient basin floor near Las Cruces, New Mexico: *Soil Science*, v. 103, n. 4, p. 265-276. (C3)
- Gile, L.H. and Grossman, R.B., 1979, *The Desert Project Soil Monograph*: U.S. Department of Agriculture, National Technical Information Service, Document No. PB80-13534, Springfield, VA 22161, 984 p. (C3)
- Gile, L.H., Hawley, J.W., and Grossman, R.B., 1981, Soils and geomorphology in the Basin Range area of southern New Mexico—guidebook to the Desert Project: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Memoir 39, 222 p. (C2a, C3)
- Gile, L. H., Peterson, F. F., and Grossman, R. B., 1966, Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils: *Soil Science*, v. 101, n. 5, p. 347-360. (C3)
- Gile, L. H., Hawley, J. W., Grossman, R. B., Monger, H. C., Montoya, C. E., and Mack, G. H., 1995, Supplement to the Desert Project Guidebook, with emphasis on soil micromorphology: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Bulletin 142, 96 p. (C2b, C3)
- Giles, G.C., and Pearson, J.W., 1998, Characterization of hydrostratigraphy and groundwater flow on the southwestern San Andres Mountains pediment, NASA-JSC White Sands Test Facility: *New Mexico Geological Society Guidebook 49*, p. 317-325. (H1, H3)
- Glennon, R., 2002, *Water follies: Groundwater pumping and the fate of America's fresh waters—Chapter 15. The Tragedy of Law and the Commons* [p. 209-224]: Washington DC, Island Press, 314 p. ISBN 1-55963-223-2 (hardback) - ISBN 1-55963-400-6 (paperback). (A2, E2)
- Glover, A., 2018, *Levees of the Hatch and Mesilla Valleys*: N. M. Geological Society, Guidebook 69, p. 63-64. See Baker 1943. (B3, E2)
- Gómez, F., 1983, *Geology of Sierra del Aguila, northern Chihuahua, Mexico*, in *Geology and Mineral Resources of North-Central Chihuahua*: El Paso Geological Society, Guidebook 1983 Field Conference, p. 261-267. (C2a, F3)
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M., and Ogg, G., eds., 2012, *The geologic time scale 2012*: Amsterdam, Elsevier, 1176 p. Paperback ISBN: 9780444594259 (B1)
- Granados Olivas, A., 2000, *Relationships between Landforms and Hydrogeology in the Lower Casas Grandes Basin, Ascension, Chihuahua, Mexico*: New Mexico State University, doctoral dissertation, 292 p. (H1, F3)
- Granados Olivas, A., 2010, *Future solutions: Research needs in the Mexican section of the Rio Grande (Bravo) watershed*: *Journal of Transboundary Water Resources*, v. 1, p. 147-157. www.wrri.nmsu.edu (E2, F3)
- Granados Olivas, A. and Kretzschmar, T., 2001, *Uso de sistemas de información Geográfica y sistemas de teledetección en la identificación y mapeo de potenciales zonas de recarga hacia acuíferos del Desierto Chihuahua: VIII Reunión Nacional sobre Sistemas de Captación de Agua de Lluvia*, Cd. Chihuahua, Chih, SEMARNAT [Mexico]. 17 p. (D2, E1, F3)
- Granados Olivas, A., and Monger, H.C., 1999, *Remote Sensing Technology for Development Planning Along the U.S.-Mexico Border: Hydrogeology and Geomorphology*, in Herrera, E. and Mexal, J., eds., *Ensuring Sustainable Development of Arid Lands Through Time: Las Cruces*, New Mexico Academy of Science Journal , v.39, p. 123-137. (E1, E2, F1)

- Granados Olivas, A., Creel, B., Kennedy, J., and Aldouri, R., 2001, Water planning GIS for the Paso del Norte region, in Aldama, A., Aparicio, F.J., and Equihua, R., eds. First International Symposium on Transboundary Waters Management, Proceedings: Asociación Mexicana de Hidráulica, Avances en Hidráulica 10, p.147-154. (E1, E2, F1)
- Granados Olivas, A., Creel, B., Sánchez-Flores, E., Chávez, J., and Hawley, J.W., 2012, Thirty years of groundwater evolution—Challenges and opportunities for binational planning and sustainable management of the Paso del Norte watersheds, in Lee, E., and Ganster, P., The U.S.–Mexican border environment: Progress and challenges for sustainability: Southwest Consortium for Environmental Research and Policy, SCERP Monograph Series, no. 16, San Diego State University Press, p. 201–217. (E2)
- Granados Olivas, A., Sánchez-Flores, E., Rojas-Villa Lobos, H.L., Chávez, J., Hawley, J., and Creel, B., 2009, Historia y resultados del programa de intercambio de información entre México y Estados Unidos referente a la temática de agua subterránea: Casa de la región Paso del Norte (Chihuahua–Nuevo México–Texas), in Plenge-Tellechea, F. y Pérez-León, J.A., coordinadores, Ciencia en la frontera: Revista de ciencia y tecnología de la UACJ, v. VII, no. 4, p. 63-71. (E2, F1)
- Granados Olivas, A., Brown, C., Greenlee, J., Creel, B., Hawley, J.W., Kennedy, J., Dena-Ornelas, O., and Hurd, B., 2006, Geographic information systems at the Paso del Norte region. The academic accomplishments and challenges for a Transboundary water resources GIS cooperation, in Anderson, K.S.J., ed., Science on the Border: New Mexico Journal of Science, v. 46, p. 45-56. (E1, F1)
- Granillo, J.A., Jr., 2004, A gravimetric study of the structure of the northeast portion of the Hueco Bolson, Texas employing GIS technology: The University of Texas at El Paso, master's thesis, 27 p. (C4, E1)
- Gregg, Josiah, 1844, Commerce of the Prairies, edited by Max L. Moorhead, 1954: Norman, University of Oklahoma Press, 469 p. See Gregg's comments on EPdN reach on p. 98-101, 272-275; and Moorhead 1958. (B3)
- Gries, J. G., 1979, Problems of delineation of the Rio Grande rift into Chihuahua tectonic belt of northern Mexico, in Riecker, R. E., ed., Rio Grande rift: Tectonics and magmatism: Washington, D.C., American Geophysical Union, p. 107-113. (C2a, F1)
- Gries, J.G., 1980, Laramide evaporite tectonics of Trans-Pecos Texas: New Mexico Geological Society Guidebook 31, p. 93-100. (C2a, F1)
- Gude, V.G., 2016, Desalination and sustainability - An appraisal and current perspective: Water Research, v. 89, p. 87–106. (E2a)
- Guerrero, J.C., 1969, Stratigraphy of Banco de Lucero, State of Chihuahua, in The Border Region, New Mexico Geological Society Guidebook 20, p. 171-172. (C2a, F3)
- Gustavson, T. C., 1991, Arid basin depositional systems and paleosols: Fort Hancock and Camp Rice Formations (Pliocene-Pleistocene) Hueco Bolson, West Texas and adjacent Mexico: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations No. 198, 49 p. (C2b, C3, I3)
- Gutiérrez-Ojeda, Carlos, 2001, Aquifer recharge estimation at Mesilla Bolson and Guaymas aquifer systems, Mexico, in IAEA, eds., Isotope based assessment of groundwater renewal in water scarce regions: IAEA-TECDOC-1246, Vienna, International Atomic Energy Agency, p. 23–44. See SRH 1988. (F3, H2, H3)
- Gutzler, D.S., 2005, Once and future climates in New Mexico and North America; the icehouse and the hothouse anti-analogues, in Lucas, S.G., Morgan, G.A., and Zeigler, K.E., eds., New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 18, 107-114. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (C1)
- Gutzler, D.S., 2020, New Mexico's climate in the 21st Century—A great change is underway: New Mexico Earth Matters, Summer 2020, p. 1-5 geoinfo.nmt.edu/publications/openfile/details.cfm?Volume=577;eps.unm.edu/people/faculty/profile/david-gutzler.html; globalchange.gov/nca4 (C1)
- Gutzler, D. S., and Robbins, T. O., 2011, Climate variability and projected change in the western United States: regional downscaling and drought statistics: Climate Dynamics, v. 37, no. 5, p. 835-849. (C1)
- Haase, C.S., and Lozinsky, R.P., 1992, Estimation of hydrologic parameters, in Hawley, J.W., and Haase, C.S., compilers, Hydrogeologic framework of the northern Albuquerque Basin: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Open File Report 387, p. VI-1—VI-3. (D1)
- Hackett, C. W., 1942, Revolt of the Pueblo Indians of New Mexico and Otermín's attempted reconquest Coronado, 1680-1682, in G.P. Hammond, ed., translations of original documents by Charmion Clair Shelby; Coronado Cuarto Centennial Publications, 1540-1940, Vol. VIII [8]: Albuquerque, University of New Mexico Press, 452 p. (B3)
- Hackett, O.M., 1972, Presentation of the O.E. Meinzer Award to George Burke Maxey; with response by George B. Maxey, in Medals and Awards for 1971: Geological Society of America, v. 83, no. 6, p. xxv-xxviii. (A2, D1)
- Haenggi, W.T., 2001, Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico, and adjacent USA; Part I, The pre-

- Mesozoic Setting: Boletín de Sociedad Geológica Mexicana, Tomo 54, p. 28-66. (C2b, F3)
- Haenggi, W.T., 2002, Tectonic history of the Chihuahua trough, Mexico, and adjacent USA; Part II, Mesozoic and Cenozoic: Boletín de Sociedad Geológica Mexicana, Tomo 55, p. 38-74. (C2b, F3)
- Hall, S.A., 2005, Ice Age vegetation and flora of New Mexico, in Lucas, S.G., et al., eds., *New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin No. 28*, p. 171-183. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (B2, C1)
- Hammond, G.P., 1965, Foreword to facsimile reprint of Cutts, J.M., 1847, *The conquest of New Mexico and California . . .*: Albuquerque, Horn & Wallace, Publishers, p. ii. (B3)
- Hammond, G. P., and Rey, A., 1953, Don Juan de Oñate, colonizer of New Mexico, 1595-1628; Coronado Quarto Centennial Publications, 1540-1940, Albuquerque, Vol. II: Albuquerque, University of New Mexico Press, 1187 p. May 4 1498 Oñate party leaves EPdN and enters NM (p. 95). (B3)
- Hammond, G. P., and Rey, A., 1966, The rediscovery of New Mexico, 1580-1594: The explorations of Chamuscado, Espejo, Canstano de Sosa, Morlete, and Leyva de Bonilla and Humaña; Coronado Quarto Centennial Publications, 1540-1940, Albuquerque, Vol. III: Albuquerque, University of New Mexico Press, 341 p. (B3)
- Hamway, S., 2020a, Recycling company to expand in Santa Teresa – Texas firm has 11 plants in US, Mexico: Albuquerque Journal-BUSINESS SECTION, Wednesday, February 19, 2020, p. A10-A11. (A3, E2c)
- Hamway, S., 2020b, Taiwanese firm plans move to Santa Teresa – Relocation part of trend for manufacturers to set up sites near customers: Albuquerque Journal-BUSINESS, Tuesday, December 8, 2020, p. A8. (A3)
- Haneberg, W.C., 1995, Depth-porosity relationships and virgin specific storage estimates for the upper Santa Fe Group aquifer system, central Albuquerque Basin, New Mexico: *New Mexico Geology*, v. 17, no. 4, p. 62-71. (D1)
- Hanson, R.T., Ritchie, A.B., Boyce, S.E., Galanter, A.E., Ferguson, I.A., Flint, L.E., and Henson, W.R., 2018, Rio Grande transboundary integrated hydrologic model and water-availability analysis, New Mexico and Texas, United States, and Northern Chihuahua, Mexico: U.S Geological Survey Open-File Report 2018-1091, 185 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181091>. (H3)
- Hardin, G., 1968, The tragedy of the commons: *Science*, v. 162, p.1243-1247. (D1)
- Harrill, J.R., and Prudic, D.E., 1998, Aquifer systems in the Great Basin region of Nevada, Utah, and adjacent states—Summary report: U.S. Geological Survey Professional Paper 1409-A, 66 p. [Also available at <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1409A>.] (D1)
- Harris, L.G., 2012, Whose water is it anyway? Anatomy of the water war between El Paso, Texas and New Mexico, in Ortega Klett, C.T., ed., *One hundred years of water wars in New Mexico: Santa Fe, Sunstone Press*, p. 227-253. ISBN: 978-0-86524-902-5. (B3, E2, E3)
- Hathaway, D. L., 2011, Transboundary groundwater policy: Developing approaches in the western and southwestern United States. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, v. 47, no. 1, p. 103-113; DOI: 10.1111/j.1752-1688.2011.01111.x (E2, F1)
- Hawley, J.W., 1962, Late Pleistocene and Recent geology of the Winnemucca segment of the Humboldt River Valley, Nevada [unpublished Ph.D. dissertation]: Urbana-Champaign, University of Illinois, 220 p. (D1)
- Hawley, J.W., 1965, Geomorphic surfaces along the Rio Grande Valley from El Paso, Texas to Caballo Reservoir, New Mexico: *New Mexico Geological Society, Guidebook 16*, p. 188-198. (C2a)
- Hawley, J.W., 1969, Notes on the geomorphology and late Cenozoic geology of northwestern Chihuahua: *New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 131-142. (C2a, F3)
- Hawley, J.W., 1975, Quaternary history of Doña Ana County region, south-central New Mexico: *New Mexico Geological Society Guidebook 26*, p. 139-150. (C2a, F1, I3)
- Hawley, J.W., 1978, compiler, 1978, *Guidebook to the Rio Grande rift in New Mexico and Colorado*: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 163, 241 p. (A2, C2a, C4)
- Hawley, J.W., 1984, Hydrogeologic cross sections of the Mesilla Bolson, New Mexico and Texas: *New Mexico Bureau of Mines and Minerals Resources, Open-file Report 190*, 10 p. 16 plates. Appendix in Peterson, D.M., Khaleel, R., and Hawley, J.W., 1984 (H1)
- Hawley, J.W., 1993, Geomorphic setting and late Quaternary history of pluvial-lake basins in the southern New Mexico region: *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Open-file Report 391*, 28 p. (C2b, I1)
- Hawley, J.W., 2005, Five million years of landscape evolution in New Mexico: An overview based on two centuries of geomorphic conceptual-model development, in Lucas, S.G., et al., eds., *New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin No. 28*, p. 9-93. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (A1, A2, C2b, F1, I1, I3)
- Hawley, J. W., 2020, A Hydrogeologic perspective on groundwater conservation in the northern Rio Grande basin, New Mexico, Texas, and Chihuahua—2014

- Albert E. Utton Memorial Lecture, in Sheely, M., ed. Proceedings, 59th Annual New Mexico Water Conference, Santa Fe, NM., p. 59-85, with 28 pptx slide pdf on CD-ROM. 59th Annual New Mexico Water Conference – New Mexico Water Resources Research Institute (nmsu.edu) (D1, F1, H1)
- Hawley, J.W. and Haase, C.S., 1992, compilers, Hydrogeologic framework of the northern Albuquerque Basin: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Open-file Report OF-387, 74 p., 8 Appendices, Glossary. (D1)
- Hawley, J.W., and Kennedy, J.F., 2004, Creation of a digital hydrogeologic framework model of the Mesilla Basin and southern Jornada del Muerto Basin (Report prepared for Lower Rio Grande Water Users Organization): New Mexico Water Resources Research Institute, Technical Completion Report 332, 105 p., with CD ROM including 2005 Addendum extending model into Rincon Valley and adjacent areas. <http://wrrri.nmsu.edu/publish/> (H1, F1)
- Hawley, J.W. and Kernodle, J.M., 2000, Overview of the hydrogeology and geohydrology of the northern Rio Grande basin—Colorado, New Mexico, and Texas, in Ortega-Klett, C.T., ed., Proceedings of the 44th Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report 312, p.79-102. <http://wrrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc/proc44/contents.html> (D1)
- Hawley, J.W. and Kernodle, J.M., 2008, Early contributions to arid-zone hydrogeology in the eastern Basin and Range region: *Ground Water*, v. 46, no. 3, p. 510-516. (A2, B3, D1)
- Hawley, J.W. and Kottlowski, F.E., 1969, Quaternary geology of the south-central New Mexico border region, in Border Stratigraphy Symposium: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 104, p. 89-115. (C2a)
- Hawley, J.W. and Lozinsky, R.P., 1992, Hydrogeologic framework of the Mesilla Basin in New Mexico and western Texas: NM Bureau of Mines and Mineral Resources, Open-File Report 323, 55 p. (H1)
- Hawley, J.W., and Wilson, W.E. III, 1965, Quaternary geology of the Winnemucca area, Nevada: Desert Research Institute, University of Nevada, Reno, Technical Report No. 5, 66 p. (D1)
- Hawley, J.W., Granados Olivas, A., and Creel, B.J., 2012, Progress report on development of an annotated bibliography for transboundary aquifer systems of the Mesilla Basin-Paso del Norte area, New Mexico, Texas, and Chihuahua—Poster Presentation Abstract for 57th Annual New Mexico Water Conference: Hard Choices: Adapting Policy and Management to Water Scarcity (8/28/12), New Mexico Water Resources Research Institute, NMSU-Las Cruces. <http://2012.wrrri.nmsu.edu/webcast>; <http://kunm.org/post/new-mexicos-hard-choices> (A1, F1)
- Hawley, J.W., Kennedy, J.F., and Creel, B.J., 2001, The Mesilla Basin aquifer system of New Mexico, West Texas and Chihuahua—an overview of its hydrogeologic framework and related aspects of groundwater flow and chemistry, in Mace, R.E., Mullican, W.F. III, and Angle, E.S., eds., *Aquifers of West Texas: Texas Water Development Board Report 356*, p. 76-99. <http://www.twdb.state.tx.us/publications/reports/GroundWaterReports/GWRReports/Individual%20Report%20htm%20files/Report%20356.htm> (F1, H1)
- Hawley, J.W., Kennedy, J. F., Granados Olivas, A., and Ortiz, M.A., 2009, Hydrogeologic framework of the binational western Hueco Bolson-Paso del Norte area, Texas, New Mexico, and Chihuahua: Overview and progress report on digital model development: N. M. Water Resources Research Institute, New Mexico State University, Technical Completion Report 349, 45 p., with 2 plates on CD ROM. <ftp://wrrri.nmsu.edu/pub/hueco> (F1, H1)
- Hawley, J.W., Kennedy, J.F., Ortiz, M.A., and Carrasco, S., 2005, Creation of a digital hydrogeologic framework model of the Rincon Valley and adjacent areas of Dona Ana, Sierra and Luna Counties NM: N. M. Water Resources Research Institute, New Mexico State University; Addendum to Technical Completion Report 332 on CD ROM. Access at <http://wrrri.nmsu.edu/publish/techrpt/tr332/cdrrom/addendum.pdf>. (F1, H1)
- Hawley, J.W., Swanson, B.H., Walker, J. S., and Glaze, S.H., 2021 (in press), Hydrogeologic Framework of the Mesilla Basin Region of New Mexico, Texas, and Chihuahua (Mexico)—Advances in Conceptual and Digital Model Development: NM Water Resources Research Institute, NMSU, Technical Completion Report No 363, 318+ p. (F1, H1)
- Hawley, J.W., Wilson, W.E., Cartwright, K., Swinderman, J., and Farvolden, R.N., 1961, Progress report on the geologic phase of the Humboldt River Project for Field Season 1960, in Progress Report, Humboldt River Research Project—A State-Federal Cooperative Program: Carson City, Nevada State Department of Conservation and Natural Resources, p. 26-32. (D1)
- Hawley, J.W., Kottlowski, F.E., Seager, W.R., King, W.E., Strain, W.S. and LeMone, D.V., 1969, The Santa Fe Group in the south-central New Mexico border region, in Border Stratigraphy Symposium: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 104, p. 52-76. (C2a, F1)
- Hawley, J.W., Hibbs, B. J., Kennedy, J. F., Creel, B. J., Remmenga, M. D., Johnson, M., Lee, M. M., and Dinterman, P., 2000, Trans-International Boundary

- aquifers in southwestern New Mexico: New Mexico Water Resources Research Institute, prepared for U.S. Environmental Protection Agency-Region 6 and International Boundary and Water Commission; Technical Completion Report-Interagency Contract, 126 p., with map data on CD-ROM. <http://wrri.nmsu.edu/publish/otherrept/swnm/down1.html> (C2b, D1, F1, I2)
- Hayton, R.D., 1978a, Institutional policies for U.S.-Mexico groundwater management: *Natural Resource Journal*, v. 18, no. 1 (Symposium on U.S.-Mexican Transboundary Resources, Part II), p. 201-212. Available at: <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol18/iss1/16> (E2, E3, F1)
- Hayton, R.D., 1978b, The ground water legal regime as instrument of policy objectives and management requirements, in *ANNALES JURIS AQUARUM II: Caracas, Venezuela; 2nd International Conference on Water Law and Administration* (Feb. 1976), p. 8-14. (E2, E3, F1)
- Helm, D.C., 1982, Conceptual aspects of subsidence due to fluid withdrawal, in Narasimhan, T.N., ed., *Recent trends in hydrogeology*: Geological Society of America, Special Paper 189, p. 103-139. (D1)
- Helm, D.C., 1984a, Analysis of sedimentary skeletal deformation in a confined aquifer and the resulting drawdown: *American Geophysical Union, Water Resources Monograph 9, Groundwater Hydraulics*, p. 29-82. (D1)
- Helm, D.C., 1984b, Field-based computational techniques for predicting subsidence due to fluid withdrawal; in Holzer, T.L., ed., *Man-induced land subsidence*: Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology VI: Groundwater Hydraulics*, p. 1-22. (D1)
- Helm, D.C., 1994, Hydraulic forces that play a role in generating fissures at depth: *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, v. 16, No 3, p. 293-304. (D1)
- Henry, C. D., 1979, Geologic setting and geochemistry of thermal water and geothermal assessment, Trans-Pecos Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Report of Investigations 96, 48 p. (C2a, F1, H1, H2)
- Henry, C.D., and Gluck, J.K., 1981, A preliminary assessment of the geologic setting, hydrology, and geochemistry of the Hueco Tanks geothermal area, Texas and New Mexico: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular 81-1, 48 p. (C2a, H1, H2)
- Henry, C. D. and Price, J. G., 1985, Summary of the tectonic development of Trans-Pecos Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Miscellaneous Map No. 36, scale 1:500,000, text 8 p. (C2a, F1)
- Herbel, C. H. and Gile, L. H., 1973, Field moisture regimes and morphology of some arid-land soils in New Mexico, in *Field soil water regime*: Soil Science Society of America, Special Publication 5, p. 119-152. (C1, C3)
- Hernández, J.W., 2012, Water wars during our Territorial years, in Ortega Klett, C.T., ed., *One hundred years of water wars in New Mexico*: Santa Fe, Sunstone Press, p. 19-28. ISBN: 978-0-86524-902-5. (B3, E3)
- Heywood, C. E., and Yager, R.M., 2003, Simulated groundwater flow in the Hueco Bolson, an alluvial-basin aquifer system near El Paso, Texas: U.S. Geological Survey, *Water Resources Investigations Report 02-4108*, 27 p. (F1, H3)
- Hibbs, B. J., and Darling, B. K., 2005, Revisiting a classification scheme for U.S.-Mexico alluvial basin-fill aquifers: *Ground Water*, v. 43, no. 5, p. 750-763. (D1, D2, F1)
- Hibbs, B.J., Lee, M.M., and Hawley, J.W., 1999, Evolution of hydrochemical facies in the Mimbres Basin aquifer system: A transboundary resource, in *Hydrological issues of the 21st Century: Ecology, Environment, and Human Health*: American Institute of Hydrology, *Hydrological Science and Technology*, v. 15, no. 1-4, pp.52-65. (F1, H1, H2)
- Hibbs, B., Eastoe, C., Hawley, J., and Granados, A., 2015, Multiyear study of the binational Hueco Bolson Aquifer reformulates key conceptual models of groundwater flow, in *Water is not for gambling: Utilizing science to reduce uncertainty*: Proceedings 2015 UCOWWR/NIWR/CUAHSI Annual Conference, Universities Council on Water Resources, p. 81-86. http://www.ucowr.org/files/2015%20Conference/2015_UCOWR_Conference_Proceedings_Final.pdf (F1, H1, H2)
- Hibbs, B.J., Lee, M.M., Hawley, J.W., and Kennedy, J.F., 2000, Some notes on the hydrogeology and ground-water quality of the Animas basin system, southwestern New Mexico: *New Mexico Geological Society, Guidebook 51*, p. 227-234. (F1, H1, H2)
- Hibbs, B. J., Creel, B. J, Boghici, R., Hayes, M., Ashworth, J., Hanson A., Samani, Z., Kennedy, J. F., Hann, P., and Stevens, K., 1997, *Transboundary Aquifers of the El Paso/Ciudad Juarez/Las Cruces Region*: U.S. Environmental Protection Agency, Region 6; Technical Contract Report- Interagency Contracts X-996343-01-0 and X-996350-01-0, prepared by the Texas Water Development Board and the New Mexico Water Resources Research Institute, variously paged. See TWDB, 1997, Appendix C—G.I.S. coverages, metadata descriptions, [and] groundwater data sets on CD-ROM, with Water Quality map insert on back-cover. (F1, H1, H2)

