

# Sostenibilidad del acuífero de Cuernavaca, Morelos determinando sus abatimientos diferenciales

## Sustainability of Cuernavaca aquifer determining its differential depletion distribution behavior

H. Arteaga-Plascencia <sup>a</sup>, E. M. Otazo-Sánchez <sup>b</sup>, C. Romo-Gómez <sup>b</sup>, O. A. Acevedo-Sandoval <sup>b</sup>,  
H. I. Navarro-Gómez <sup>a</sup>, S. Montiel-Palma <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.  
<sup>b</sup> Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

El comportamiento en la distribución del abatimiento del acuífero de Cuernavaca, en el Estado de Morelos fue determinado durante un periodo de diez años, analizando los niveles estáticos en lluvia-estiaje y la geometría de diversos aprovechamientos, cuyos volúmenes de extracción resultaron cercanos a 220 hm<sup>3</sup> anuales. La zona está conformada por suelos sedimentarios e ígneos, que sobreyacen a un acuífero mayoritariamente de tipo libre. Se obtuvieron grados de presión hídrica con abatimientos mayores a 20 metros, permitiendo detectar puntos vulnerables respecto a la disponibilidad hídrica. La extracción se emplea en satisfacer las demandas en el uso público urbano, tanto en servicio doméstico como en los comercios y servicios tipo micro, pequeñas y medianas empresas. En virtud de ello, se busca contribuir en el diagnóstico del grado de presión hídrica del acuífero para tener una explotación sostenible. En caso contrario, se pudieran presentar efectos de subsidencia, generando hundimientos en el terreno con implicaciones de índole constructiva.

*Palabras Clave:* Abatimiento, Disponibilidad, Acuífero, Cuernavaca, Piezometría.

### Abstract

The depletion distribution behaviour of the Cuernavaca aquifer, in Morelos state, was determined over ten years period, analyzing the static levels in rain-dry season and the geometry of various uses whose extraction volumes were close to 220 hm<sup>3</sup>/y. The overlie ground layers are made up of sedimentary and igneous soils, which overlie a mostly free-type aquifer. The degrees of water pressure were obtained with underground water level decrease greater than 20 meters, allowing the detection of vulnerable points regarding water availability. The extraction is used to satisfy the demands of urban public use, both in domestic service, as well as in businesses and services such as micro, small and medium-sized enterprises. This implies, it seeks to contribute to the diagnosis of the degree of aquifer stress in order to have a sustainable exploitation. Otherwise, subsidence effects could occur, generating subsidence in the ground with constructive implications.

*Keywords:* Depletion distribution, Availability, Aquifer, Cuernavaca, Piezometric Levels.

## 1. Introducción

En la actualidad, el acelerado crecimiento urbano de la Ciudad de Cuernavaca y su zona conurbada, ha generado un desequilibrio en diferentes áreas. Los recursos naturales de Morelos, específicamente los de su ciudad capital, Cuernavaca, se han deteriorado por prácticas de uso

ineficientes o políticas públicas inadecuadas y desligadas de los principios del desarrollo sustentable (CEAGUA, 2017). Respecto a la hidrología subterránea, la explotación del acuífero somero con fines de uso en agua potable, no ha sido llevada a cabo de manera sustentable. Como consecuencia, la disponibilidad en el volumen del agua subterránea ha disminuido considerablemente, modificando las condiciones

\*Autor para la correspondencia: silmonti@yahoo.com.mx

**Correo electrónico:** vhugoartepas@hotmail.com (Hugo Arteaga-Plascencia), elenamariaotazo@gmail.com (Elena María Otazo-Sánchez), claudiar@uaeh.edu.mx (Claudia Romo-Gómez), acevedo@uaeh.edu.mx (Otilio Arturo Acevedo-Sandoval), humberto\_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto I. Navarro-Gómez), silmonti@yahoo.com.mx (Silvia Montiel-Palma).

de equilibrio entre los sistemas acuíferos que subyacen a Cuernavaca, que se encuentra conformada por zonas de recarga y descarga; un acuífero superior (Chichinautzin y Cuernavaca); un paquete de formaciones confinantes (Tepoztlán y Mexcala) y un acuífero profundo (Cuautla y Morelos).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020) ha estimado que existe un volumen anual disponible en el acuífero de Cuernavaca de 20'347, 667 m<sup>3</sup> para otorgar nuevas concesiones.

