

The background features a stylized globe with a grid of latitude and longitude lines. Overlaid on the globe are numerous silhouettes of various types of trees, including deciduous and coniferous species, arranged in a circular pattern around the globe.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas

**Clima, recursos hídricos, vulnerabilidad
social y deforestación**

Luis Carlos Bravo Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
(Coordinadores)

DR © Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo
(por coordinación)

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Avenida Plutarco Elías Calles 1210
Fovissste Chamizal, CP 32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tels. +52 (656) 688 2100 al 09

Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas: clima, recursos hídricos, vulnerabilidad social y deforestación / Coordinadores Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo.-- Ciudad Juárez, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2019.

184 páginas.

ISBN: 978-607-520-354-6

Contenido: Introducción.-- Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut / Ana Karen García Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Luis Carlos Bravo Peña, Lara Cecilia Wiebe Quintana.-- Diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable mediante Sistemas de Información Geográfica en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua: recomendaciones / Yadira Iveth Ibarra Pérez, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Mario Iván Uc Campos, Luis Carlos Bravo Peña.-- Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imágenes landsat para el año 2013 / Heber Javier García Cortés, Lara Cecilia Wiebe Quintana, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Hugo Luis Rojas Villalobos, María Elena Torres Olave.-- Prospección de indicadores de respuesta frente al abatimiento del acuífero, una exploración entre menonitas y mestizos de la región de Cuauhtémoc, Chihuahua / Jessica Iveth Cera Campos, Luis Carlos Bravo Peña, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Ramón Leopoldo Moreno Murrieta, María Elena Torres Olave.-- Predicción de áreas susceptibles a deforestación del suroeste de Chihuahua, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de regresión lineal múltiple / Héctor Obed Castro Beltrán, Luis Carlos Bravo Peña, María Elena Torres Olave, Lara Cecilia Wiebe Quintana.

Estaciones climatológicas – 2000 -2011 - Chihuahua.

Red de agua potable - Diagnóstico (SIG) - Cuauhtémoc, Chihuahua.

Laguna de Bustillos - Precipitación pluvial.

Recursos hídricos (Indicadores) — Cuauhtémoc, Chihuahua.

Deforestación - Chihuahua - Sistemas de Información Geográfica

HD1696.M6 G46 2019

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvo a cargo de la Dirección General de Comunicación Universitaria, a través de la Subdirección de Editorial y Publicaciones

Coordinación editorial:

Mayola Renova González

Cuidado editorial:

Subdirección de Editorial y Publicaciones

Diseño de portada y diagramación:

Karla María Rascón

Primera edición, 2019

elibros.uacj.mx



Contenido

Introducción 7

Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut

Ana Karen García Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Luis Carlos Bravo Peña
Lara Cecilia Wiebe Quintana 9

Diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la red de agua potable mediante Sistemas de Información Geográfica en Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua: recomendaciones

Yadira Iveth Ibarra Pérez
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Mario Iván Uc Campos
Luis Carlos Bravo Peña 33

Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imágenes landsat para el año 2013

Heber Javier García Cortés
Lara Cecilia Wiebe Quintana
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Hugo Luis Rojas Villalobos
María Elena Torres Olave 71

Prospección de indicadores de respuesta frente al abatimiento del acuífero, una exploración entre menonitas y mestizos de la región de Cuauhtémoc, Chihuahua

Jessica Iveth Cera Campos
Luis Carlos Bravo Peña
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Ramón Leopoldo Moreno Murrieta
María Elena Torres Olave 101

Predicción de áreas susceptibles a deforestación del suroeste de Chihuahua, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos de regresión lineal múltiple

Héctor Obed Castro Beltrán
Luis Carlos Bravo Peña
María Elena Torres Olave
Lara Cecilia Wiebe Quintana 143

Dinámica del crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos utilizando imágenes Landsat para el año 2013

Heber Javier García Cortés
Lara Cecilia Wiebe Quintana
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Hugo Luis Rojas Villalobos
María Elena Torres Olave

Resumen

La escasez de agua perjudica el desarrollo de las actividades económicas, el equilibrio de los ecosistemas, la sobrevivencia de los seres vivos, el bienestar de las poblaciones y propicia la limitación de la biodiversidad. Por ello, el objetivo en la presente investigación es evaluar y registrar la relación entre el crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos, Chihuahua, México, en función de la cantidad de lluvia ocurrida durante el ciclo 2013, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e Imágenes Landsat 8 de la Cuenca Hidrológica No 34.

Para este trabajo se midió la superficie que ocupa el área de inundación de la Laguna de Bustillos mediante series de imágenes Landsat, de abril de 2013-diciembre 2013 usando el software ArcGis. Se utilizó la red climatológica de Unifrut para obtener los datos de precipitación de cuatro estaciones meteorológicas. El análisis de las imágenes satelitales permitió evaluar

quincenalmente el crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos. Los resultados mostraron un incremento de la superficie en el área de inundación en función de la precipitación pluvial, y se pudo establecer una ecuación polinomial de quinto grado, con un coeficiente de determinación muy alto ($r^2=0.9908$).

Palabras clave: crecimiento del área de inundación, Laguna de Bustillos, Sistemas de Información Geográfica, red climatológica, precipitación pluvial.

Dynamic growth of flooding area of Laguna de Bustillos using Landsat images for the year 2013

Summary

Water scarcity harms the development of economic activities, the balance of ecosystems, the survival of living things, the welfare of the people and propiciates limitation of biodiversity. Therefore, the objective of this research was to assess and record the relationship between growth floodplain of Laguna Bustillos, Chihuahua, Mexico, depending on the amount of rainfall that occurred during the 2013 cycle, using Geographic Information Systems (GIS) and Landsat 8 for Watershed No 34. For this work, the area that occupies the floodplain of Lake Bustillos was measured by a series of Landsat images from April 2013 - December 2013 using the ArcGIS software. UNIFRUT climatological network was used to obtain precipitation data from four weather stations. Analysis of satellite images allowed biweekly assess growth floodplain of Laguna Bustillos. The results showed an increase in area in the floodplain depending on rainfall, and could establish a polynomial equation of fifth grade, with a very high coefficient of determination ($r^2 = 0.9908$).

Keywords: growth floodplain, Laguna de Bustillos, Geographic Information Systems, climatological network, storm water.

Introducción

Los impactos del cambio climático son cada día más evidentes, observables y cuantificables. El año 2010 fue el más caluroso en todo el mundo (Oswald, 2011), sin embargo, los países firmantes del Protocolo de Kioto han retrasado un nuevo convenio que sustituya dicho protocolo y mantener el aumento de la temperatura de la Tierra debajo de los 2° C. No obstante, las predicciones para un uso intensivo del petróleo, indican que pudiera incrementar los niveles de temperatura hasta más de 6 °C y provocar desastres nunca conocidos, generando hambrunas en muchos países.

El cambio climático requerirá una nueva visión del manejo del agua a fin de hacer frente a los impactos en las precipitaciones mayores y más extremas, así como mayores variaciones intra e interestacionales y tasas más elevadas de evapotranspiración en todos los tipos de ecosistemas. Los fenómenos climáticos extremos como inundaciones y sequías van aumentando y se calcula que su frecuencia y magnitud se incrementen y que probablemente afecten de forma considerable a todas las regiones en lo que respecta a la producción de alimentos en general y a la seguridad alimentaria (Wei et al., 2009).

Debido a todo esto, existe un riesgo serio de conflictos futuros por tierras habitables y recursos naturales tales como el agua dulce. El cambio climático está afectando a la distribución de plantas, las especies invasoras, las plagas y los vectores de enfermedades y es posible que aumenten la incidencia y la localización geográfica de muchas enfermedades del ser humano, los animales y las plantas (IAASTD, 2008, Wei et al., 2009). La Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y la Alimentación (FAO, 2009), delimita como causas de este tipo de problemáticas al cambio de uso de suelo, en América del Norte; a la demografía principalmente en el incremento de la población urbana; la economía, en donde sobresale una mejoría en aquellos países industrializados por su baja dependencia de actividades primarias como la agricultura, además de tener mejores esquemas de conservación de recursos naturales, políticos e instituciones basadas en la comunidad como un diseño para el manejo de recursos

naturales, y finalmente, el impulso de ciencia y tecnología para mejorar la competitividad y sustentabilidad de los sectores productivos.