- Hibbs, B., Boghici, R., Ashworth, J., Hayes, M., Peckham, D., Guillen, R., Fuentes, O., Laloth, N., Morales, M., Maldonado, A., Creel, B., Kennedy, J., Hanson, A., Samani, Z., Nunez, F., Lemus, R., Moreno, G., Rascon, E., Kuo, R., Waggoner, S., Ito, C., Robinson, J., Valdez, J., Little, D., Rascon, A., Reyes, A., Williams, K., Vaughan, M., Cabra, O., Kelly, T., King, C., 1998, Transboundary aquifers and binational ground-water data base, City of El Paso/Ciudad Juarez area; Base de datos binacional del acuífero transfronterizo, de Ciudad Juarez, Chih./El Paso, Tex.: first binational aquifer report and data base sanctioned by the governments of the United States and Mexico, 47 p. + appendices and CD-ROM. Participating agencies; International Boundary and Water Commission, U.S. Environmental Protection Agency, Texas Water Development Board, New Mexico Water Resources Research Institute, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Comisión Nacional del Agua, Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juarez. (F1)
- Hightower, M., 2003, Desalinization of inland brackish water: Issues and concerns: *Southwest Hydrology*, v. 2, no. 3, p. 18-19. (E2a)
- Hill, R. T., 1891, Preliminary notes on the topography and geology of northern Mexico and southwest Texas, and New Mexico: *American Geologist*, v.8, p. 133-141. (B3, C2a, F1)
- Hill, R. T., 1892a, Notes on the Texas-New Mexican region: *Geological Society of America Bulletin*, v.3, p. 85-100. (B3, C2a)
- Hill, R. T. 1892b, Underground waters of the arid region: *Engineering Magazine*, v.3, p. 653-660. (G1)
- Hill, R. T., 1896, Descriptive topographic terms of Spanish America: *National Geographic*, v. 7, p. 291-302. (A1, B3, C2a, F1)
- Hill, R. T., 1900, Physical geography of the Texas region: U. S. Geological Survey Topographical Atlas Folio 3, 12 p. (B3, C2a, G1)
- Hoffer, J. M., 2001a, Geology of Potrillo Maar, southern New Mexico and northern Chihuahua, Mexico, in Crumpler, L.S., and Lucas, S.G., eds., *Volcanology in New Mexico: New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin 18*, p. 137-140. (C2b, F1)
- Hoffer, J.M., 2001b, Geology of the West Potrillo Mountains, in Crumpler, L.S., and Lucas, S.G., eds., *Volcanology in New Mexico: New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin 18*, p. 141-145. (C2b)
- Hogan, J.E., Phillips, F.M., and Scanlon, B.R., eds., 2004, Groundwater recharge in a desert environment: the southwestern United States: Washington, DC, American Geophysical Union, *Water Science and Application 9*, 294 p. (D2)
- Hogan, J.F., Phillips, F.M., Mills, S.K., Hendrickx, J.M.H., Ruiz, J.T., Chesley, J.T., and Asmeron, Y., 2007, Geologic origins of salinization in a semi-arid river: The role of sedimentary basin brines: *Geology*, v. 35, no. 12, p. 1063-1066. (D2, H2, H3)
- Hoidale, G. B., Smith, S. M., Blanco, A. J. and Barber, T. L., 1967, A study of atmospheric dust: Atmospheric Science Laboratory, White Sands Missile Range, New Mexico, ECOM Report No. 5067, 132 p. (C1, C3)
- Holliday, V.T., and Miller, D.S., 2013, The Clovis landscape, Chapter 13, p.221-245, in Graf, K.E, Ketron, C.V., and Waters, M.R., eds., *Paleoamerican Odyssey*, Center for the Study of the First Americans, Department of Anthropology, College Station TX 77843-4352, Texas A&M University, 573 p. ISBN-13: 978-0-615-82691-2, ISBN-10: 0-615-82691-1 (B2, C1, C3)
- Hoover, J.D., Ensensdot, S.E., Barnes, C.G., and Dyer, R., 1988, Early Trans-Pecos magmatism: Petrology and geochemistry of Eocene intrusive rocks of the El Paso area: *New Mexico Geological Society, Guidebook 39*, p. 109-118. (C2a, F1)
- Horgan, P., 1954, Great rivers, the Rio Grande in North American History: New York, Holt, Rinehart and Winston, 1020 p. (B3)
- Hornberger, G.M., Raffensperger, J.P., Wiberg, P.L., and Eshleman, K.N., 1998, *Elements of physical hydrology*: Baltimore, MD, The Johns Hopkins University Press, 302 p. See Glossary, p. 277-292. (A1, D2)
- Hudson, M.R., and Grauch, V.J.S., 2013, Introduction, in Hudson, M.R., and Grauch, V.J.S., eds., *New Perspectives on Rio Grande Rift Basins: From Tectonics to Groundwater: Geological Society of America Special Paper 494*, p. v-xii. doi: 10.1130/2013.2494(00) (A2, C2b, C4)
- Hughes, A.E., 1914, The beginning of Spanish settlement in the El Paso District: *Berkeley, University of California Publications in History, Vol. I, No. 3*, p. 295-392. (B3)
- Hundley, N., 1966, Dividing the waters: a century of controversy between the United States and Mexico: Berkeley, University of California Press, 266 p. (B3, E3, F1)
- Hurd, B., Leary, N., Jones, R., and Smith, L.B., 1999, Relative regional vulnerability of water resources to climate change: *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, no. 6, p. 1399-1410. (E1)
- Hurd, B., Brown, C., Greenlee, J., Granados-Olivas, A., and Hendrie, M., 2006, Assessing water-resource vulnerability for arid watersheds: GIS-based research in the Paso del Norte region, in Anderson, K.S.J., ed., *Science on the Border: New Mexico Journal of Science*, v. 46, p. 203-235. (E1-2, F1)
- Hutchison, W.R., 2006, Groundwater management in El Paso, Texas: Ph.D. Dissertation, Center for Environmental

- Resource Management, The University of Texas at El Paso. Dissertation.com, Boca Raton, FL, 329 p. (H1)
- International Boundary Commission (IBC), 1935, Final Report: Control and canalization of the Rio Grande, Caballo Dam, New Mexico to El Paso, Texas: p. 5. (E2)
- International Boundary Commission (IBC), 1936, Final Report: Control and canalization of the Rio Grande, Caballo Dam site, New Mexico to Courchesne Bridge at El Paso, Texas: p. 2-3. (E2)
- International Boundary and Water Commission (IBWC), 2010, Hydrogeological activities in the Conejos-Medanos/Mesilla Basin Aquifer, Chihuahua Phase I: Prepared by the International Boundary and Water Commission, and Mexican Geological Survey, v. 1, 109 p. See INEGI 2012. (F1)
- INEGI, 1983a, Ciudad Juárez H13-1, Cartas Geológica: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, SPP Programación y Presupuesto. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. Escala 1:250,000. (C2a)
- INEGI, 1983b, Ciudad Juárez H13-1, Cartas Hidrológica de Aguas: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, SPP Programación y Presupuesto. Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. Escala 1:250,000. (F3)
- INEGI, 1999, Estudio Hidrológico del Estado de Chihuahua: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Dirección General de Difusión, Aguascalientes, México, 222 p. ISBN 970-13-2077-8 <http://inegi.gob.mx> (F3)
- INEGI, 2012, Zona Hidrogeológica Conejos-Médanos: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Edificio Sede, Av. Héroe de Nacozari Sur 2301, Fraccionamiento Jardines del Parque, 20276, Aguascalientes, Aguascalientes; DR©2012, Impreso en México. www.inegi.org.mx; atencion.usuarios@inegi.org.mx (F3)
- James, H.L., 1969, History of the United States–Mexican boundary survey–1848-1855: New Mexico Geological Society, Guidebook 20, p. 40-55. (B3)
- Jasechko, S., Lechler, A., Pausata, F.S.R., Fawcett, P.J., Gleeson, T., Cendón, D.I., Galeewsky, J., LeGrande, A.N., Risi, C., Sharp, Z.D., Welker, J.M., Werner, M., Yoshimura, K., 2015. Late-glacial to late-Holocene shifts in global precipitation 180: *Climate Past*, v. 11, p. 1375–1393. (C1)
- Jiménez, A.J., and Keller, G.R., 2000, Rift basin structure in the border region of northwestern Chihuahua: New Mexico Geological Society Guidebook 51, p. 79-83. (C2b, C4, F2, H1)
- Julyan, R., 1996, The place names of New Mexico: Albuquerque, The University of New Mexico Press, 385 p. (A1, B3)
- Junge, C. E. and Werby, R. T., 1958, The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium, and sulfate in rain water over the United States: *Journal of Meteorology*, v. 15, p. 417-425. (C1, C3, D1)
- Keller, G.R., 2004, Geophysical constraints on the crustal structure of New Mexico, in Mack, G.H., and Giles, K.J., eds., *The Geology of New Mexico: A geologic history*: New Mexico Geological Society, Special Publication 11, p. 439-456. (C4)
- Keller, G.R., and Cather, S.M., eds., 1994, Basins of the Rio Grande rift: Structure, stratigraphy and tectonic setting: Geological Society of America Special Paper 291, 304 p. (C2b, C2c)
- Kelley, S., Augusten, I., Mann, J., and Katz, L., 2007, History of Rio Grande reservoirs in New Mexico: Legislation and litigation: *Natural Resources Journal*, v. 47, no. 3, p. 525-613. (E3)
- Kennedy, J.F., and Hawley, J.W., 2003, Late Quaternary paleohydrology of a linked pluvial-lake and Ancestral Rio Grande system, Paso Del Norte Region, Southwestern USA And Northern Mexico in *Shaping the Earth, a Quaternary Perspective: XVI INQUA Congress (July 23-30, 2003)*, Desert Research Institute, Reno, NV, Programs with Abstracts, p. 181. (F1, I2)
- Kennedy, J.F., Hawley, J.W., and Johnson, Molly, 2000, The hydrogeologic framework of basin-fill aquifers and associated ground-water-flow systems in southwestern New Mexico—an overview: *New Mexico Geological Society Guidebook 51*, p. 235-244. (F1)
- Kernodle, J. M., 1992, Summary of U.S. Geological Survey ground-water-flow models of basin-fill aquifers in the southwestern alluvial basins region, Colorado, New Mexico, and Texas: U.S. Geological Survey, Open-file Report 90-361, 81 p. (H3, D2)
- Kernodle, J.M., D.P. McAda, and C.R. Thorn. 1995. Simulation of Ground-water Flow in the Albuquerque Basin, Central New Mexico: U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 94-4251, 114 p. (D1, D2)
- King, W. E., Hawley, J. W., Taylor, A. M. and Wilson, R. P., 1969, Hydrogeology of the Rio Grande Valley and adjacent intermontane areas of southern New Mexico: New Mexico Water Resources Research Institute, WRRRI Report 6, 141 p. (H1)
- King, W. E., Hawley, J. W., Taylor, A. M. and Wilson, R. P., 1971, Geology and ground-water resources of central and western Doña Ana County, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Hydrologic Report 1, 64 p. (H1)
- Klein, D.P., 1995, Structure of the basins and ranges, southwest New Mexico, and interpretation of seismic