### 1.1. Generalidades de la zona

Morelos es uno de los estados más pequeños del país. Las aguas subterráneas contribuyen con el 98% del agua potable del estado, extrayéndola de 660 pozos profundos con una simple potabilización con inyección de cloro. La alta permeabilidad de las rocas basálticas ocasiona que la contaminación microbiológica alcance el acuífero (Delgadillo, 2000; Bolongaro, 2006).

Cuernavaca es la capital política del estado de Morelos. Tiene una superficie de 200.41 km<sup>2</sup>. En la zona urbana de Cuernavaca habitan 1'081,970 personas lo que la coloca en el 15vo. lugar de las zonas metropolitanas del país con una densidad poblacional de 1895.1 hab/km<sup>2</sup> (INEGI, 2020). El acuífero de Cuernavaca se localiza al noroccidente del Estado de Morelos (18° 40' y 19° 0' N, 99° 20' y 99° 10' O) con una superficie aproximada de 820 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2020) en la cuenca del Río Amacuzac y las subcuencas hidrográficas de los ríos Apatlaco y Tembembe. (CONAGUA, 2002).

La clasificación fisiográfica del área donde se encuentra el acuífero, comprende dos provincias y subprovincias fisiográficas: la porción norte se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac. La parte sur se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses (Delgadillo, 2000).

El clima predominante en la porción centro-sur del acuífero de Cuernavaca es semicálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 18 °C. En la región norte se presentan los climas templado y subhúmedo en la clasificación de Köppen modificada (García, 2004), con temperaturas medias anuales entre 12 °C y 18 °C. Con respecto al régimen pluvial, las mayores precipitaciones se presentan entre junio y octubre (Bolongaro, 2006) y se tienen valores de 1278 mm. estimados a partir del método de los Polígonos de Thiessen. (CONAGUA, 2018).

La evaporación potencial media anual se ve influenciada por la temperatura, la humedad relativa y el viento, por lo que en las partes altas como la Sierra del Chichinautzin, la evaporación registra los 1,428 mm anuales y aumenta a medida que se pierde altitud, generándose una evaporación mayor en la parte central y sur del valle de Cuernavaca de alrededor de los 1610 mm a los 1775 mm anuales (Gob. de Cuernavaca, 2009).

La Sierra Chichinautzin, que cubre parte del acuífero, se desarrolló entre el Popocatepetl y la Sierra de Zempoala desde hace medio millón de años aproximadamente, y desde entonces, ha sido la esponja de basalto permeable que capta las aguas pluviales entre la Cuenca de México y el Valle de Cuernavaca-Cuautla. Debido a la diferencia de alturas de la Cuenca y el Valle, se estima que un volumen de infiltración de 5 m<sup>3</sup>/s va a los manantiales correspondientes de la Cuenca de México, y 11 m<sup>3</sup>/s a los valles de Cuernavaca y Cuautla (Molina, 1991).

Los afloramientos en la zona comprenden edades que varían del Cretácico Inferior al Antropoceno. Las unidades principales, cuyos tipos de roca predominante se ilustran en la Figura 1, de la más antigua a la más reciente (CONAGUA, 2018) son:

#### Cuaternario

- Formación Xochicalco.
- Formación Morelos.
- Formación Cuautla.
- Formación Mexcala.

#### Terciario

- Formación Cuernavaca.
- Grupo Chichinautzin.

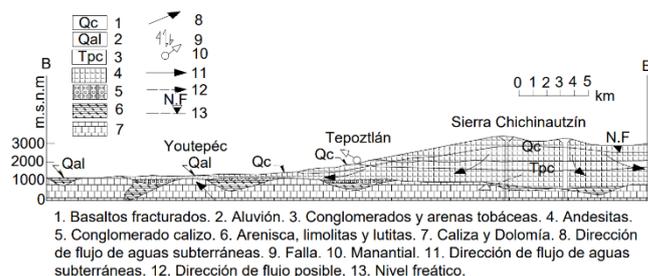


Figura 1: Sección geológica esquemática.

Fuente: Jaimes et al, 1989.

De acuerdo con la información geológica y geofísica de la zona, se define la existencia de un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por los sedimentos aluviales y fluviales que constituyen el lecho y llanura de inundación de los ríos Apatlaco y Tembembe y otros arroyos tributarios; así como por areniscas y conglomerados con intercalaciones de basaltos y andesitas débilmente empacados en arenas y arcillas que rellenan los valles con espesores de hasta 250 m (CONAGUA, 2018).

