

Estudios Geofísicos para la detección de agua subterránea en el municipio de Jalcomulco, Veracruz, México

Geophysical studies for the detection of groundwater in the municipality of Jalcomulco, Veracruz, Mexico

Julio César González Hernández ^a | José Serrano Ortiz ^b | Katrin Sieron ^c | Jesús Ortigoza ^d |
Blake Weissling ^e | Francisco Córdoba Montiel ^f | Rafael Torres Orozco ^g |

Recibido: 28 de febrero de 2023.

Aceptado: 10 de abril de 2023.

^a Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: julio.igfbuap@gmail.com¹

^b Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: seotz_jso@hotmail.com

^c Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico, Xalapa, México.
Contacto: ksieron@uv.mx | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4036-9107> *Autora para correspondencia.

^d Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: jesusortigoza75@gmail.com

^e University of Texas at San Antonio (UTSA), Department of Geological Sciences, EUA. Contacto: Blake.Weissling@utsa.edu

^f Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México.
Contacto: fcordoba@uv.mx

^g Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico, Xalapa, México.
Contacto: raftorres@uv.mx | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2214-9829>

¹ *Los datos provenientes de los estudios geofísicos se pueden solicitar al primer autor del presente artículo.

Resumen: A partir de la interpretación de propiedades físicas medidas en el subsuelo por medio de diferentes técnicas geofísicas, podemos localizar y delimitar la distribución de los diferentes cuerpos de agua subterráneos: el espesor y distribución de los estratos, el tipo de roca, además de estructuras geológicas como diaclasas, fallas o pliegues. En este trabajo se presentan los resultados de los datos adquiridos durante la aplicación de estudios de tomografía de resistividad eléctrica y sísmica de refracción, así como del levantamiento geológico de la zona de estudio, realizados en el municipio de Jalcomulco, estado de Veracruz, México, con el fin de identificar el nivel freático a una profundidad somera, del cual se pudiera extraer agua mediante la perforación de un pozo, ya que el existente muestra contaminación por el río La Antigua. Después de la interpretación y constricción de los diferentes métodos se llegó a la conclusión de que existe la presencia de un volumen de agua libre de contaminación a los 16 m de profundidad. Además, se identifican al menos tres estratos con características geofísicas distintas, correspondientes a la capa de suelo reciente, depósitos fluviales y de lahares. Esta información puede ser de utilidad para futuros proyectos de excavación de pozos.

Palabras clave: Prospección geofísica; geohidrología; sísmica de refracción; geoelectrica; agua subterránea.

Abstract: *From the interpretation of physical properties, measured in the subsoil by means of different geophysical techniques, we can locate and delimit the distribution of the different underground water bodies, the thickness and distribution of the strata, the type of rock, as well as structures geological features such as joints, faults or folds. This paper presents the results of the data acquired during the application of tomography studies of electrical resistivity and seismic refraction, as well as the geological survey of the study area, carried out in the municipality of Jalcomulco, state of Veracruz, Mexico, in order to identify the water table at a shallow depth, from which water could be extracted by drilling a well, since the existing sample shows contamination by the Antigua river.. After the interpretation and constraint of the different methods, it was concluded that there is the presence of a volume of water free of contamination at a depth of 16 m. In addition, at least three strata with different geophysical characteristics are identified, corresponding to the recent soil layer, fluvial and lahar deposits. This information may be useful for future well drilling projects.*

Keywords: Geophysical Survey; Geohydrology; Refraction Seismology; Geoelectrics; Groundwater.

Introducción

Los trabajos geofísicos y geológicos en la zona central del municipio Jalcomulco (**Figura 1**), igual que otros recientemente presentados (Sieron *et al.*, 2021) han sido producto de una colaboración entre miembros del Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV) y personal académico de la Facultad de Ingeniería (licenciatura en Ingeniería Geofísica) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). El trabajo interdisciplinario realizado en las zonas de Xalapa, Pico de Orizaba y Jalcomulco ha conducido a una comprensión mayor de contextos geológicos. El presente artículo, efectuado en colaboración durante los meses de agosto y septiembre de 2019, implicó una serie de estudios geofísicos y geológicos en la zona centro del municipio de Jalcomulco, estado de Veracruz, México (**Figura 1**); y tiene su origen en la inquietud de la población sobre la situación del agua subterránea (acuíferos), su cercanía –y eventual afectación– a aguas contaminadas del río Los Pescados (**Figura 1**). En la actualidad, existe una

preocupación a nivel mundial que va en aumento día con día relacionada con la escasez y calidad del agua, debido principalmente a su contaminación superficial y en menor medida, la subterránea, producto de acciones antropogénicas. Para la identificación de la estratigrafía y capas potenciales con calidad de acuífero en el subsuelo, se pueden emplear distintas técnicas, entre las cuales destaca la prospección geoelectrica.

Aquí combinamos métodos de tomografía eléctrica de resistividad con el método de refracción sísmica. Para una adecuada interpretación de los resultados de los métodos geofísicos aquí mencionados se requiere conocer el contexto geológico de la zona. Por ende, se llevó a cabo un trabajo geológico anteriormente, el cual consistió en un reconocimiento básico de las unidades geológicas presentes en el área, comparando ésta con la información ya existente y disponible.

1. Aspectos geográficos y geológicos de la zona de estudio

El municipio de Jalcomulco se localiza en el centro del estado de Veracruz, entre 19° 16' y 19° 24' de latitud norte y los 96° 41' y 96° 50' de longitud oeste, con una altitud que va de los 200 a los 800 m s. n. m. El municipio colinda al norte con los de Emiliano Zapata y Apazapan, al este con los municipios de Apazapan y Tlaltetela, al Sur con el municipio de Tlaltetela, al Oeste con los municipios de Tlaltetela y Coatepec (**Figura 1**). Tiene una superficie 72.4 km² y según la proyección de la Comisión Nacional de Población (CONAPO) hasta el año 2019 contaba con una población de 5190 habitantes (CEIEG, 2019).

Jalcomulco tiene como principal afluente de agua al río “Los Pescados” o río “La Antigua” (**Figura 1**), ubicado en la cuenca con el mismo nombre. Esta cuenca se encuentra localizada geográficamente entre los 19° 05' y 19° 34' latitud norte, y 96° 06' y 97° 16' longitud oeste (CONAGUA, 2019). El río “La Antigua” nace en la Sierra Madre Oriental con el nombre de río “Resumidero”, a una altitud de 3,350 m en el estado de Puebla. A lo largo de su trayectoria hacia el Golfo de México cambia su nombre a río “Los Pescados” y río “La Antigua”.

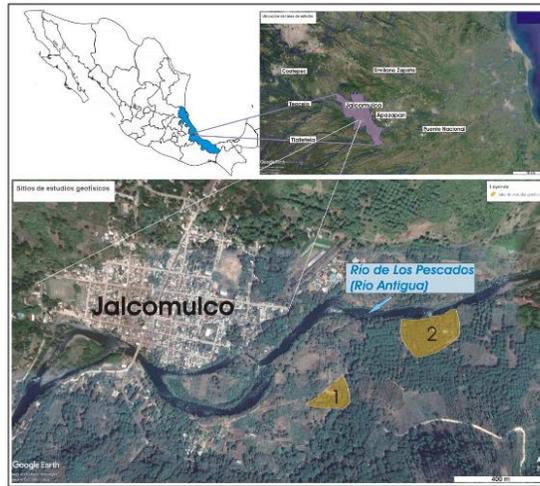
El área de estudio se encuentra, aproximadamente, a 0.5 km de la localidad Jalcomulco y cerca del cauce del río (**Figura 1**). Cabe mencionar que en los dos predios estudiados se encuentra un pozo para la toma de agua de uso doméstico. Con respecto a las unidades geológicas más importantes en la zona cercana a estos predios estudiados, predominan dos tipos: las rocas calcáreas y rocas ígneas extrusivas variadas.

De acuerdo con la información derivada de la carta geológico-minera 1:250000 Veracruz E-143 (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2002) y la carta Coatepec E14-B37 1:50000 (SGM, 2010), ambas del Servicio Geológico Mexicano, las rocas más antiguas que afloran en la zona de estudio son calizas (KtssCz) ampliamente distribuidas por la zona de estudio, margas y lutitas (KcmMg-Lu), del Cretácico superior (**Figura 2**). Del Terciario existen afloramientos aislados, lutitas, margas y areniscas mal cementadas y conglomerados (TpaLu-Mg y TmAr-Cgo, respectivamente). El vulcanismo comenzó en el Terciario y se presenta en la zona de estudio con lavas alcalinas representadas por basaltos, andesitas basálticas y brechas volcánicas basálticas (TmBvB).

En el Plioceno Pleistoceno-Superior, se precipitaron depósitos de travertino (TplQptTr). Simultáneamente en la porción centro-oriental, tuvieron lugar erupciones basálticas calcoalcalinas denominadas basaltos Xalapa, seguida de una actividad explosiva alcalina correspondiente a las tobas basálticas Chiconquiaco, (QptTB). Posteriormente, se depositaron rocas piroclásticas –antes

descritas– y más recientemente en el Cuaternario, el vulcanismo asociado a la cadena Citlaltépetl-Cofre de Perote generó productos volcánicos emplazados sobre andesitas y dacitas Pliocénicas y basaltos del Pleistoceno (QptB), sobre los cuales se depositan dacitas y andesitas, lahares y arenas (QptLH-ar) y depósitos piroclásticos (QptTR). En la etapa de destrucción parcial del flanco sur-este del volcán Cofre de Perote, se originó el lahar “Los Pescados”, cuyos depósitos consisten en fragmentos subredondeados y subangulosos de andesita en una matriz arenosa en abundantes afloramientos (**Figura 3**), en la cercanía de los predios estudiados con métodos geofísicos.

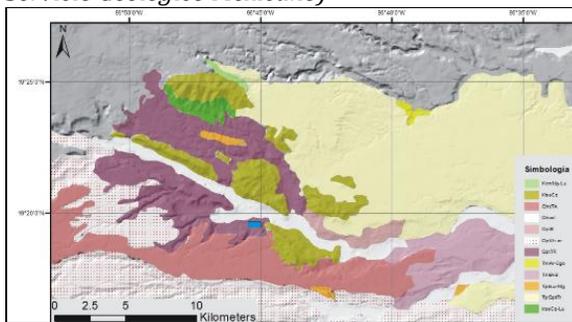
Figura 1
 Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

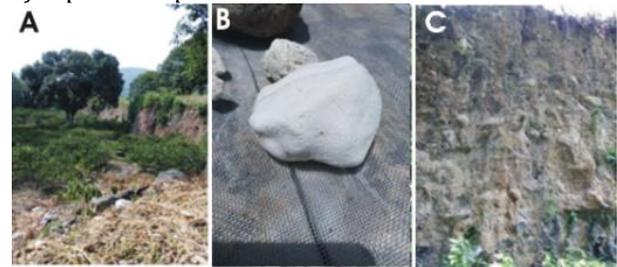
Por último, se presenta un material piroclástico con composición andesítica (QhoTA). Cubriendo parcialmente a todas estas unidades se observan depósitos Cuaternarios consistentes de limos y arenas, depósitos aluviales (Qhoal) y sedimentos eólicos.

Figura 2
 Geología de la zona de estudio (modificada del Servicio Geológico Mexicano)



Nota: En el cuadro azul se realizó la prospección geofísica. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3
 Ejemplos de depósitos de lahares



Nota: (A y C) que afloran cerca del cauce del río, así como caliza (en este caso como canto rodado, B). Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología

Una de las técnicas geofísicas más utilizada en la exploración hidrogeológica es la prospección eléctrica, que incluye la tomografía eléctrica de resistividad (TRE), la cual se basa en la inyección artificial de una corriente a partir de electrodos enterrados en superficie, esto con la intención de caracterizar la resistividad de los materiales geológicos.

Por otra parte, la sísmica de refracción se basa en el análisis de la propagación de ondas refractadas en el subsuelo para identificar la forma y composición de las capas superficiales de roca y es común su utilización en conjunto con los métodos geoelectricos en estudios de hidrogeología a poca profundidad (Castany, 1975). Los estudios de refracción encuentran una amplia aplicación en los programas de exploración de suministros subterráneos (Kearey *et al.*, 2002). A continuación se describen brevemente las técnicas empleadas en este trabajo.

2.1. Geoelectrica

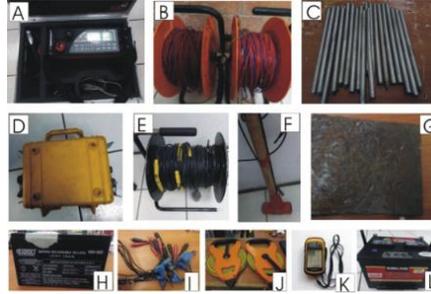
Con los métodos geoelectricos se estudia el subsuelo a partir de sus propiedades eléctricas que son la conductividad, o su inverso: la resistividad (propiedad física que no depende de la geometría del cuerpo, y consiste en la oposición de éste al paso de una corriente eléctrica), mediante mediciones realizadas en superficie o desde algún pozo (registros eléctricos). En estos estudios se emplean electrodos espaciados entre sí que se introducen en el subsuelo a lo largo de perfiles.

2.1.1. Tomografía eléctrica de resistividad (TRE)

La tomografía eléctrica de resistividad se encuentra clasificada como un método geoelectrico resistivo. Por medio de dos electrodos, conectados con cables a un equipo (resistivímetro), se induce una corriente eléctrica que se propaga en el suelo. Posteriormente, se registra con otros dos electrodos la diferencia de potencial; es decir, habrá una caída de voltaje a lo largo del trayecto de la corriente, ya que el subsuelo se encuentra constituido por diferentes rocas, minerales, porosidad y fluidos en los poros. En estos métodos, las corrientes eléctricas generadas artificialmente viajan a través del subsuelo, recuperando en superficie valores de resistividades en diferentes puntos a distintas profundidades. Con estos datos es posible construir perfiles geoelectricos 2D o modelos geoelectricos 3D para llevar a cabo una caracterización con base a las propiedades eléctricas (resistividad). En el área de estudio se realizaron un total de 3 perfiles de tomografía de resistividad eléctrica con un resistivímetro ARES (**Figura 4**) y un arreglo Wenner-Schlumberger, con una separación entre electrodos de 4 m.

Figura 4

Equipo utilizado para la adquisición de datos de prospección eléctrica



Nota: A. ARES, B. Carretes de cables, C. Electrodo. Equipo utilizado para sismica de refracción: D. Equipo GEODE de 12 canales (marca Geometrics), E. Carrete de cable, F. Marro (golpes para generación de ondas), G. Placa de acero que recibe el impacto del marro. H. Batería de 12 V, I. 12 geófonos; equipo adicional (J. cintas métricas, K. PS; L. batería de 12 V; ordenador (sin imagen). Fuente: Elaboración propia.

2.2. Sísmica de refracción

La refracción sísmica es un método que emplea la energía de ondas generadas usualmente en superficie (en este caso con un marro). Estas ondas, después de viajar a través del subsuelo y encontrar un refractor (capa de roca en donde la velocidad de las ondas aumenta), regresan a la superficie y son captadas por sensores (geófonos) que transforman las vibraciones en pulsos eléctricos. Los pulsos eléctricos viajan a través de un cable hasta un equipo (sismógrafo) en donde finalmente son registrados en un sismograma.

Con este método se pueden detectar diferentes estratos y cambios en rocas. El método tiene algunas limitantes si se compara con la tomografía eléctrica de resistividad, entre ellas, una menor resolución horizontal y vertical relacionada con la cantidad de energía que puede generarse con el marro y como se disipa ésta con la profundidad. En sísmica de refracción, por lo general la atención se centra únicamente en la primera llegada (o arribo) de la energía sísmica (ondas primarias). Los primeros arribos son identificados y marcados en gráficas de tiempo vs distancia (curvas dromocrónicas) indican otra capa en el subsuelo. Este enfoque simple no siempre produce una imagen completa o precisa del subsuelo. Por todo esto es que el método se utiliza normalmente para localizar interfaces de refracción (refractores) que separan capas de diferente velocidad sísmica a una profundidad típica de 15 m. Para la adquisición de los datos en campo se utilizó el software Geometrics Seismodule Controller, que funciona para los sismógrafos StrataVisor NZ, Geode, SmartSeis ST y ES-3000. El programa de adquisición de datos de sísmica de refracción consistió en realizar un total de 4 perfiles con un Geode. Cada perfil estuvo conformado por doce geófonos, separados entre sí por una distancia de 5 m, alcanzando una longitud total de 55 m. En todos los perfiles se realizaron 4 disparos.

2.3. Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos para tomografía eléctrica consistió en llevar a cabo un modelado 2D con base en las resistividades del subsuelo. El software que fue utilizado para realizarlo es el RES2DINV de Geotomo Software. El procesamiento de datos efectuado para obtener el modelo se denomina inversión, el cual consiste, en que, a partir de resistividades aparentes tomadas en campo, se obtenga un modelo de resistividades del subsuelo que pueda considerarse como real (Ortigoza-González, 2021). El procesamiento de los datos de sísmica de refracción consistió en construir modelos de velocidad con el software SeisImager/2DTM, basado en los diferentes tiempos de arribo de las ondas primarias. Para este trabajo sólo se utilizaron dos módulos: el PickwinTM y el PlotrefaTM, con los cuales se pueden obtener modelos en dos dimensiones (2D).

Al igual que en prospección eléctrica, el procesamiento de datos que se lleva a cabo para obtener el modelo es una inversión de datos que consiste en utilizar las distancias entre los puntos de energización y de recepción, junto con los tiempos de los primeros arribos de las señales sísmicas para elaborar las dromocronas (curvas tiempo-distancia) de las que se obtienen las velocidades de cada uno de los estratos, su espesor, profundidad, forma e inclinación, llegando así a un modelo de velocidades del subsuelo que pueda considerarse “real”.

3. Resultados

Pozo con agua de calidad pobre: La profundidad obtenida resultó en 10.20 m, medida desde la parte superior de la plataforma del pozo, que estaba aproximadamente a 3 m por encima del nivel del río adyacente. En relación con una posición GPS tomada en la orilla del río, con una elevación de 317 m, la elevación estimada del agua en el pozo fue de 310 m. Nótese que el nivel del agua en el pozo que se encuentra 7 m por debajo del nivel del río, sugiere un gradiente hidráulico alejándose del río.

Pozo con calidad de agua excelente: Con una cinta métrica se obtuvieron las medidas del pozo que fueron de 0.75 m de construcción, 6.17 m del relieve a el espejo de agua y 1.83 m de tirante de agua. Se estimó que el nivel del agua en el pozo estaba a 322 m s. n. m. Véase la **Figura 5** para el esquema del pozo Blanco

Figura 5

Esquema que muestra la relación entre los dos pozos que se encuentran en el área de estudio



Nota: También ver **Figura 1**. Fuente: Elaboración propia.

En el modelo de los resultados de los perfiles TE1 y TE2 (**Figura 6**) se pueden distinguir zonas superficiales (hasta los 6 m de profundidad), las cuales son relativamente secas (menor contenido de humedad). Además, son consistentes con las observaciones geológicas que corresponden a un depósito pétreo (aluvión y depósitos recientes del río en colores amarillo, marrón y verde).

A partir de una profundidad de aproximadamente 6 m, la resistividad disminuye, lo que puede explicarse con espacios de poros llenos con agua y concuerda con el nivel del agua en el pozo construido en el terreno vecino. