# ZONIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD PROTECTORA Y VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO DE TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

Zoning of protective capacity and vulnerability to contamination of Texcoco aquifer, State of Mexico

Ma. de Lourdes VÁZQUEZ-CASTRO<sup>1</sup>, Lázaro Raymundo REYES-GUTIÉRREZ<sup>2</sup>\*, Mauricio CARRILLO-GARCÍA<sup>1</sup> and Aurelio REYES-RAMÍREZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma. Avenida de las Garzas 10, Colonia El Panteón, Lerma de Villada, Estado de México, C.P. 52005, México.

\*Autor para correspondencia: l.reyes@correo.ler.uam.mx

(Recibido: enero 2021; acceptado: marzo 2022)

Palabras clave: conductancia longitudinal, Dar Zarrouk, estudio geoeléctrico, método AVI.

#### RESUMEN

El estudio consistió en estimar la capacidad protectora y vulnerabilidad intrínseca natural del acuífero de Texcoco, mediante la combinación del método Índice de Vulnerabilidad del Acuífero (AVI, por su sigla en inglés) y el parámetro geoeléctrico de Dar Zarrouk (conductancia longitudinal unitaria, S). El acuífero de Texcoco, constituido por materiales lacustres, aluviales y depósitos volcánicos, se localiza al oriente del Valle de México. Se realizaron 87 sondeos eléctricos verticales Schlumberger (SEV) distribuidos en la zona del acuífero. Los datos de los SEV en campo se adquirieron con un resistivímetro Terrameter SAS-300B con abertura de electrodos de corriente de 750 m a ambos lados de un centro común y se interpretaron con el programa de computadora IX1D de Interpex. La conductancia longitudinal unitaria se obtuvo a partir de la inversión de los datos de campo y se elaboraron mapas de contornos con el método kriging y de mínima curvatura en Surfer V16. El espesor de la capa superior de la zona no saturada varía entre 0.3 y 10.5 m. La conductancia longitudinal de la capa superior presenta valores de 0.0 a 75 Siemens/m. El nivel del agua subterránea en el acuífero presenta una elevación de 2140 msnm en la zona centro sur y 2290 msnm en las estribaciones de la Sierra de Río Frío. Con el método AVI, a partir de los datos de la conductividad hidráulica,  $K_{\nu}$  (m/d) y el espesor h (m) de la zona no saturada, se obtuvieron valores de la resistencia hidráulica C = 1.4 a 3.9 días. Los resultados obtenidos son de interés para las autoridades municipales en la planeación y toma de decisiones.

Key words: longitudinal conductance, Dar Zarrouk, geoelectric study, AVI method.

# ABSTRACT

This study estimated the protective capacity and natural intrinsic vulnerability of the Texcoco aquifer combining the Aquifer Vulnerability Index method (AVI) and the Dar Zarrouk geoelectric parameter (unitary longitudinal conductance, S). Lacustrine deposits, alluvial materials, and stratified volcanic deposits form the Texcoco aquifer. It

is located in the east of the Valley of Mexico. Eighty-seven (87) Schlumberger vertical electric sounding (VES) were made and distributed in different profiles in the aquifer area. The VES data were collected in the field with a Terrameter SAS-300B resistivity meter with 750 m current electrode opening on both sides of a common center and interpreted with the Interpex IX1D software. The longitudinal conductance was obtained from the process of inversion of the data, and maps were elaborated with the kriging method and minimum curvature in Surfer V16. The thickness of the upper layer of the unsaturated zone varies between 0.3 and 10.5 m. The longitudinal conductance of the upper layer presents values from 0.0 to 75 Siemens/m. The groundwater level in the aquifer has an elevation of 2140 m asl in the south-central zone of the study area to 2290 m asl in the foothills of the Sierra de Río Frío. The AVI method allows us to correlate the hydraulic conductivity Kv (m/d) data and the thickness h (m) of the unsaturated zone to determine values of the hydraulic resistance C = 1.4 to 3.9 days. The obtained results are of interest to the municipal authorities in planning and deciding to preserve the underground water resource.

# **INTRODUCCIÓN**

El término de vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de un acuífero a ser afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie del terreno, determinada por las características intrínsecas de los estratos que constituyen la zona no saturada (Foster e Hirata 1988, Foster et al. 2007).

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad intrínseca como el Índice de Vulnerabilidad del Acuífero (AVI, por su sigla en inglés), permiten determinar las zonas de riesgo a la contaminación de un acuífero (Van Stempvoort et al. 1993, Anornu y Kabo-bah 2013), así como determinar las zonas protectoras a partir de la conductividad hidráulica y el espesor de la zona no saturada.

En los estudios de protección contra la contaminación del agua subterránea existen diversos factores que contribuyen a la incertidumbre de los parámetros hidráulicos de los acuíferos, por ejemplo, el considerar el medio hidrogeológico como homogéneo e isotrópico (Orellana 1982, Auge 2004), por lo que es indispensable determinar la complejidad del subsuelo para un sistema multicapa. A lo largo del tiempo se han aplicado diferentes técnicas geofísicas para este fin, sobresaliendo los métodos geoeléctricos por su fácil manejo e interpretación y bajo costo.

La aplicación de los métodos geoeléctricos como el sondeo eléctrico vertical (SEV, arreglo Schlumberger) y actualmente la tomografía eléctrica resistiva (TER), al estudio de la capacidad protectora de los materiales de cobertura contra la contaminación del agua subterránea se han reportado en la literatura (Vías-Martínez 2005, Oladapo y Akintorinwa 2007, Okonkwo y Ugwu et al. 2015, Himi et al. 2017, Benabdelouahab et al. 2018). Estas investigaciones establecen los parámetros hidráulicos del acuífero a partir de la resistividad aparente de las rocas y de los parámetros de Dar Zarrouk para proporcionar información y describir las zonas protectoras susceptibles a contaminarse por la acción natural y antrópica. Las zonas protectoras de un acuífero son los horizontes suprayacentes al mismo, que les confieren cierta protección a infiltraciones de algún fluido o lixiviado (**Fig. 1**).