Según Núñez et al. (2007), la sequía es uno de los fenómenos naturales más complejos y el que a más personas afecta; tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio; sus efectos son acumulativos y pueden permanecer aun después de la culminación del evento. Dadas estas características que la distinguen de otros fenómenos naturales, la sequía se clasifica en meteorológica, hidrológica y agrícola.

Reyes et al. (2012) han propuesto numerosas definiciones de sequía y cada una involucra diversos factores ambientales, sociales y económicos. La carencia de una definición clara y universalmente aceptada contribuye a controversias sobre este fenómeno.

Ortega (2013) reporta que la severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, su duración o su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas.

Según Hernández et al. (2007), aunque el término sequía no se menciona en la definición, se sabe que es uno de los factores más significativos que contribuyen a la degradación del suelo en las regiones áridas. Sin embargo, las actividades humanas son la principal causa de este proceso.

Algunas estimaciones indican que cerca del 10% de la superficie de la tierra del planeta ha sido transformada por la acción humana. Convirtiendo en desiertos las áreas forestales y praderas. Por otra parte, más de un 25% de la tierra se encuentra en riesgo de degradación (World Resources Institute, 1990).

México no es ajeno a estas problemáticas y se puede decir que se está cada vez más consciente de la importancia de crear grupos dedicados a la modelación numérica para trabajar en conjunto a nivel nacional, con la finalidad de constituir un equipo

de expertos que genere información climática de utilidad para quienes se encargan de planear y tomar decisiones usando pronósticos o escenarios climáticos (Magaña, 2004; Hernández et al., 2007).

En el norte México la cantidad de lluvia representa menos de 40% de la precipitación total del país, esta región es altamente vulnerable a impactos causados por sequías. En el estado de Chihuahua, la precipitación pluvial es muy variable; se presentan años con cantidades normales o abundantes seguidos por otros donde son escasas. Entre el año 1993 y 2004 la precipitación fue menor al promedio histórico (CNA, 2003).

El 74% de la superficie del estado de Chihuahua se encuentra en esta región, y la precipitación media anual es 448 mm; cerca de 83% de la lluvia total se pierde por evaporación y transpiración, y solo 17% es aprovechada por los sectores productivos y para uso doméstico (CNA, 1996).

Lizárraga et al. (2010) definieron una regionalización climatológica en México usando 18 regiones climáticas, con datos de 50 años (1953-2003). El estado de Chihuahua fue clasificado en la región 5, con una precipitación media anual de 446 mm, de los cuales 74 mm ocurren durante el invierno y 372 mm en el verano, equivalentes al 83% del total. La sequía más importante para el estado de Chihuahua fue la registrada de 1992 al 2003 (11 años), con un déficit de 56 mm año⁻¹, lo que equivale al 12% de la lluvia media anual, con lo cual el crecimiento de la vegetación, principalmente matorral, es de 5 a 7 meses.

Chihuahua ha sido afectado por eventos de sequía que ocasionan pérdidas considerables, principalmente en los sectores agropecuario y forestal (Rodríguez, et al., 2005). Debido a esto, el gobierno del estado ha canalizado recursos a través del Fondo Nacional de Desastres para atender los daños.

El problema de la sequía en Chihuahua es grave, ya que es el mayor consumidor de agua en el sector agrícola en la República Mexicana —emplea alrededor del 80% del agua que se extrae de los ríos, lagos y acuíferos—. Otros sectores usuarios del

agua son el doméstico y el industrial. Aproximadamente, el 12% del agua es utilizada para satisfacer las necesidades de uso doméstico en los centros urbanos de México, lo cual lo ubica como el segundo consumidor de agua (Muñoz y Núñez, 2005).

En Chihuahua, la escasez del agua obedece, entre otras causas, a la irregular distribución espacial y temporal de la lluvia; es decir, los regímenes bajos de precipitación se presentan en donde la densidad de población es más alta y donde se concentra la mayor parte de las actividades económicas de las que subsisten los habitantes del estado. En el estado de Chihuahua se registra una precipitación promedio anual de 419 mm, lo que lo ubica entre las primeras cuatro entidades federativas que registran las precipitaciones más bajas a nivel nacional (CNA, 2003). Debido a esto, la cantidad disponible es, en muchas ocasiones, insuficiente para cubrir las necesidades de uso e impacta seriamente la recarga de cuerpos de agua y acuíferos subterráneos (CNA, 2003).

En el estado de Chihuahua se localiza la región hidrológica No. 34, la cual tiene una extensión de 3277 Km², según la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1989). En esta región se encuentra una depresión natural, la Laguna de Bustillos. Amado et al., (1999) reportaron que en la citada laguna desembocan los escurrimientos superficiales de 13 arroyos. La Laguna de Bustillos alberga la contribución de diversos elementos, por procesos naturales, sumándole una rigurosa contaminación debido a diversas actividades antropogénicas (Rubio et al., 2006). Este cuerpo lacustre, que se encuentra entre los más importantes a nivel nacional, es recolector de residuos industriales, aguas residuales urbanas y arrastres aluviales de zonas agrícolas o pecuarias (De la Fuente, 1998; Quintana et al., 2014).

En la actualidad, existen diversas herramientas computacionales que contribuyen a la realización de estudios sobre el manejo integrado de los recursos naturales; entre estas herramientas se destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten analizar la variabilidad espacial y temporal de los

diferentes parámetros necesarios para llevar a cabo estudios de esta naturaleza (Esteller et al., 2003).

Por ello, el objetivo principal de este estudio es evaluar y registrar la relación entre el crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos en función de la cantidad de lluvia ocurrida durante el ciclo 2013, tomando como base los Sistemas de Información Geográfica e Imágenes Landsat de la Cuenca Hidrológica No. 34. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar imágenes satelitales del ciclo 2013, a fin de obtener información sobre el crecimiento del área de inundación en la Laguna de Bustillos;
2. Obtener mediante modelos estadísticos una ecuación matemática que permita determinar el comportamiento del área de inundación en función de la precipitación pluvial, utilizando datos meteorológicos.
3. Determinar el volumen de agua de lluvia que aportó al área de estudio durante el 2013, mediante el método de polígonos de Thiessen.

Hipótesis

Por medio de la aplicación de técnicas de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica es posible determinar si el embalse de la Laguna de Bustillos se recuperó de manera significativa con las precipitaciones pluviales del ciclo 2013.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

Localización.- La Laguna de Bustillos (Figura 1) está situada en el seccional de Anáhuac en el Municipio de Cuauhtémoc,

Chihuahua, rodeada de los poblados de Ciudad Cuauhtémoc y Bustillos (CNA, 1991). Dicho cuerpo de agua se extiende aproximadamente por 302.7 km². Tiene una longitud promedio de 16.5 km, un ancho de 7.5 km, una profundidad media de 1.2 m y una capacidad aproximada de 148 000 000 m³ de agua. Su polígono se encuentra ubicado en latitud 28°58'12"-28°15'00" N-longitud 107°09'36"-106°15'00" W. La cuenca hidrográfica que drena hacia la laguna se caracteriza por tener una planicie que tiene una elevación media de 2000 msnm (CNA, 1991).

