

Artículo Científico

Evolución piezométrica del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria en la cuenca baja del río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua, México

Piezometric evolution of the Palomas-Guadalupe Victoria aquifer in the Lower Basin of the Casas Grandes River, Ascension, Chihuahua, Mexico

Carlo I. Romero-Gameros^{1*}, Alfredo Granados-Olivas¹, Óscar F. Ibáñez-Hernández^{1,3} y J. M. Herrera-Mercado²

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Avenida Del Charro #450 Norte. Ciudad Juárez, Chihuahua. México. 32315. Tel. (656) 688-2100

²Junta Municipal de Agua y Saneamiento. Calle Pedro N. García #2231 Col. Partido Romero C.P. 32030, Cd. Juárez, Chih. Tel. (656) 686 00 73

³Junta Central de Agua y Saneamiento. Av. Prol. Teófilo Borunda 500, Centro, 31000 Chihuahua, Chih. | (614) 439 35002

*Correspondencia: Correo Electrónico carloromerog@gmail.com (Carlo I. Romero-Gameros)

Recibido: 23 de abril de 2021; **Aceptado:** 27 de agosto de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

El agua subterránea es el recurso hídrico de principal uso en las regiones áridas y semiáridas del México abasteciendo a las comunidades, industrias y agricultura. El uso intensivo del agua subterránea, aunado con las condiciones áridas y semiáridas del norte de México influyen en el descenso de los niveles estáticos de los acuíferos. La aplicación de piezometría digital facilita la generación de datos de calidad a través del tiempo que pueden ser usados para el monitoreo de la evolución temporal en estudios geohidrológicos. En el presente estudio, se realizó la instalación de cinco piezómetros digitales a lo largo de la cuenca baja del Río Casas Grandes (CBRCG) con el fin de monitorear continuamente la evolución temporal de los niveles estáticos del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) realizando la modelación de las redes de flujos y líneas equipotenciales dentro del área. Los resultados demuestran abatimientos puntuales de los niveles estáticos hasta de 3 m en un periodo de 10 años. Adicionalmente, se observó un sostenimiento de los niveles estáticos e incluso recuperación de estos en otras áreas de la cuenca comprobando diversos ambientes geohidrológicos en la zona. El estudio demuestra la necesidad de ampliar el monitoreo por piezometría digital generando una representación continua de la evolución piezométrica del acuífero, dando así lugar al uso sustentable del agua subterránea en la cuenca, así como la determinación de zonas vulnerables y puntos potenciales de recarga del acuífero.

Palabras clave: abatimiento, acuífero, nivel estático, piezometría digital, sobreexplotación.

Abstract

Groundwater is the only resource for the arid and semi-arid regions in northern Mexico supplying different users such as domestic, industry and agriculture. The intensive use of groundwater resources along with the arid conditions of the region affects depletion on static water levels of aquifers. The application of digital piezometry allows the generation of quality data thru extended periods of time for geohydrological studies. This research focused on the installation and calibration of five digital piezometers to monitor the evolution of static water levels in the Palomas-Guadalupe Victoria aquifer (0812) located at the Lower Casas Grandes River Basin in Northern Chihuahua, Mexico. Real time modeling of aquifer equipotential lines and groundwater flow direction produced by the overexploitation of agricultural wells located in the basin was carried out. Results show variable drawdowns of the static water levels up to 3 m in a 10-year period; furthermore, groundwater levels at some sites in the aquifer do not show any depletion at all demonstrating a recovered groundwater level in some areas of the watershed, which could be related to diverse geohydrological settings. The study demonstrates the need to expand digital piezometric monitoring to improve the research on groundwater evolution of the aquifer, generating a sustainable management of groundwater resource of the basin, as well as the determination of vulnerable and potential recharge zones.

Keywords: drawdown, aquifer, static water level, digital piezometers, overexploitation.

1. Introducción

El agua subterránea representa la mayor fuente de agua dulce disponible en el planeta, la cual es utilizada para el consumo de más de la mitad de la población (Castro Condori, 2017). En México, este recurso es utilizado para satisfacer la demanda de agua proveniente del sector industrial y un 65% del volumen de agua que es requerido para abastecer las ciudades, además de ser la principal fuente de abastecimiento de dos millones de hectáreas para la agricultura (Chávez *et al.*, 2006; CONAGUA, 2014). El estado de Chihuahua está sometido a una serie de factores que lo hacen propenso a la sobreexplotación de sus acuíferos tales como su ubicación geográfica, áreas de alto crecimiento demográfico, geología, extracciones para irrigación de cultivos, sequía y aumento de temperatura ambiente (Gutiérrez *et al.*, 2016). Por otro lado, la explotación desordenada de las aguas subterráneas plantea problemas en el ámbito ambiental, social, económico, administrativo y legal, siendo una de las principales problemáticas el descenso de los niveles piezométricos dentro de las diversas cuencas del estado de Chihuahua (Pulido Bosch, 2000).