El agua subterránea del acuífero de Texcoco es una fuente importante de suministro, que abastece al menos a 13 municipios al oriente del Estado de México. Se han registrado, en pozos de agua, niveles piezométricos a una profundidad que varía de 40 a 130 m en 2009, con una tasa de abatimiento promedio de 1.2 a 3.8 m/año, en el periodo de 2006 a 2011. Debido a la extracción intensiva de agua subterránea, se han presentado hundimientos diferenciales e incluso ha mermado el flujo de agua de los manantiales de la zona (CONAGUA 2018b). De acuerdo con el censo realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2006, existen 19 manantiales con sistema de flujo regional, que descargan en conjunto 330 L/s (CONAGUA 2020).

La existencia de focos de contaminación como el basurero del Bordo Poniente y la planta de composta de residuos orgánicos, ubicados en la zona federal del ex lago de Texcoco (lago artificial Nabor Carrillo) que funciona como un regulador de las avenidas del Valle de México para prevenir afectaciones a la zona urbana y al colector de aguas tratadas (Rodríguez, 1982) para uso agrícola, estos representan un problema latente de contaminación al acuífero.

La importancia de determinar parámetros como la conductividad hidráulica saturada de campo  $K_v$  (Reynolds y Elrick 1986, Stephens et al. 2018),



Fig. 1. Esquema de la zona de protección al acuífero (condiciones intrínsecas de la geología y suelo edáfico).

mediante estudios de suelo in situ, es que permite describir y evaluar los procesos de infiltración y la dinámica del movimiento del agua en la zona no saturada (ZNS) del acuífero y por consecuencia, si el material lo permite, el flujo de recarga puede llegar al nivel freático. La información recolectada de la infiltración y conductividad hidráulica saturada de campo, la textura y la infiltración, son datos iniciales de importancia para incorporar en los modelos numéricos que describen el comportamiento del agua subterránea en un acuífero multicapa.

Para la secuencia de *n* capas sedimentarias horizontales, las propiedades eléctricas pueden representarse en términos de la resistividad eléctrica y el espesor de cada capa. El flujo de agua y de corriente eléctrica depende del tipo (tamaño del grano) y espesor de las capas, de modo que las conductividades hidráulicas y eléctricas son mayores en la dirección horizontal que en la vertical, dando lugar a una unidad litoestratigráfica heterogénea y anisotrópica. Se puede evaluar la protección y el riesgo de que algún fluido contaminante ingrese al subsuelo mediante el método AVI y los parámetros de Dar Zarrouk (DZ) como la conductancia longitudinal (S) y la resistencia transversal (R) definidos por Maillet (1947). El parámetro S de Dar Zarrouk representa un buen complemento del método AVI para evaluar si existe o no protección del acuífero a la contaminación desde la superficie. Presenta su valor máximo cuando el espesor de las capas poco resistivas suprayacentes al acuífero es grande (Casas et al. 2008, Brea-Iglesias 2016).

El acuífero de Texcoco se ha estudiado ampliamente y la gestión del agua ha estado orientada a la disponibilidad y explotación volumétrica de los recursos hídricos subterráneos para el abastecimiento de la población y para la agricultura, entre otros usos. Por otra parte, se ha dedicado poca atención a los estudios de protección y vulnerabilidad del acuífero. Existen estudios de vulnerabilidad acuífera que comprenden una porción del acuífero de Texcoco (ex lago de Texcoco), como el realizado por Ramos-Leal et al. (2010) en el que identifican, con el método SINTACS, que la zona lacustre del acuífero de la zona Metropolitana del Valle de México presenta un menor riesgo de vulnerabilidad acuífera, debido a la presencia de materiales arcillosos y arenas finas. Otro estudio relevante en la zona de la Ciudad de México es el reportado por Hernández-Espriú et al. (2014), donde se presenta una extensión de la metodología DRASTIC, denominada DRASTIC-Sg, que se enfoca en evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en acuíferos urbanos afectados por el hundimiento diferencial causado por el bombeo intensivo. Con respecto al acuífero de Texcoco, no se localizó información de algún mapa de riesgo a la contaminación o de vulnerabilidad acuífera.

Por lo anterior, el objetivo principal de este estudio es evaluar el nivel de protección y vulnerabilidad a la contaminación en la zona que comprende el acuífero de Texcoco, mediante estudios tipo AVI y técnicas geoeléctricas aplicando el método de Dar Zarrouk (conductancia longitudinal unitaria, S).

# **Referente geológico**

El Valle de Texcoco pertenece a la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano, se caracteriza por presentar sierras volcánicas y cañadas entre los flujos de material ígneo, así como lomeríos de basalto y el vaso lacustre salino. En la porción oriente, sobresalen rocas ígneas como la andesita y el basalto y tobas y brechas volcánicas de la formación Tarango. En la región central se presentan rellenos aluviales y al poniente depósitos lacustres. En la zona se distinguen diferentes formaciones geológicas (**Fig. 2**), donde la permeabilidad está controlada por su granulometría, fracturamiento y grado de compactación de las tobas, conglomerados y lahares (aluvión antiguo de arenas y conglomerados). Los materiales del vulcanismo de fines del terciario y del cuaternario, tobas basálticas (Qb), material brechoide escoráceo (Qbv), emanaciones volcánicas arcillo arenosas (Qtb), abarcan desde el piedemonte de las sierras aledañas al oriente y tienen contacto con la formación Tarango hasta las inmediaciones de lo que fue el Lago de Texcoco, conformando estratos granulares diversos (Reyes et al. 2010). Los depósitos lacustres (Qla), que rellenan el Valle, regionalmente comprenden sedimentos



Fig. 2. Esquema geológico del área de estudio mostrando ubicación de los sondeos eléctricos verticales y perfiles geoeléctricos (Modificado de Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez 2012, INEGI 2017).

finos incluidos en los estratos arenosos permeables, productos de la desintegración de las rocas andesíticas que lo rodean, así como materiales clásticos y piroclásticos de actividades volcánicas depositados en un ambiente lacustre. Se estima que hay depósitos lacustres con espesores de 30 a 300 m adelgazándose hacia las márgenes de las sierras, ubicando el mayor espesor en la planicie. Los depósitos aluviales (Qal), constituidos por material clástico fluvial poco consolidado se encuentran rellenando el Valle. Es decir, el material presente tiene diverso tamaño como gravas, arenas, limos y arcillas con variaciones laterales de importancia (CONAGUA 2018b).

