

Evolución temporal del flujo del agua subterránea en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando modelación geoespacial

Temporal evolution of groundwater flow in Ciudad Juárez, Chihuahua applying geospatial modeling

ARTURO SOTO-ONTIVEROS^{1,5}, ALFREDO GRANADOS-OLIVAS², ADÁN PINALES-MUNGUÍA³,
SERGIO SAÚL-SOLÍS² Y JOSIAH MCCONNELL HEYMAN⁴

Recibido: Agosto 25, 2018

Aceptado: Diciembre 4, 2018

Resumen

El agua subterránea es un recurso indispensable para el desarrollo de las poblaciones de zonas áridas. El acelerado crecimiento urbano y la falta de planeación para el manejo adecuado del recurso son las principales causas de presión para su disponibilidad. Esto provoca un descenso en los niveles de agua subterránea, induciendo un cambio en la dirección del flujo. En el presente trabajo se analizó la evolución de los niveles estáticos de los acuíferos Bolsón del Hueco y Bolsón de la Mesilla en Ciudad Juárez, Chihuahua en un periodo de 39 años (1975-2014), para estimar la dirección del flujo del agua subterránea. Se aplicaron procedimientos de modelación geoespacial y geoestadísticas por medio del método de interpolación de Kriging, para lo cual se usó información de la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS). Esta información es un registro histórico del nivel estático respecto a la elevación del brocal de los pozos para los años 1974, 1994 y 2014. Los resultados demuestran que la profundidad del nivel estático en la región ha variado durante este periodo desde los 30 m a los 140 m, generando conos de abatimiento locales, principalmente en el área central de la ciudad. Se necesitan nuevas políticas de desarrollo urbano que ayuden al uso sustentable del acuífero y prevean la sobreexplotación del acuífero.

Palabras clave: Bolsón del Hueco, Modelación Geoespacial, Agua Subterránea, Dirección de Flujo.

Abstract

Groundwater is a resource essential for the development of populations. The accelerated urban growth in the cities of the world is one of the main causes of the pressure on availability on the resource. Population growth, and the lack of planning for the proper management of the resource are causing a decrease in groundwater levels, generating a change in the direction of groundwater flow. This paper discusses the evolution of static groundwater levels of the Bolsón del Hueco aquifer over a period of 39 years (1975-2014). It also estimates the direction of groundwater flow in Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico. Geostatistical modeling procedures were used by applying Kriging interpolation method while using information from the Municipal Water and Sanitation Board (JMAS). The information is a historical record of the static groundwater levels for 1974, 1994 and 2014. The results show the depth of static water levels in the region has varied throughout this time period from 30 m to 140 m, generating local cones of depression mainly in the downtown area of the city. New urban development policies are required that could help the aquifer to accomplish a sustainable approach since presently it has generated negative consequences such as overexploitation of the aquifer.

Keywords: Bolson del Hueco, Geospatial Modeling, Groundwater, Flow Direction.

¹ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ. Instituto de Arquitectura Diseño y Arte. Av. Del Charro 450 norte. Ciudad Juárez, Chihuahua. México. C.P 32310

² UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Avenida Del Charro #450 Norte. Ciudad Juárez, Chihuahua. México. 32315. Tel. (656) 688-2100.

³ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA (UACH). Circuito Número I s/n, Nuevo Campus Universitario II. C. P. 31100 Chihuahua, Chih. Tel. (614) 442-9500.

⁴ UNIVERSIDAD DE TEXAS EN EL PASO. Centro de Estudios Interamericanos y de la Frontera.

⁵ Dirección electrónica del autor de correspondencia: asotoo@yahoo.com

Introducción

La disponibilidad de agua, en cantidad y calidad, es hoy en día una necesidad clave para el desarrollo de las poblaciones. La presión por el recurso agua puede llegar a afectar su disponibilidad y calidad, disminuyendo con esto su aprovechamiento e inclusive su uso para las necesidades más vitales de las poblaciones.

Esta situación puede convertirse en un freno al desarrollo, por lo cual se requiere de acciones en el proceso de aprovechamiento del agua subterránea, con el fin de optimizarlo desde una perspectiva del desarrollo (Manzano-Solís, 2007). El agua subterránea constituye la fuente principal de abastecimiento de agua en nuestro país, especialmente en la parte norte, en donde las precipitaciones son escasas e irregulares y las temperaturas muy altas. Sin embargo, estas fuentes no son inagotables y es necesario preservarlas (Ruíz, 2008). Cuando la extracción de las aguas subterráneas supera la recarga, se consume el agua almacenada en los acuíferos y se generan abatimientos de los niveles freáticos. De tal manera que, si esta situación se prolonga el volumen almacenado de agua disminuirá progresivamente, provocando una serie de consecuencias negativas, que van desde el cambio de la dirección del flujo hasta el agotamiento del acuífero, entre otros impactos ambientales. Esto podría provocar la disminución de la calidad del agua, frenar el crecimiento urbano, desaparición o reducción de los caudales base de los ríos, la eliminación de la vegetación nativa o incluso la pérdida del ecosistema por la degradación completa de la fuente de abastecimiento.

De acuerdo con datos de CONAGUA, el acuífero binacional del Bolsón del Hueco localizado el norte de Chihuahua, tiene una condición de sobreexplotación, por lo que se ha establecido veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas al sureste de Ciudad Juárez, Chihuahua, lo cual fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de marzo de 1952 (CONAGUA, 2008). De continuar estas tendencias de sobreexplotación del acuífero se podrían tener consecuencias negativas directas en la producción de agua potable, en donde un descenso importante del nivel estático originado por el bombeo intenso de las aguas subterráneas estaría presente en la región. Estos descensos de los niveles piezométricos afectan el entorno inmediato de los pozos e inclusive