De los 653 acuíferos definidos en el país, 61 pertenecen al estado de Chihuahua de los cuales 30 están catalogados como sobreexplotados (Gobierno del estado de Chihuahua, 2019; Arreguin *et al.*, 2010). En lo que refiere al área de estudio, el acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) 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, tales como chile, nogal y alfalfa (CONAGUA, 2018; INEGI, 2003). El clima de la zona corresponde al tipo BWk(x'), clima muy árido, templado, siendo sus características generales una temperatura media anual de 17.7 °C, temperatura mínima anual de 9 °C, temperatura máxima anual de 26.4 °C, presentando

lluvias repartidas durante todo el año con un promedio de 175.8 mm con mayor presencia durante los meses de julio y agosto (Servicio Meteorológico Nacional, 2010; CONAGUA, 2018).

El acuífero está situado en un contexto geológico volcánico principalmente, donde se presentan rocas ígneas intrusivas y extrusivas expuestas con composición variante y por orden de abundancia basálticas, andesíticas a riolíticas. Debido a la erosión, en las zonas de bajo terreno, se presentan condiciones sujetas a inundaciones, y se encuentran depósitos sedimentarios compuestos por limos, arenas y gravas con presencia de arcillas (CONAGUA, 2018). Una de las principales fuentes de recarga del acuífero está ubicada en los abanicos aluviales de las sierras que se localizan en la cuenca baja del Río Casas Grandes (Fig. 1), en donde estas regiones geomorfológicas están delimitadas por la sierra de las Coloradas al norte y noroeste, Sierra de Boca Grande al suroeste, sierras Las Lilas y El Cartucho al sur y Montañas el Camello hacia el este (Ramírez-Villazana *et al.*, 2016).

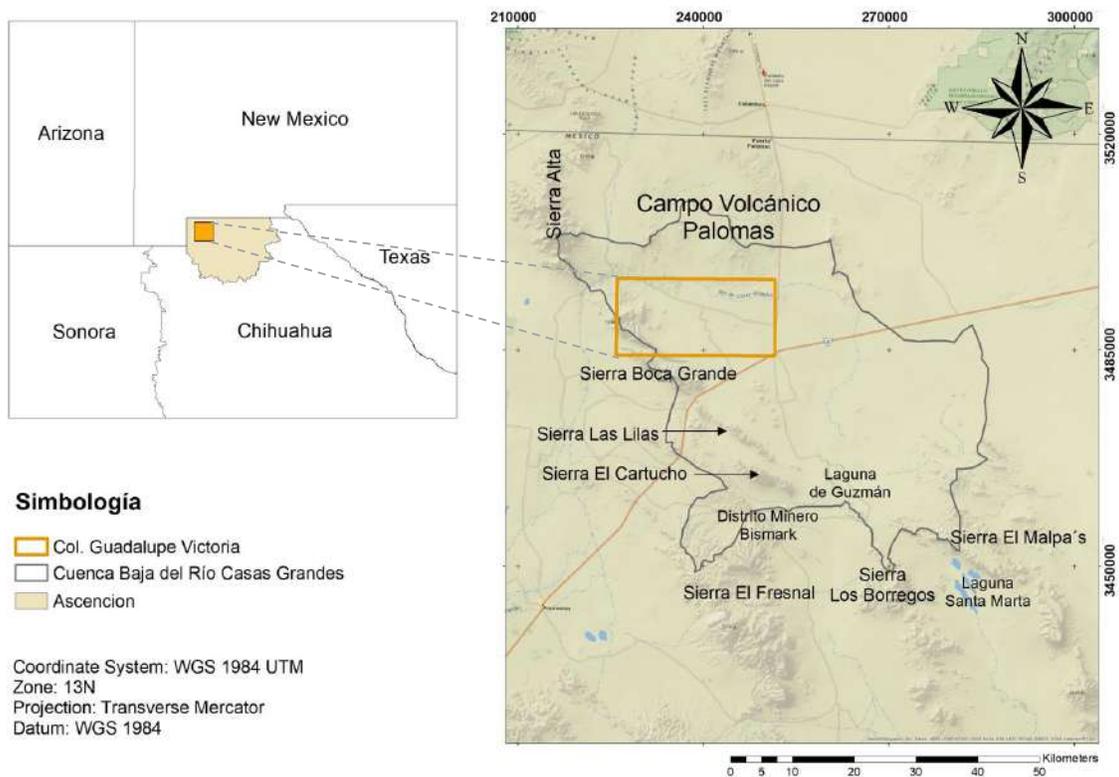


Figura 1. Ubicación de la cuenca baja del Río Casas Grandes.
Figure 1. Location of the Lower Basin of the Casas Grandes River.