- velocity sections: U.S Geological Survey Open-File Report 95-406, 60 p. (with plates by G.A. Adams and P.L. Hill, scale 1:250,000 and 1:500,000). (C2c)
- Knorr, D.B., 1988, City of El Paso ground water recharge project, in Ortega-Klett, C.T., ed., *Ground Water Management, Proceedings of the 32nd Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report no. 229*, p. 87-101. (D2)
- Knorr, D.B., and Cliett, T., 1985, Proposed groundwater recharge at El Paso, Texas, in Asano, T., ed., *Artificial recharge of groundwater: Boston, Butterworth Publishers*, p. 425-479. (D2)
- Kocherga, Angela, 2018a, Summit looks at border water issues—Participants learn about desalination, cooperation as promising strategies: *Albuquerque Journal-Metro & New Mexico Section*, Sunday, March 4, 2018, p. A9-A10. (A3)
- Kocherga, Angela, 2018b, NM border visionary Charlie Crowder dies: *Albuquerque Journal-UPFRONT*, Friday, August 10, 2018, p. A1, A16. (A3)
- Konikow, L.F., and Leake, S.A., 2014, Depletion and capture: Revisiting “the source of water derived from wells.” *Ground Water*, v. 52 (suppl. 1), p. 100–111. (D1)
- Koning, D.J., and Read, A.S., 2010, Geologic map of the southern Española Basin, Santa Fe County, New Mexico: New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, Open-file Report 531. <https://geoinfo.nmt.edu/publications/openfile/details.cfm?Volume=531> (B1, D1)
- Koning, D. J., Jochems, A. P.; Heizler, M.T., 2018, Early Pliocene paleovalley incision during early Rio Grande evolution in southern New Mexico: *New Mexico Geological Society, Guidebook 69*, p. 93-108. Repository: 2018001 < <http://nmgs.nmt.edu/repository/index.cfm?rid=2018001> > (C2b)
- Kottlowski, F. E., 1958a, Geologic history of the Rio Grande near El Paso: *West Texas Geological Society, Guidebook 1958 Field Trip*, p. 46-54. (C2a)
- Kottlowski, F.E., 1958b, Lake Otero-second phase formation of New Mexico’s gypsum dunes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 33, p. 541-552. (I2)
- Kottlowski, F. E., 1960, Reconnaissance geologic map of Las Cruces 30-minute quadrangle: *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Geologic Map 14*. (C2a)
- Kubicki, C., Carroll, K.C., Witcher, J.C., and Robertson, A., 2021, An Integrated Geochemical Approach for Defining Sources of Groundwater Salinity in the Southern Rio Grande Valley of the Mesilla Basin, New Mexico and West Texas, USA: *Desalination and Water Purification Research Program Research and Development Office Report No. NMSU005*, Prepared for the Bureau of Reclamation under Agreement No. R16AC00002; NM Water Resources Research Institute, Technical Completion Report No. 388, 40 p., 3 Appendices. (H1, H2)
- Lawton, T.E., 2004, Upper Jurassic and lower Cretaceous strata of southwestern New Mexico and northern Chihuahua, Mexico, in Mack, G.H., and Giles, K.J., eds., *The Geology of New Mexico: A geologic history: New Mexico Geological Society, Special Publication 11*, p. 153-168. (C2b)
- Lee, E., and Ganster, P., eds., 2012, *The U.S.–Mexican border environment: Progress and challenges for sustainability: Southwest Consortium for Environmental Research and Policy, SCERP Monograph Series, no. 16*, 453 p., ISBN: 0-925613-53-3 <http://sdsupress.sdsu.edu/> (E2, E3)
- Lee, W. T., 1907, *Water resources of the Rio Grande Valley in New Mexico: U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 188*, 59 p. (C2a, F2, G1)
- Leeder, M.R., 1998, *Lyell’s Principles of Geology: foundations of sedimentology*, in Blundell, D.J. and Scott, A.C., eds., *Lyell: the past is the key to the present: Geological Society of London, Special Publication 143*, p. 97-110. (D1)
- Leggat, E. R., Lowry, M. E. and Hood, J. W., 1962, *Ground-water resources of the lower Mesilla Valley, Texas and New Mexico: Texas Water Commission, Bulletin 6203*, 191 p. (H1, H2)
- Lehner, F., Wahl, E.R., Wood, A.W., Blatchford, D.B., and Llewellyn, D., 2017, Assessing recent declined in Upper Rio Grande runoff efficiency from a paleoclimatic perspective: *Geophysical Research Letters*, v. 44, p. 4124-4133. (C1)
- Limón-González, M., 1986, Evaluación geológico--geoquímica de la provincia de Chihuahua: *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín, Tomo XXXVIII*, p. 3-58. (C2a, H2)
- Lisiecki, L.E., and Raymo, M.E., 2005, A Plio-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic ^{13}O records: *Paleoceanography*, v. 20, PA1003. doi: 10.1029/2004.PA001071. (B1, C1)
- Lister, F.C., and Lister, R.H., 1966, *Chihuahua, storehouse of storms: Albuquerque, The University of New Mexico Press*, 360 p. (B3)
- Littlefield, D.R., 2000, The history of the Rio Grande Compact of 1938, in Ortega-Klett, C.T., ed., *Proceedings of the 44th Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report 312*, p. 21-28. Accessed at <http://www.wrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc44/littlefield.pdf>. (E3)
- Love, D.W., Allen, B.D., Scholle, P.A., and Bustos, D., 2020, *White Sands National Park*, in Scholle, P.A., Ulmer-Scholle, D.S., Cather, S.M., and Kelley, S.A.,

- eds., *The Geology of Southern New Mexico's Parks, Monuments, and Public Lands*: N.M. Bureau of Geology and Mineral Resources. ISBN: 978-1-883905-48-4 <https://geoinfo.nmt.edu/publications/guides/nmparks/southern/home.cfml> (C2b, I2)
- Lovejoy, E. M. P., 1976, *Geology of Cerro de Cristo Rey uplift, Chihuahua and New Mexico*: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Memoir 31, 84 p. (C2a)
- Lovejoy, E. M. P., ed., 1979, *Sierra de Juarez, Chihuahua, Mexico: Structure and history*: El Paso Geological Society, Special Publication, 59 p. (C2a)
- Lucas, S. G., and Hawley, J. W., 2002, *The Otero Formation, Pleistocene lacustrine strata in the Tularosa Basin, southern New Mexico*: New Mexico Geological Society, Guidebook 53, p. 277-283. (I2)
- Lucas, S.G., Krainer, K., Spielmann, J.A., and Durney, K., 2010, *Cretaceous stratigraphy, paleontology, petrography, depositional environments, and cycle stratigraphy at Cerro de Cristo Rey, Doña Ana County, New Mexico*: New Mexico Geology, v. 32, no. 4, p. 103-130. (C2b)
- Machette, M.N., 1985, *Calcic soils of the southwestern United States*, in Weide, D.L., ed., *Quaternary soils and geomorphology of the American Southwest*: Geological Society of America Special Paper 203, p. 1-21. (C2a, C3)
- Machette, M., Thompson, R., Marchetti, D., and Smith, R.S.U., 2013, *Evolution of ancient Lake Alamosa and integration of the Rio Grande during the Pliocene and Pleistocene*, in Hudson, M.R., and Grauch, V.J.S., eds., *New Perspectives on Rio Grande Rift Basins: From Tectonics to Groundwater*: Geological Society of America Special Paper 494, p. 1-20. doi: 10.1130/2013.2494(01) (I3)
- Macías-Coral, M., Samani, Z., and Martínez, S.L., 2006, *Two countries-one common problem: How to deal with dairy manure along the United States-Mexico border*, in Anderson, K.S.J., ed., *Science on the Border*: N.M. Journal of Science, v. 44, p. 89-97. (E2c, F1)
- Mack, G.H., 2004, *Middle and late Cenozoic crustal extension, sedimentation, and volcanism in the southern Rio Grande rift, Basin and Range, and southern Transition Zone of southwestern New Mexico*, in Mack, G.H., and Giles, K.J., eds., *The Geology of New Mexico: A geologic history*: New Mexico Geological Society Special Publication 11, p. 389-406. (C2b)
- Mack, G.H., Dunbar, N., and Foster, R., 2009, *New sites of 3.1-Ma pumice beds in axial-fluvial strata of the Camp Rice and Palomas Formations, southern Rio Grande rift*: New Mexico Geology, v. 31, no. 2, p. 31-37. (C2b)
- Mack, G.H., Love, D.W., and Seager, W.R., 1997, *Spillover models for axial rivers in regions of continental extension: The Rio Mimbres and Rio Grande in the southern Rio Grande rift, USA*. *Sedimentology*, v. 44, p. 637-652. (C2b, I3)
- Mack, G.H., McIntosh, W.C., Leeder, M.R., and Monger, H.C., 1996, *Plio-Pleistocene pumice floods in the ancestral Rio Grande, southern Rio Grande rift, USA*: *Sedimentary Geology*, v. 103, p. 1-8. (C2b)
- Mack, G., H., Seager, W.R., Leeder, M.R., Perea-Arlucea, M., and Salyards, S.L., 2006, *Pliocene and Quaternary history of the Rio Grande, the axial river of the southern Rio Grande rift, New Mexico, USA*: *Earth-Science Reviews*, v. 77, p. 141-162, doi:10.1016/j.earscirev.2006.07.002. (C2b)
- Malagamba, Francisco A., 1990, *Troublesome equity in distribution of shared water resources: The U.S.-Mexico border*, in Ganster, P., and Walter, H., eds., *Environmental hazards and bioresource management in the United States-Mexico Borderlands*: Los Angeles, UCLA Latin American Center Publications, p. 13-21. (E3, F1)
- Mandel, Shmuel, 1979, *Problems of large-scale groundwater development*, in Back, W., and Stephenson, D.A., eds., *Contemporary hydrology – The George Burke Maxey Memorial Volume*: *Journal of Hydrology*, v. 43, no. 1/6, p. 439-443. *Seminal discussion of groundwater mining*. (D1)
- Manning, A.K., 2011, *Mountain-block recharge, present and past, in the eastern Española Basin, New Mexico, USA*: *Hydrogeology Journal*, v. 19, no. 2, p.379-397. DOI 10.1007/s10040-010-0696-8 (D2, H3)
- Márquez-Alameda, A., *Coordinador del volumen*, 1992, *Historia general de Chihuahua I – Geología, geografía y arqueología*: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y Gobierno del Estado Chihuahua, 307 p. (B2-3, C, F3)
- Maxey, G.B., 1964, *Hydrostratigraphic units*: *Journal of Hydrology*, v. 2, no. 2, p. 124-129. (D1)
- Maxey, G.B., 1968, *Hydrogeology of desert basins*: *Ground Water*, v. 6, no. 5, p. 1-22. (D1)
- Maxey, G.B., and Eakin, T.E., 1949, *Ground water in White River Valley, White Pine, Nye, and Lincoln Counties, Nevada*: Nevada State Engineer's Office, *Water Resources Bulletin* 8, 59 p. (D2)
- Maxey, G.B., and Shamberger, H.A., 1961, *The Humboldt River Research Project in Nevada*, in *Ground water in arid zones*: International Association of Scientific Hydrology, Publication No. 57, p. 437-454. (D1)
- McAda, D.P. and Barrow, P., 2002, *Simulation of groundwater flow in the Middle Rio Grande basin between Cochiti and San Acacia, New Mexico*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4200, 81 p. (D1)