# **MATERIALES Y MÉTODOS**

# Ubicación del área de estudio

El área del acuífero de Texcoco se localiza en la zona nororiental de la ciudad de México y al oriente del Estado de México, entre los paralelos 2 130 000 m y 2 175 000 m de latitud norte y los meridianos 495 000 m y 540 000 m de longitud oeste en coordenadas proyectadas del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM, por su sigla en inglés) WGS84/ UTM Z14N, con una superficie aproximada de 934 km<sup>2</sup> (**Fig. 3**).

Este acuífero pertenece a la Región Hidrológica RH XIII y a la Cuenca del Valle de México. En el Valle de Texcoco desembocan actualmente varios ríos intermitentes (Papalotla, Xalapango, Coxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco), los cuales descienden de las zonas altas de la Sierra Nevada hasta la planicie del ex lago de Texcoco. El acuífero de Texcoco colinda al oriente con el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, al norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca y hacia el Sur con el acuífero Chalco-Amecameca (SEMARNAT 2019). Los límites administrativos de estos acuíferos están en un terreno común con estratigrafías similares, en una planicie aluvial y lacustre.

Para el desarrollo de este trabajo se consultaron diferentes fuentes y archivos proporcionados por la Subdirección General Técnica de la CONAGUA (2018a), INEGI (2001, 2014, 2017) y estudios técnicos de geofísica eléctrica, realizados en el Área de Hidrogeología del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma de Chapingo. Esta información fue corroborada y completada por estudios geoeléctricos, análisis físicos y químicos, aplicados en las zonas detectadas como susceptibles de presentar permeabilidad o infiltración que pueda afectar a zonas suprayacentes del acuífero. Las zonas permeables por uso de suelo son una guía para correlacionar la información obtenida de los estudios geoeléctricos realizados en campo con la geología de la zona de estudio y apoyo de las cartas geológicas y topográficas 1:50 000 de INEGI (2001, 2017).

### Prospección geoeléctrica y adquisición de datos

En total, se realizaron 87 sondeos eléctricos verticales (SEV) en el área de estudio usando el arreglo tetraelectródico Schlumberger con una semiabertura máxima de electrodos de corriente AB/2= 750 m y MN/2= 25 m usando un Terrameter SAS-300B y sus accesorios. El método consiste en inyectar corriente eléctrica al terreno a través de un par de electrodos AB para medir la respuesta de los materiales del subsuelo al flujo de corriente en otro par de electrodos MN, donde AB/2  $\geq$  5 (MN/2), (Koefoed 1979, Orellana 1982). La ventaja del arreglo Schlumberger es que corrige la variación lateral de cambios, así como el efecto por ruido superficial y aumenta la profundidad de penetración de la corriente.

Para el arreglo Schlumberger utilizado, se obtuvieron las lecturas de la resistencia R (Ohm), representada por la ecuación 1 (ley de Ohm), del volumen del material geológico dentro del espacio eléctrico de la configuración electródica.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

Donde;  $\Delta V$  representa la diferencia de potencial (volt), mientras *I* es la intensidad de la corriente eléctrica alimentada (ampere).

Del producto del factor geométrico K y R, se obtuvo la resistividad aparente ( $\rho_a$ ), para cada una de las capas litológicas detectadas, utilizando las ecuaciones (2) y (3). La **figura 4** muestra el arreglo Schlumberger del SEV.

$$\rho_a = K \left( \frac{\Delta V}{I} \right) = KR \tag{2}$$

$$K = \pi \left[ \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN} \right]$$
(3)

Además, se realizó un recorrido por la zona de estudio para la toma de muestras de suelo, a una profundidad de 30 a 50 cm, logrando recolectar 120 muestras que se analizaron con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT 2002), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, en sus apartados AS-01 (preparación de



Fig. 3. Localización del acuífero de Texcoco, indicando la ubicación de los sondeos eléctricos verticales de prospección geoeléctrica y pozos de la zona de estudio.

la muestra), AS-02 (pH medido en agua), AS-03 (densidad aparente) y AS-09 (determinación de la textura del suelo), con el propósito de clasificar los suelos por tipo textural.

Se realizaron también mediciones de conductividad hidráulica vertical saturada de campo ( $K_v$ ), en la zona no saturada del acuífero, utilizado un infiltrómetro de doble cilindro para estimar este parámetro y utilizarlo en el método AVI. Para este estudio, la caracterización de la capacidad protectora del acuífero se basa en los valores de la conductancia longitudinal unitaria (S) un parámetro de segundo orden llamado de Dar Zarrouk, ecuación (4), de las unidades de roca de cobertura o zona vadosa en el área de estudio.

$$S = \sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{\rho_i} = \sum_{i=1}^{n} h_i^* \sigma_i \quad (mhos \ o \ Siemens) \tag{4}$$



Fig. 4. Esquema de arreglo colineal tetraelectródico tipo Schlumberger.

donde  $h_i$  (m) es el espesor de la capa i y  $\rho_i$  (Ohm-m) es la resistividad de la capa i,  $\sigma_i$  (Siemens/m) la conductividad eléctrica de la capa i y n es el número de capas desde la superficie hasta la profundidad del nivel del agua.

Con respecto a la evaluación de la capacidad protectora de la cobertura con el AVI, se sigue una metodología simplificada que cuantifica la vulnerabilidad del acuífero a través de un parámetro denominado resistencia hidráulica (*C*, ecuación 5), la que corresponde a una estimación del tiempo de viaje de un lixiviado o fluido contaminante a través de la zona no saturada hasta el nivel freático. Esta metodología parte del supuesto que el constituyente contaminante es conservativo y viaja en dirección vertical.