La realización de estudios por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como parte del análisis de disponibilidad del acuífero se ha realizado tomando en cuenta datos de 1991 y 2005 aunado a la actualización geohidrológica realizada por la Universidad Autónoma de Chihuahua en 2009 en la que se obtuvo la evolución de los niveles piezométricos del acuífero (CONAGUA, 2018).

Posteriormente, la evolución piezométrica del acuífero fue tomada como objeto de estudio en diversas investigaciones proyectando la evolución temporal de la cuenca baja del Río Casas Grandes (Romero 2018, Armendáriz 2013 y Martínez 2010). La disponibilidad de agua subterránea en el estado de Chihuahua está comprometida y ha entrado en crisis durante los últimos años debido a factores antropogénicos y naturales (Reyes Cortés *et al.*, 2009). Por lo tanto, la actualización de información por medio de piezometría digital u otros métodos es esencial para generar una representación actual del comportamiento del acuífero para de esta forma llevar a cabo planes de gestión y sustentabilidad hídrica con respecto al uso del recurso en la cuenca.

El principal objetivo del estudio se centró en analizar la evolución temporal de la piezometría del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0821), durante el periodo 2010-2020. Para ello, se realizó la instalación y calibración de cinco piezómetros digitales en la infraestructura hidroagrícola de la cuenca baja del Río Casas Grandes, para incrementar la recopilación de información y la continuidad de recolección de datos, lo que permitirá una mejora hidrogeológica a futuro.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El análisis de evolución temporal fue realizado a partir de la instalación de cuatro piezómetros digitales del tipo Cera Diver (Fig. 2), diseñados para acuíferos con propiedades salinas o ambientes agresivos de calidad química del agua subterránea, con una capacidad de almacenaje superior a las 48000 lecturas, y uno del tipo Baro Diver, el cual monitorea a tiempo real la presión atmosférica, utilizado para la medición niveles someros de agua y medir 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). Estos son diseñados para la obtención de información de temperatura de agua, presión barométrica y nivel piezométrico dentro del pozo (Romero-Gameros, 2018) generando datos de alta calidad y confiabilidad con una precisión de $\pm 0.05\%$ a escala completa (VanEssen, 2020). Además, su calibración permite el monitoreo del acuífero a una temporalidad deseada por el usuario. Estos piezómetros fueron complementados por dos unidades instaladas en estudios previos para ampliar la recolección de información.



Figura 2. Piezómetro digital CeraDiver (VanEssen, 2020).

Figure 2. CeraDiver digital piezometer (VanEssen, 2020).

2.2 Localización de pozos e instalación de piezómetros

Previo a su instalación, fueron seleccionados cinco distintos pozos de monitoreo a lo largo de la cuenca con el fin de abarcar la mayor área posible del acuífero teniendo en cuenta el permiso por parte del propietario del pozo, que este no contara con infraestructura de bombeo, su accesibilidad y la existencia de un nivel sobre el espejo del agua menor a los 50 m debido al cable disponible para su instalación. Los piezómetros Cera-Diver fueron calibrados con datos de niveles estáticos referentes a cada pozo, obtenidos por medio de una sonda de arco eléctrico (Fig. 3). Se tomó en cuenta una temporalidad de registro automatizado en el piezómetro digital de cuatro días, con una toma de datos continua hasta la interrupción por parte del usuario, 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 captura de datos con una temporalidad de 12 h.



Figura 3. Sonda de arco eléctrico Solinst Model 102.
Figure 3. Solinst Model 102 electric arc probe.

Para su instalación, se requirió la fabricación de puentes estabilizadores (Fig. 4) diseñados con respecto a las medidas del ademe de cada pozo utilizados como sostén tanto del cable de acero como del piezómetro digital, colocados y reforzados en la infraestructura del pozo (Fig. 5) con el fin de que no pudieran ser removidos ni alterados por las condiciones meteorológicas del área de estudio, así como por actos vandálicos.