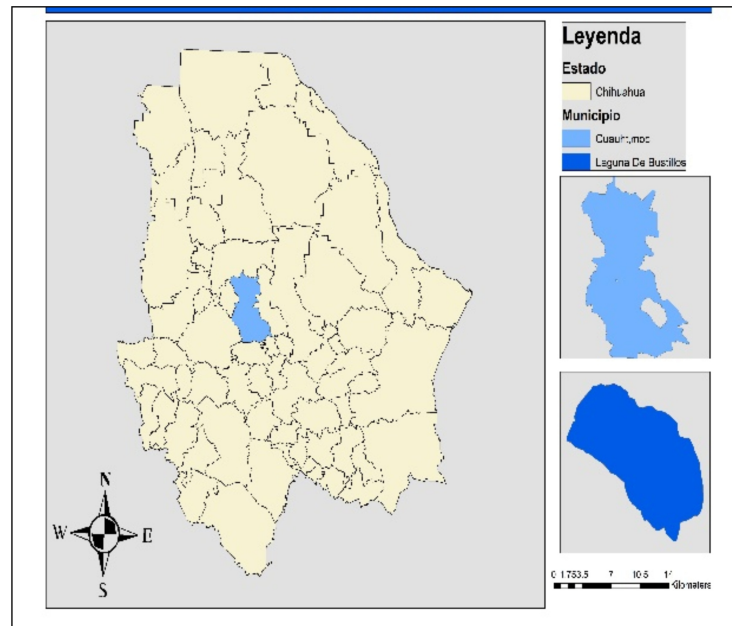


Figura 1. Ubicación de área de estudio.

Características de la cuenca. - Según García et al., (2013), la corteza se encuentra compuesta por capas sedimentarias continentales: conglomerados, depósitos lacustres, depósitos de pie de monte y aluviales. Las sierras que delimitan la cuenca presentan una elevación media de 2400 msnm y en cuanto a litología se refiere, están formadas principalmente por rocas ígneas extrusivas-ignimbritas, riolitas, dacitas, andesitas y basaltos.

Clima.- El área de estudio presenta una precipitación media anual de 415.7 mm, así como clima semiseco templado con una temperatura media anual de 14.6 °C (Conagua, 2010). En el año 2011 se registró una precipitación de 74.2 mm, que estuvo muy por debajo de los registrados desde 1985 (Figura 2).

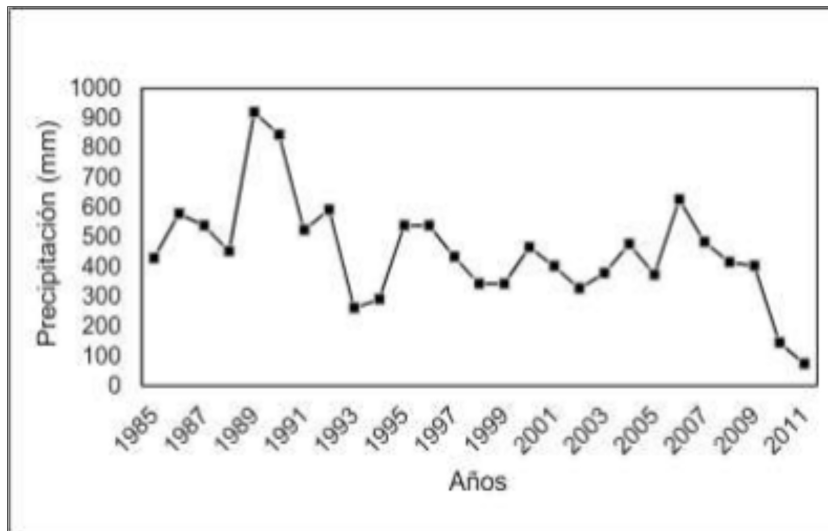


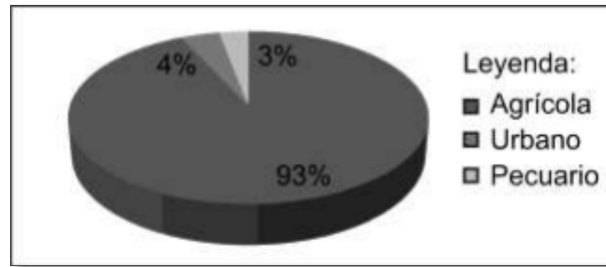
Figura 2.- Precipitación media anual en el área de estudio para el periodo 1985-2011.

Panorama sobre el agua.- En Chihuahua, el problema de la escasez del agua obedece, entre otras causas, a la irregular distribución espacial y temporal de la lluvia, es decir, los regímenes bajos de precipitación se presentan en donde la densidad de población es más alta y donde se concentra la mayor parte de las actividades económicas de las que subsisten los habitantes del estado. Debido a esto, la cantidad de agua disponible es insuficiente para cubrir las necesidades de uso e impacta seriamente la recarga de cuerpos de agua y acuíferos subterráneos (CNA, 2003).

Una característica primordial de la zona es que el acuífero se recarga únicamente por el agua de lluvia, con una media anual en tan solo 115 Hm³ (Conagua y COLPOS, 2007). Si esto se asocia a la sequía que se ha presentado en las últimas décadas, se puede prever la posible afectación por una sobreexplotación del acuífero, sobre todo si se considera que actualmente se

extraen 569.4 Hm³ (Conagua, 2009), de los cuales el 92.7% son destinados para uso agrícola, el 4% para el sustento de la zona urbana y un 3.3% se destinan para actividades pecuarias (Figura 3).

Figura 3.- Porcentaje de extracción de agua por uso (CNA, 2009).



Análisis temporal del comportamiento del área de inundación

Para este trabajo se utilizaron 15 imágenes del satélite Landsat 8, con una resolución espacial de 30 metros. Se utilizaron todas las bandas espectrales de la 1 a la 7 y la 9. Las fechas de las imágenes corresponden a los meses de abril a diciembre del año 2013, lo cual permitió un buen registro de los cambios en el cuerpo de agua de la Laguna Bustillos.

Las imágenes fueron adquiridas de página web <http://earthexplorer.usgs.gov/>, la cual pertenece a United States Geological Survey (USGS). Los datos de adquisición de cada una de las imágenes se pueden apreciar en el Cuadro 1.

Corrección atmosférica.- Se enfrentaron diversos problemas al utilizar imágenes de satélite como lo son las Landsat 8, uno de ellos es el “ruido atmosférico”, lo que lleva a perturbaciones en la imagen que dificultan su utilización o que arrojarían resultados erróneos o alejados de la realidad (Alatorre & Beguería, 2009).

Este problema se presentó en forma de nubosidad en las imágenes primera, del 8 de julio; la segunda, del 24 de julio; la tercera, del 25 de agosto y la última del 10 de septiembre de este mismo año, en las cuales no fue posible realizar ningún tipo de

corrección atmosférica, mientras que en el resto de las imágenes se efectuó, mediante el software IDRISI™ Taiga, una corrección con el propósito de una mejor discriminación del área de inundación, lo cual se traduce en una correcta interpretación visual y espacial entre las imágenes.

Cuadro 1.- Características de las imágenes Landsat 8.

Sensor	Path	Row	Fecha de captura	ID referente
Landsat 8	33	40	19 de abril 2013	LC80330402013109LGN01
Landsat 8	33	40	05 de mayo 2013	LC80330402013125LGN01
Landsat 8	33	40	21 de mayo 2013	LC80330402013141LGN01
Landsat 8	33	40	06 de junio 2013	LC80330402013157LGN00
Landsat 8	33	40	22 de junio 2013	LC80330402013173LGN00
Landsat 8	33	40	08 de julio 2013	LC80330402013189LGN01
Landsat 8	33	40	24 de julio 2013	LC80330402013205LGN00
Landsat 8	33	40	09 de agosto 2013	LC80330402013221LGN00
Landsat 8	33	40	25 de agosto 2013	LC80330402013237LGN00
Landsat 8	33	40	10 de septiembre 2013	LC80330402013253LGN00
Landsat 8	33	40	26 de septiembre 2013	LC80330402013269LGN00
Landsat 8	33	40	12 de octubre 2013	LC80330402013285LGN00
Landsat 8	33	40	29 de noviembre 2013	LC80330402013333LGN00
Landsat 8	33	40	15 de diciembre 2013	LC80330402013349LGN00
Landsat 8	33	40	31 de diciembre 2013	LC80330402013365LGN00

Fuente: elaboración propia

Se realizó una combinación entre las bandas de las imágenes, las cuales se eligieron mediante una visualización previa de composiciones de color verdadero y falso color. La composición de falso color, combinando las bandas 4, 5 y 6, fue la composición que ayudó a discriminar los cuerpos de agua presentes en el área de estudio.