Para el cálculo del tiempo de viaje se utiliza la siguiente ecuación, la que se expresa finalmente en días o años:

$$H_R = C = \sum_{1=1}^n \frac{d_i}{K_i} \tag{5}$$

donde *C* es un factor teórico que describe la resistencia de un material geológico al flujo vertical (Prashant et al. 2020),  $d_i$  (m) corresponde al espesor de las capas homogéneas ubicadas sobre el sistema saturado, mientras que  $K_i$  (m/d), es la conductividad hidráulica asociada a la capa de suelo. A partir de los valores del tiempo de viaje se estima la vulnerabilidad del acuífero según lo indicado en el **cuadro I**. Los modelos para estimar la vulnerabilidad y tiempo de viaje de algún fluido contaminante presentan limitaciones debido a que no consideran las propiedades químicas o de transporte del contaminante ni el proceso de atenuación (Prashant et al. 2015). Es evidente la similitud entre las fórmulas de la conductancia longitudinal (S) y la resistencia hidráulica (C) del método AVI. Esto permite aplicar la conductancia longitudinal para evaluar la vulnerabilidad del acuífero. Proporciona una relación entre la resistividad eléctrica y el espesor de las capas arcillosas, que a la vez condiciona la conductividad hidráulica vertical de la zona no saturada.

CUADRO I. VULNERABILIDAD DELACUÍFERO SEGÚN EL MÉTODO ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO (AVI).

Resistencia hidráulica C	Log (C)	Vulnerabilidad
<10	< 1	Extremadamente Alta
10-100	1 a 2	Muy Alta
100-1000	2 a 3	Moderadamente Alta
1000-10 000	3 a 4	Baja
>10 000	> 4	Extremadamente Baja

(Fuente: Prashant et al. 2020).

#### Evaluación de la capacidad protectora y vulnerabilidad del acuífero *Recolección de datos*

#### *Recoleccion ae aatos*

Los datos recolectados de los estudios geoeléctricos (SEV), permitieron evaluar la capacidad protectora y la vulnerabilidad en la zona del acuífero de Texcoco y sus inmediaciones. Se construyeron perfiles cubriendo distancias en la parte centro del área de estudio de entre 1300 m y 12000 m de distancia.

Las estaciones de los SEV se distribuyeron en las fronteras norte, noreste, noroeste, centro y sur de la zona en estudio. La parte oeste no se cubrió en su totalidad, debido a restricciones de acceso por la construcción y maquinaria almacenada del nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Los datos se procesaron con el programa IX1D (programa de cómputo de interpretación de imágenes de resistividad 1D Interpex 2010) y los resultados de los modelos de capas se presentan en forma de perfiles y mapas con el programa Surfer V16 (Golden Software).

A partir de los datos interpretados se generaron secciones geoeléctricas para delinear las capas suprayacentes al acuífero. Los parámetros de las capas obtenidas se utilizaron para calcular las variaciones de la conductancia longitudinal (S) y la resistencia transversal ( $R_T$ ), conocidos como parámetros de Dar Zarrouk (Orellana 1982). Estos parámetros representan la descomposición de la circulación de corriente en la dirección horizontal y vertical, sin grandes variaciones, al considerar un medio equivalente (isótropo y homogéneo).

La combinación de la resistividad y de los espesores con los parámetros de Dar Zarrouk, conductancia longitudinal unitaria (*S*), resistencia transversal unitaria ( $R_T$ ), la resistividad longitudinal ( $\rho_S$ ) y la resistividad transversal ( $\rho_T$ ), se utilizaron directamente para evaluar la capacidad protectora y vulnerabilidad del acuífero de acuerdo con el **cuadro II**. Cuanto mayor sea el espesor de las capas arcillosas en la zona no saturada, correlacionadas geoeléctricamente por bajos valores de resistividad, mayor será la protección del acuífero y menor su vulnerabilidad.

CUADRO II. ÍNDICE DE LA CONDUCTANCIA LONGI-TUDINAL (CAPACIDAD PROTECTORA).

Conductancia longitudinal S (mhos)	Índice de la capacidad protectora	Clase de vulnerabilidad
>10	Excelente	Extremadamente baja
5-10	Muy buena	Muy Baja
0.7-4.5	Buena	Baja
0.2-0.69	Moderada	Moderada
0.1-0.19	Débil	Alta
< 0.1	Pobre	Muy alta

(Fuente: Oladapo y Akintorinwa 2007).

#### Procesamiento de datos e interpretación

Los datos de resistividad eléctrica medidos en campo se procesaron graficando los valores de la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) contra la separación de los electrodos (AB/2) para obtener las curvas de SEV y se realizó una interpretación cuantitativa de los datos para obtener una caracterización aproximada del modelo de capas del subsuelo, para cada SEV.

El procesamiento de los datos se realiza introduciendo los valores de resistividad aparente ( $\rho_a$ ), las aberturas AB/2 y MN/2 al programa de inversión (IX1D). La inversión de cada SEV genera como resultado un modelo de capas de resistividades y profundidades reales que es la información que ha de interpretarse y correlacionarse con la posible unidad hidroestratigráfica, con el fin de cuantificar y delimitar las anomalías geológicas en profundidad y obtener una visión de la estructura y material del subsuelo.

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El acuífero de Texcoco se considera un acuífero de libre a semiconfinado (Escobar-Villagrán y Palacios-Vélez 2012, CONAGUA 2020). En el perfil geoeléctrico-geológico A-A' en la zona poniente de la planicie lacustre (ex lago de Texcoco), se detecta una capa de arcilla y arenas finas, desde una profundidad aproximada de 35 m y mayor a 250 m. Este estrato funciona como un acuitardo, hacia el centro se presenta una interface de rocas ígneas de permeabilidad media a baja v su espesor se adelgaza hacia el este cubierto por arenas arcillosas y brecha volcánica de permeabilidad media. El material que conforma la primera capa del suelo (suelo edáfico con contenido de arcilla, limo, arena y grava, en algunas partes con material de relleno), es determinante para que algún contaminante logre o no infiltrarse a la zona no saturada y posteriormente afecte la calidad del agua subterránea.