En este sentido, la parte inferior del acuífero se encuentra en una secuencia de rocas sedimentarias marinas provenientes de calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, cuyas características físicas hacen que por erosión presenten fracturamientos y/o disolución. Esta porción inferior presenta condiciones de semiconfinamiento y/o confinamiento debido a que las sobreyacen capas de lutitas y limolitas de la formación Mexcala. El límite inferior del acuífero lo constituyen las mismas rocas calcáreas que a mayor profundidad no presentan fracturamientos así como rocas arcillosas.

En la región de montañas al norte de la entidad el déficit de agua es mayor a 50 L/s (CONAGUA, 2018; Bolongaro et al., 2006).

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Análisis piezométrico de la zona de estudio

En la figura 2, se muestra la ubicación de los pozos utilizados para realizar el presente estudio.

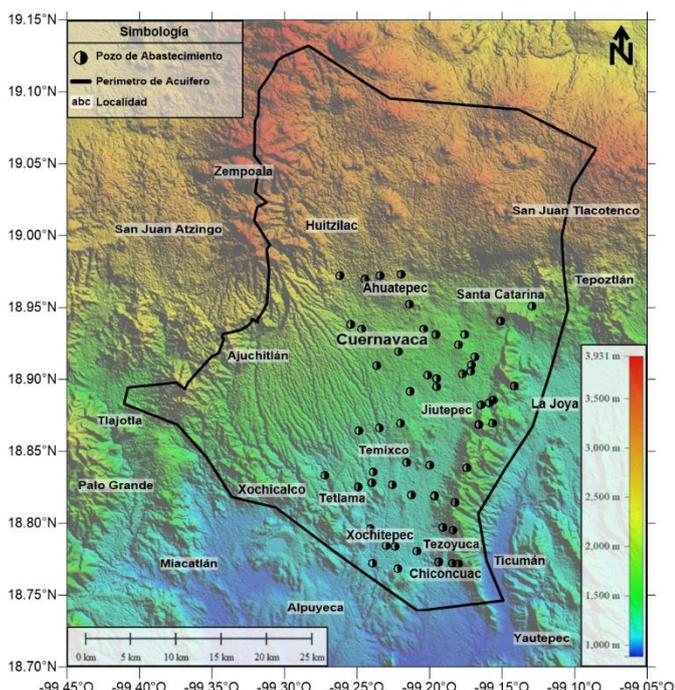


Figura 2: Ubicación de pozos de muestreo existentes en el área de estudio dentro del acuífero de Cuernavaca.

Se utilizaron pruebas hidráulicas en pozos, que incluyeron: desarrollo de pozo, aforo y prueba de bombeo, donde resultaron valores de transmisividad que varían de  $3 \times 10^{-3}$  a  $3.3 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s (259 a 2851 m<sup>2</sup>/día). Con respecto a la conductividad hidráulica, los valores oscilan entre  $4.4 \times 10^{-5}$  m/s a  $2.8 \times 10^{-4}$  m/s (3.8 m/d a 24.2 m/d). Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento (Universidad de Chapingo, 2010).

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información recabada por CONAGUA desde el año 2001 al año 2010, conforme a los lineamientos de la NOM-011-CONAGUA-2000 que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

A partir de los niveles estáticos históricos en los diferentes pozos de abastecimiento público, localizados en el acuífero bajo estudio, se obtuvo la configuración de la profundidad del nivel estático de manera gráfica, (Surfer13®). El uso de isolíneas obtenidas con los niveles estáticos, permitió identificar los abatimientos diferenciales espacio-temporales, así como zonas críticas.

### 2.2. Relación de los niveles piezométricos con las actividades económicas y el abastecimiento urbano

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado en el año 2010, apoyado con la información del Registro Público de Derechos del Agua, REPDA; se registraron un total de 443 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 355 son pozos, 48 norias y 40 manantiales. Del total de obras, 433 se encuentran activas y 10 inactivas; de las obras activas 52 son para uso agrícola, 301 para uso público-urbano, 50 para actividades domésticas y 40 para uso industrial. El volumen de extracción era de 219.1 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 7.0 hm<sup>3</sup> se destinaban al uso agrícola, 192.0 hm<sup>3</sup> al uso público urbano, 0.2 hm<sup>3</sup> al uso doméstico, 6.5 hm<sup>3</sup> al uso de servicios, 10.1 hm<sup>3</sup> al uso industrial y 3.3 hm<sup>3</sup> a usos múltiples (Figura 3).