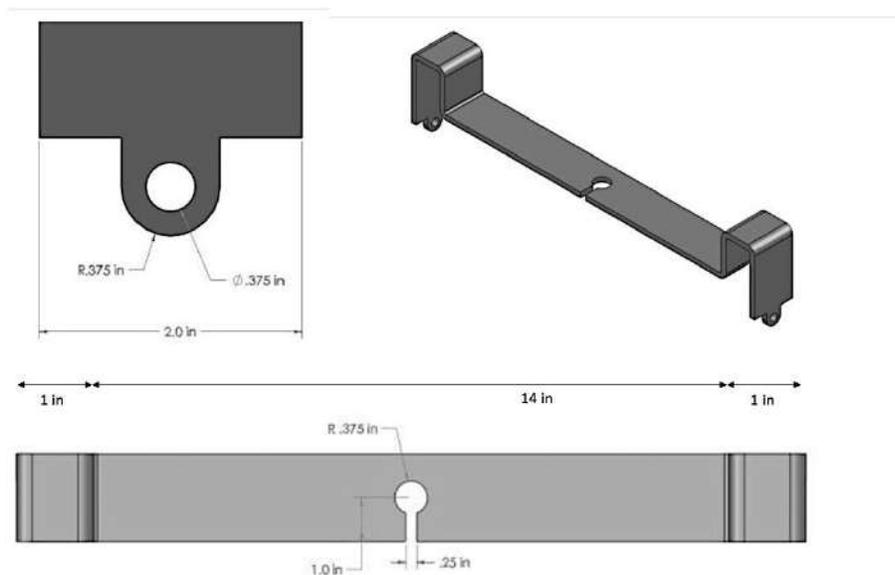


Figura 4. Puentes estabilizadores (Martínez, 2010).
Figure 4. Stabilizing bridges (Martínez, 2010).



Figura 5. Instalación de piezómetros digitales sobre la infraestructura del pozo (Romero-Gameros, 2018).
Figure 5. Installation of digital piezometers over well infrastructure (Romero-Gameros, 2018).

2.3 Colección de datos

Una vez instalados los piezómetros, se procedió a la captura de datos con una temporalidad de cuatro días, proceso que comenzó automáticamente según la programación del equipo. Dichos datos se compensaron barométricamente para la obtención del nivel piezométrico a partir de una interpolación lineal para los valores de presión atmosférica. Dentro de esta, el piezómetro mide el nivel del agua subterránea mediante un sensor de presión de precisión alta capturando datos de la presión absoluta. Dicha presión es igual al peso de la columna de agua encima del piezómetro más la presión del aire que predomina. 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 dentro de uno de los pozos seleccionados, la cual se calcula con la Ec. (1):

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

Donde WC es la carga de la columna de agua sobre el piezómetro, Pdiver el dato de presión obtenido del piezómetro, Pbaro el dato de presión proporcionado por el barómetro, ρ la densidad del agua (1000 kg/m³) 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 Ec. (2):

$$WL = TOC - CL + WC \quad \text{Ec. (2)}$$

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. El nivel estático se obtiene a través de la sustitución de (1) en (2) dando la Ec. (3):

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

Una vez procesados los niveles estáticos obtenidos por los piezómetros digitales, se realizó la comparación de evolución temporal de los niveles estáticos medidos a través de una sonda de arco eléctrico por Martínez (2010), Armendáriz (2013) y Romero (2018), complementado por el análisis de los equipos y la recolección de datos durante el año 2020.

2.4 Análisis de datos

Los datos de evolución se utilizaron para resaltar los abatimientos generados dentro de la zona de estudio utilizando la interpolación de Kriging dentro del software ArcGIS, aplicando un modelo de semivariograma circular para generar una superficie estimada de curvas equipotenciales. Para esto, se tomó en cuenta un conjunto de datos de elevación referidos a los niveles estáticos en el acuífero. Dicha interpolación se basa en modelos estadísticos, donde se incluyen relaciones estadísticas entre los puntos medidos, asumiendo la posibilidad de modelar cierta parte de una variación espacial definida a partir de procesos aleatorios con autocorrelación espacial. Este método se basa en un análisis estadístico exploratorio de datos, el modelado de variogramas, la

creación de una superficie y la exploración de la superficie de varianza (ESRI, 2016). El modelado de variogramas se definió a partir de un modelo circular dentro del software dando paso a la predicción y creación de superficies. Para esto, los valores medidos circundantes se ponderan calculando una predicción de ubicación sin mediciones a partir de la Ec. (4):

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{Ec. (4)}$$

Siendo $Z(s_i)$ el valor medido en una ubicación i ; λ_i una ponderación desconocida asignada al valor medido en la ubicación i ; s_0 la ubicación de la predicción y N la cantidad de valores medidos (ESRI, 2016).

3. Resultados y discusión

La evolución temporal de los niveles estáticos fue obtenida a partir de los cinco piezómetros instalados a lo largo de la Colonia Guadalupe Victoria en la cuenca baja del Río Casas Grandes.