Se elaboró el mapa potenciométrico y abatimiento del nivel del agua con el método de interpolación *kriging* en Surfer V16 (**Figs. 5** y **6**). Para el año 2017 los niveles piezométricos promedio oscilaron entre los 40 y 150 m, obteniéndose una profundidad en el lago Nabor Carrillo de 40 m y en el poblado de Texcoco de aproximadamente 65 m. En el caso de las cargas potenciométricas se establecieron entre 2140 y 2290 m snm; la superficie piezométrica presenta una serie de conos de abatimiento ubicados en el poblado de Texcoco hacia Chicoloapan y los Reyes, con un abatimiento del nivel del agua de 0.2 a 1.8 m/año.

Existen diferentes factores que propician la infiltración de compuestos solubles logrando su transporte por el flujo de agua subterránea, tales como porosidad, textura del suelo, permeabilidad y pH. La porosidad y la textura son variables que indican la cantidad de agua de recarga que puede retener la zona no saturada del acuífero (dependiendo de sus características y la topografía de la zona). Mientras que el pH controla la solubilidad de compuestos permitiendo un transporte hacia las zonas de mayor carga hidráulica.

De los análisis físicos y químicos realizados a las muestras de suelo, aplicando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMAR-NAT 2002), que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, se obtuvieron con respecto a su pH (AS-02) tres tipos de suelos en la zona: suelos moderadamente ácidos (40.62 %) con pH de 5.2 a 6.5, suelos neutros (25 %) con pH de 6.6 a 7.2 y medianamente alcalinos (34.38 %) con pH de 7.4 a 8.5. El mayor porcentaje



Fig. 5. Mapa potenciométrico para 2017 (m snm). (Fuente: CONAGUA 2018a).

de suelos moderadamente ácidos se debe a algunos constituyentes orgánicos e inorgánicos que pueden estar presentes. Con respecto a la densidad aparente (AS-03), en los sitios muestreados se determinaron valores entre 1.21 y 1.32 g/cm<sup>3</sup> (porosidad de 45.6 a 49.8 %), valores probablemente debidos al intemperismo y por tratarse de zonas agrícolas. Estos resultados indican que se trata de suelos tipo franco (NOM-021-SEMARNAT-2000), con presencia de material limoso y con retención de humedad por las arcillas.

Las muestras presentan diferentes tipos de textura (AS-09): grava 1.5 %, franco arenoso con 47.7 %,

franco 19.5 %, franco arcilloso-arenoso 14.1 %, franco arcilloso 6.3 %, arena franca 6.3 %, arcillosa 3.1 %, franco limoso y arcillo limosa con 1.5 %, por lo que predominan los suelos de tipo franco arenoso (**Fig. 7**).

La tasa de infiltración de las muestras se muestra en el mapa de distribución de la conductividad hidráulica saturada de campo ( $K_v$ ) (**Fig. 8**), delimitando la zona de estudio de acuerdo con el tipo de material (consolidado, no consolidado). Los materiales se categorizaron por su litología y las características físicas. Para los análisis, se abarcó las zonas norte, central y oriente del acuífero, importantes para recibir



Fig. 6. Abatimiento del nivel piezométrico para 2017-2018 con valores de 1.0 a 1.8 (m/año) al centro y poniente (Fuente CONA-GUA 2018a).



Fig. 7. Clasificación de suelo por textura, zona del acuífero de Texcoco.



Fig. 8. Mapa de zonas permeables en el acuífero de Texcoco, Estado de México.

recarga y para delimitar zonas de riesgo. Los suelos presentes en la zona de Texcoco, por el porcentaje de arcilla presente no permiten que la filtración sea rápida, pero la presencia de arenas en la mayoría de los sitios estudiados permite una infiltración que favorece el abastecimiento del acuífero. No obstante, es importante detectar a tiempo si el suelo conduce algún fluido que pueda contaminar el agua del acuífero. En el terreno estudiado la velocidad de infiltración es de moderada a lenta debido a que la compactación del suelo provoca una alta retención de agua por el tipo de textura predominante.

En los límites de la zona poniente del acuífero predomina la velocidad de infiltración muy lenta (0.059 m/d), que indica que la zona puede contener

material compacto en el estrato de suelo (arcilla y limo). En la zona centro y oriente se identificaron zonas con velocidades de infiltración de 1 a 6 m/d, mientras que la zona norte del acuífero presenta la mayor tasa de infiltración con velocidades desde 7.0 hasta 11.2 m/d.

Las zonas con mayor susceptibilidad a la infiltración de algún tipo de contaminante del acuífero son las que presentaron valores de por arriba de 5 m/d y corresponden a la parte central y hacia el norte y sur del acuífero. Las zonas con menor riesgo a la infiltración de contaminantes son las detectadas al poniente con rumbo a la Ciudad de México y al lago Nabor Carrillo, en la zona federal del ex lago de Texcoco y áreas puntuales en el centro de Texcoco. Con el proceso de inversión datos de los resultados de los valores de resistividad y el espesor de las capas detectadas con el método geoeléctrico, se obtuvo información de la litología del subsuelo y el espesor de la cobertura (**Figs. 9a** y **9b**). La zona poniente presenta resistividades con valores bajos (5 a 10 ohm/m), mientras que las zonas centro y norte del acuífero presentan variaciones en resistividad aparente que oscilan entre 5 y 150 ohm/m. Desde la zona centro con dirección hacia el sureste se localizaron los valores de resistividad mayores (650 a 1150 ohm/m). Mientras que la cobertura de la capa superior (primera unidad litoestratigráfica detectada), presenta el menor espesor en la zona lacustre del ex lago de Texcoco (**Fig. 9b**), incrementándose (8.5 a 9.0 m) en algunas zonas puntuales del centro (Texcoco) y en dirección hacia San Jerónimo Amanalco.