Posteriormente, se trabajó en ARCMAP™, exportando las imágenes trabajadas en IDRISI™, primeramente realizando un *shapefile* para cada imagen con el fin de delimitar el área de inundación por mes.

Después se agregó un campo en la tabla de atributos llamado "área" y a través del comando Calculate Geometry se realizó el cálculo en metros cuadrados para cada imagen. Luego se realizó el mismo procedimiento para calcular el perímetro para cada imagen en metros.

Análisis temporal de la precipitación

Por medio de Unifrut se obtuvieron los datos de precipitación anual para el área de estudio. Para esto se contó con valores por día para el año 2013 con los datos de cuatro estaciones: a) Estación Quinta Lupita, localizada en latitud $28^{\circ} 26' 49.4''$ y longitud $106^{\circ} 52' 39.9''$; b) Estación Zona Dorada, latitud $28^{\circ} 24' 49.2''$ y longitud $106^{\circ} 49' 42.1''$; c) Estación Álvaro Obregón Rubio, latitud $28^{\circ} 45' 56.6''$ y longitud $106^{\circ} 55' 03.3''$, y d) Estación San José de la Herradura, latitud $28^{\circ} 24' 49.2''$ y longitud $107^{\circ} 00' 54.2''$ (Figura 5). Se obtuvo la precipitación promedio de cada una de las cuatro estaciones meteorológicas.

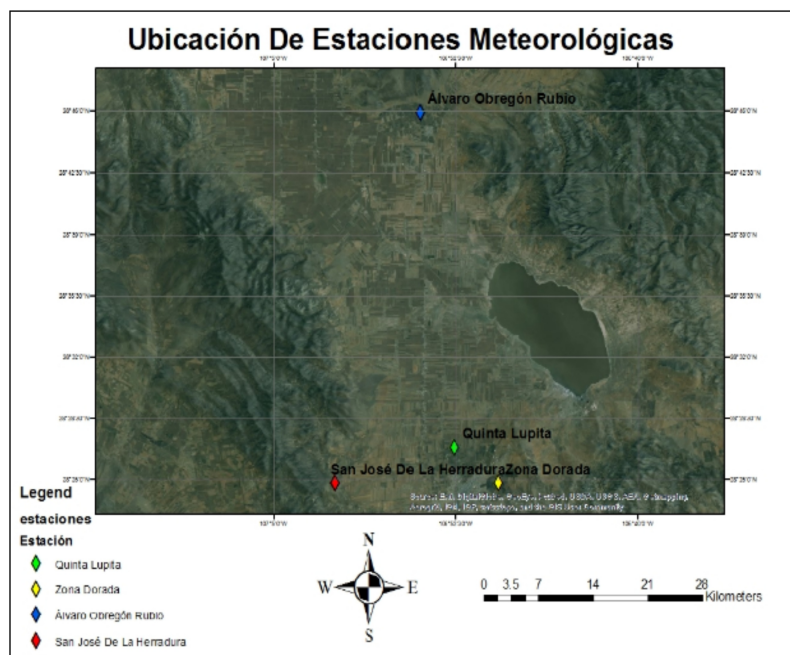


Figura 4. Ubicación de las 4 estaciones meteorológicas.

Relación entre precipitación y área

Para establecer una relación puntual entre la precipitación y las imágenes de satélite, se calculó la precipitación quincenal haciendo el corte para la fecha de cada imagen disponible. Luego se obtuvo la media aritmética de las cuatro estaciones para los periodos estipulados. Cabe mencionar que para las imágenes que no fue posible aplicar la corrección atmosférica, se utilizó la función trend de Microsoft Excel, que permite estimar valores faltantes con base en el comportamiento de las variables independientes conocidas y los resultados de las variables dependientes para cada parámetro, los cuales fueron el 8 y 24 de julio, 25 de agosto, 10 de septiembre, 28 de octubre y 13 de noviembre. Dado que se buscó una relación directa entre la precipitación y el área de inundación de manera temporal, se parte de la premisa de que no toda el agua que precipita se evapora, es por ello que se calculó la precipitación media acumulada y se ajustó, usando regresión polinomial, una función de quinto grado, donde la variable independiente es la precipitación en milímetros y la variable dependiente es el área de la inundación en kilómetros cuadrados.

Análisis espacial del volumen de agua precipitada

Considerando el área total de la Cuenca Hidrológica de la Laguna de Bustillos, se estimó la superficie que ocupa cada estación meteorológica dentro de la cuenca y asimismo el volumen de lluvia que aporta cada una de ellas. Mediante la utilización de polígonos de Thiessen se obtuvieron las cartografías con el área en km^2 que ocupa cada estación dentro de la cuenca y otra con el volumen de lluvia en hm^3 que aporta cada estación dentro de la misma cuenca.

Resultados

Análisis temporal del comportamiento del área de inundación

El análisis de las imágenes satelitales permitió evaluar quincena con quincena el crecimiento del área de inundación de la Laguna de Bustillos en la región de Anáhuac, Chihuahua, facilitando así el entendimiento de la recuperación de dicho cuerpo de agua, adquiriendo datos espaciales y cuantitativos de su crecimiento. La obtención de 11 cartografías para los diferentes periodos permite realizar una comparación visual de los resultados, como se muestra en la serie de figuras de la 5 a la 15; se aprecia claramente que para la imagen del 21 de mayo de 2013 (Figura 7) el área de inundación alcanzó el mínimo, del periodo de estudio, mientras que en la imagen del 26 de septiembre obtuvo la mayor área de inundación (Figura 11) y en las imágenes posteriores se mantuvieron estables con cambios mínimos del área de inundación.

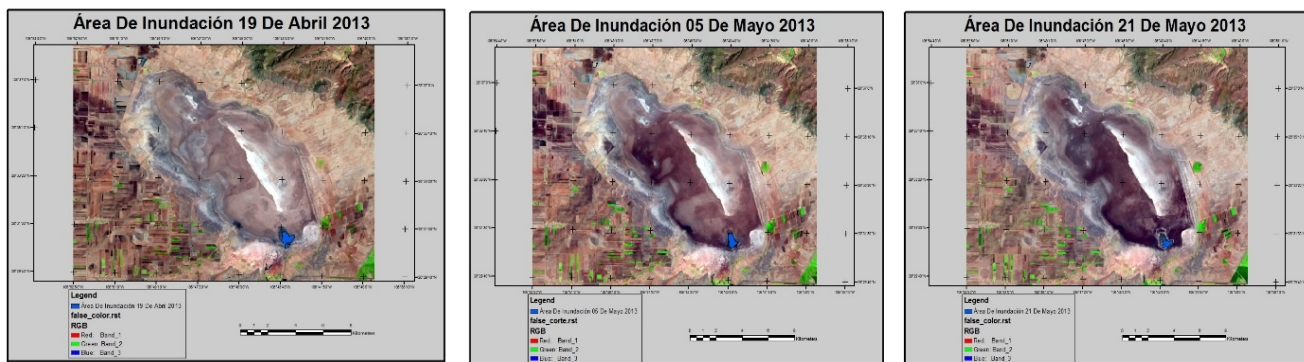


Figura 5. Área de inundación 19 de abril

Figura 6. Área de inundación 5 de mayo

Figura 7. Área de inundación 21 de mayo

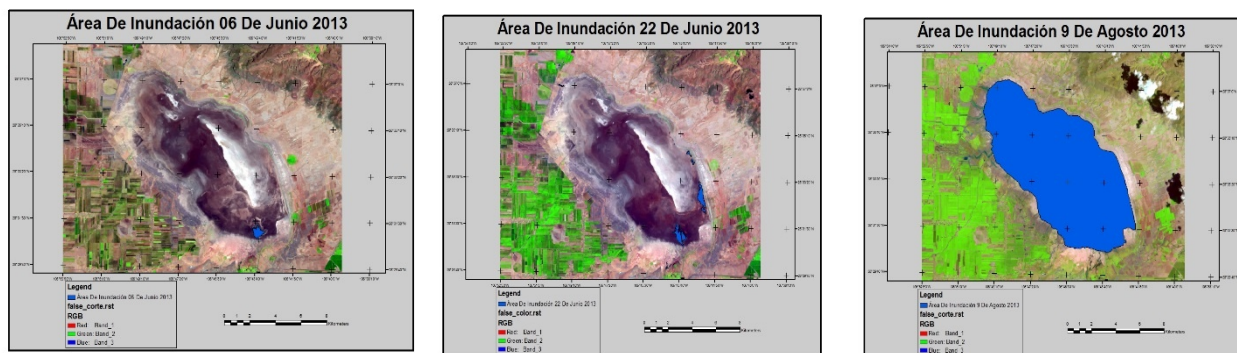


Figura 11. Área de inundación 26 de septiembre

Figura 12. Área de inundación 12 de octubre

Figura 13. Área de inundación 29 de noviembre

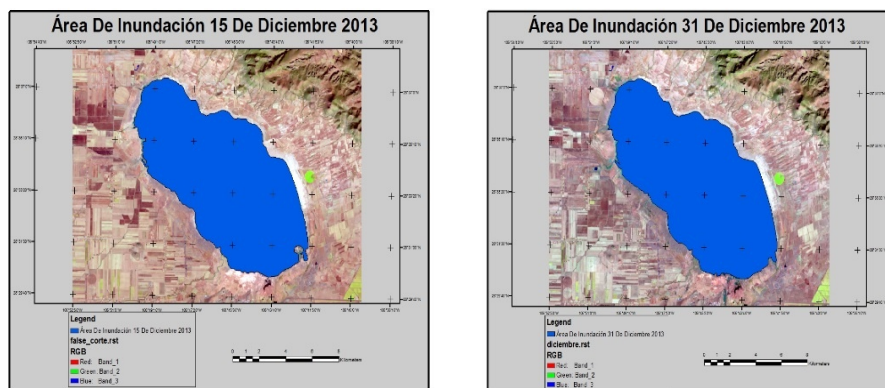


Figura 14. Área de inundación 15 de diciembre

Figura 15. Área de inundación 31 de diciembre

Análisis temporal de precipitación

En el Cuadro 2 se indica la fecha de cada imagen, el área de inundación en km² y la respectiva precipitación media acumulada, también se puede observar cómo esta última se comporta de una manera similar al área de inundación.

Cuadro 2. Relación de la superficie (km²) en el área de inundación de la Laguna de Bustillos en función de las imágenes de satélite, por fecha, durante el ciclo 2013.

Fecha por quincena	Área Km ²	Precipitación media acumulada mm	Figura
19 de abril 2013	0,55	0,03	Figura 5
05 de mayo 2013	0,42	0,40	Figura 6
21 de mayo 2013	0,32	6,88	Figura 7
06 de junio 2013	0,43	10,25	Figura 8
22 de junio 2013	1,31	19,33	Figura 9
08 de julio 2013	1,57	38,90	No se pudo corregir
24 de julio 2013	7,21	152,25	No se pudo corregir
09 de agosto 2013	88,28	256,73	Figura 10
25 de agosto 2013	97,06	411,18	No se pudo corregir
10 de septiembre 2013	96,66	460,40	No se pudo corregir
26 de septiembre 2013	97,65	480,35	Figura 11
12 de octubre 2013	96,87	480,73	Figura 12
28 de octubre 2013	96,31	508,73	No disponible
13 de noviembre 2013	96,17	526,45	No disponible
29 de noviembre 2013	96,34	533,95	Figura 13
15 de diciembre 2013	95,86	536,63	Figura 14
31 de diciembre 2013	96,47	591,40	Figura 15

Fuente: elaboración propia

Como se observa, la primera etapa se representa del 19 de abril al 6 de junio donde se muestra el área más pobre de inundación; la segunda etapa fue del 22 de junio al 24 de julio, cuando tuvo una ligera recuperación el área de inundación; en la tercera etapa, del 9 de agosto al 10 de septiembre, fue donde se disparó considerablemente el área de inundación; y la etapa final, del 12 de octubre al 31 de diciembre, el área se mantuvo de manera similar.

Al establecer la relación algebraica entre estas dos variables, se obtuvo la ecuación 1.

$$y = -7.486971801E^{(-13)} x^{5+1} [0.373644892E]^{(-8)} x^{4-} \\ 1.7233080908E^{(-5)} x^{3+0.006755063344x^{2-}} \\ 0.5573732791x + 4.690308212$$

Donde: X es la precipitación media acumulada y Y es el área de inundación

La representación gráfica del evento se puede apreciar en la Figura 16, la cual se ajustó a un modelo de quinto grado, con un coeficiente de determinación muy alto ($r^2=0.9908$).

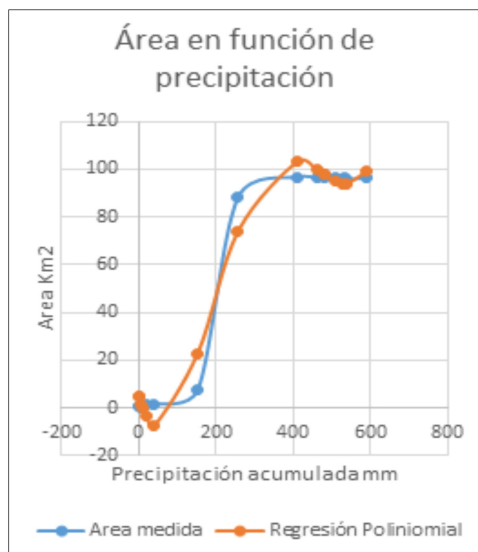


Figura 16. Representación gráfica y relación estadística entre el crecimiento del área de inundación en la Laguna de Bustillos con el agua de lluvia ciclo 2013.

Análisis espacial del volumen de agua precipitada

De este análisis se obtuvo el Cuadro 3, donde se observa que la estación Álvaro Obregón, "Rubio", es la que más influencia ejerce sobre la cuenca con un área de 1970.07 km² y una precipitación anual de 388.6 mm; debido a esto es la que más volumen aporta con 765.83 hm³ de lluvia por año. La que menos influencia ocupa es la estación de Quintas Lupitas, con un área de 397.34 km²; con una precipitación anual de 443.8 mm es la que menos volumen de lluvia aporta dentro de la cuenca con 176.34 hm³ por año.

Cuadro 3. Registro del volumen de agua de lluvia ocurrido durante el ciclo 2013, dentro de la cuenca hidrológica, Laguna de Bustillos.

Estación	Latitud	Longitud	Precipitación (mm)	Área (Km ²)	Volumen (hm ³)	Porcentaje de contribución
Quintas Lupita	28,44705556	106,87775	443,8	397.344	176.341	12%
Zona Dorada	28,41366667	106,8283611	421,5	500.761	211.071	15%
Álvaro Obregón "Rubio"	28,76572222	106,9175833	388,6	1970.750	765.833	60%
San José de La Herradura	28,41366667	107,0150556	475,7	429.294	204.215	13%

Fuente: elaboración propia

En las cartografías que se obtuvieron mediante este método, se puede observar el área en km² que ocupa cada estación dentro de la cuenca (Figura 17) y otra con el volumen de lluvia en hm³ (Figura 18).

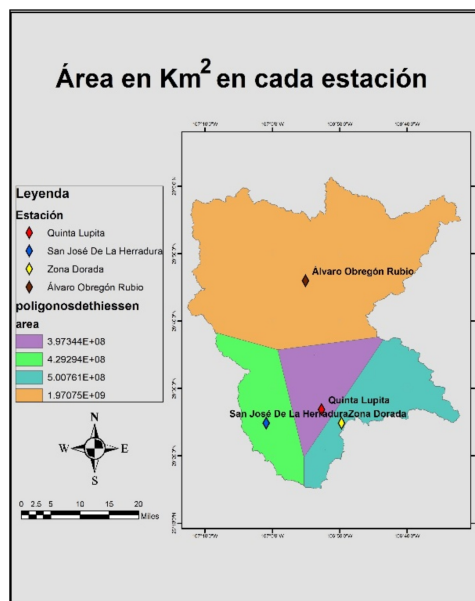


Figura 17.- Área en km² en cada estación 2013.

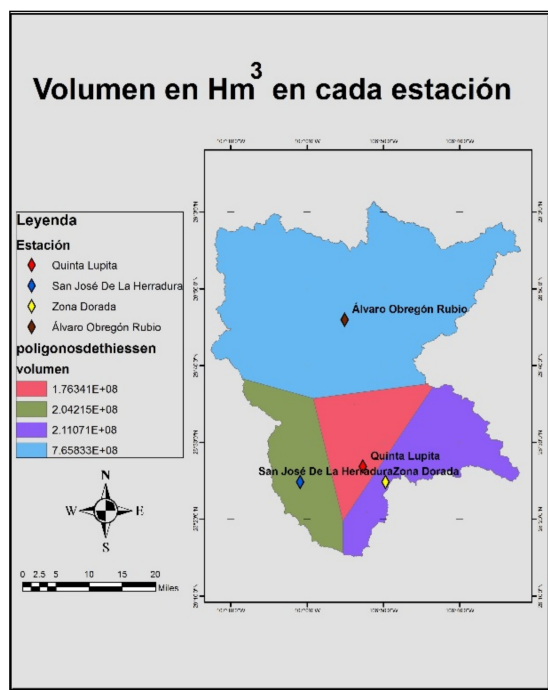


Figura 18. Área en hm³ en cada estación 2013.

Validación de resultados

Con el propósito de comparar la exactitud de los resultados obtenidos en la sección "Análisis temporal de precipitación", se obtuvo la precipitación total en la cuenca, pero esta vez, en lugar de usar la media aritmética (PMA cuadro 4), se utilizaron los valores de porcentaje (PPC) de contribución para cada estación obtenidos en la sección "Análisis espacial del volumen de agua precipitada" (ver cuadro 3). Al multiplicar a la precipitación quincenal de cada estación por el porcentaje de contribución de la misma, se obtuvo la precipitación por quincena para toda la cuenca, luego la precipitación acumulada de la misma manera, cuyos valores se muestran en el cuadro 4.

Se aprecia que se obtienen valores muy cercanos entre los obtenidos en la columna PMA. Esto induce la idea de que el método expuesto en ambas secciones es adecuado para la estimación de la precipitación aun cuando se desconoce la posición de las estaciones meteorológicas que pudieran contribuir a determinada cuenca y el área de influencia de la misma.

Por otra parte, al aplicar la ecuación de quinto grado a la precipitación acumulada calculada por media aritmética (PMA) y a la precipitación acumulada calculada por porcentaje de contribución (PPC), se obtienen valores área muy cercanos a las áreas medidas en las imágenes de satélite, esto se aprecia claramente también en cuadro 4.

Para apreciar claramente la idea anterior, se muestra la figura 19, donde se grafica el área en km² contra la precipitación. Se usa la precipitación PMA y la precipitación PPC, además se muestra el área obtenida. Se puede observar que las gráficas son muy cercanas entre sí.

Cuadro 4. Validación de resultados

Fecha	Precipitación acumulada por media aritmética mm (PMA)	Precipitación acumulada por porcentaje de contribución mm (PPC)	Área medida km ²	Validación de la ecuación con PMA km ²	Validación de la ecuación con PPC km ²
19 de abril 2013	0.025	0.02	0.555556	4.6778903	4.6819491
05 de mayo 2013	0.4	0.24	0.422856	4.4699396	4.4684386
21 de mayo 2013	6.875	4.69	0.328949	1.1733901	1.1720773
06 de junio 2013	10.25	8.68	0.438143	-0.3302579	-0.3314766
22 de junio 2013	19.325	19.87	1.316131	-3.6797128	-3.6806932
08 de julio 2013	38.9	41.21	1.6126262	-7.7522478	-7.7527879
24 de julio 2013	152.25	146.39	7.5835399	22.913012	22.912874
09 de agosto 2013	256.725	234.73	88.282362	74.055858	74.053108
25 de agosto 2013	411.175	389.35	96.7867	103.42329	103.4136
10 de septiembre 2013	460.4	437.96	96.586263	99.853336	99.841099
26 de septiembre 2013	480.35	453.99	97.658825	97.750602	97.737294
12 de octubre 2013	480.725	454.85	96.873906	97.71083	97.697502
28 de octubre 2013	508.725	482.89	96.280851	95.004886	94.99001
13 de noviembre 2013	526.45	496.81	96.196768	93.871886	93.855995
29 de noviembre 2013	533.95	503.92	96.343583	93.618059	93.601728
15 de diciembre 2013	536.625	506.49	95.864465	93.567285	93.550795
31 de diciembre 2013	591.4	548.61	96.478614	99.287874	99.267866

Fuente: elaboración propia

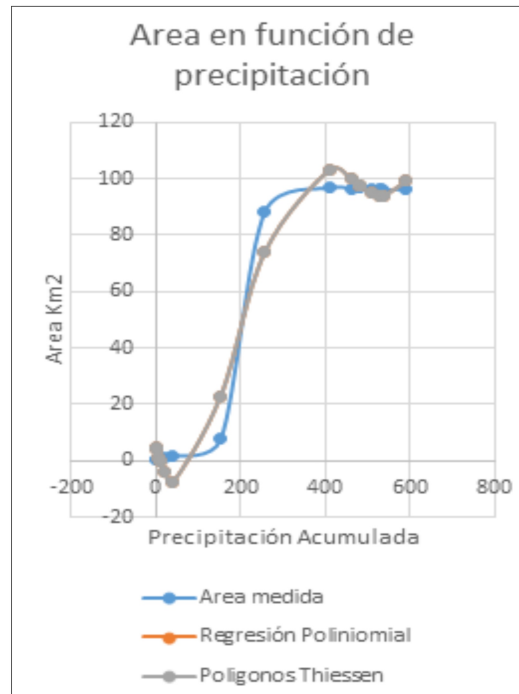


Figura 19. Área en función de precipitación.

Conclusiones

La CNA (2003) puntualiza que existen notables ejemplos de fenómenos como en la Laguna de Mayrán, en Torreón, Coahuila, que está a punto de desaparecer por la falta de escurrimientos de las montañas que retienen las presas, y por la escasez de lluvias debido a que se alteró el microclima de la región. Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se puede decir que debido al comportamiento de las precipitaciones en años pasados (Figura 7), la Laguna de Bustillos presenta un fenómeno similar al mencionado por el autor, ya que el área de inundación alcanzó niveles muy bajos en el primer cuatrimestre del año 2013. El análisis general de la información a través de las imágenes Landsat permitió registrar que el embalse creció de manera muy rápida, ya que para el 9 de agosto, del 2013, con 256.73 mm de lluvia promedio acumulada ya se había cubierto el 90 % del área total de inundación (área = 88.28 km²), respecto al crecimiento total máximo de la misma (área= 97.65 km²), el cual ocurrió el 26 de septiembre de 2013, cuando se habían registrado 480.35 mm de

lluvia promedio acumulada, como se observa en el cuadro 3, y que para el 31 de diciembre de 2013, la reducción en el área de inundación fue de tan solo el 2% (96.47 km²), con un total de precipitación promedio acumulada de 591.40 mm, cantidad que supera en un 24 % el promedio general histórico que es de 450 mm por año.

De acuerdo con Gómez y De la Lanza (2010), en un estudio similar, las variaciones y cambios importantes que en la laguna de Tecocomulco y la subcuenca a la que pertenece, han experimentado fenómenos similares a estos en los últimos 30 años y están fuertemente relacionados con los fenómenos meteorológicos tales como El Niño y La Niña.

Relacionado con el tema, Ortiz y Amado (2001), durante la primavera-verano de 1992, hicieron un estudio de campo utilizando el cultivo de maíz con el propósito de registrar la factibilidad de usar el agua de la Laguna de Bustillos para producir grano en cantidad comercial cuya calidad permita el consumo humano. Los resultados indicaron rendimientos máximos de 5.0 t ha⁻¹, de grano, sin que la producción de forraje presentara concentraciones elevadas de elementos pesados como Plomo, Cadmio, Níquel, Cromo, y Cobalto. Los principales usos de esta laguna son agrícolas y ganaderos, y esto obviamente muestra repercusiones serias en la economía de la región.

La citada reducción de precipitaciones llevó consigo una severa limitación de los volúmenes almacenados en el área de inundación de la Laguna de Bustillos, pero en el año 2013 incrementó de una manera muy notable por medio de la precipitación de ese año. Cabe mencionar que influye mucho la gran extensión de la cuenca y que la mayor parte del agua no se infiltra —longitud promedio de 16.5 km, un ancho de 7.5 km, una profundidad media de 1.2 m, según Amado et al., (1999).

De acuerdo con la evolución temporal del área de inundación, se pudo comprobar que la cuenca hidrográfica que drena hacia la Laguna de Bustillos tiene un grado de respuesta a las precipitaciones muy elevado, lo cual se relaciona con una

incipiente cubierta vegetal en las sierras y piedemontes, lo cual incrementa la respuesta a la precipitación, una baja infiltración y graves problemas de erosión. En relación a la metodología aplicada, se observa que resulta muy sencilla y pertinente en estimación de áreas de inundación conociendo solamente la precipitación en un periodo determinado, con la limitante de que este método parte de la idea de que se estima una precipitación acumulada, por lo que se requiere que dicho periodo sea amplio.

Bibliografía

Alatorre, L. C., & Beguería, S. (2009). Identificación de zonas de erosión activa y áreas de riesgo mediante teledetección: un ejemplo en un paisaje de cárcavas sobre margas en el piri-neo central español. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 171-194.

Amado A., J. P., V. D. Solano R. y P. Ortiz F. (1999). Producción de frijol bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada y fosfórica usando agua residual en Bustillos, Chihuahua, *TERRA*, vol. 17, no. 2, pp. 337-344. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo Estado de México.

Amado A., J. P. y P. Ortiz F. (2001). Consecuencia de la fertilización nitrogenada y fosfórica sobre la producción de avena irrigada con agua residual. *TERRA*, vol. 19, no. 2, pp. 175-182. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo Estado de México.

Comisión Nacional del Agua (1996). *Programa hidráulico de gran visión del Estado de Chihuahua 1996-2020*. Edición, Chihuahua, México. 482 p.

Comisión Nacional del Agua (1989). *Dictamen técnico del diagnóstico preliminar del posible aprovechamiento de la Laguna de Bustillos para uso agrícola*. Cuauhtémoc, Chih.

Comisión Nacional del Agua (1991). *Actualización del estudio geohidrológico, políticas de operación y proyecto de*

manejo del acuífero del Valle de Cuauhtémoc, Chihuahua, Comisión Nacional del Agua. Contrato CNA-GRN-90-009, 186 pp.

Comisión Nacional del Agua (2003). "Estadísticas del agua en México." 1ª Ed. México D.F. Comisión Nacional del Agua-Collegio de Posgraduados. 2007. Plan director: Unión de Asociaciones de Usuarios de Aguas Subterráneas del Acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua, S. de R.L. de I.P. de C.V., Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional del Agua (2009). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea Acuífero (0805) Cuauhtémoc, Estado de Chihuahua, Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx>.

Comisión Nacional del Agua 2010. Registro Público de Derechos de Agua, Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 15 de Octubre de 2010, de www.conagua.gob.mx.

Esteller, M.V., Quentin, E., Díaz, 2003. Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos, Centro Interamericano de Recursos del Agua-Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro Coatepec S/N; C.U. 50130 Toluca, Estado de México.

FAO. 2009. *State of the World's Forests*. United Nations Food and Agriculture Organization. Rome, Italy. (Consulta del 12 de Enero del 2013).

García, A.K., Ojeda, L.A., Pérez, G., Servín, Y., Alatorre, L.C. (2013). Evaluación de las extracciones de agua subterránea por métodos indirectos en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México: aplicando la teledetección y SIG. Estudiantes de la Licenciatura de Geoinformática. División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Calle Morelos y privada del

Roble núm. 101, Fracc. El Roble, C.P. 31579, Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Gómez, G., De la lanza, G. (2010). Laguna de Tecocomulco y sus variables climáticas, hidrológicas y de vegetación a través de imágenes de satélite, en R. Sánchez G.: *Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la cuenca de México*, México, UNAM.

Hernández, M.E., Carrasco, G., Alfaro G. (2007). *Mitos y realidades de la sequía en México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 88.

IAASTD (2008). Executive Summary of the synthesis Report of the International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD). Intergovernmental Plenary in Johannesburg, South Africa.

Lizárraga C., C., J. Sabori, J. C. Rodríguez, J. A. Saiz H., C. Watts (2010). Tendencias del Sistema Monzón Norteamericano en México. En: González Barrios, J. L., I. Sánchez Cohen (Dir.). *Manejo comparado en cuencas hidrológicas. Incertidumbre climática, vulnerabilidad ecológica y conflicto social*. Ediciones de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, la Red Temática del Agua Conacyt y la Red Nacional de Innovación Agua y Suelo del INIFAP. Torreón, Coahuila, México, 282 pp.

Muñoz, R. C. y Núñez, L. D. (2005). ¿Contribuye el monitoreo de la sequía a mitigar sus efectos? In: S. García., *S. Educación ecológica: Reflexión y praxis en torno a la sequía en Chihuahua*, Instituto de Ecología, A. C., pp. 190.

Núñez I. D., C. Muñoz, R., V. Reyes G-, I. Velasco V., y G.-Esparza, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de Tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia*, vol. 41, pp. 253-262.

Ortega, D.G. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México, 2013. *Terra*

Latinoamericana, vol. 31, núm. 3. pp. 167-180 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

Oswald, S. U. (2011). Elementos de climatología física. In: I. Sánchez C., G. Díaz P., Ma T. Cavazo P., G. R. Granados R., y E. Gómez R. (eds). *Elementos para entender el cambio climático y sus impactos*. Universidad Autónoma Metropolitana-UNIFAP- UNAM-Medio Ambiente y Ecología-CICESE-Miguel Ángel Porrúa. pp. 5-10.

Quintana, R.M., Soto, G., Rubio, H.A., Espinoza, J.R., Holguín, C.L., Camarillo, J.A. (2014). Evaluación de parámetros físicoquímicos y contenido de metales en sedimentos de la Laguna de Bustillos en Chihuahua, México., *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, vol. 12, pp. 37-45.

Reyes, V.M. y Núñez, D. (2012). Implementation of the Drought Monitoring System in Northwest Mexico. Investigation Center on the Drought of the Institute of Ecology A.C.