Los datos obtenidos por el barómetro instalado en el pozo “Rancho El Milagro” (Fig. 6) denotan una fluctuación de presiones entre 886 a 911 cmH₂O aproximadamente, lo que representa la carga ejercida por la columna de agua sobre el piezómetro. Las temperaturas capturadas demuestran fluctuaciones entre los 0 y 28 °C durante el periodo de toma de datos. Cabe señalar que los datos de temperatura obtenidos varían conforme a las estaciones del año, representando las temperaturas menores a las temporadas gélidas, demostrando de igual manera las variaciones que existen de temperatura durante el día y la noche. Sin embargo, la profundidad de la ubicación de la sonda refleja la posibilidad de una temperatura relacionada al promedio en las diversas zonas del acuífero lo que pudiera ser también referente para medir otros parámetros geohidrológicos tales como la recarga.

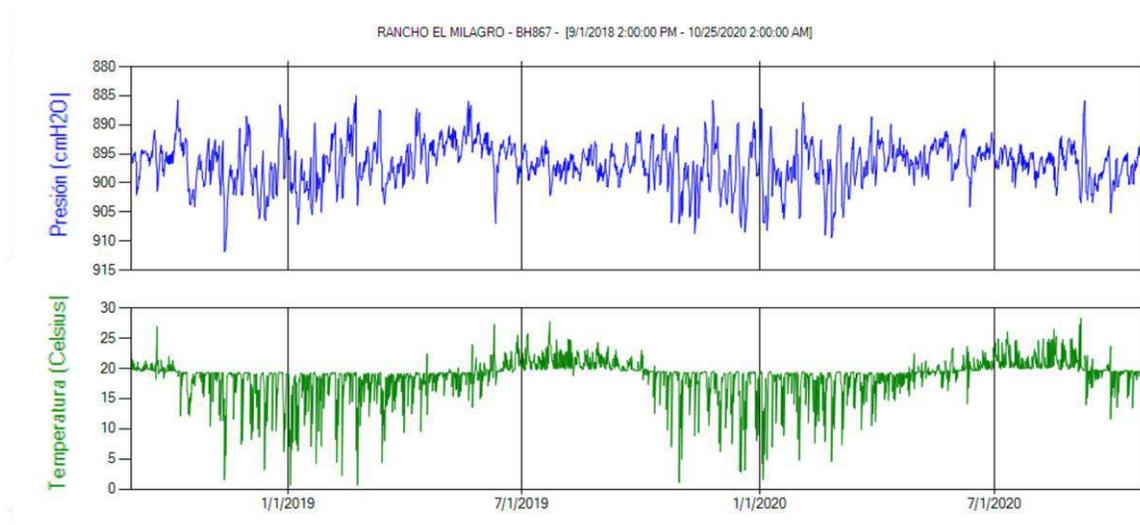


Figura 6. Evolución temporal de presión y temperatura capturadas por el Baro-Diver de agosto 2018 a octubre del 2020.

Figure 6. Time evolution of pressure and temperature captured by the Baro-Diver from August 2018 to October 2020.

El peso ejercido por la presión barométrica es aproximadamente igual a 10 m de la columna de agua. Dicha presión no es estable en el tiempo, pero presenta fluctuaciones de hasta 1 metro de columna de agua. En caso de no ser compensados los datos obtenidos por los piezómetros digitales, existe una estática de error de 10 m y una dinámica de error de 1 metro, por esto la importancia de la instalación del piezómetro Baro-Diver para la realización de la compensación barométrica en el resto de los piezómetros instalados.

El piezómetro instalado en el “Rancho Viejo”, una vez aplicada la compensación barométrica a los datos, demuestra una fluctuación del nivel estático dentro de los 11.05 y 11.65 m, con el descenso más notorio del nivel estático durante julio del 2020. La temperatura del agua dentro del pozo oscila entre los 20.96 y 21.21 °C en el periodo 2018-2019, manteniendo una fluctuación constante a partir de los siguientes meses de la toma de datos. Esta fluctuación se ve influida por los cambios en las estaciones del año, mostrando que el dato de temperatura más bajo fue tomado durante el mes de diciembre. Así mismo, la temperatura incrementa conforme los datos se aproximan a épocas más cálidas (Fig. 7). Cabe señalar que los picos más altos visibles dentro de la evolución temporal de los niveles estáticos representan el descenso de los niveles en el pozo siendo calculados a partir de la presión ejercida por la columna de agua dentro del piezómetro precedido de la compensación barométrica expuesto anteriormente.