Con ayuda de los estudios geoeléctricos de resistividad se localizó el basamento hidrogeológico (**Figs. 9c** y **9d**). Se identificaron espesores de la capa



Fig. 9. Distribución de la resistividad y espesores: a) Resistividad de la capa superficial, b) Espesor de la capa superficial, c) Resistividad de la capa impermeable del basamento hidrogeológico, d) Espesor de la capa impermeable del basamento hidrogeológico.

superficial prácticamente nulos a 12.5 m en el centro y al este del acuífero con resistividades de 10 a 60 ohm/m, mientras que el basamento se presenta hacia el centro del valle a una profundidad promedio de 120 m y resistividades de 400 a 1600 ohm/m asociadas con roca fracturada y sana, respectivamente, lo que indica que son zonas con capacidad de almacenar agua y apropiadas para la recarga del acuífero. En la zona centro y con dirección noroeste se localiza la capa impermeable del acuífero a una mayor profundidad, con dirección hacia la zona conocida como el Caracol.

En el perfil geológico-geoeléctrico A-A' (Fig. 10a), a una profundidad mayor a 30 m a partir de la capa superficial se localiza el material arcilloso propio de la zona lacustre-aluvial. El mayor espesor de este material se presenta en dirección noroeste entre los SEV 28 y 27 en la zona del lago Nabor Carrillo. También, en este perfil se localiza a una profundidad de aproximadamente 40 m, en la zona centro en el SEV 30, una zona con resistividad de 3420 a 24 400 ohm/m, correlacionada con material de tipo basalto fracturado a sano, que forma una zona impermeable. Con dirección al sureste se localiza material de tipo arenoso (arenas gruesas y gravas) que envuelve una zona puntual de arenas finas en una matriz de arcilla (28 ohm/m). El material tipo arenoso se asienta sobre un estrato de limos y arcillas (a la profundidad de estudio de este perfil), en dirección sureste.

En la zona centro del acuífero se obtuvo el perfil geológico-geoeléctrico B-B' (Fig. 10b), en dirección noroeste-sureste donde se detectaron seis unidades geoeléctricas. En éste se detectó una capa superficial con profundidad no mayor a 5 m con resistividades de 2 a 8 ohm/m (material compactado, arcilloso), a lo largo de todo el perfil. A esa capa subyace un estrato con resistividad entre 88 y 186 ohm/m, característico de materiales arenoso y grava con capacidad de permitir la circulación de agua, con espesor variable, que se adelgaza hacia los extremos, mientras que su espesor aumenta hacia el centro. La unidad 3 subyacente a este estrato se asocia con arena media y grava con resistividad del 44-88 ohm/m de espesor variable, mientras que su espesor aumenta hacia el centro. La unidad 4 se presenta entre el SEV 24 y 22, se asocia con arcilla y resistividad de 1 a 2 ohm/m, le subyace la unidad 5 de material arcillo limoso con resistividad de 12 ohm/m y espesor variable, de 80 a 280 m de profundidad, mientras que al centro y sureste se presenta la unidad 6 de material fracturado en una matriz de arenas medias a gruesas o brecha (102 a 399 ohm/m), en el SEV 22 y entre los SEV 21 y 48 hacia el sureste.

A lo largo del perfil geoeléctrico-geológico D-D' (Fig. 10c) se detectaron seis unidades geoeléctricas en el SEV 48. La unidad 1, se localiza a lo largo de todo el perfil y se asocia con material de tipo arenoso compactado de espesor variable y resistividad de 24 a 446 ohm/m. La unidad 2, un estrato continuo a lo largo de todo el perfil se correlaciona con arena media v grava con matriz limo arcillosa de espesor variable y resistividad de 24 a 98 ohm/m. En los extremos del perfil, en dirección suroeste y noreste, se identifica la unidad 3, discontinua en el SEV 101 con material arenoso de granulometría media a fina y presencia de material grueso (gravas) con resistividad de 86 a 239 ohm/m y buena capacidad de contener agua. Al centro del perfil, en el SEV 101, se presenta la unidad 4 que se ensancha hacia ambos lados del SEV 101, se asocia a arena empacada con material limo arcilloso y resistividad de 28 ohm/m. La unidad 5 se presenta en los extremos del perfil en el SEV 7 asociado con roca fracturada y resistividad de 478 ohm/m y, en el SEV 105 interpretada como roca compacta con resistividad de 3012 ohm/m. En la zona inferior del perfil, con dirección suroeste, se detectó la unidad 6 con material arcilloso en el SEV 11 y SEV 7 con resistividad de 6 ohm/m.

En el perfil G-G' (Fig. 10d) se detectaron seis unidades geoeléctricas. Este perfil abarca zonas tipo lacustre y aluvial del acuífero. La unidad 1 con espesor variable de suroeste a noreste, incluye las comunidades de Chimalhuacán, Montecillos, San Miguel Coatlinchán, Chiconcuac y con dirección al Monte Tláloc se identificó material fino tipo arcilloso en dirección suroeste (Chimalhuacán), con resistividades que varían de 2 a 95 ohm/m entre los SEV 27 y SEV2, mientras que en el SEV 6 se obtuvo un valor de 1130 ohm/m asociado con roca fracturada en dirección al Monte Tláloc (zona de Río Frío). La unidad 2 se presenta en todo el perfil con espesor variable y profundizándose en el SEV 48 hasta una profundidad de 280 m, asociada con arena y grava de matriz limo arcillosa con resistividades de 24 a 144 ohm/m. La unidad 3 una capa discontinua en los SEV 26 y 2, se asocia con material arcilloso de espesor variable entre los SEV 27 y 26 y los SEV 2 y 6. La unidad 4 se asocia con material de granulometría fina a media en una matriz de arcillas y limos en el centro y suroeste del perfil con resistividades de 12 a 46 ohm/m con una interface de roca compacta en el SEV 48 y SEV 6 al noreste. La unidad 5 sólo se presenta entre el SEV 48 y SEV 6, se asocia con grava o brecha volcánica de espesor variable y resistividad de 258 ohm/m. La unidad 6 se presenta en los SEV 27, 48 y 6, asociada



Fig. 10. Perfiles geoeléctricos de la zona del acuífero de Texcoco.

con basalto no alterado y resistividades de 3428 a 10 000 ohm/m al noroeste, centro y sureste.

La resistencia hidráulica (*C*) se obtuvo con el método AVI para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Texcoco, utilizando la conductividad hidráulica vertical y los espesores de las unidades geoeléctricas. La capacidad protectora y la vulnerabilidad del acuífero se determinó con el parámetro de Dar Zarrouk de la conductancia longitudinal (*S*), empleando la resistividad y los espesores de manera directa. Los resultados se muestran en la **figura 11**, delimitados a diferentes intervalos. Para graficar los resultados obtenidos con el programa Surfer V16 se utiliza el método de curvatura mínima para evitar oscilaciones bruscas y falsos máximos y mínimos locales, con una malla de tamaño 100 m, en el sistema UTM.

La distribución de los valores de resistencia hidráulica (C), representa el tiempo de viaje del agua infiltrada que puede transportar contaminantes disueltos, para que se muevan verticalmente y crucen a través de las diferentes capas de la zona no saturada desde la superficie del terreno al nivel freático. El mapa de la **figura 11a** muestra la distribución de la resistencia hidráulica (C) y ha permitido identificar las principales zonas susceptibles a la contaminación del agua subterránea, de acuerdo con la estimación del tiempo de viaje del agua infiltrada a través de la zona no saturada. Las zonas centro y norte del acuífero presentan valores máximos de C de 2.9 a 3.9 días, sugiriendo una vulnerabilidad baja. Los extremos oeste y este presentan un tiempo de tránsito menor (1.4 a 2 días), clasificándose como una región de vulnerabilidad muy alta. Mientras que la mayor parte en el centro del acuífero presenta valores entre 1.5 a 2.1 días, considerándose de vulnerabilidad muy alta a moderadamente alta.

El mapa de distribución de la conductancia longitudinal unitaria (S) (**Fig. 11b**), muestra la protección a la contaminación de las aguas subterráneas por la presencia de materiales de baja conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) en la zona no saturada. Al oeste y noreste se presentan valores mayores a 40 Siemens/m, indicando zonas donde el acuífero estará más protegido y muy baja vulnerabilidad, valores entre 20 y 40 Siemens/m indican zonas con moderada protección y moderada vulnerabilidad, en la zona central y hacia el oeste se presentan valores menores a 20 Siemens/m indicando zonas con baja a muy baja protección y, por tanto, mayor riesgo a que las aguas subterráneas se vean afectadas por la contaminación de fuentes antrópicas.



Fig. 11. a) Distribución de la resistencia hidráulica (C, m/d). b) Distribución de la conductancia longitudinal unitaria (S, Siemens).

### **CONCLUSIONES**

Los datos de los estudios de infiltración y geoeléctricos se utilizaron para calcular el tiempo de arribo y la vulnerabilidad a la contaminación a partir de la resistencia hidráulica (*C*), la capacidad protectora y vulnerabilidad a partir de la conductancia longitudinal unitaria (*S*) del acuífero de Texcoco. Los resultados indican que la zona de estudio presenta, en la mayor parte de su superficie, vulnerabilidad de alta a moderada y capacidad protectora de baja a moderada.

La capacidad protectora que presenta el acuífero contra la contaminación del agua subterránea con respecto al parámetro (C) y de la conductancia longitudinal (S) es variable. Esto se debe a que el acuífero se considera de tipo semiconfinado y heterogéneo, con zonas de hasta 40 m de arcilla, que proporcionan protección contra la infiltración de contaminantes. Los sitios con una cobertura de arcilla arenosa que corresponden a una capacidad protectora excelente y extremadamente baja vulnerabilidad, se localizaron en la zona oeste del acuífero.

La zona de estudio presenta, en general, una vulnerabilidad de moderada a alta, de acuerdo con el mapa AVI elaborado con la información del espesor de las capas de la cobertura no saturada, del nivel del agua y los valores de la conductividad hidráulica de cada capa (**fig. 11a**). Aunque el área lacustre alrededor del lago Nabor Carrillo presenta una cobertura superficial arcillosa con un menor tiempo de tránsito.

La correlación entre las técnicas físicas y geoeléctricas, permitió identificar en la zona este del acuífero áreas con capacidad de protección de pobre a débil (<20 Siemens/m) con vulnerabilidad de muy alta a moderadamente alta (1.4 a 2.1 días) de acuerdo con el tiempo de tránsito para clasificar el grado de vulnerabilidad. Asimismo, al oriente existen áreas puntuales con alta vulnerabilidad intrínseca para incorporar contaminantes al acuífero.

Debido a que el sistema acuífero de Texcoco presenta variaciones en sus parámetros hidráulicos, es relevante aplicar otros métodos de valoración (GOD, DRASTIC, SINTACS), para comparar los distintos grados de riesgo a la contaminación. De la misma manera, es importante validar estos métodos con apoyo de trazadores y análisis químicos de muestras de agua en los pozos de la región.

Este estudio es importante como una alternativa para elaborar programas de gestión y protección, considerando el modelo conceptual obtenido en perfil y en planta, así como los valores de los parámetros hidrogeológicos obtenidos como la porosidad y la conductividad hidráulica e incorporarlos en un modelo numérico de flujo del agua subterránea y transporte de contaminantes en el acuífero de Texcoco, Estado de México.

### REFERENCIAS

- Anornu G. y Kabo-bah A. (2013). Evaluation of AVI and DRASTIC methods for groundwater vulnerability mapping. Journal of Environment and Ecology 4 (2), 126-135. https://doi.org/10.5296/jee.v4i2.4961
- Auge M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latinoamericana de Hidrogeología 4, 85-103
- Benabdelouahab S., Salhib A., Himi M., El Messar JE., Casas A., Mesmoudie H. y Benabdelfadel A. (2018). Using resistivity methods to characterize the geometry and assess groundwater vulnerability of a Moroccan coastal aquifer. Groundwater for Sustainable Development 7, 293-304. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.07.004
- Brea-Iglesias A. (2016). Uso de técnicas geofísicas en la planificación y gestión de recursos hídricos subterráneos. Aplicación en acuíferos mediterráneos. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad de Barcelona. Barcelona, España, 259 pp.
- Casas A., Himi M., Diaz Y., Pinto V., Front X. y Tapias J.C. (2008). Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. Environmental Geology 54, 515-520. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0844-1
- CONAGUA (2018a). Subdirección General Técnica. Archivos proporcionados de la base de datos de la Comisión Nacional del Agua CD-ROM.
- CONAGUA (2018b). Subdirección General Técnica. Acuíferos por región hidrológico-administrativa. Sistema Nacional de Información del agua. Base de datos CONAGUA [en línea] http://sina.conagua.gob. mx/sina/tema.php?tema=acuíferos, 10/05/2020
- CONAGUA (2020). Subdirección General Técnica. Gerencia de aguas subterráneas. Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Texcoco, Estado de México [en línea]. Base de datos CONAGUA https:// sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\_Acuíferos\_18/ edomex/DR\_1507.pdf, 15/05/2020
- Escobar-Villagrán B. y Palacios-Vélez O. (2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México. Tecnología y Ciencias del Agua 3 (2), 67-84
- Foster S. y Hirata R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. World Health Organization (WHO)-Pan American Health Organization (PAHO)/Programa de Salud Ambiental (HPE)- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Manual Técnico. Lima, Perú, 81 pp.

- Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M. y Paris M. (2007). Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. 2da ed, The International Bank for Reconstruction and Development/The Word Bank. Michigan, EUA, 103 pp.
- Hernández-Espriú A., Reyna-Gutiérrez J., Sánchez-León E., Cabral-Cano E., Carrera-Hernández J., Martínez-Santos P. y Colombo D. (2014). The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City. Hydrogeology Journal 22 (6), 1-17. https://doi.org/10.1007/s10040-014-1130-4
- Himi M., Tapias J., Benabdelouahab S., Salhi A., Rivero L., Elgettafi M., El Mandour A., Stitou J. y Casas A. (2017). Geophysical characterization of saltwater intrusion in a coastal aquifer: the case of Martil-Alila plain (North Morocco). Journal of African Earth Sciences 126, 136-147. https://doi.org/10.1016/j. jafrearsci.2016.11.011
- INEGI (2014, 2017). Conjunto de datos vectoriales de información topográfica de; E14B21 Texcoco; E14A29 Cuautitlán; E14B31 Chalco de Díaz Covarrubias, escala 1:50 000 serie III. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Base de datos INEGI [en línea]. https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/, 12/09/2020
- INEGI (2001). Cartas geológicas de; E14B21 Texcoco, E14A29 Cuautitlán, E14B31 Chalco de Díaz Covarrubias (escala 1:50 000). Instituto Nacional de Estadística e Informática. Obtenido de archivos de INEGI CD-ROM.
- Koefoed O. (1979). Geosounding principles, 1: resistivity sounding measurements. Elsevier Science Publishing Company, Ámsterdam, Holanda, 277 pp.
- López-Loera H. (2014). Geofísica para la localización de agua subterránea en ambientes volcánicos áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 66 (1), 165-181
- Maillet R. (1947) The fundamental equations of electrical prospecting. Geophysics 12 (4), 529-556. https://doi. org/10.1190/1.1437342
- Okonkwo A.C. y Ugwu G.Z. (2015). Determination of Dar-Zarrouk parameters for prediction of aquifer protective capacity: a case of Agbani Sandstone aquifer, Enugu State, Southeastern Nigeria. International Research Journal of Geology and Mining. 5 (2),12-19
- Oladapo M.I. y Akintorinwa O.J. (2007). Hydrogeophysical study of Ogbese Southwestern, Nigeria. Global Journal of Pure and Applied Sciences 13 (1), 55-61. http://www.doi.org/10.4314/gjpas.v13i1.16669

- Orellana E. (1982). Prospección geofísica de corriente continua. 2da ed, Biblioteca Técnica Philips, Madrid, España. 578 pp.
- Prashant K., Baban K.S., Sanjit K.D., Praveen K.T. y Ghanshyam C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: a critical evaluation. Environmental Impact Assessment Review 51, 38-49. https://doi.org/10.1016/j. eiar.2015.02.001
- Prashant K., Praveen K.T. y Sanjit K.D. (2020). Groundwater vulnerability assessment and mapping using DRASTIC model. CRC Press, Taylor and Francis Group, Florida, EUA, 120 pp.
- Ramos-Leal J., Ramos-Leal C., Noyola C. y Tapia O. (2010). Aquifer vulnerability and groundwater quality in mega cities: case of the Mexico Basin. Environmental Earth Sciences 61, 1309-1320. https://doi. org/10.1007/s12665-009-0434-5
- Reyes A., Sánchez M., Coras P. y Arteaga R. (2010). Subsuelo del Valle de México, Chapingo, México. Memorias. IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola y XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Victoria, Espíritu Santo, Brasil. 25 - 29 de julio, 2010. CD-ROM.
- Reynolds W.D. y Elrick D.E. (1986). A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of fieldsaturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. Groundwater Monitoring and Remediation 6 (1), 84-95. https://doi. org/10.1111/j.1745-6592.1986.tb01229.x
- Rodríguez T., J. L. (1982). Aspectos geotécnicos del bordo perimetral al lago Dr. Nabor Carrillo en el ex vaso de Texcoco. Tesis profesional. México: UNAM, FES Aragón.
- SEMARNAT (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Diario Oficial de la Federación. 13 de septiembre de 2019, 12 pp.
- SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. 2a. ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México, México. 31 de diciembre de 2002, 73 pp.
- Stephens D.B., Kron A.J. y Kron A. (2018). Vadose zone hydrology. CRC press, Taylor and Francis Group, Florida, EUA, 350 pp.
- Ugwu N.U., Ranganai R.T., Simon R.E. y Ogubazghi G. (2016). Geoelectric evaluation of groundwater potential and vulnerability of overburden aquifers at

Onibu-Eja active open dumpsite, Osogbo, Southwestern Nigeria. Journal of Water Resource and Protection 8 (3), 311-329. https://doi.org/10.4236/ jwarp.2016.83026

- Van Stempvoort D., Ewert L. y Wassenaar L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS - compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal 18 (1), 25-37. https://doi. org/10.4296/cwrj1801025
- Vías-Martínez J. M. (2005). Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España. Tesis de Doctorado. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga. Málaga, España, 407 pp.