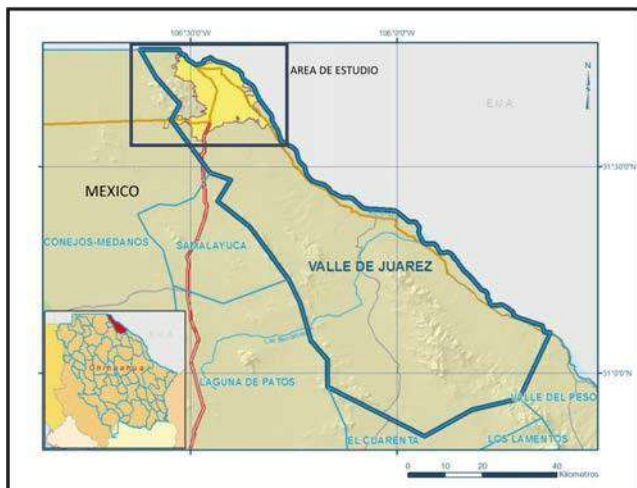
en una zona de influencia más amplia. El monitoreo del nivel estático de las aguas subterráneas en la ciudad provee de importante información para la evaluación temporal del abatimiento, y para la planeación sustentable de la explotación del agua subterránea en una región. El Bolsón del Hueco es un acuífero que, de acuerdo con la información existente, a partir de 1965 comienza un intenso aprovechamiento de su disponibilidad, pero también se inicia un importante abatimiento de sus niveles (Sanchez, 2017). Por ejemplo, en Ciudad Juárez, Chihuahua se tienen registros desde 1965 de los niveles estáticos, reflejando cómo ha cambiado la dirección del flujo desde 1903. El flujo del agua subterránea, antes de su explotación, era en dirección hacia el cauce principal del Río Bravo; después, por el intenso bombeo a que ha estado sometido el acuífero, se han identificado conos de abatimiento puntuales, principalmente en el centro de la ciudad (Hutchison, 2004).

En en la presente investigación se analizaron y evaluaron los niveles estáticos para poder determinar la evolución geoespacial y temporal de la dirección del flujo del agua subterránea del acuífero del Bolsón del Hueco.

Características del área de estudio.

El acuífero Bolsón del Hueco tiene su localización en la frontera norte del estado de Chihuahua, colinda con el país vecino de los Estados Unidos de América, observándose como frontera natural el cauce del río Bravo. Su geometría es irregular, con una superficie alargada de aproximadamente 3,386.45 km² de extensión, que se encuentra contenida entre los paralelos 31° 07' y 31° 48' de latitud norte; los meridianos 106° 10' y 106° 58' de longitud oeste; altitud entre 1,000 y 1,900 m, incluye parcialmente el Distrito de Riego 009 del Valle de Juárez, la totalidad de la zona urbana de Ciudad Juárez y la zona de Anapra como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Localización del Acuífero Bolsón del Hueco y zona de estudio (Conagua, 2009).



Ciudad Juárez ha experimentado un crecimiento demográfico notable, basado desde un principio en el comercio e intercambio fronterizo, y desde 1965 en la industria maquiladora (Martínez, 2018). El intenso crecimiento en una región muy árida presenta desafíos a la sostenibilidad medio ambiental (Heyman, 2007).

Geología.

En el área de estudio, la geología está formada por unidades litológicas que datan del mesozoico hasta el cenozoico, formadas por rocas clásticas y carbonatadas. Los sedimentos del relleno de la cuenca, por lo regular son materiales heterogéneos débilmente consolidados y no consolidados que sobreyacen rocas desde el Precámbrico hasta el Terciario (Sandeen, 1954). Las rocas más antiguas son de tipo sedimentario y de origen marino, y corresponden a las formaciones Navarrete-Las Vigas, Cuchillo y Grupo Aurora, las cuales fueron depositadas en la Cuenca Chihuahua durante el Cretácico Inferior y están representadas por lutitas-areniscas, calizas arcillosas y biógenas y calizas respectivamente (CONAGUA, 2008). Dichos estratos van desde la sierra de Juárez, sierra El Presidio, hasta la sierra de Guadalupe en el norte de Chihuahua, México (De la O'Carreno, 1957, 1958; GeoFimex, 1970; Wilkins, 1986).

El agua subterránea se aloja principalmente en los depósitos terciarios del bolsón, el cual está constituido principalmente por material arenoso con algunas capas delgadas de arcilla con características de semi-confinado, siendo aprovechado por los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez, Chihuahua. La mayor parte de los pozos de uso agrícola se emplazan solo en los depósitos del aluvión y raramente rebasan los 100 m de profundidad, mientras que los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez extraen agua principalmente de los depósitos de bolsón y tienen profundidades promedio de 250 m, los sedimentos del aluvión Río Bravo tienen espesores que varían de 40 a 100 m y se componen de materiales con granulometría que va de gravas a arcillas y arenas; dispuestos en estratos irregulares de espesores variables, cuya litología cambia gradualmente tanto lateral como verticalmente, existiendo una predominancia de las gravas y arenas (CONAGUA, 2008).

Los depósitos sedimentarios del acuífero varían lateralmente en su granulometría, predominando las arenas, limos y arcillas, dichos estratos se extienden por el valle agrícola y va desde el poblado de Loma Blanca al sureste de Ciudad Juárez, Chihuahua hasta el poblado de Guadalupe, D. B., en esta estratigrafía regional, se puede observar un estrato arenoso a una profundidad aproximada de 450 m; este estrato es más permeable que los depósitos areno-arcilloso que lo circundan, y aparentemente se extiende hacia zonas de recarga con más elevación, lo cual provoca artesianismo, en donde incluso llega a brotar agua a la altura del poblado El Millón, el cual se abastece de agua potable a través del pozo PJB-5 que alcanza a emplazarse en el mencionado estrato (CONAGUA, 2008).

Existe una tendencia a aumentar el contenido de arcilla desde el valle agrícola hacia la zona de las Sierras de Presidio, Guadalupe y San Ignacio, lo cual se refleja en la disminución de gastos de extracción de los pozos perforados en esas zonas, aunque la calidad del agua, por el contrario, tiende a mejorar sustancialmente hacia esas zonas.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo recopilando información de diferentes fuentes, sobre todo la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS), del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La JMAS proporcionó una base de datos con el registro histórico del nivel estático respecto a la elevación del brocal para los años 1974, 1994 y 2014, variando la cantidad de pozos de 33 en 1975 hasta 212 pozos al 2014, todos localizados Acuífero del Bolsón del Hueco. La información estadística se procesó con el paquete computacional de Sistema de Información Geográfica ArcGIS, y su extensión Spatial Analyst, utilizando el método geoestadístico de interpolación de Kriging.

El método de Kriging es un método geoestadístico de interpolación avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos, que ha probado ser útil y popular en muchos campos (Burgess y Webster, 1980). Kriging pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(s_i) \quad (1)$$

donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = un peso desconocido para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = el número de valores medidos

Kriging provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regulares o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una mínima varianza conocida (Fundecor, 2018). Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial y que proporcionan alguna medida de precisión de los pronósticos, con la interpolación de los años propuestos en la investigación. En el presente estudio, se utilizó este

procedimiento metodológico para estimar la elevación piezométrica, y con ello las isolíneas con las elevaciones de los niveles estáticos. Las redes de flujo se generaron para los años 1975, 1994 y 2014, para la elaboración de mapas. Además, se utilizó la extensión Arc Hydro Groundwater para la visualización de este proceso geoespacial que genera las direcciones del flujo utilizando las curvas de igual elevación y mostrando continuidad en las direcciones del flujo dominante para cada periodo de tiempo. Esta extensión sigue los principios generales para establecer la dirección del flujo y se establece de forma perpendicular en función de la pendiente de las curvas de igual elevación estático. Los factores que influyen en una configuración piezométrica pueden ser tanto hidrológicos como geológicos, debiendo considerar la topografía de la zona, los afloramientos geológicos, los ríos, lagunas, manantiales, zonas empantanadas, distribución de pozos, y canales.

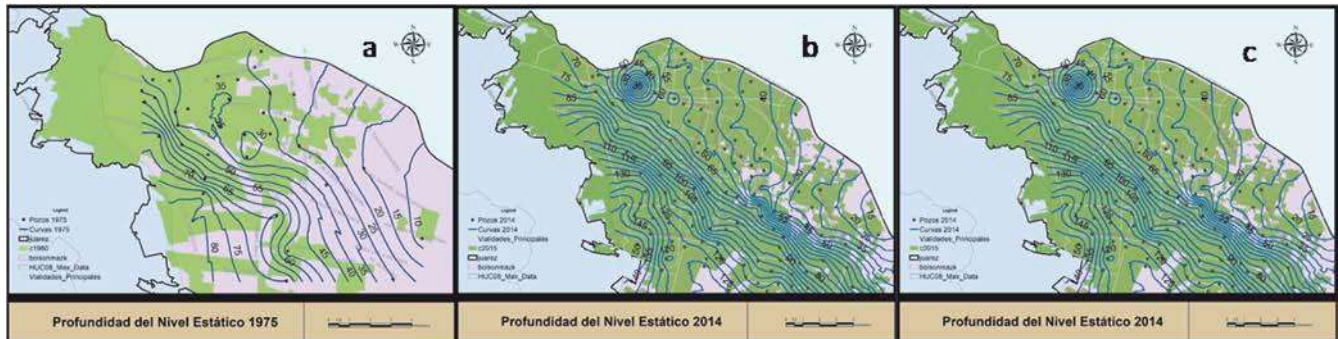
Resultados y discusión

Profundidad del nivel estatico.

En lo que respecta a la evolución piezométrica del año 1975, los valores de menor profundidad del nivel estático se encuentran en el área de la planicie fluvial del río Bravo, con 10 a 15 m de profundidad. Estos valores de poca profundidad al espejo del agua subterránea se dan principalmente por ser la parte topográficamente más baja de la ciudad, de pendientes muy suaves constituida por los depósitos aluviales y fluviales que conforman la planicie o valle del río Bravo, localizados en una franja angosta en ambos márgenes del río Bravo y varía entre 9 y 11.5 km de ancho, con un promedio de 9.5 km de ancho.

La profundidad al nivel estático del agua subterránea en esta sección aumenta hacia el poniente sobre las colonias colindantes de la Sierra de Juárez con profundidades de entre 75 m y 80 m, se aprecia que los valores de las curvas se profundizan conforme se acercan a la zona montañosa al poniente como se aprecia en la Figura 2a. Debido a la elevación topográfica de la superficie del terreno, la elevación del nivel del agua subterránea se profundiza en estas zonas de la ciudad. En lo que respecta al centro de la ciudad, varía de los 30 a 40 m donde se concentra la mayor parte de la población, alcanzando casi los 500 mil habitantes para este año de 1975.

Figura 2a, b, c Profundidad del nivel estático del agua subterránea de 1975, 1994, y 2014 en Ciudad Juárez, Chih. (Elaboración propia).



En la Figura 2b, se puede observar la red de monitoreo piezométrico conformada por 53 pozos que cubrían Ciudad Juárez en 1994 y contaban ya con nivelación de brocal. Los valores de menor profundidad al espejo del agua subterránea siguen siendo las riberas del río Bravo, pero ahora con una profundidad de 30 m a 35 m comparados con los 10-15 m de profundidad presentados en 1975, lo que demuestra un abatimiento debido principalmente al excesivo bombeo causado por el aumento de población y por la creación de nuevos asentamientos en lo que anteriormente eran áreas agrícolas.