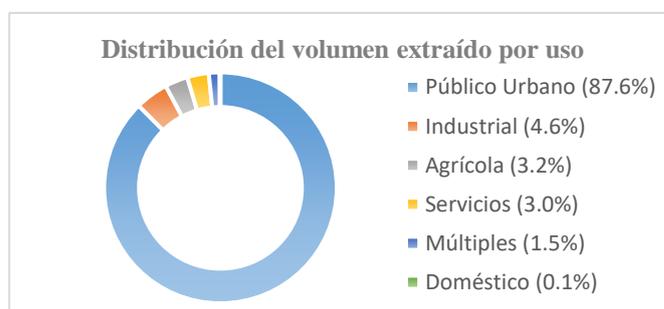


Figura 3: Distribución del volumen extraído según su uso. Fuente REPDA, 2010

## 3. Resultados

En la figura 4, se muestra una configuración de la elevación del nivel estático (msnm) del período 2001-2010, donde se observa que las isolíneas de entre 50 m a cercanos a 100 m de profundidad, son las indicativas de la variación de niveles para la zona más poblada del Estado, correspondiente a la de Cuernavaca. Los niveles estáticos someros se ubican en las localidades Xochitepec, Tezoyuca y Chiconcuac; en tanto que los más profundos se registran en las localidades de Cuernavaca, Tetlama, Temixco y Ahuatepec. De esta manera se puede comparar la profundidad del acuífero respecto al nivel en cualquier tiempo específico para estimar su abatimiento. Más adelante se ilustra la comparación más crítica que es la que se ubicó en el inicio del período estudiado (2001) vs el final (2010), siendo determinado en la época de lluvias (Figura 7).

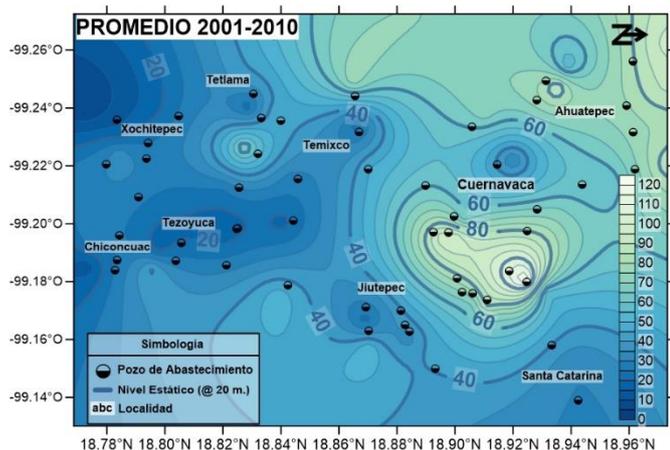


Figura 4. Configuración de la profundidad en el nivel estático promedio. Período 2001-2010.

En las figuras 5 y 6 se presenta la comparativa entre los períodos de lluvia y estiaje y sus influencias en las conformaciones de los niveles piezométricos, medidos en los aprovechamientos. Debido a la ausencia del 100% de datos en algunas estaciones, ya sea en época de lluvia o de estiaje, sólo se ilustran de manera completa, los períodos 2001, 2004 y 2007. De acuerdo a la configuración de la profundidad del nivel estático, los niveles correspondientes se localizaban entre los cercanos a 15 m llegando a alcanzar 100 m de profundidad en lluvias para el año 2010.

El comportamiento de los abatimientos durante el período de estiaje muestra que en diversos puntos del acuífero la extracción y/o recuperación del mismo fluctúa llegando a alcanzar el nivel original en poblaciones como Temixco cuyo comportamiento en estiaje presentó un período en el que se incrementó la extracción al noroeste y que si bien, no desplazó al pozo principal en cuanto a extracción, sí tiene una tendencia a igualar la extracción Fig. 5b). Para el año 2007 los niveles tienden a estabilizarse Fig. 5c).

Para la capital del Estado, en estiaje se determina que al principio del período se presentaban extracciones más uniformes y con profundidades de 60 a 80 m en toda la zona. Sin embargo, ya para el año 2007 se localizan al menos otros dos puntos fuertes de abatimiento cuyas profundidades se incrementaron en alrededor de 20 m llegando a alcanzar profundidades en el acuífero mayores a 100 m (Fig 5c). Al principio del período, Fig. 5a), las profundidades de los niveles piezométricos tienen una clara tendencia ascendente en dirección suroeste-noreste con las máximas en Cuernavaca. En este punto conviene resaltar que topográficamente se tienen elevaciones de terreno en sentido inverso a la dirección del flujo subterráneo, y conforme transcurre el tiempo esa tendencia casi lineal se ve alterada en algunos puntos pero siempre manteniéndose en dirección hacia Cuernavaca. Esto pudiera ser indicativo también de una probabilidad de desecación de las zonas al suroeste de la región estudiada.

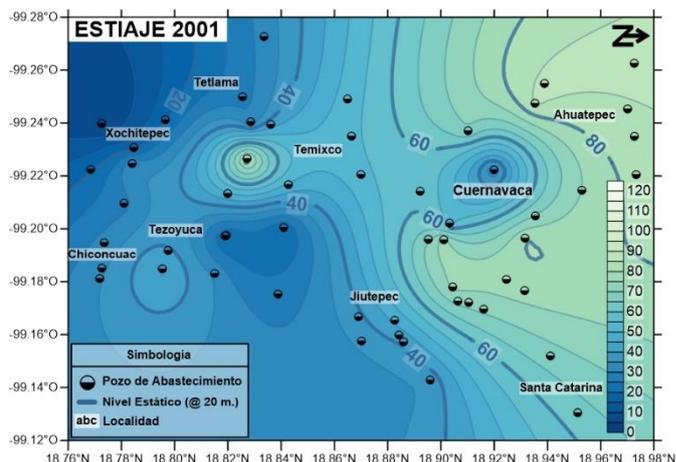


Figura 5a). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de estiaje. Año 2001.

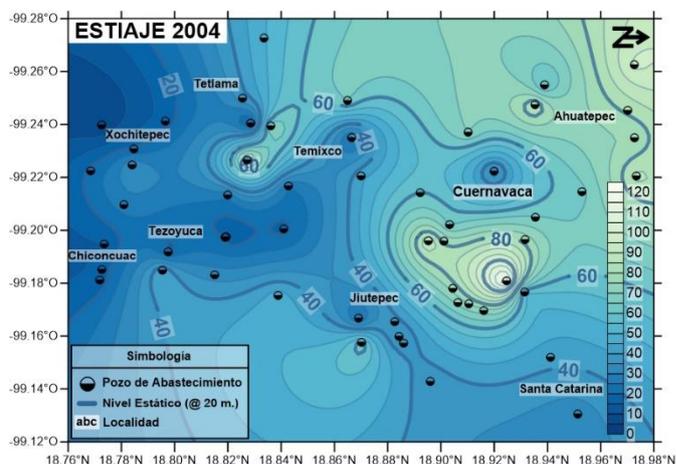


Figura 5b). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de estiaje. Año 2004.

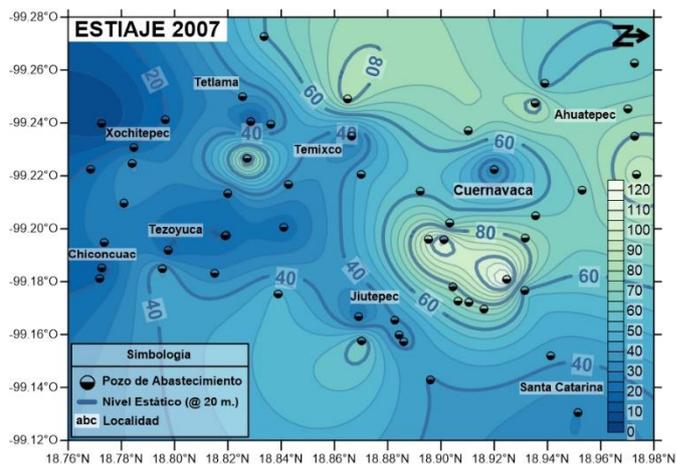


Figura 5c). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de estiaje. Año 2007.

Al analizar el comportamiento para lluvias, se muestran tendencias similares en los abatimientos. En el caso de Temixco se observa un ligero desplazamiento hacia la localidad vecina, Tetlama. También se observa que el acuífero presenta en general niveles más someros, lo cual se explica debido a la alta permeabilidad de la zona cuya conformación geológica se explicó anteriormente que permite la recarga del acuífero en tiempos relativamente cortos y al tipo de acuífero libre que lo conforma.

En cuanto a los abatimientos en el período de estudio, se puede observar en esta época tendencias más pronunciadas comparados con la época de estiaje, principalmente en la zona cercana a Cuernavaca. Se observa también ya en el año 2007, Fig. 6c y 6d dos puntos en la zona con extracciones mayores que no se observaban en 2004 y 2001 Figs. 6a y 6b. Es por ello que se realizan las gráficas en tres dimensiones mostradas en las figuras 7. Estas ubicaciones pudieran ayudar a analizar si pudiera existir alguna probabilidad de afectación en las construcciones que se encuentran localizadas en estos puntos por subsidencia.

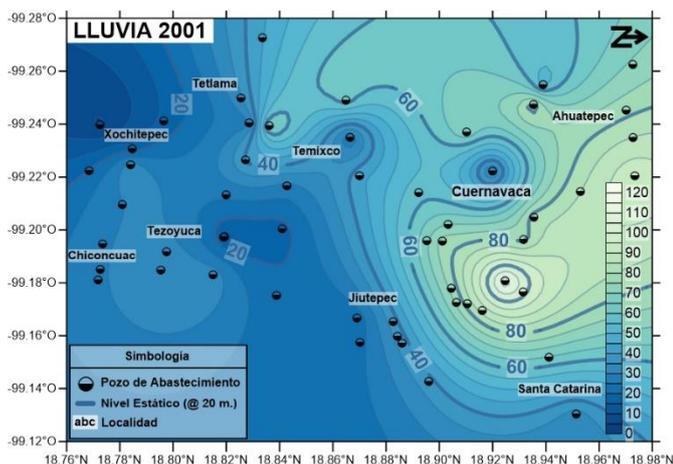


Figura 6a). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de lluvia. Año 2001.

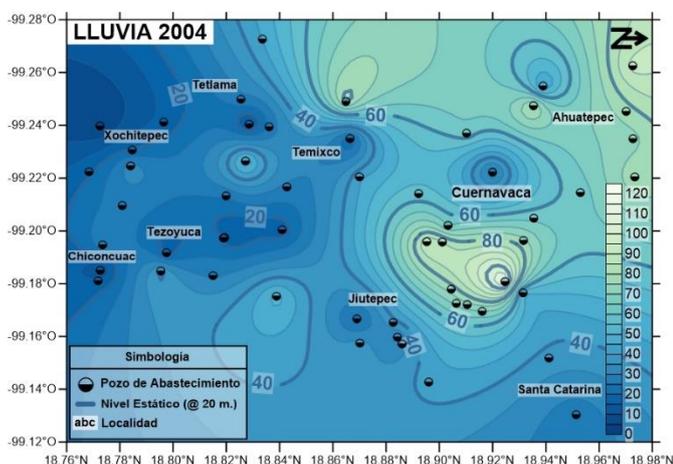


Figura 6b). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de lluvia. Año 2004.

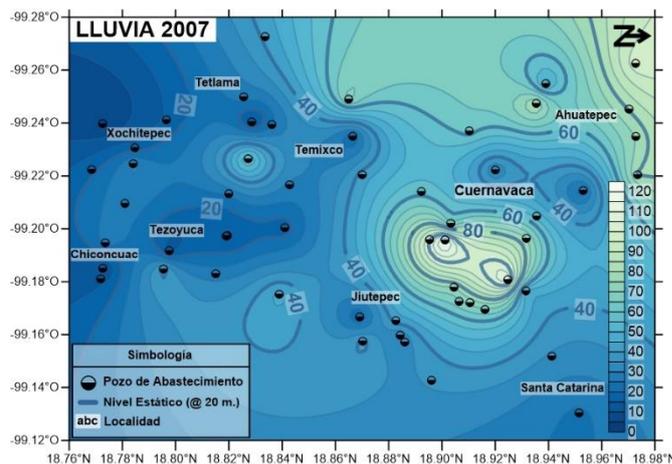


Figura 6c). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de lluvia. Año 2007

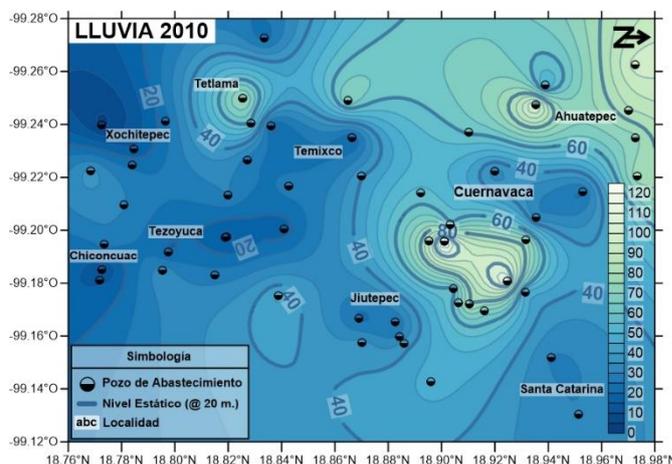


Figura 6d). Configuración de la profundidad en el nivel estático durante la temporada de lluvia. Año 2010.

De estas configuraciones, es posible identificar las diferencias en los niveles piezométricos debido a las extracciones que se encuentran abastecidas del acuífero, realizando la comparativa entre el año de inicio 2001 al año final del 2010.

En la Figura 7 se ilustran las variaciones en la configuración inicial y final de la zona del acuífero estudiado (años 2001 y 2010 respectivamente), lo cual muestra los abatimientos en los niveles estáticos en los pozos como consecuencia de las extracciones. Se observa que ya en 2001 se ubicaban las zonas en las que el acuífero se encontraba con abatimientos localizados y que al final del período todos ellos presentaban mayores profundidades en sus niveles piezométricos. Es de llamar la atención el cambio drástico de la profundidad alrededor de la zona de Cuernavaca durante el período analizado.

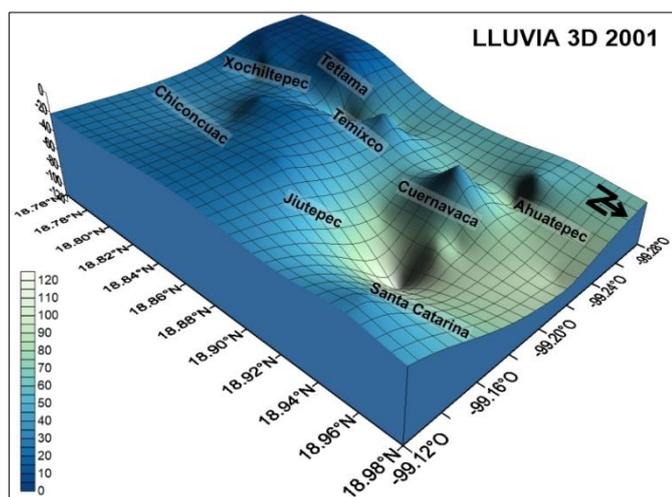


Figura 7a). Niveles piezométricos estáticos. Año 2001.

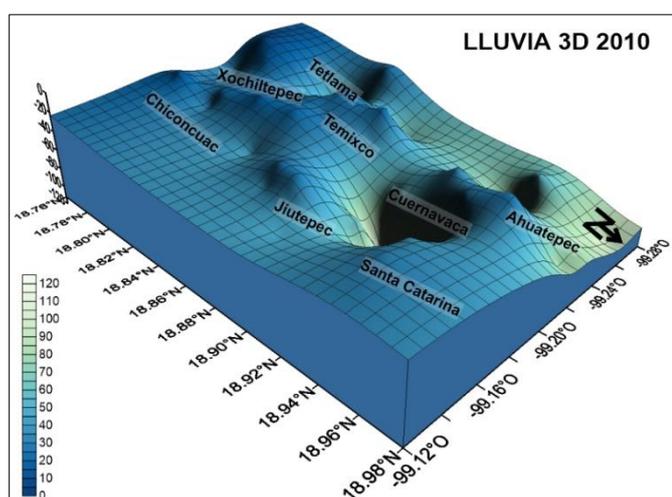


Figura 7b). Niveles piezométricos estáticos. Año 2010.

Con estos comportamientos espacio-temporales, es posible identificar los abatimientos y su distribución en el período estudiado. Si bien, la recarga modifica la profundidad de los niveles de saturación en el acuífero, éstos no tienen la tendencia a recuperarse al estado inicial.

Una vez identificados los puntos críticos en donde los abatimientos comienzan a ser notables, se pueden predecir posibles subsidencias en dichos lugares que hay que tomar en cuenta para cualquier construcción de obra, tanto nueva como ya existente.