- McFadden, L. D., 2013, Strongly dust-influenced soils and what they tell us about landscape dynamics in vegetated aridlands of the Southwestern United States: Geological Society of America Special Paper 500, p. 501-532. (C3)
- Meinzer, O.E., 1923, Outline of ground water hydrology, with definitions: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 494, 71 p. (D1)
- Meinzer, O. E. and Hare, R. E., 1915, Geology and water resources of the Tularosa Basin, New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 343, 317 p. (B2, C1, C2a, D1, G1, I2)
- Meixner, Thomas, Manning, A.H., Stonestrom, D.A., Allen, D.M., Ajami, Hoori, Blasch, K.W., Brookfield, A.E., Castro, C.L., Clark, J.F., Gochis, D.J., Flint, A.L., Neff, K.L., Niraula, Rewati, Rodell, Matthew, Scanlon, B.R., Singha, Kamini, and Walvoord, M.A., 2016, Implications of projected climate change for ground-water recharge in the western United States: *Journal of Hydrology*, v. 534, p. 124-138. [Also available at <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.027>.] (C1, D1)
- Merry, R.W., 2009, A country of vast designs – James K. Polk, the Mexican War, and the Conquest of the American Continent: New York, Simon & Schuster Paper Back edition, 576 p. (A2, B3)
- Metcalfe, S., Bimpson, A., Courtice, A.J., and O'Hara, S., 1997, Climate change at the monsoon/westerly boundary in northern Mexico: *Journal of Paleolimnology*, v. 17, p. 155-171. (B2, C1, F3, I2)
- Metcalfe, S., Say, A., Black, S., McCulloch, R., and O'Hara, S., 2002, Wet conditions during the last glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora basin, Mexico: *Quaternary Research*, v. 57, p. 91-101. (B2, C1, F3, I2)
- Mifflin, M.D., 1968, Delineation of Groundwater Flow Systems in Nevada: University of Nevada-Reno, Desert Research Institute, Technical Report Series H-W, Hydrology and Water Resources Publication 4, 109 p. (D1, D2)
- Mifflin, M.D., 1988, Region 5, Great Basin, in Back, W., Rosenshein, J.S., and Seaber, P.R., eds. *Hydrogeology—The Geology of North America*: Geological Society of America, Decade of North American Geology, v. 0-2, p. 69-78. (D1, D2)
- Mifflin, M.D., and Hess, J.W., 1979, Regional carbonate flow systems in Nevada: *Journal of Hydrology*, v. 43, p. 217-237. (D1, D2)
- Monger, H. C., Daugherty, L. A., and Gile, L. H., 1991, A microscopic examination of pedogenic calcite in an Aridisol of southern New Mexico, in Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum, and silica accumulation in soils: *Soil Science Society of America, Special Publication No. 26*, p. 37-60. (C3)
- Monger, H.C., Cole, D.R., Gish, J.W., and Giordano, T.H., 1998, Stable carbon and oxygen isotopes in Quaternary soil carbonates as indicators of ecogeomorphic changes in the northern Chihuahuan Desert, USA: *Geoderma*, v.82, p. 137-172. (B2, C1, C3)
- Monger, H.C., Gile, L.H., Hawley, J.W., and Grossman, R.B., 2009, The Desert Project – an analysis of aridland soil-geomorphic processes: N.M. State University Agricultural Experiment Station Bulletin 798, 76 p., <http://www.nmsu.edu> (A2, C2b, C3)
- Monreal, R., and Longoria, J., 1999, A revision of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous stratigraphic nomenclature for the Chihuahua trough, north-central Mexico: Implications for lithocorrelations, in Bartolini, C., Wilson, J.L., Lawton, T.F. (eds.), *Mesozoic Sedimentary and Tectonic History of North-Central Mexico*: Geological Society of America Special Paper 340, p. 69-92. (C2b, F3)
- Moore, S.J., Bassett, R.L., Liu, B., Wolf, C.P., and Doremus, D., 2008, Geochemical tracers to evaluate hydrogeologic controls on river salinization: *Ground Water*, v. 46, no. 3, p. 489-501. (E2a, F2, H2)
- Moorhead, M. L., 1958, *New Mexico's royal road, trade and travel on the Chihuahua Trail*: Norman, University of Oklahoma Press, 234 p. (A2, B3)
- Morrison, R. B., 1969, Photointerpretive mapping from space photographs of Quaternary geomorphic feature and soil associations in northern Chihuahua and adjoining New Mexico and Texas: *New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 116-129. (C2a, C3, E1, F1, I2)
- Mueller, J.E., 1975, *Restless river: International law and the behavior of the Rio Grande*: Texas Western Press, The University of Texas at El Paso, 155 p. (A2, B3, E3, F1)
- Mueller, J.E., 2000, An annotated guide to the artwork of the United States Boundary Commission, 1850-1853, under the direction of John Russell Bartlett: GEM Enterprises, 4120 Tesota Drive, Las Cruces, NM 88011, 228 p. (B3)
- Mumme, S.P., 1994, The North American Free Trade Agreement: The Environmental Side Agreement and Parallel Bilateral Border Accords: *Transboundary Resources Report*, v. 8, no. 3, p. 1-3. (E2, E3, F1)
- Mumme, S.P., 2010, Environmental governance in the Rio Grande watershed: Binational institutions and the transboundary water crisis—An agenda for strengthening binational water governance along the Rio Grande: *Journal of Transboundary Water Resources*, v. 1, p. 43-68. www.wrri.nmsu.edu (E2, E3, F1)
- Naus, C.A., 2002, Conceptual model of the bolson-fill aquifer, Soledad Canyon area, Doña Ana County, New Mexico: *New Mexico Geological Society Guidebook 53*, p. 309-318. (C2b, H1)

- Nelson, J.W., and Holmes, L.C., 1914, Soil Survey of the Mesilla Valley, New Mexico-Texas: U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 39 p. map scale 1:63,360. Shallow depth to water table shown in large no. soil-test borings. (C3, G1)
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P., Jr., and Jackson, J.A., 2005, Glossary of Geology (fifth edition): Alexandria, VA, American Geological Institute, 779 p. (A1)
- Nickerson, E. L., 1998, U.S. Geological Survey seepage investigations of the Lower Rio Grande in the Mesilla Valley, in Ortega Klett, C.T., ed., Proceedings of the 43rd Annual New Mexico Water Conference: Water Challenges on the Lower Rio Grande. New Mexico Water Resources Research Institute, Report No. 310, p. 59-68. (H3)
- Nickerson, E. L., 2006, Description of piezometers and ground-water-quality characteristics at three new sites in the Lower Mesilla Valley, Texas, and New Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5248, 27 p. Persistent URL: <http://pubs.water.usgs.gov/sir20055248> (H1, H2)
- Nickerson, E. L., and Myers, R.G., 1993, Geohydrology of the Mesilla ground-water basin, Doña Ana county, New Mexico, and El Paso County, Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4156, 89 p. (H1, H2)
- Nichols, G., 2015, Stratigraphic architecture of fluvial distributive systems in Basins of internal drainage: Search and Discovery Article #51145 (2015), 42 p. pdf – For related information contact author directly at Nautilus Ltd, Hermitage, Berkshire, United Kingdom g.nichols@nautiuswold.com (D1)
- Nordt, L., 2003, Late Quaternary fluvial landscape evolution in desert grasslands of northern Chihuahua, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 115, no. 5, p. 596-606. (B2, C1, C2b, F3)
- Omernik, J. M., 2004, Perspectives on the nature and definition of Ecological Regions: Environmental Management. p. 34 – Supplement 1, p.27-38. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-5197-2> (C1)
- Ordóñez, E., 1936, Physiographic provinces of Mexico: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 20, no.10, p. 1277-1307. (C, F3)
- Ordóñez, E., 1942, Las provincias fisiográficas de México: Revista Geografía de Instituto Panamericano Geografía e Historia, tomo. 1, nos.2 & 3. (C, F3)
- Ortega Klett, C.T., ed., 2000, The Rio Grande Compact: It's the Law: Proceedings of the 44th Annual New Mexico Water Conference, New Mexico Water Resources Research Institute Report No.310, 199 p. <http://wrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc/proc44/contents.html> (B3, E2, E3)
- Ortega-Ramírez, J.R., Valiente-Banuet, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Mortera-Gutierrez, C.A., and Alvarado-Valdéz, G., 1998, Paleoclimatic changes during the late Pleistocene-Holocene in Laguna Babicora, near the Chihuahuan Desert, Mexico: Canadian Journal of Earth Science, v. 35, p. 1168-1179. (B2, C1, F3, I2)
- O'Sullivan, J.L., 1839, The great nation of futurity: United States Magazine and Democratic Review, v. 6, no. 23, p. 426-430. Introduction of Manifest Destiny concept. (B3)
- O'Sullivan, J.L., 1845, Annexation: United States Magazine and Democratic Review, v. 17, no. 1 (July-August 1845), p. 5-10. First newsmedia use of term "Manifest Destiny." (B3)
- Overpeck, J.T, and Udall, B., 2020, Climate change and aridification of North America: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), v. 117, no. 22, p. 11856-11858. (C1, D1)
- Pacheco, Jerry, 2008, Foxconn can sharply alter border economy: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK-International Trade, Monday, August 11, 2008, p. 9. (A3)
- Pacheco, J., 2012, Southern N.M. rail project vast in impact: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK-Business Across the Border, Monday, January 9, 2012, p. 3. (A3)
- Pacheco, J., 2017a, Assaults on NAFTA can't dim the demand for trade: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, October 23, 2017, p. 9, 13. (A3)
- Pacheco, J., 2017b, Mexican envoy expresses concerns for NAFTA: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, December 4, 2017, p. 15. (A3)
- Pacheco, J., 2018a, U.S. industries ramp up their defense of NAFTA: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, February 12, 2018, p. 8. (A3)
- Pacheco, Jerry, 2018b, Visionaries transformed NM-Mexico border area: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, August 27, 2018, p. 12-13. (A3)
- Pacheco, J., 2018c, USMCA: The good, the bad, the ugly: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, October 8, 2018, p. 9. (A3)
- Pacheco, J., 2019a, NAFTA, USMCA and 'déjà vu all over again:' Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, July 15, 2019, p. 7, 9. (A3)
- Pacheco, J., 2019b, The impressive impact of trade with Mexico: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, September 9, 2019, p. 3. (A3)
- Pacheco, Jerry, 2020, Collaboration needed to keep rivers flowing: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, October 5, 2020, p. 8. (A3)

- Pacheco, Jerry, 2021, Texas energy grid crisis affected Mexico, trade: Albuquerque Journal—BUSINESS OUTLOOK, Monday, March 8, 2021, p. 8. (A3)
- Palacios-Fest, M.R., Carreño, A.L., Ortega-Ramírez, J.R., and Alvarado-Valdéz, G., 2002, A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babícora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry: *Journal of Paleolimnology*, v. 27, p. 185-206. (B2, C1, F3, I2)
- Parcher, J., and Hernández, A., 2008, U.S.-Mexico Border Geographic Information System: U.S. Department of the Interior-U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3069, 4 p. (E2, F1)
- Parcher, J.W., Woodward, D.G., and Duval R.A., 2010, A descriptive overview of the Rio Grande-Rio Bravo watershed: *Journal of Transboundary Water Resources*, v. 1, p. 159-177. www.wrri.nmsu.edu p. (E2, F1)
- Paskus, Laura, 2020, At the Precipice—New Mexico's Changing Climate: Albuquerque, University of New Mexico Press, 200 p. 978-0-8263-5911-7 (A2,, C1)
- Pattie, J.O., 1831, The personal narrative of James O. Pattie: Unabridged 1831 edition, with introduction by William H. Goetzmann, 1962: Philadelphia and New York, J.P. Lippincott Company-Keystone Western Americana series, 269 p. See comments on EPdN reach (10/23-28/1826) on p. 101-102. Note, however that parts of the “narrative,” like many of that era, contains lots of flamboyant self-promotion. (B3)
- Pazzaglia, F.J., 2005, River responses to Ice Age (Quaternary) climates in New Mexico, in Lucas, S.G., et al., eds., *New Mexico's Ice Ages: New Mexico Museum of Natural History & Science Bulletin No. 28*, p. 115-124. <http://nmnaturalhistory.org/bulletins> (C2b, I3)
- Pazzaglia, F.J., and Hawley, J.W., 2004, Neogene (rift flank) and Quaternary geology and geomorphology, in Mack, G.H., and Giles, K.J., eds., *The Geology of New Mexico: A geologic history: New Mexico Geological Society, Special Publication 11*, p. 407-438. (C2b)
- Pérez de Villagrà, Don Gáspar, 1962, *A History of New Mexico, Alcalá—1610* (Translated by Gilberto Espinosa, F.D. Hodge, ed.): Glorieta, NM, The Rio Grande Press, 308 p. p. 21, May 4 1498 Oñate party leaves EPdN and enters NM. (B3)
- Peterson, D. M., and Wilson, J. L., 1988, Variably saturated flow between streams and aquifers: New Mexico Water Resource Research Institute, Technical Completion Report, Project No. 1-3-45628, WRRRI Report No. 233, 289 p. (D2, H3)
- Peterson, D.M., Khaleel, R., and Hawley, J.W., 1984, Quasi three-dimensional modeling of groundwater flow in the Mesilla Bolson, New Mexico: New Mexico Water Resources Research Institute Technical Completion Report No. 178, project no. 1-3-45645, New Mexico State University, 185 p. <https://nmwrri.nmsu.edu/tr178/>. (H1, H3)
- Phillips, F.M., Hall, G.E., and Black, M.E., 2011, *Reining in the Rio Grande—People, Land, and Water: Albuquerque, University of New Mexico Press*, 252 p. (A2, B3, C1, D1, E3)
- Phillips, F.M., Hogan, J.F., Mills, S.K., and Hendrickx, J.M.H., 2003, Environmental tracers applied to quantifying causes of salinity in arid-region rivers: Preliminary results from the Rio Grande, southwestern USA, in Alsharhan, A.S., and Wood, W.W., eds., *Water resources perspectives: Evaluation, management and policy: Amsterdam, Elsevier*, p. 327-334. (D2, H2)
- Plummer, L.N., Bexfield, L.M., Anderholm, S.K., Sanford, W.E., and Busenberg, E., 2004, Geochemical characterization of ground-water flow in the Santa Fe Group aquifer system, Middle Rio Grande Basin, New Mexico: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 03-4141, 369 p., with CD-ROM. (D1, D2, H3)
- Poppa, Terrance, 1985, Vast water under Mexico's sands?: *El Paso Herald-Post (Metro)*, Thursday, February 14, 1985 (A3, F3)
- Powell, P.W., 1952, *Soldiers, Indians, and silver: The northward advance of New Spain, 1550-1600: Berkeley, University of California Press*, 317 p. (B3)
- Ramberg, I. B., Cook, F. A., and Smithson, S. B., 1978, Structure of the Rio Grande rift in southern New Mexico and West Texas based on gravity interpretation: *Geological Society of America Bulletin*, vol. 89, no. 1, p. 107-123. (C2a, C4)
- Rango, Albert, 2006, Snow: The real water supply for the Rio Grande basin, in Anderson, K.S.J., ed., *Science on the Border: New Mexico Journal of Science*, v. 44. p. 99-118. (C1, F1)
- Rebert, Paula, 2001, *La Gran Línea: The Report of the United States—Mexico boundary survey, 1849-1857: Austin, University of Texas Press*, 268 p. ISBN 0-292-77111-8. (B3)
- Rebert, Paula, 2005, View from the borderland: Mapping the United States and Mexican Boundary Survey, 1857-1859: *Terrae Incognitae—the Official Publication of The Society for the History of Discoveries*, v. 37, p. 75-90. (A2, B3, F1)
- Reeves, C. C. Jr., 1965, *Pluvial Lake Palomas, northwestern Chihuahua, Mexico; and Pleistocene geologic history of south-central New Mexico: New Mexico Geological Society Guidebook 16*, p. 199-203. (C2a, F3, I2, I3)
- Reeves, C. C. Jr., 1969, *Pluvial Lake Palomas, northwestern Chihuahua, Mexico: New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 143-154. (C2a, C4, F3, I2, I3)
- Reheis, M.C., Goodmacher, J.C., Harden, J.W., McFadden, L.D., Rockwell, T.K., Shroba, R.R., Sowers, J.M., and Taylor, E.M., 1995, Quaternary soils and dust