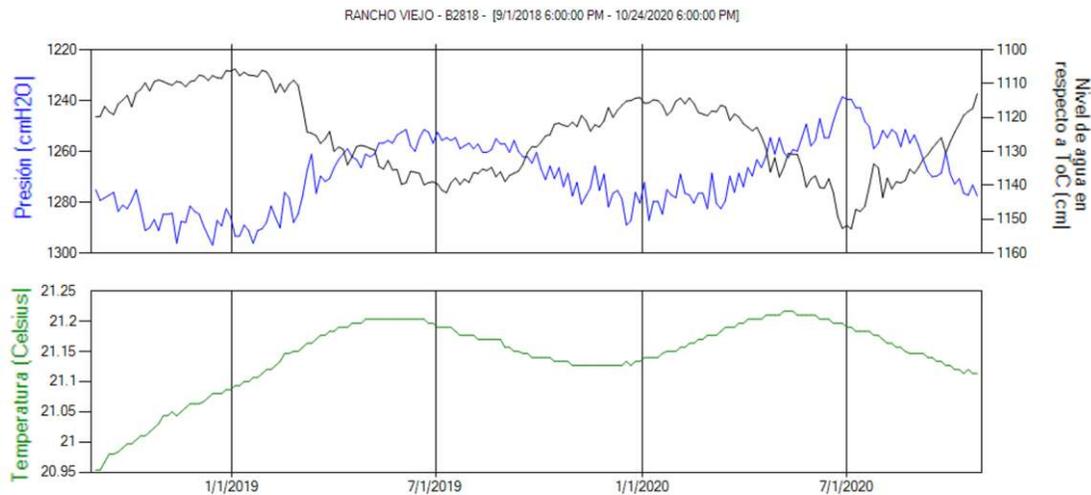


Figura 7. Evolución de presión, temperatura y nivel estático en el pozo “Rancho Viejo” capturada por piezometría digital de septiembre 2018 a octubre 2020.

Figure 7. Evolution of pressure, temperature and static level in the “Rancho Viejo” well captured by digital piezometry from September 2018 to October 2020.

Por otra parte, se realizó la modelación de líneas equipotenciales y abatimientos de cinco pozos (Fig. 8) dentro de la cuenca baja del Río Casas Grandes, denotando un flujo de agua con una tendencia de NE-SO representados por las variaciones de niveles estáticos. Estos niveles presentan fluctuaciones continuas a lo largo del estudio, los cuales son influenciados por la presencia de pozos de bombeo aledaños a los pozos monitoreados ya que la extracción continua de agua conlleva a la generación de conos de abatimiento dentro de los pozos y se reflejan en zonas cercanas a estos. Los niveles estáticos dentro de la parte noroeste del estudio están dentro de un rango de los 10 y 20 m de profundidad con respecto a la altura en metros sobre el nivel del mar del pozo, precedido con la tendencia hacia el suroeste por niveles estáticos entre los 20 y 30 m, siendo el nivel estático más profundo observado el del pozo “Rancho el Milagro”, por debajo de los 60 m. La dirección de flujo de agua subterránea presenta una tendencia NO-SE con dirección al abanico aluvial formado en las faldas de la Sierra Boca Grande viéndose representadas por las variaciones en los niveles estáticos de los pozos analizados.

Con respecto a la comparativa de evolución temporal de los pozos analizados (Tabla 1), se ven representadas las fluctuaciones de los niveles estáticos de 1996 a 2020 en el pozo “Rancho Viejo” dentro de los cuales existen decrementos en los niveles estáticos.

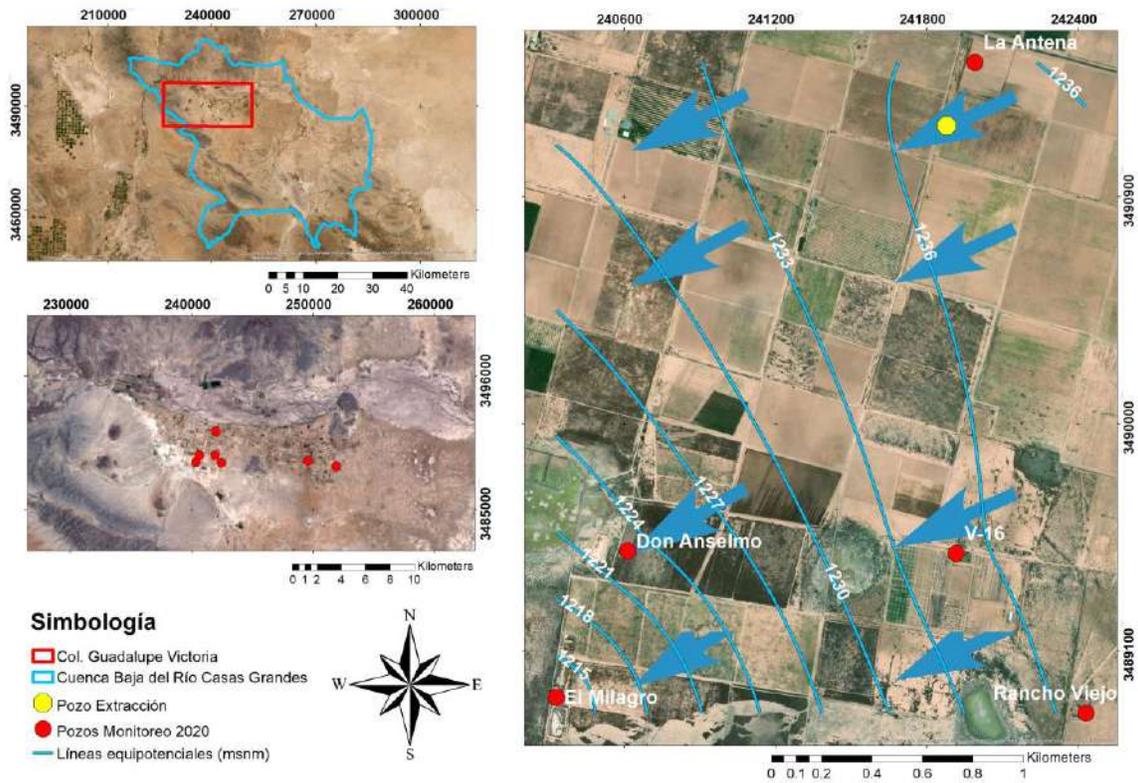


Figura 8. Modelación de líneas equipotenciales y flujos dentro de la Cuenca Baja del Río Casas Grandes
Figure 8. Modeling of equipotential lines and flows within the Lower Basin of the Casas Grandes River.

Tabla 1. Evolución temporal de los niveles estáticos en la cuenca baja del Río Casas Grandes.
Table 1. Temporal evolution of static levels in the Lower Basin of the Casas Grandes River.

| Pozo | Nivel estático (m) | | | | | |
|--------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1996 | 1999 | 2010 | 2013 | 2018 | 2020 |
| Rancho Viejo | 14.6 | S/R* | 11.71 | 12.17 | 11.8 | 11.7 |
| La Antena | S/R* | S/R* | 21 | 20.34 | 20.85 | 21.23 |
| Don Anselmo | S/R* | S/R* | 23.9 | 22.5 | 17.8 | 25.83 |
| El Milagro | 67.5 | 62.27 | S/R* | S/R* | 67.4 | 67.2 |
| V-16 | 21.2 | 19.86 | S/R* | S/R* | 15.5 | 15.55 |

*Sin registro piezométrico

*No piezometric register

Los pozos analizados para la comparativa 1996-2020 demuestran una evolución con fluctuaciones similares, demostrando descensos y aumentos de sus niveles estáticos relativamente bajos, exceptuando el pozo “Don Anselmo”, el cual presenta cambios drásticos en su nivel mostrando recuperación y abatimientos notorios. Es importante señalar que el pozo “La Antena” demuestra una gran estabilidad de su nivel estático al no presentar abatimientos debido a la presencia de un pozo en operación constante aproximadamente a 200 m de distancia (Fig. 8), demostrando que la complejidad geológica y estratigráfica del acuífero influye directamente en el nivel estático del pozo. En contraste, la piezometría digital permitió el análisis de los niveles estáticos del acuífero a tiempo real, denotando la basta cantidad de información generada en cada uno de los pozos analizados. Gracias a este método, se capturaron datos en intervalos de tiempo reducidos sin la necesidad de realizar repetidas visitas de campo.

4. Conclusiones

Dentro de esta investigación se documentó 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, demostrando su importancia para la realización de estudios geohidrológicos ya que facilita la obtención de datos en tiempo real, formando bases de datos más completas y confiables debido a la programación de los equipos. A su vez, denota la posibilidad de estudio de los acuíferos a grandes escalas de tiempo, sin la necesidad de visitar el área de estudio frecuentemente.

Con respecto a los datos obtenidos a partir de la piezometría digital, se visualizaron variaciones del nivel estático entre los 11.05 y 11.65 m en el periodo 2018-2020 dentro del pozo “Rancho Viejo”, presentando la mayor reducción del nivel en el año 2020. Dichos datos corroboran la comparativa histórica del periodo 2010-2020, dentro de la cual se registraron niveles estáticos cercanos a los 11.7 m, con un ligero descenso en el 2013 a los 12.17 m de profundidad. A su vez, se capturó un incremento de temperatura del agua de aproximadamente 0.2 °C a partir del año 2019 la cual no demostró ninguna tendencia de descenso. Cabe señalar que la temperatura del agua subterránea es uno de los mejores métodos de trazadores ambientales para la detección de flujos de agua debido a que la temperatura en los acuíferos es transportada no solo por conducción, si no por advección causada por los flujos de agua subterránea, influyendo en el perfil de temperatura del suelo. Dichos trazadores de temperatura son utilizadas para cuantificar las tasas de recarga en regiones áridas y semiáridas (Taniguchi, 1994; Kicuchi & Ferré, 2016).

La metodología implementada demostró un monitoreo consistente de la evolución temporal de los niveles estáticos dentro de la cuenca, permitiendo analizar los flujos de agua dentro del acuífero, así como los abatimientos generados dentro de este. Dentro de esto, se demostró una tendencia principal de flujo NO-SE remarcando un abatimiento generado hacia la sección sureste del área con dirección al abanico aluvial de la Sierra Boca Grande. Sin embargo, debido a que la complejidad litológica del área de estudio afecta en gran medida los flujos y niveles estáticos dentro de la infraestructura hidroagrícola, se requiere la ampliación de monitoreo para poseer un mayor conocimiento acerca de los flujos y generar una modelación más significativa del área, así como generar datos con mayor relevancia en lo que concierne a la evolución temporal y abatimiento del

acuífero. A su vez, la aplicación de estudios de geofísica en el área sustentaría y determinaría los perfiles estratigráficos del área, complementando estudios geohidrológicos futuros.

Es necesario el seguimiento del estudio de piezometría en el acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) de la cuenca baja del Río Casas Grandes, debido a que la mayor parte del agua utilizada en la zona proviene del acuífero y es empleada en extensas zonas de riego, ya que la agricultura es la actividad económica principal dentro de la cuenca. El uso intensivo del agua subterránea en la zona conlleva a una variedad de problemas como el abatimiento de los pozos, así como la pérdida total del nivel dentro de ellos. En este sentido, se considera necesaria la gestión del recurso hídrico para un uso sustentable ya que debido a la condición árida de la zona es propenso a la disminución de los niveles estáticos debido a la problemática actual del cambio climático.

5. Referencias

- Armendáriz, C. (2013). Implementación de nuevas tecnologías en la medición de niveles piezométricos en la Cuenca Baja del Río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua, México Tesis [Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez].
- Arreguín Cortés, F. I., Alcocer Yamanaka, V., Marengo Mogollón, H., Cervantes Jaimes, C., Albornoz Góngora, P. & Salinas Juárez, M.P. (2010), Los retos del agua. En *El agua en México: Cauces y Encauces* (pp. 51-78) Tlalpan, México: Comisión Nacional del Agua. Tlalpan (Ciudad de México): Academia Mexicana de Ciencias.
- Castro Condori, W. (2017). Evaluación del nivel freático de las aguas subsuperficiales en la parte baja del municipio de Umala provincia Aroma del departamento de La Paz. *Revista Estudiantil AGRO-VET*, 1(1), pp. 41-53.
- CONAGUA (2014). Comisión Nacional del Agua, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014) Programa Nacional Hídrico 2014-2018, Cd. de México, p. 29
- CONAGUA (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero (0812) Palomas-Guadalupe Victoria, Estado de Chihuahua. *Diario Oficial de la Federación*
- ESRI (2016) Environmental Systems Research Institute.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>
- Gobierno del estado de Chihuahua (2019). Gobierno del estado de Chihuahua, Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua, (2019). Plan Estatal Hídrico 2040 del estado de Chihuahua, Chihuahua, p. 27.
- 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) Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua, Aguascalientes, Aguascalientes, ISBN 970-13-4166-X, 9, pp 111-120

- Kikuchi, C.P. & Ferré, T.P.A. (2016). Analysis of subsurface temperature data to quantify groundwater recharge rates in closed Altiplano basin, northern Chile. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1472-1>
- Martínez, P. (2010). *Piezometría Digital en la Cuenca Baja del Río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua, México* Tesis [Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez].
- Pulido Bosch, A. (2000). La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización. *Boletín Geológico y Minero*, 111(5), pp. 3-18.
- Ramírez-Villazana, O., A. Granados-Olivas & A. Pinales-Munguía. (2016). Clasificación geoespacial de los indicadores del medio físico para la recarga del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria, Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua* 10(1): pp. 32-38.
- 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 [Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez].
- Servicio Meteorológico Nacional (2010). <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>
- Taniguchi, M. (1994). Estimated Recharge Rates from Groundwater Temperatures in The Nara Basin, Japan. *Hydrogeology Journal*, 2(4), pp. 7–14.
- VanEssen. (2020) Cera-Diver. <https://www.vanessen.com/products/water-level/cera-diver#key-specifications>