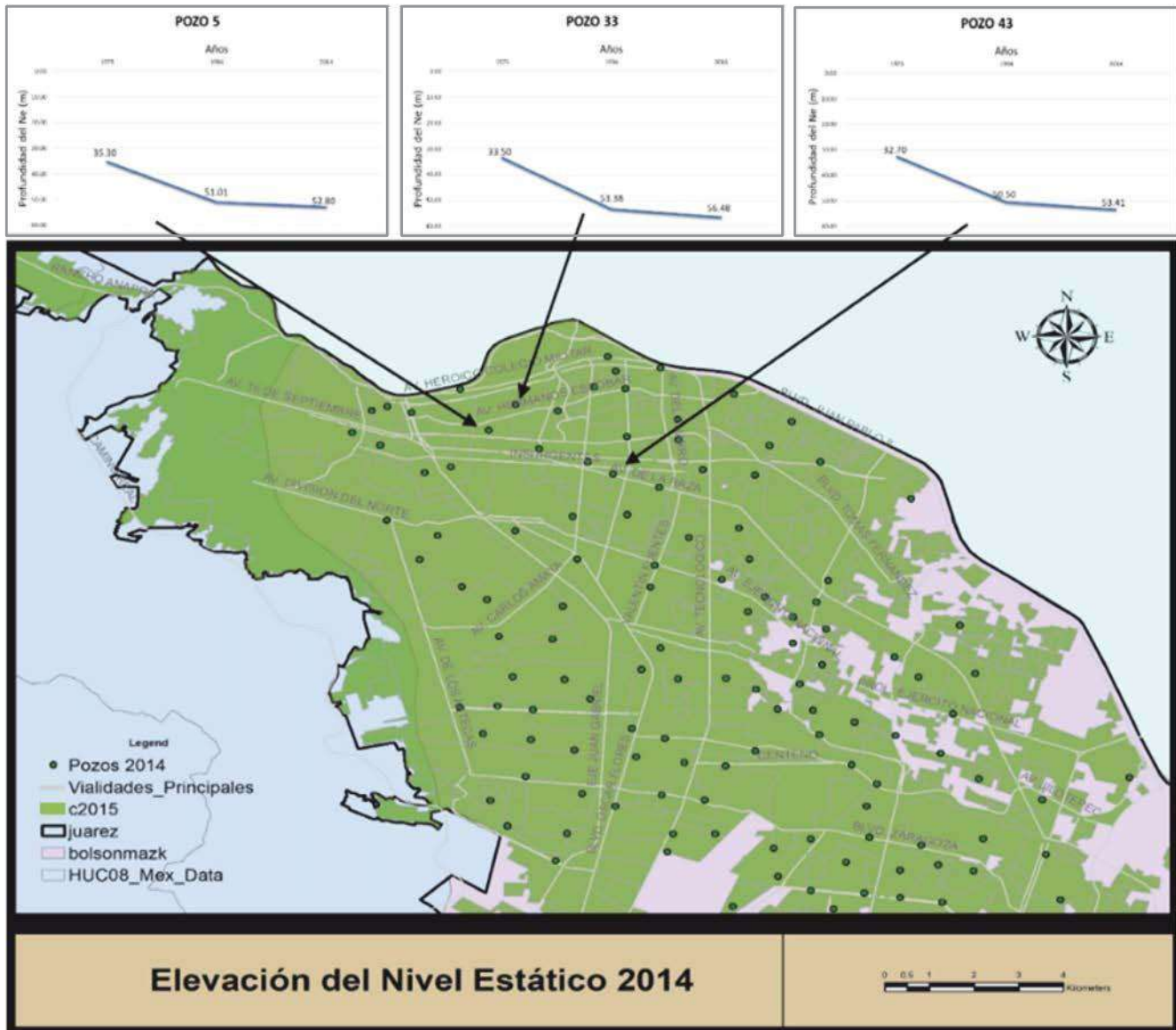
En la zona central se tiene una profundidad de 50 a 55 m donde se concentra gran parte de la población, en lo que respecta a colonias colindantes de la Sierra de Juárez, los valores se profundizaron de 80 m que tenía en 1975 a 120 m para 1994, estos descensos de los niveles estáticos son causados principalmente por las demandas del recurso conforme al aumento de población, que de 1975 a 1994 la población se duplicó de 500 mil a casi el millón de habitantes.

Con relación al año 2014, la red de monitoreo piezométrico estuvo conformada por 176 pozos que cubrían Ciudad Juárez y contaban ya con nivelación de brocal, las configuraciones de la profundidad del nivel estático se comparan con las anteriores y se observan las fluctuaciones que se han registrado en especial al decremento de los niveles estáticos. La profundidad del nivel estático para el año de 2014 incluye curvas que van de 15 a 150 m, los valores que se encuentran en la ribera del río Bravo son de 15 a 40 m como consecuencia de los nuevos asentamientos

urbanos, principalmente el denominado «Riberas del Bravo». Al pie de la Sierra de Juárez los niveles estáticos fluctúan entre los 130 y los 150 m, cómo se puede observar en la Figura 2c. Estos descensos de los niveles estáticos son el resultado de un incremento de población, que de 1994 al 2014 aumentó en casi 400 mil habitantes, extrayendo 177,468,891 m³ de agua solo para el 2014. Hay que resaltar que algunas áreas, principalmente en el norte de la ciudad, los niveles se habían logrado mantener o en algunos casos reducir sus abatimientos, como lo vemos en las curvas de niveles estáticos en las curvas del centro, en donde los niveles estáticos se sostienen en los 35 m al espejo del agua respecto a los pozos colindantes, este sostenimiento se debe principalmente a la entrada en operación de la batería de pozos de Conejos Médanos en el año 2010 que provee agua a esa zona de la ciudad y algunos pozos dejan de bombear en esa área y el nivel se recupera gradualmente.

La Figura 3 muestra una tendencia de descenso en los niveles; y un repunte en la zona norte de la ciudad. Se puede considerar en forma general que se está tendiendo a una compensación de los niveles estáticos del agua en el acuífero y algunas zonas están en recuperación. Estos pozos se ubican dentro del Bolsón de la Mesilla localizado al poniente de la ciudad, que es un acuífero separado por la barrera orográfica de la Sierra de Juárez. En el acuífero Conejos Médanos se localizan 26 pozos con una profundidad promedio de 250 metros y actualmente se encuentran en operación 23, extrayendo en conjunto un caudal promedio de 830 l/s, (COCEF, 2013), agua que entra al sistema de distribución de la ciudad.

Figura 3. Evolución temporal-geoespacial al nivel estático en la mancha urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua (Elaboración propia).



Elevación del nivel estático.

La elevación del nivel estático respecto al nivel del mar en los años de 1975, 1994 y 2014 se incluyen entre las Figuras 4a, b, c. Una comparación entre ellas muestra la modificación que ha existido, donde se destaca el crecimiento de los conos piezométricos, principalmente en el área central de la ciudad.

Las curvas de elevación del nivel estático en el 1975 presentan valores de hasta 1110 msnm al sur

oriente de la ciudad, como lo vemos en la figura 4a. Al pie de la Sierra de Juárez, en el poniente de la ciudad, la elevación del nivel estático es de 1085 msnm y continúa disminuyendo hacia la parte sur, que es una zona plana de la ciudad donde el nivel fluctúa entre 1055 msnm, donde se ha formado un gran cono de abatimiento, lo que representa un diferencial de 30 m de abatimiento y marcando un flujo hacia el sur de la ciudad.

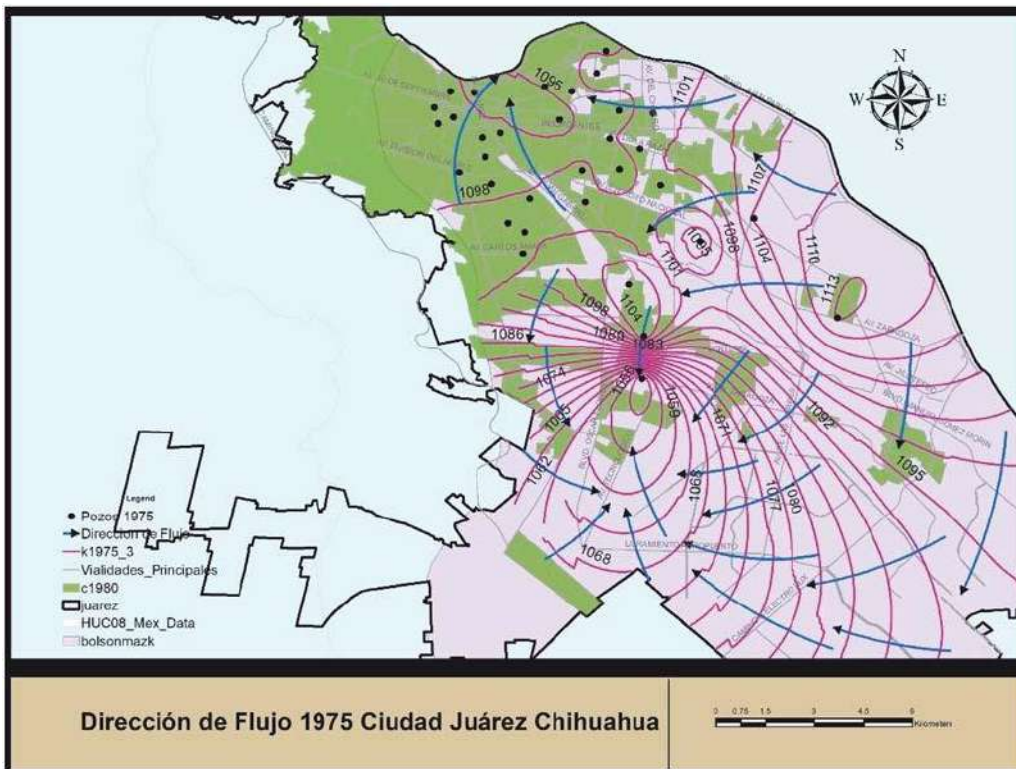
Figura 4a, b, c. Elevación del nivel estático del agua subterránea de 1975, 1994 y 2014. Ciudad Juárez, Chihuahua (Elaboración propia).



Para el año 1994 se presentan valores desde 1095 msnm a 1077 msnm principalmente en la zona norte de la ciudad, en colindancia con los Estados Unidos de América, los cuales disminuyen hacia la zona sur de la ciudad rumbo al aeropuerto, en donde se presenta la curva 1068 msnm para la zona de la ribera del río Bravo. Esto es debido al gran cono de abatimiento que se tiene en esa área de la ciudad ocasionada por el excesivo bombeo de agua subterránea por parte de la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento para poder

cubrir la demanda de la población. En este sentido, es por lo que las elevaciones fluctúan entre 1068 msnm a los 1077 msnm, al pie de la sierra de Juárez, entre los 1077 msnm a 1080 msnm como lo vemos en la figura 4b. Es claro que el desarrollo urbano en la ciudad y el equipamiento de pozos profundos en esa zona demuestran que en la planeación del crecimiento urbano no se considera la disponibilidad ni los estudios y modelación de los flujos de agua subterránea por efectos del bombeo, que ponen en riesgo las adecuadas estrategias del desarrollo urbano.

Figura 5. Dirección de flujo y nivel estático 1975. Ciudad Juárez, Chihuahua (Elaboración propia).



En el año de 2014 las elevaciones varían de 1092 msnm en las riberas del río Bravo y de 1056 msnm al pie de la sierra de Juárez. Los abatimientos están generalizados a lo largo de la ciudad como consecuencia del aumento de extracción de agua del acuífero, como lo vemos en la figura 4c.

Dirección de flujo 1975-1994-2014.

Las redes de flujo se generaron para los años 1975, 1994 y 2014. Para el año 1975 se aprecia una gran zona de abatimiento cercana al aeropuerto, con un descenso de aproximadamente 70 m, casi el doble de profundidad promedio de nivel estático que es de 39 m, por lo cual, las equipotenciales de flujo van en esa dirección, como ya se había mencionado anteriormente, desde 1960, en donde el flujo ya se centraba desde entonces en esa zona central de la ciudad, como se aprecia en la figura 5.

En el mapa de la Figura 6 de 1994 se aprecia la irregularidad de las redes de flujo que no presentan un patrón de dirección en particular. Esto puede ser por el bombeo o manejo de la red de distribución de agua debido a las diversas demandas en la ciudad y la operación de los pozos como en los años anteriores, pero con la diferencia de que esas zonas están más en el área central de la ciudad. De tal manera que desde 1985 se empiezan a colapsar algunos pozos, por lo que la Junta Municipal de Agua y Saneamiento los empieza a reemplazar con nueva infraestructura de bombeo. Ya para el año 1994 se tienen más de 20 remplazos de estos pozos ubicados la mayoría perforados cercanos a la ubicación del pozo original de remplazo. Por lo que los abatimientos continúan presentándose en los mismos lugares ya señalados, en donde en este año en particular se presentan abatimientos de hasta 104 m, por lo que la dirección de flujo se mantiene en la misma zona del aeropuerto.

Figura 6. Dirección de flujo y nivel estático 1994. Ciudad Juárez, Chihuahua (Elaboración propia).

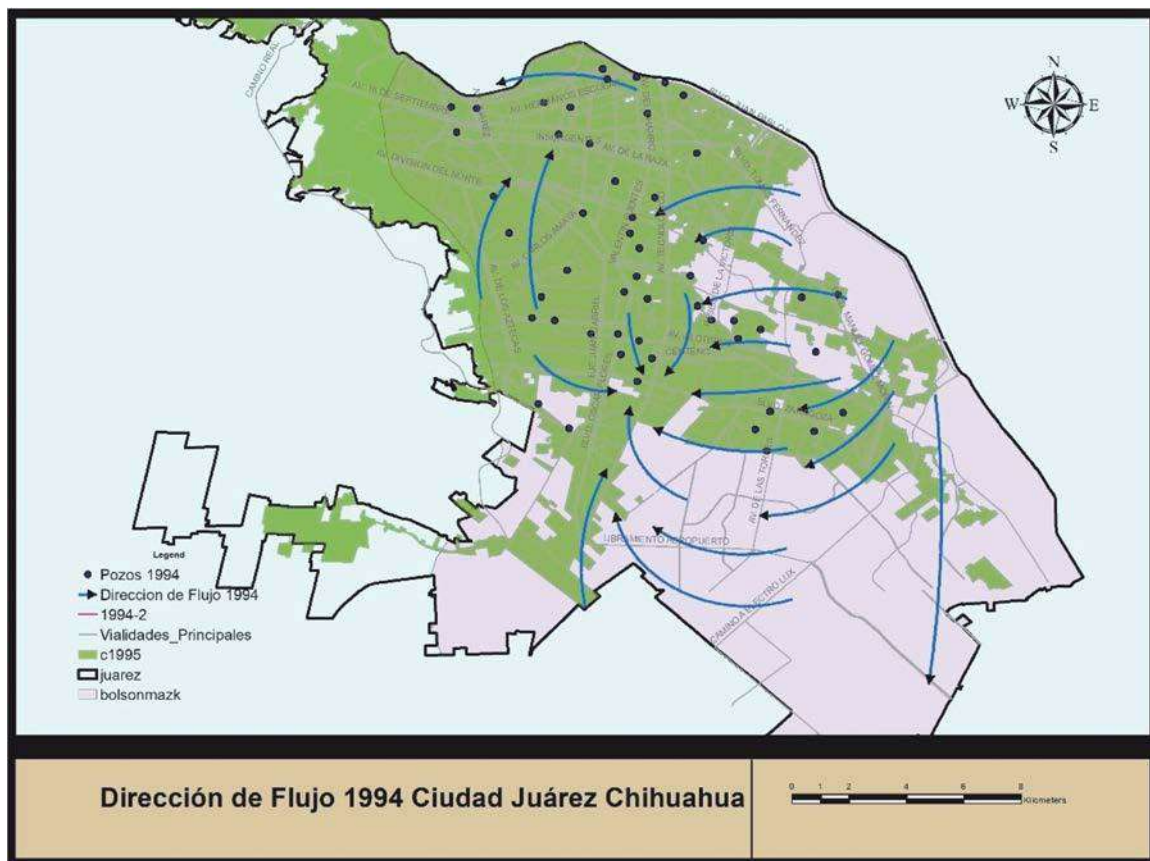
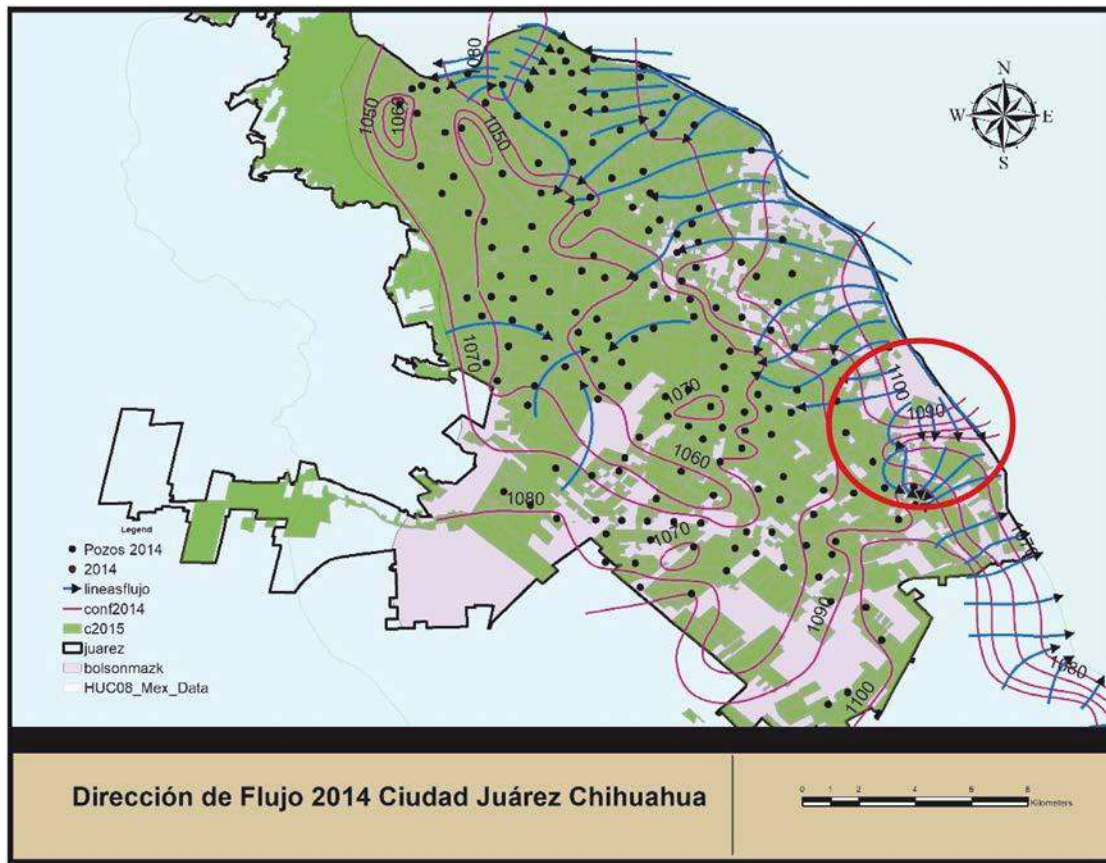


Figura 7. Dirección de flujo y nivel estático 2014. Ciudad Juárez, Chihuahua (Elaboración propia).



En la Figura 7, con datos más recientes de niveles estáticos, se aprecian grandes zonas de descensos de niveles del agua subterránea generalizados en casi toda la ciudad. A diferencia de los años anteriores, en donde los abatimientos se apreciaban en el área cercana del aeropuerto, en este año en particular se aprecia que los pozos circundantes donde se localizaba el pozo 43 (Figura 3), se tienen todavía un gran abatimiento debido a la gran extracción que se presenta todavía en este año. Los 23 pozos de remplazo que había en 1994 pasaron a ser 55 en el 2014, por lo que los descensos continuaron presentándose en los mismos lugares ya señalados. Para este año se presentan abatimientos de hasta 149 m, y es por esta razón que la dirección de flujos de agua subterránea continúan generándose hacia la mancha urbana de la ciudad, los que nos indica que el desarrollo urbano de la ciudad afecta sustancialmente las el movimiento del flujo de agua subterránea. Hay que resaltar que hay un cambio de dirección del flujo en una zona de transición, entre los flujos que entran y los que salen de la ciudad hacia la ciudad

estadounidense de El Paso, Texas como lo vemos en la Figura 7 en el círculo rojo. En esta zona los flujos cambian de dirección, posiblemente esto se deba a que es una zona periurbana donde el exceso de riego y la poca demanda por parte de los agricultores mantienen los niveles estáticos estables, por lo que el agua fluye de manera natural a lo largo del río Bravo como una zona de recarga natural. Los flujos que entran a la ciudad es por el gran abatimiento que se tiene en el centro de la ciudad que direccionan o ejercen influencia para direccionar los flujos hacia esa zona. En contraparte, los que salen se deben a que en el nivel estático está muy cerca de la superficie y los flujos tienden a ir a la parte topográficamente más baja, que es hacia la zona del río Bravo. Una probable solución al problema generalizado de abatimientos y cambios de dirección de flujos que presenta el acuífero, sería el de construir una batería de pozos similar a la que se tiene en Conejos-Médanos, colocada al suroriente de la ciudad para liberar la presión que se tiene sobre todo en la zona central de la ciudad.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero en el periodo comprendido entre 1975 y 2014, ha ocasionado que la profundidad al nivel estático dentro de la mancha urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, varíe aproximadamente desde los 30 a los 140 m, excepto en la zona ripariana del río Bravo, donde las profundidades son generalmente menores de 15 m. Esto puede ser debido al intenso bombeo del agua subterránea para garantizar el suministro de agua potable para una población que cada día va en aumento.

Por otro lado, se presentan en los hidrogramas de la Figura 3, la evolución piezométrica donde se muestra la profundidad del nivel estático que ha ido en descenso. En tiempos recientes el descenso se ve compensado levemente con un cambio de pendiente en los hidrogramas, principalmente en las zonas norte y centro de la ciudad.

En tiempos de «predesarrollo» en Ciudad Juárez la extracción en el año de 1903 era mínima, y el agua subterránea fluía esencialmente de norte a sur en Nuevo México y Texas hasta que llega al río Bravo. Esto se demuestra cuando los gradientes hidráulicos «giran» hacia el sureste y las líneas de flujo seguían la «corriente del río Bravo» de manera natural por ser la parte más baja de las ciudades de Ciudad Juárez, en México y El Paso, Texas en los Estados Unidos. Por otro lado, la dirección del flujo de agua subterránea antes de 1960 era de Ciudad Juárez a El Paso, y a partir de 1960, por el aumento del bombeo en Ciudad Juárez, el flujo empezó a cambiar. Ya en la década de los 90 se observa un importante cono de abatimiento en la parte central de Ciudad Juárez causado por un bombeo intenso. Dando como resultado un cambio de tendencia y ahora el agua subterránea fluye de El Paso a Ciudad Juárez en respuesta a dichas extracciones. Es por esto que los abatimientos son más fuertes y lo suficientemente grandes como para revertir el gradiente hidráulico natural que tendía a fluir a lo largo de la cuenca con gradiente hacia la pendiente natural del río Bravo.


Se necesitan nuevas políticas de desarrollo urbano que ayuden a que el acuífero sea sustentable. Actualmente se han provocado consecuencias ambientales negativas como la sobreexplotación del acuífero en el Bolsón del Hueco, principalmente en la zona central de la ciudad, lo que podría tener afectaciones tanto en lo social, ambiental, económico

y político, puesto que la toma de decisiones no obedece a una adecuada planeación urbana conforme a la disponibilidad y evolución piezométrica del acuífero en cuestión.

Agradecimientos

Este material se basa en el trabajo que es apoyado por el Instituto Nacional de la Alimentación y la Agricultura del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NIFA-USDA por sus siglas en inglés), bajo el fondo de soporte número 2015-68007-23130.

Literatura citada

- BURGESS, T., and R. Webster. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II block kriging. *Journal of Soil Science* 31(2):333-341.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). 2008. Actualización geohidrológica del Acuífero Valle de Juárez, Chihuahua, México.
- COCEF. 2013. Actualización de Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Juárez, Chihuahua.
- DE LA O'CARRENO, A. 1957. Estudio Geohidrológico preliminar del Valle de Juárez y sus áreas circunvecinas, estado de Chihuahua. México, D.F.
- FUNDECOR. 2018. Laboratorio Vivo de mi Paisaje, San Jose, Costa Rica. <https://www.fundecor.org/>
- GEO FIMEX, S.A., 1970. Valle de Juárez, Chihuahua, Estudio Geofísico: Sociedad de Reconocimientos Geotécnicos Del Grupo S.R.G., Coyoacán, México, 16 p.
- HEYMAN, J. M. 2007. «Environmental Issues at the U.S.-Mexico Border and the Unequal Territorialization of Value,» en Alf Hornborg, J. R. McNeill, and J. Martinez-Alier, coord., *Rethinking Environmental History: World-System History and Global Environmental Change*, Walnut Creek, CA: AltaMira Press, pp. 327-344.
- HUTCHISON, W. G. 2004. Hueco Bolson groundwater conditions and management in the El Paso Area. *Hydrogeology Report EPWU*, 04-01.
- SÁNCHEZ, R. L. 2017. Balance y perspectivas de la administración del agua en el Municipio de Juárez. Parte I. *CULCyT*, (61).
- LUQUE RODRÍGUEZ, R. I. 2013. Estudio de la evolución temporal y espacial del nivel estático del acuífero Valle del Mayo para el periodo 1997-2011.
- MANZANO-SOLÍS, L. R. 2007. Diseño de Base de Geodatos Censales Demográficos e Implementación Geomática de Indicadores Hídricos. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. 201p
- RUIZ, J. L. 2008. Impacto de la sobreexplotación del acuífero del Valle de Guaymas en la Calidad del Agua, Tesina, Colegio de Sonora. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo.
- SANDEEN, W. M. 1954. Geología de la Cuenca Tularosa, Nuevo México, libro guía del sudeste de Nuevo México: Sociedad Geológica de Nuevo México, quinta conferencia de campo, p 81-88.
- WILKINS, D. W. 1986. Hidrogeología y análisis de los sistemas acuíferos regionales de las cuencas aluviales del sudoeste, porciones de Colorado, Nuevo México y Texas, informe de investigación de recursos hidráulicos núm. 84-4224 del U.S. Geological Survey, p. 61. 

Este artículo es citado así:

Soto-Ontiveros, A., A. Granados-Olivas, A. Pinales-Munguía, S. Saúl-Solís, y J. McConnell Heyman. 2018. Evolución temporal del flujo del agua subterránea en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando modelación geoespacial. *TECNOCIENCIA Chihuahua* 12(2):103-113.