- deposition in southern Nevada and California: *Geological Society of America Bulletin*, v. 107, p. 1003-1022. (C3)
- Reyes Cortés, I.A., 1992, *Geología de Chihuahua*, in Márquez-Alameda, Arturo, Coordinador del volumen, 1992, *Historia general de Chihuahua I—geología, geografía y arqueología*: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y Gobierno del Estado Chihuahua, p. 45-101. (C2b, F3)
- Richardson, G.B., 1909, *Description of the El Paso quadrangle, Texas*: U.S. Geological Survey Geological Atlas, El Paso folio, ser. no. 116, 11 p. (G1)
- Richardson, G.L., Gebbard, T.G., Jr., and Brutsaert, W.F., 1972, *Water-table investigation in the Mesilla Valley: Las Cruces, New Mexico State University, Engineering Experiment Station Technical Report 76*, 206 p. (H3)
- Ríos, A.Á., 1999, *Capirotada: A Nogales memoir: Albuquerque*, The University of New Mexico Press, 145 p. ISBN 0-8263-20093-7. (A2,B3)
- Rittenhouse, J.D., 1965, *Disturnell's Treaty Map: The map that was part of the Treaty of Guadalupe Hidalgo on Southwestern Boundaries, 1848: Santa Fe, Stagecoach Press*, 20 p., with map. (B3)
- Robinson-Avila, K., 2020a, *Electric Rise in Wind, Solar—NM striding to 2020 renewable energy goal of 20% with several new projects on tap or online: Albuquerque Journal-BUSINESS OUTLOOK: TECH BYTES section*, Monday, June , 2020, p. A10-A11. (A3)
- Robinson-Avila, K., 2020b, *Electric Rise in Wind, Solar—NM striding to 2020 renewable energy goal of 20% with several new projects on tap or online: Albuquerque Journal-BUSINESS OUTLOOK: TECH BYTES section*, Monday, June , 2020, p. 10-11. (A3)
- Robinson-Avila, K., 2020c, *Rise in Wind, Solar—NM leaders look to build a renewable grid that's resilient too: Albuquerque Journal-BUSINESS OUTLOOK*, Monday, November 9, 2020, p. 10-11. (A3)
- Ruhe, R. V., 1964, *Landscape morphology and alluvial deposits in southern New Mexico: Annals of the Association of American Geographers*, v. 54, p. 147-159. (C2a)
- Ruleman, C.A., Hudson, A.M., Thompson, R.A, Miggins, D.P., Paces, J.B., and Goerhring, B.M., 2019, *Middle Pleistocene formation of the Rio Grande Gorge, San Luis Valle, south-central Colorado and north-central New Mexico, USA: Process, timing, and downstream implications: Quaternary Science Reviews*, v. 223, no. 105846, p. 1-48. www.elsevier.com/locate/quascirev (I3)
- Sálaz Márquez, R.D., 2004, *Epic of the Greater Southwest: New Mexico · Texas · California · Arizona · Oklahoma · Colorado · Utah · Nevada: Box 10515, Alameda, NM 87184, Cosmic House*, 620 p. ISBN 0-932492-06-1. (B3)
- Sandoval Solis, S., 2011, *Water planning and management for large scale river basins. Case of study: Rio Grande/ Rio Bravo transboundary basin: University of Texas at Austin, doctoral dissertation*. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/ETD-UT-2011-08-3772> (E2, E3, F1)
- Sanford, W.E., Plummer, L.N., McAda, D.P., Bexfield, L.M., and, Anderholm, S.K., 2004, *Hydrochemical tracers in the Middle Rio Grande basin, USA: 2. Calibration of a groundwater-flow model: Hydrogeology Journal*, v. 12, no. 4, p. 389-407. (D1, H2, H3)
- Sayre, A. N. and Livingston, P., 1945, *Ground-water resources of the El Paso area, Texas: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 919*, 190 p. (Sayre, A.N. and Livingston, P., 1945, *Ground-water resources of the El Paso area, Texas: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 919*, 190 p. (D1, F2, G2)
- Scanlon, B.R., 2004, *Evaluation of methods of estimating recharge in semiarid and arid regions in the southwestern U.S., in Hogan, J.E., Phillips, F.M., and Scanlon, B.R., eds., Groundwater recharge in a desert environment: the southwestern United States: Washington, DC, American Geophysical Union, Water Science and Application 9*, p. 235-254. (D2)
- Schmidt, R.H.Jr., 1973, *A geographical survey of Chihuahua: El Paso, Texas Western Press (UTEP), Southwestern Studies Monograph No. 37*, 63 p. (C1, C2a)
- Schmidt, R. H. Jr., 1979, *A climatic delineation of the "real" Chihuahuan Desert region: Phytologia*, v. 44, p. 129-133 (C1, F3)
- Schmidt, R. H. Jr., 1992, *Chihuahua, tierra de contrastes geográficos: Geografía*, in Márquez-Alameda, Arturo, Coordinador del volumen, 1992, *Historia general de Chihuahua I—geología, geografía y arqueología: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y Gobierno del Estado Chihuahua*, p. 45-101. (C2b, F3)
- Schmidt, R. H. Jr. and Marston, R. A., 1981, *Los Médanos de Samalayuca, Chihuahua, Mexico: New Mexico Journal of Science*, v. 21, no. 2, p. 21-27. (C2a, F3)
- Schumm, S.A., 1965, *Quaternary paleohydrology; in Wright, H. E. Jr. and Frey, D. C., eds., The Quaternary of the United States: Princeton, NJ, Princeton University Press*, p. 783-794. (C, D1)
- Secretaria de Programación y Presupuesto (SPP), 1981, *Carta Hidrológica: Aguas Subterráneas, Chihuahua: Escala 1:1,000,000*. (F3)
- SRH (Secretaria de Recursos Hidráulicos), 1988, *Resultados de las perforaciones por la S.A.R.H. en la zona de Conejos Médanos Chihuahua—Programa de exploración: SRH Departamento de Aguas del Subsuelo, Anexos 2 y 3. See Gutiérrez-Ojeda 2001*, p. 26. (F3)
- Seager, W. R., 1989, *Geology beneath and around the West Portrillo basalts, Doña Ana and Luna Counties, New*

- Mexico: New Mexico Geology, v. 11, p. 53-59. (C2a, F2)
- Seager, W. R., 1995, Geology of southwest quarter of Las Cruces and northwest El Paso 1° x 2° sheets: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Geologic Map 60, scale 1:125,000. (C2b, C4, F2)
- Seager, W. R., 2004, Laramide (late Cretaceous to Eocene) tectonics of southwestern New Mexico, in Mack, G.H., and Giles, K.J., eds., *The Geology of New Mexico: A geologic history*: New Mexico Geological Society, Special Publication 11, p. 183-202. (C2b)
- Seager, W. R. and Mack, G. H., 1994, Geology of the East Potrillo Mountains and vicinity, Doña Ana County, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Bulletin 113, 27 p. (C2b, F2)
- Seager, W. R. and Morgan, P., 1979, Rio Grande rift in southern New Mexico, west Texas and northern Chihuahua, in Riecker, R. E., ed., *Rio Grande rift, tectonics and magmatism*: Washington D.C., American Geophysical Union, p. 87-106. (C2a, C4, F1)
- Seager, W. R., Kottowski, F. E. and Hawley, J. W., 2008, Geologic Map of the Robledo Mountains and vicinity, Doña Ana County, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Open-File Report 509, scale 1:24,000, CD-ROM. <http://geoinfo.nmt.edu/publications/maps/geologic/ofgm/> (C2b)
- Seager, W. R., Mack, G. H., and Lawton, T.F., 1997, Structural kinematics and depositional history of a Laramide uplift-basin pair in southern New Mexico: Implications for development of intraforeland basins: *Geological Society of America Bulletin*, v. 107, p. 1389-1401. (C2b)
- Seager, W. R., Hawley, J. W., Kottowski, F. E. and Kelley, S.A., 1987, Geologic map of east half of Las Cruces and northeast El Paso 1° x 2° sheets, New Mexico: New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources, Geologic Map, GM-57, scale 1:125,000, 3 sheets. (C2a, C4, F2)
- Sharp, J.M., Jr., 2001, Regional groundwater flow systems in basins in Trans-Pecos Texas, in Mace, R.E., Mullican, W.F. III, and Angle, E.S., eds., *Aquifers of West Texas*: Austin, Texas Water Development Board Report 356, p. 66-75. (D1, D2)
- Sheng, Z., 2005, An aquifer storage and recovery system with reclaimed wastewater to preserve native groundwater resources in El Paso, Texas: *Journal of Environmental Management*, v. 75, issue 4, p. 367-377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.10.007> (E2b, E2c)
- Sheng, Z., and Devere, J., 2005, Understanding and managing the stressed Mexico-USA transboundary aquifer in the Hueco bolson aquifer in the El Paso del Norte region as a complex system: *Hydrogeology Journal*, v. 13, no. 5-6, p. 813-825. (E2, F1)
- Sheng, Z., and Helm, D.C., 1994, Displacement discontinuity modeling of fissuring caused by groundwater withdrawal, in Siriwardane, H.J., and Zaman, M.M., eds., *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, WV, USA: Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema, p. 1263-1268. (D1)
- Sheng, Z., Helm, D.C., and Li, J., 2003, Mechanisms of earth fissuring caused by groundwater withdrawal: *Journal of Environmental Geosciences*, v. 9, no. 4, p. 313-324. (D1)
- Sheng, Z., Darr, M., King, J.P., Bumgarner, J., and Michelsen, A., 2013, Mesilla Basin/Conejos-Médanos section of the Transboundary Aquifer Assessment Program, in Alley, W.M., ed., *Five-year interim report of the United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program: 2007-2012*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1059, 31 p. (F1)
- Siegel, D. 2008, *Reductionist hydrogeology: ten fundamental principles: Hydrological Processes*, v. 22, p. 4967-4970—Published online 10 November 2008 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.7139. (D1)
- Siegel, D.J., 2020, The future of geoscience in the context of emerging climate disruption: *GSA Today*, v. 30, no. 2, p. 4-5. (B3, C1, D1)
- Siegel, D.J., and Hinchey, E. J., 2019, Big data and the curse of scale: *Groundwater*, v. 57, no. 4, p. 505. (D1)
- Slichter, C.S., 1905, Observations on ground waters of the Rio Grande valley: U.S. Geological Survey Water-Supply and Irrigation Paper 141, 83 p. (G1)
- Smith, G. I., 1966, Geology of Searles Lake – a guide to prospecting for buried continental salines, in *Second Symposium on Salt*, Cleveland, Northern Ohio Geological Society, p. 167-180 (D1, I1)
- Smith, G. I. and Street-Perrott, F. A., 1983, Pluvial lakes of the western United States, in Porter, S. C., ed., *Late Quaternary environments of the United States*, volume 1, *The Late Pleistocene*: Minneapolis, University of Minnesota Press, p. 190-212. (B2, C1, I1)
- Snyder, J. T., 1986, Heat flow in the southern Mesilla Basin, with an analysis of East Potrillo geothermal system, Doña Ana County, New Mexico; New Mexico State University, master's thesis, 252 p. (C4, F2, H1)
- Sonnichsen, C.L., 1968, *Pass of the North, four centuries on the Rio Grande*: The University of Texas at El Paso, Texas Western Press, 469 p. See comments on EPdN reach on pp.14-17, 29, 79, 89-91,106-107,132,135-136,147,262, 282-284. (A2, B3)
- Spagat, E., 2020, Contracting laws for Border Wall will be waived—Homeland Security says move will speed construction: *Albuquerque Journal-Metro & New Mexico*, Wednesday, February 19, 2020, p. A7-A8. (A3)

- Spaulding, W. G. and Graumlich, L. J., 1986, The last pluvial climatic episode of southwestern North America: *Nature*, v. 320, p. 441-444. (B2, C1)
- SSURGO, 2002/2003: Soil Survey Geographic Database of the National Resources Conservation Service (NRCS) for Doña Ana County, provided by the Elephant Butte Irrigation District. Also available online at: <http://soildatamart.nrcs.usda.gov/Download.aspx?Survey=NM690&UseState=NM> (C3)
- Stanton, J.S., Anning, D.W., Brown, C.J., Moore, R.B., McGuire, V.L., Qi, S.L., Harris, A.C., Dennehy, K.F., McMahon, P.B., Degnan, J.R., and Böhlke, J.K., 2017, Brackish groundwater in the United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1833, 185 p., <https://doi.org/10.3133/pp1833>. (D1, E2a)
- Stein, R., Kanamatsu, T., Alvarez-Zarikian, C., Higgins, S.M., Channell, J.E.T., Aboud, E., Ohno, M., Acton, G.D., Akimoto, K., Bailey, I., Bjørklund, K.R., Evans, H., Nielsen, S.H.H., Fang, N., Ferretti, P., Gruetznier, J., Guyodo, Y.J.B., Hagino, K., Harris, R., Hatakeda, K., Hefter, J., Judge, S.A., Kulhanek, D.K., Nanayama, F., Rashid, H., Sierro Sanchez, F. J., Voelker, A., and Zhai, Q., 2006, North Atlantic Paleogeography: The Last Five Million Years: *Eos Transactions American Geophysical Union*, v. 87, no. 13, p. 29-33. DOI: 10.1029/2006EO130002 (B1, B2)
- Stonestrom, D.A., Constantz, J., Ferré, T.P.A., and Leake, S.A., eds., 2007, Ground-water recharge in the arid and semiarid southwestern United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1703, 414 p., pubs.usgs.gov/pp/pp1703/. (A2, D2)
- Strain, W. S., 1966, Blancan mammalian fauna and Pleistocene formations, Hudspeth County, Texas: *Texas Memorial Museum, Bulletin 10*, 55 p. (B1, C2a)
- Strain, W. S., 1971, Late Cenozoic bolson integration in the Chihuahua tectonic belt, in *The geologic framework of the Chihuahua tectonic belt: West Texas Geological Society, Publication No. 71-59*, p. 167-173. (C2a)
- Suthersan, S., Quinnan, J., Horst, J., Ross, I., Kalve, E., Bell, C., and Pancras, T., 2016, Making strides in management of “Emerging Contaminants,” in *Advances in Remediation Solutions: Groundwater Monitoring & Remediation*, v. 36, no. 1, p. 16-25. See Fig. 1 and USEPA 2015. (E2c)
- Sweetkind, D.S., 2017, Three-dimensional hydrogeologic framework model of the Rio Grande transboundary region of New Mexico and Texas, USA, and northern Chihuahua, Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017-5060, 49 p. <https://doi.org/10.3133/sir20175060>
- Sweetkind, D.S., 2018, Digital 3D geologic framework of the Las Cruces area: *N. M. Geological Society, Guidebook 69*, p. 60-62. (H1)
- Sweetkind, D.S., Hanson, R.T., Ritchie, A.B., and Hawley, J.W., 2017, Data release of Three-Dimensional Hydrogeologic Framework Model of the Rio Grande Transboundary Region of New Mexico and Texas, USA and Northern Chihuahua, Mexico: U.S. Geological Survey data release. (H1) <https://doi.org/10.5066/F7JM27T6>; <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/586c36ede4b0f5ce109fa88f>
- Székely, Alberto [Ambassador], 2010, Albert E. Utton Memorial Lecture—2003: *Journal of Transboundary Water Resources* (Ward, E.M., and Barrantes, E.A., eds.), v. 1, p. 189-198. www.wrri.nmsu.edu (E3)
- Tamayo, J.L., 1968, *Geografía moderna de México (Quinta edición revisada): México, D.F., Editorial F. Trillas, S.A.*, 382 p. See: Las regiones geomórficas – Sierra Madre Occidental (p. 43) and Altiplanicie Septentrional (p. 52-53); Vertientes interiores endorreicas – cuencas de las Lagunas Guzman, Santa María y Patos (p. 142-143); and Chihuahua-Potosinense Provincia biótica (p. 162). (A1, F3)
- Teclaff, Ludwik. A., 1982, Principles of transboundary pollution control: Mexico-Symposium on Anticipating Transboundary Resource Needs and Issues in the U.S.-Mexico Border Region to the Year 2000: *Natural Resources Journal*, v. 22, p. 1065--1079. (E2c, E3)
- Teeple, A.P., 2017, Geophysics- and geochemistry-based assessment of the geochemical characteristics and groundwater-flow system of the U.S. part of the Mesilla Basin/Conejos-Médanos aquifer system in Doña Ana County, New Mexico, and El Paso County, Texas, 2010–12: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017-5028, 183 p., <https://doi.org/10.3133/sir20175028>. ISSN: 2328-0328 (online) (C4, H1, H2)
- Texas Water Development Board (TWDB), 1997, Appendix C—G.I.S. coverages, metadata descriptions, [and] groundwater data sets on CD-ROM, with Water Quality map* insert on back-cover; in Hibbs and 9 others, *Transboundary Aquifers of the El Paso/Ciudad Juarez/Las Cruces Region*: U.S. Environmental Protection Agency, Region 6; Technical Contract Report- Interagency Contracts X-996343-01-0 and X-996350-01-0, prepared by the Texas Water Development Board and the New Mexico Water Resources Research Institute, variously paged. *Map includes Stiff diagrams color-coded for four total dissolved solids classes [0-1,000, 1,000-3,000, 3,000-5,000, and >5,000 mg/L] for more than 200 wells in Doña Ana and Otero Counties, NM; El Paso and Hudspeth Counties, TX; and contiguous parts of Chihuahua. (F1, H1, H2)
- Texas Water Development Board (TWDB), 2010, *Desalination plants: Texas Water Development Board*

- database, accessed June 11, 2015, at <http://www2.twdb.texas.gov/apps/desal/DesalPlants.aspx>. (E2a)
- Texas Water Development Board (TWDB), 2015, Brackish resources aquifer characterization system (BRACS): Texas Water Development Board Web site, accessed March 1, 2013, at <http://www.twdb.texas.gov/innovativewater/bracs/>. (E2a)
- Thompson, S., III, 1982, Oil and gas exploration wells in southwestern New Mexico, in Powers, R.B., ed., *Geologic studies of the Cordilleran thrust belt: Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook to Field Conference*, v. 2, p. 521-536. (C2a)
- Thompson, S., III, Tovar-R., J.C., and Conley, J.N., 1978, Oil and gas exploration wells in the Pedregosa Basin: *New Mexico Geological Society Guidebook 29*, p. 331-342. (C2a)
- Thorn, C.R., McAda, D.P. and Kernodle, J.M., 1993, Geohydrologic framework and hydrologic conditions in the Albuquerque Basin, central New Mexico: U. S. Geological Survey, *Water-Resources Investigations Report 93-4149*, 106 p. (D1, D2)
- Tillery, S., Sheng, Z., King, J.P., Creel, B., Brown, C., Michelsen, A., Srinivasan, R., and Granados-Olivas, A., 2009, The development of a coordinated database for water resources and flow model in the Paseo del Norte watershed (phase III)—Part II, availability of flow and water quality data for the Rio Grande Project area: *New Mexico Water Resources Research Institute Technical Completion Report no. 348, Part II*, and *Texas Water Resources Institute Technical Report 359, Part II*, 14 p., accessed September 25, 2017, at <https://nmwrri.nmsu.edu/wp-content/uploads/2015/technical-reports/tr348ii.pdf>. (H2, H3)
- Tillman, F.D., Pool, D.R., and Leake, S.A., 2015, The effect of modeled recharge distribution on simulated groundwater availability and capture: *Groundwater*, v. 53, no. 3, p. 378-388. (D2, 1)
- Tolman, C. F., 1909, Erosion and deposition in southern Arizona bolson region: *Journal of Geology*, v. VII, no. II, p. 136-163. (B, G1)
- Tolman, C.F., 1937, *Ground Water: New York*, McGraw-Hill Book Co., Inc. 593 p. (C2a, G1)
- Tompkins, Frank, 1934, *Chasing Villa: Harrisburg, PA*, Military Service Publishing Company; Silver City, NM, High-Lonesome Books reprint, 272 p. ISBN-13:978-0944383391 (B)
- Tovar-R, J., Vázquez, H., Lozano, S., 1978, Interpretación integrada geológica-geofísica, porción norte de Chihuahua: *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Boletín*, Tomo XXX, p. 59-132. (C2a, C4)
- Underwood, J.R., Jr., 1980, Physiographic features, Trans-Pecos region: *New Mexico Geological Society Guidebook 31*, p. 57-58. (C2a, F2)
- United States (US) and Mexico, 1907, *Convention between the United States and Mexico Equitable Distribution of the Waters of the Rio Grande: Signed at Washington, May 21, 1906: ratification advised by the Senate, June 26, 1906; ratified by the President, December 26, 1906; ratified by Mexico, January 5, 1907; ratifications Exchanged at Washington, January 16, 1907; and proclaimed, January 16, 1907: Washington, DC; U.S. GPO*, 3 p. (E3)
- United States-Mexico Transboundary Aquifer Act (US-MX TAA) , 2006, Public Law no. 109-448, 120 Statute 3328, Cornell University Law School Legal Information Institute, p. S.214—1-5. Access at https://www.law.cornell.edu/topn/united_states-mexico_transboundary_aquifer_assessment_act. (E3)
- U.S. Bureau of Reclamation (USBOR), 2011, *Reclamation—Managing water in the west—Rio Grande Project*: at http://www.usbr.gov/projects/Project.jsp?proj_Name=Rio%20Grande%20Project. (E2)
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2015, The third unregulated contaminant monitoring rule (UCMR3): data summary. <http://water.epa.gov/lawregs/rulesregs/sdwa/ucmr/ucmr3/index.cfm> See Suthersan et al. 2016. (E2c)
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 2019, Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) action plan- EPA Publication 100K20002. http://water.epa.gov/sites/production/files/2020-01/documents/pfas_action_plan_feb2020.pdf (E2c)
- U.S. Geological Survey (USGS), 1965, Magnitude and frequency of floods in the United States—Part 8, Western Gulf of Mexico basins; U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1682, p. 418-422. (C1)
- U.S. Geological Survey (USGS), 2017, U.S. Geological Survey National Water Information System: <https://dx.doi.org/10.5066/F7P55KJN> (C1, E2)
- U.S. Geological Survey (USGS), ND, *Water Resources Data, Calendar Year Streamflow Statistics: Online data retrieval system*, URL <http://water.usgs.gov/nm/nwis/sw>. (C1, I3)
- U.S. Reclamation Service, 1914, *Maps of Mesilla Valley, showing various known river channels: U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Rio Grande Project*. (B, G1)
- Utton, A.E., 1983, *Some International Aspects of Groundwater Development in the Mexico-United States Frontier Region: UNM School of Law, Natural Resources Center Report to The Governor's Law Study Committee*, 58 p. (E3)
- Utton, A.E., 1994, Water and the arid Southwest: An international region under stress: *Natural Resources Journal*, v. 34, no. 4, p. 957-961. (E3)
- Utton, A.E., 1996, *Remarks made by Professor Al Utton upon receiving an award of appreciation at the 40th*

- Annual Water Conference, in Ortega Klett, C.T., ed., *Reaching the Limits: Stretching the Resources of the Lower Rio Grande*, Proceedings of the 40th Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report No. 297, p. viii-ix-12. (E3)
- Utton, A.E., and Atkinson, C.K., 1979, *International groundwater management: The case for the Mexico-United States frontier*: N. M. Water Resources Research Institute, WRRI Project No. 1345626, New Mexico State University, Technical Completion Report 109, 130 p. (E3)
- Utton, A.E., and Atkinson, C.K., 1981, *International groundwater management: The case for the Mexico-United States frontier*, in Teclaff, L.A., and Utton, A.E., eds., *International Groundwater Law*: New York, Oceana Publications, Inc., p. 175-188. (E3)
- Utton, A.E., and Atkinson, C.K., 1983, *La Administración Internacional de Aguas Subterráneas: El Caso de la Región Fronteriza México-Estados Unidos*: Boletín Mexicano de Derecho Comparado - UNAM Instituto de Investigación Jurídicas: Nuevo Serie, Año XVI, Mayo-Agosto de 1983, No. 47. (E3)
- Van Devender, T. R., 1990, *Late Quaternary vegetation and climate in the Chihuahuan Desert, United States and Mexico*, in Betancourt, J. L., Van Devender, T. R., and Martin, P.S., eds., *Packrat middens, the last 40,000 years of biotic change*: Tucson, The University of Arizona Press, p. 104-133. (C1)
- Van Devender, T. R., 1995, *Desert grassland history: Changing climates, evolution, biogeography, and community dynamics*, in McClaren, M.P., and Van Devender, T. R., P. S., eds., *The desert grassland*: Tucson, University of Arizona Press, p. 68-99. (C1)
- Van West, C.R., Windes, T.C., Levine, F., Grissino-Mayer, H.D., and Salzer, M.W., 2013, *The role of climate in early Spanish-Native American interactions in the US Southwest*, in Mathers, C., Mitchem, J.M., and Haecker, C.M. (eds.), *Native and Spanish New Worlds—Sixteenth-Century Entradas in the American Southwest and Southeast (Amerind Studies in Anthropology Series)*: Tucson, The University of Arizona Press, p. 81-98. (B2, C1)
- Villagran, L., 2017a, *Reflecting on my years of covering borderlands*: Albuquerque Journal, Wednesday, June 14, 2017, p. A9, A16. (A3)
- Villagran, L., 2017b, *Two nations, one aquifer—Border water at risk*: Albuquerque Journal, Sunday, June 25, 2017, p. A1, A8, A9. (A3)
- Villagran, L., 2017c, *Two nations, one aquifer—‘We have a voice but nobody listens’—Lack of potable water forces many Juárez residents to subsist on brackish wells*: Albuquerque Journal, Sunday, June 25, 2017, p. A1, A3. (A3)
- Wagner, J.D.M., Cole, J.E., Beck, J.W., Patchett, P.J., Henderson, G.M., Barnett, H.R., 2010. *Moisture variability in the southwestern United States linked to abrupt glacial climate change*. *Nature Geoscience*, v. 3, p. 110–113. (C1)
- Walker, J.S., Brown, C., and Fernald, S., 2015, *Use of the DRASTIC Model to Evaluate Groundwater Pollution Sensitivity from On-Site Wastewater Systems in the Mesilla Basin*: WRRI Technical Completion Report No. 367, 98 p. (E2)
- Walker, M.J.C., Head, M. J., Berkelhammer, M., Bjorck, S., Cheng, H., Cwynar, L., et al., 2018, *Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/subseries*. *Episodes*, v. 41, no. 4, p 213–223. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2018/018016> (B1, C1)
- Waltemeyer, S.D., 2008, *Analysis of the magnitude and frequency of peak discharge and maximum observed peak discharge in New Mexico and surrounding areas*: U. S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2008-5119, 105 p. (D2)
- Walton, J., Ohlmacher, G., Utz, D., and Kutianawala, M., 1999, *Response of the Rio Grande and shallow ground water in the Mesilla Bolson to irrigation, climate stress, and pumping*: *Environmental & Engineering Geoscience*, v. V, no. 1, p. 41-50. (H2, H3)
- Ward, F.A., Mayer, A.S., Garnica, L.A., Townsend, N.T., and Gutzler, D.S., 2019, *The economics of aquifer protection plans under climate water stress: New insights from hydroeconomic modeling*: *Journal of Hydrology*, v. 576, 667-684. (E2)
- Wasiolek, Maryann, 1995, *Subsurface recharge to the Tesuque aquifer system from selected drainage basins along the western side of the Sangre de Cristo Mountains near Santa Fe, New Mexico*. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 94-4072, 43 p. (D2)
- Wasserman, M., 2015, *Pesos and politics: Business, elites, foreigners, and government in Mexico*: Palo Alto, CA, Stanford University Press, 257 p. ISBN 9780804791540. (B3)
- Wasserman, M., 2017, *Tragedy and opportunity in Mexican mining during the Revolution: Stories from the Engineering and Mining Journal*: *The Mining History Association 2017 Journal*, p. 40-52. (B3)
- Webb, D.S., 1969, *Facets the geology of the Sierra del Presidio area, north-central Chihuahua*: *New Mexico Geological Society Guidebook 20*, p. 182-186. (C2a, F3)
- Weber, D.J., 1982, *The Mexican frontier, 1821-1846: The American Southwest under Mexico*: Albuquerque, University of New Mexico Press, 416 p. (B3)

- Weber, D.J., 1992, *The Spanish frontier in North America: New Haven, The Yale University Press*, 602 p. ISBN: 9780300051988 (B3)
- Weissmann, G., Hartley, A., and Nichols, G., 2011, Alluvial facies distribution in continental sedimentary basins—distributive fluvial systems, in Davidson, S., Leleu, S., and North, C., eds., *Rock to rock record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation: SEPM (Society for Sedimentary Geology)*, v. 79, p. 327-355. ISBN: 978-1-56576-305-(D1)
- West, F., 1996, *The Mesilla Valley: A century of water resources investigations*, in Ortega Klett, C.T., ed., *Reaching the Limits: Stretching the Resources of the Lower Rio Grande*, Proceedings of the 40th Annual New Mexico Water Conference: New Mexico Water Resources Research Institute Report No. 297, p. 21-28. (D1, H3)
- Western Water Assessment (WWA) - Rio Grande TreeFlow 2008 Tree-ring reconstruction of streamflow and climate for the Rio Grande basin and adjacent basins [including Rio Grande near Otowi, NM from 1450-2002]: University of Colorado at Boulder. (B2, B3, C1, D1)
- Wilkins, D.W., 1986, *Geohydrology of the Southwest Alluvial Basins, Regional Aquifer-systems analysis in parts of Colorado, New Mexico, and Texas: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Reports 84-4224*, 61 p. (D1, F2)
- Wilkins, D.W., 1998, *Summary of the Southwest Alluvial Basins, regional aquifer-systems analysis in parts of Colorado, New Mexico, and Texas: U.S. Geological Survey Professional Paper 1407-A*. 49 p. (D1, F2)
- Williams, A.P., Cook, E.R., Smerdon, J.E., Cook, B.I., Abotzoglou, J.T., Bolles, K., Baek, S.H., Badger, A.M., and Livneh, B., 2020, Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought: *Science*, v. 368, issue 6488, p. 314-318. DOI: 10.1126/science.aaz9600 (B3, C1)
- Wilson, C. A., White, R. R., Orr, B. R. and Roybal, R. G., 1981, *Water resources of the Rincon and Mesilla Valleys and adjacent areas, New Mexico: New Mexico State Engineer, Technical Report 43*, 514 p. (F2, H1, H2)
- Wilson, J.L., and Guane, H., 2004, Mountain-block hydrology and mountain-front recharge, in *Groundwater recharge in a desert environment: the southwestern United States: Washington, DC, American Geophysical Union, Water Science and Application 9*, p. 113-137. (D2)
- Winograd, I.J., and Thordarson, W., 1975, *Hydrogeologic and hydrogeochemical framework, South-Central Great Basin, Nevada-California, with special reference to the Nevada Test Site: U.S. Geological Survey Professional Paper 712-C*, 126 p. (D1)
- Witcher, J.C., King, J.P., Hawley, J.W., Kennedy, J.F., Williams, J., Cleary, M., and Bothern, L., 2004, *Sources of Salinity in the Rio Grande and Mesilla Basin Groundwater: New Mexico Water Resources Institute, Technical Completion Report—Account No. 01-4-23960B*, New Mexico State University, Las Cruces, 168 p., with appendices and plates on CD ROM. (C2b, E2a, H1, H2)
- Wolf, C., Ewing, A., and Yuhas, K. (Abstract), 2020, *Securing water supply for Albuquerque, New Mexico using managed aquifer recharge: Program with abstracts, Water, Energy, and Policy in a Changing Climate Conference, National Groundwater Association (NGWA), Albuquerque, NM, Feb. 24 – 25, 2020*. (E2b)
- Woodward, D., and Duval R., 1996, *United States-Mexico Border Area, as delineated by a shared-water resource perspective—Fact sheet 1: United States Department of the Interior U.S.–Mexico Border Field Coordinating Committee*, 4 p. (E2, F1)
- Woodward, L. A., Callender, J. F., Seager, W. R., Chapin, C. E., Gries, J. C., Schaffer, W. L. and Zilinski, R. E., 1978, *Tectonic map of the Rio Grande rift region in New Mexico, Chihuahua, and Texas; in Hawley, J.W., compiler, Guidebook to the Rio Grande rift in New Mexico and Colorado: N.M. Bureau of Mines and Mineral Resources, Circular 163, Sheet 2, scale approx. 1:1,000,000*. (C2a, F1)
- York, J. C., and Dick-Peddie, W. A., 1969, *Vegetation changes in southern New Mexico during the past hundred years*, in McGinnies, W. G. and Goldman, B. J., *Arid lands in perspective: Tucson, The University of Arizona Press*, p. 155-166. (B3, C1)
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Williams, M., and Summerhayes, C. (eds.) 2019a. *The Anthropocene as a geological time unit: A guide to the scientific evidence and current debate*. Cambridge, UK; Cambridge University Press, 361 p. (B1, B2, B3, C1, D1)
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Ellis, E.C., Head, M.J., Vidas, D., Steffen, W., Thomas, J.A., Horn, A., Summerhayes, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Gałuszka, A., Williams, M., Barnosky, A.D., Richter, D. deB., Gibbard, P.L., Syvitski, J., Jeandel, C., Cearreta, A., Cundy, A.B., Fairchild, I. J., Rose, N.L., Ivar do Sul, J.A., Shotyk, W., Turner, S., Wagemann, M., and Zinke J., 2021, *The Anthropocene: comparing its meaning in geology (chronostratigraphy) with conceptual approaches arising in other disciplines: AGUPUBS Online Library, Wiley.com*, 44 p (B1, B2, B3, C1, D1) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020EF001896>
- Zwanzinger, J.A., 1992, *New concepts in Mesozoic stratigraphy of Chihuahua*, in Goodell, P.C., Garcia-

Gutiérrez, C., and Reyes-Cortés, I., eds., Energy Resources of the Chihuahua Desert region: El Paso Geological Society, p. 77-124 (C2b, F3)

I1—Regional Overviews
I2—Transboundary Region Paleohydrologic Systems
I3—Evolution of the Rio Grande Fluvial System

Appendix. Topic/Subtopic Categories, with Alphanumeric Cross-Reference Codes (Hawley et al. 2021-APNDX. B)

A—Bibliographies, Dictionaries, Biographies, Glossaries, Reviews, and News Items

A1—Bibliographies, Dictionaries, and Glossaries

A2—Biographies and Reviews

A3—News Items

B—History, Prehistory, and Geologic Time

B1—Time: Geologic and Prehistoric

B2—Prehistoric Perspective: US Southwest and Northern Mexico

B3—Historic Perspective: US Southwest and Northern Mexico

C—Environmental, Physiographic, and Geologic Setting

C1—Climatic, Hydrographic, Ecologic, and Paleoenvironmental Setting

C2—Geologic and Geomorphic Setting

C2a—Geologic and Geomorphic Setting: Pre-1990

C2b—Geologic and Geomorphic Setting: Post-1989

C3—Soil-Geomorphic Relationships and Soil Surveys

C4—Geophysical/Geochemical Data and Interpretations

D—Basic Hydrogeologic Concepts

D1—Conceptual Models and Regional Overviews

D2—Groundwater-Flow Systems, Including Recharge

E—GIS/Remote Sensing and Resource Management/Planning

E1—GIS/Remote Sensing

E2—Resource Management/Planning

E2a—Desalination

E2b—Recharge and Recovery

E2c—Groundwater-Quality Protection and Waste Management

E3—Legal and Environmental Issues and Constraints

F—Regional Transboundary Hydrogeology and Geohydrology

F1—Binational

F2—USA

F3—México

G—Early Documents on Mesilla Basin Region Aquifer Systems (1875-1960)

G1—1875-1935

G2—1935-1960

H—Contemporary Documents on Mesilla Basin Region Aquifer Systems

H1—Hydrogeology

H2—Hydrochemistry

H3—GW-Flow Models

I—Paleohydrology: Ancestral Fluvial and Pluvial Lake Systems