#### 4. Conclusiones

El beneficio de la recarga al acuífero tiende a favorecer una mejora en el caudal de agua hacia los pozos que abastecen agua a la población y ayuda a la recuperación de los niveles piezométricos de los mismos, ya que existe una presión hídrica importante del acuífero.

El análisis hecho en este estudio muestra la existencia de zonas de extracción subterránea de agua que ya presentan abatimientos mayores a 20 m. Estos conos de abatimiento pueden llevar a la alteración de las direcciones de flujo. Si bien, no se detectaron efectos de subsidencia en el espesor granular, las extracciones locales pueden derivar en el cizallamiento del material y la creación de cavernas que propicien hundimientos locales como los ya generados en otras partes del país.

Aunque actualmente, según datos de los estudios realizados por CONAGUA y contratistas, la recarga es mayor que la extracción, lo que permite que a nivel regional no se manifiesten grandes alteraciones ni en los niveles generales ni en las direcciones de flujo principales, pero sí se observan tendencias de cambio que pueden derivar en el desequilibrio del sistema en donde la extracción ya o sea exclusiva del flujo local y se propicie la dispersión de la contaminación arrastrada por la recarga natural.

Al recabar datos adicionales se sugiere desarrollar un modelo matemático del flujo en el acuífero, y de ser posible, el análisis de optimización de extracciones y recargas así como del flujo e interacción de la recarga inducida con la calidad del agua para proponer la estabilización del acuífero con menor probabilidad de daños por eventos de riesgo en el cambio de condiciones de la matriz del acuífero, que pudiera ocasionar hundimientos en zonas con suelos blandos, en la superficie y agrietamiento y posible minado del acuífero de Cuernavaca.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior (PRODEP). Los autores quieren externar su agradecimiento al M.I. Miguel A. Juárez Manjarrez por su disposición siempre generosa, para proporcionar los datos requeridos.

#### Referencias

- Bolngaro-Crevenna, R. A., Sierra, O. R., Torres, R. V., Márquez, G. A. Z., Ramírez, V. J. D., Uribe, N. S., Monsalvo, J. C. B., 2006. Análisis de la Vulnerabilidad y Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en los Sectores más relevantes del Estado de Morelos. Instituto Nacional de Ecología.  
<http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2006c.pdf>
- CEAGUA, 2017. Estadísticas del agua en el estado de Morelos. Comisión Estatal del Agua. Morelos, México. 198 p.  
<https://ceagua.morelos.gob.mx/node/108>
- CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuernavaca, Estado de Morelos. Gerencia de Aguas Subterráneas Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México.
- CONAGUA, 2018. Actualización de la disponibilidad media de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), Estado de Morelos.
- CONAGUA, 2020. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca (1701), Estado de Morelos, México, D.F.: Conagua,  
[https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/morelos/DR\\_17\\_01.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/morelos/DR_17_01.pdf)
- Delgadillo, M. J., 2000. Contribuciones a la investigación regional del estado de Morelos. Ed. UNAM. México.
- García, A. E., 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Ed. UNAM. México.
- Gob. de Cuernavaca, 2009. Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Municipio de Cuernavaca. POET, II-1 – II-178.

- INEGI, 2020. Panorama sociodemográfico de México. Cuernavaca, Morelos. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/tableros/panorama/> [27 de julio de 2021].
- Jaimes, P. L. R., Cortes, S.A., Vázquez, S.E., Aravena, R., Fritz, P., Drimmie, R. 1989. Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Geofísica Internacional*. Vol. 28-2, 219-244. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1029>
- Molina, T. C., 1991. El problema geológico del abastecimiento de agua en Cuernavaca\*, IMTA. *Revista Tyca* 552-668, Ingeniería Hidráulica en México.
- NOM-011-CONAGUA-2000., 2000. Conservación del Recurso Agua que Establece las Especificaciones y el Método para Determinar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales. México.
- REPDA, 2010. Red pública de Derechos del Agua. CONAGUA <http://201.116.60.182/TramitesYServicios/RegistroPublicoDeDerechosDeAgua/ConsultaALaBaseDeDatosDelRepda>
- Universidad de Chapingo, 2010. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Tepalcingo-Axochiapan y Zacatepec, en el Estado de Morelos, realizado para CONAGUA. [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/morelos/DR\\_1704.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/morelos/DR_1704.pdf)