Resumen curricular del autor y coautores

ARTURO SOTO ONTIVEROS. Terminó su licenciatura en ingeniería Civil en el año de 2002 en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Su maestría la realizó en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas en el área terminal de Hidrología Subterránea en el Año 2008. Actualmente se encuentra terminando el grado de Doctor en Estudios Urbanos en el Instituto de Arquitectura Diseño y de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), con la tesis titulada "Disponibilidad de Agua Subterránea y su relación con el Desarrollo Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua: Un análisis retrospectivo y prospectivo durante el periodo 1980 al 2030". Ha participado en congresos como ponente, es coautor de diversas publicaciones y capítulos de libros. Actualmente es uno de los Investigadores técnicos por la sección mexicana del proyecto financiado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos denominado "Sustainable water resources for irrigated agriculture in a desert river basin facing climate change and competing demands: From characterization to solutions" proyecto que se desarrollará durante el periodo del 2015 al 2020 con una bolsa de 4.9 millones de dólares.

ALFREDO GRANADOS OLIVAS. Desde 1990 ha sido Profesor-Investigador asignado al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental en la UACJ. Tiene la distinción de haber obtenido el reconocimiento como Investigador Nacional Nivel I por parte del Sistema Nacional de Investigadores (SNI 2004-2019). El Dr. Granados fue Gerente Técnico del PRONACOSE (Programa Nacional Contra la Sequía) establecido por el presidente Enrique Peña Nieto a principios del 2013. Obtuvo recientemente el premio "Distintivo Sustentable 2013 en el área de Investigación otorgado por parte de la SAGARPA y el Gobierno del Estado de Chihuahua, por sus estudios en el uso eficiente del agua en la agricultura. Así mismo, obtuvo el Premio Estatal en Ciencia, Tecnología e Innovación 2013 categoría de Ciencia en el Área de Medio Ambiente y Recursos Naturales por parte del Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno del Estado de Chihuahua. Recientemente ha sido acreedor del Reconocimiento al Mérito Académico 2016 Región I, otorgado por la Asociación Nacional de Escuelas y Facultades de Ingeniería (ANFEI). Ha sido asesor de tesis de licenciatura, maestría y doctorado en: 9 tesis de nivel doctoral, 29 tesis a nivel maestría y 19 tesis a nivel licenciatura y ha publicado como autor principal o en co-autoría con pares académicos 87 artículos arbitrados, 40 memorias en extenso y 10 reportes técnicos.

ADÁN PINALES MUNGUÍA. Terminó su licenciatura en Ingeniería Civil en el año de 1996 en la Universidad de Colima (UCol). Realizó el posgrado en la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), en Chihuahua, Chih., donde obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología Subterránea en 1999 y el grado de Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en Modelación del Agua Subterránea, en el año de 2004. Desde 2005 labora en la Facultad de Ingeniería de la UACH y posee la categoría de Académico Titular C. Fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores en el periodo de 2006 a 2009 (candidato). Sus áreas de especialidad son: Hidrología Subterránea, Modelación Matemática de Sistemas Acuíferos, Diseño de Redes de Monitoreo y Diseño de Códigos de Computadora para la Simulación Matemática de Acuíferos. Ha dirigido 20 tesis de licenciatura y 18 de maestría. Es autor o coautor en más de 40 publicaciones en congresos, capítulos de libros, libro y artículos. Ha dirigido 5 proyectos de investigación financiado por fuentes externas.

SERGIO SAÚL SOLÍS. Cuenta con estudios de Doctorado por la Universidad de Sheffield (Inglaterra), en el área de Hidráulica Ambiental y de Maestría por la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) en el área de Ingeniería Ambiental. Con relación a su experiencia laboral, de 1993 a 1997 trabajó en la sección mexicana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), en el cual participó en varios proyectos de monitoreo de aguas binacionales. Concurrentemente, en este periodo trabajó en diversas áreas del Laboratorio de Química Analítica Ambiental de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Durante 1999 fue asistente de investigación en el Centro de Estudios Ambientales y Administración de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP). Es coordinador del Cuerpo Académico Consolidado (UACJ-CA91) de Modelos Ambientales, del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UACJ, además de contar con perfil PRODEP, de la Secretaría de Educación Pública. Ha impartido diversas clases en el programa de licenciatura en Ingeniería Civil (Tratamiento de Aguas Residuales, Seminario de Ecología, Sistemas de Información Geográfica, Sensores Remotos, Proyecto de Titulación I y II) y a nivel Maestría (Introducción a la Ingeniería Ambiental, Desarrollo Sustentable, Operaciones Biológicas Unitarias, Tecnología del Agua, Modelos Ambientales y Transporte de Contaminantes). Las Líneas de Generación y Aplicación del Conocimiento (LGAC) que cultiva son Ciencia y Tecnología del Agua. Ha dirigido 7 tesis de licenciatura y 3 de maestría. Es autor o coautor en más de 40 publicaciones, entre capítulos de libros, libro, artículos y reportes técnicos. Ha participado en más de 15 congresos nacionales e internacionales, ha dirigido y participado en 6 proyectos de investigación financiado por fuentes externas.

JOSIAH HEYMAN. Cuenta con estudios de Doctorado por la Universidad de New York, en el área de Antropología y de licenciatura por la Universidad Johns Hopkins en el área de Antropología. Con relación a su experiencia laboral, de 1989-2002 trabajó como profesor en la Universidad Tecnológica de Michigan, trabaja como profesor titular en el Departamento de Sociología y Antropología del 2002 a la fecha en la Universidad de Texas en el Paso (UTEP) además de ser Director del Centro de Estudios Interamericanos y Fronterizos del 2014 al presente. Ha dirigido y participado 18 proyectos de investigación financiado por fuentes externas, el más reciente es "Recursos hídricos sostenibles para la agricultura de riego en una cuenca hidrográfica del desierto frente al cambio climático y el crecimiento urbano: de la caracterización a las soluciones", Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, \$ 5 millones / 5 años (UTEP \$ 2.2 millones) 2015-presente. Rol en el proyecto: co-líder, con el Dr. Hargrove, del proyecto general. Ha participado como autor y coautor de 4 libros arbitrados tiene 4 publicaciones en revistas especializadas, además de tener 119 publicaciones en artículos, capítulos de libros y ensayos largos (excluye reseñas de libros cortos, entradas breves de la enciclopedia y otros elementos menores). Además de destacarse como activista social en su comunidad.

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v12i2.150>