Rodríguez, P. J., Giddings L., Gadsden, H., Boken, K. (2005). "Agricultural Drought in North-Central Mexico", en: *A Comprehensive Book on Drought, Monitoring and Predicting Agricultural Droughts: A Global Study*. Oxford University Press.

United States Geological Survey (USGS). Fecha de consulta. Diciembre 18 2012.<http://earthexplorer.usgs.gov>.

Wei, X., C. Declan, L. Erda, X., Yinlong, J. Hui, J. Jinhe, H. Lan and Li Yan (2009). Future cereal production in china: the interaction of climate change, water availability and Socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 19: 34-44.

World Resource Institute (1990). *World Resource 1990-1991: a report*, The United Nations Development Programme, Oxford University, New York.

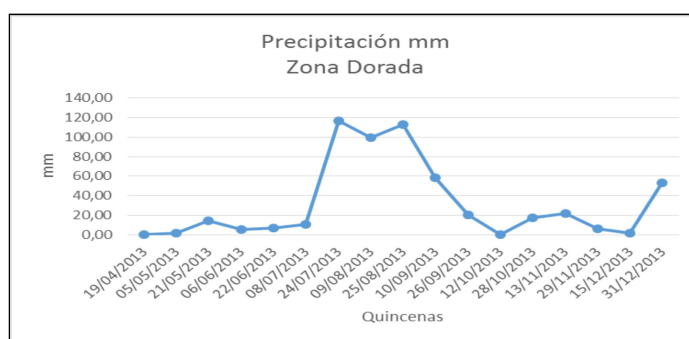
Anexos

- Los lagos más grandes del mundo son el Baikal, en Asia (contiene 18% del agua que se acumula en los lagos), el Tangañica (16%) y el Nyasa o Malawi, en África (10%) y el Superior en Canadá-Estados Unidos (10%).
- Estudios preliminares señalan la existencia en México de cerca de 12 mil cuerpos de agua que representan en conjunto 862 mil hectáreas inundadas (Cadena et al., inédito). Destacan cerca de 70 lagos, cuyas extensiones varían entre 1000 y más de 10000 ha, y cubren en conjunto un área de 370891 ha (66% corresponde a embalses mayores de 10000 ha) De la Lanza y García 2002. El lago Chapala, en Jalisco, es el mayor en México, seguido en importancia por los de Cuitzeo y Pátzcuaro en Michoacán y Guanajuato, Catemaco en Veracruz, Tequesquitengo en Morelos y Nabor Carrillo en México (CNA, 2004), además del Catazaja en Chiapas, Del Corte en Campeche, Babícora y Bustillos en Chihuahua, entre otras.
- El agua es un asunto de seguridad nacional y debe trascender los intereses de grupo o individuales. Este aspecto mejorará en la medida en que la sequía se aprecie como un fenómeno natural inevitable, impredecible, progresivo y con frecuencia severo; y de que se tenga conciencia de que es el déficit y la demanda no satisfecha de carácter antropogénico, lo que puede ocasionar el desastre, que no es natural.
- En la actualidad son varios factores que provocan la escasez del agua. El cambio climático es el que afecta a todo el mundo, ya que en tiempos de lluvia no llueve lo suficiente, ocasionando problemas mayores a la agricultura, ganadería, etcétera. Sin embargo, no es el único que afecta, de ahí se le suman la deforestación con el propósito de tener más lugar libre, ocasionando basura de raíces y hojas que de una manera u otra determina el cauce de los ríos; la contaminación de grandes industrias

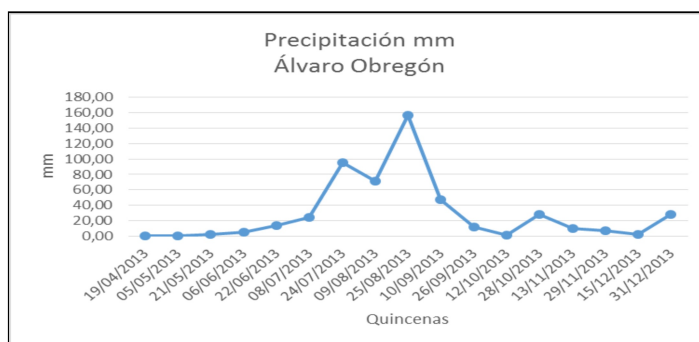
que lanzan miles de millones de litros cúbicos de gases, líquidos y desperdicios tóxicos al medio ambiente provocando con esto reacciones que repercuten negativamente en la lluvia; en la actualidad el factor del crecimiento de la población en zonas urbanas es mucho mayor que en otros años.

Se obtuvieron las gráficas de los resultados.

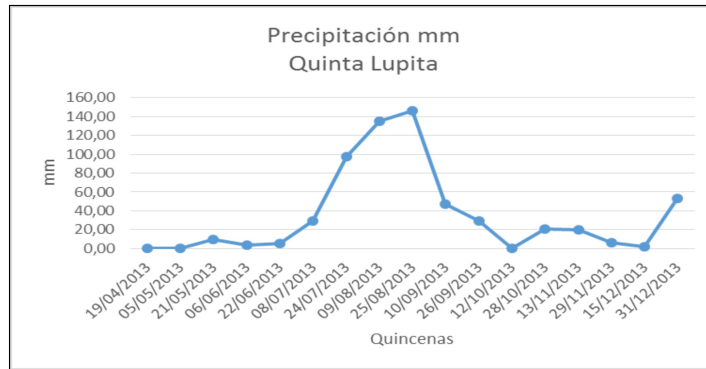
Se graficaron los datos de precipitación en cada fecha de imagen para cada una de las 4 estaciones.



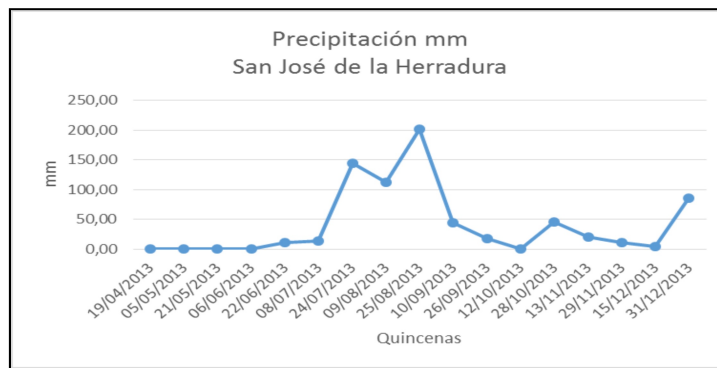
Anexo 1. Gráfica de precipitación zona dorada.



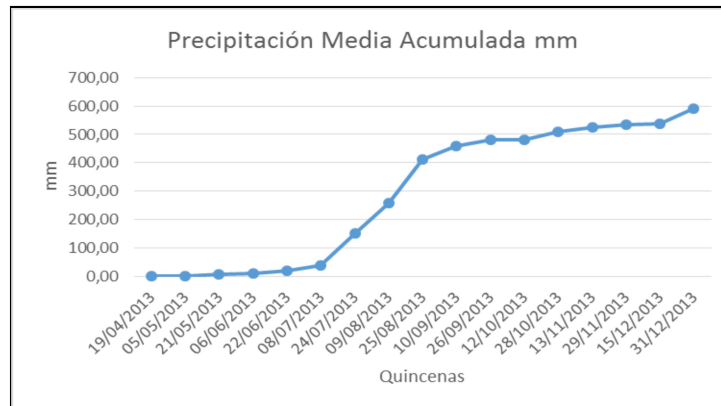
Anexo 2. Gráfica de precipitación Álvaro Obregón.



Anexo 3. Gráfica de precipitación Quinta Lupita.



Anexo 4. Gráfica de precipitación San José De La Herradura.



Anexo 5. Gráfica de precipitación media de las 4 estaciones.

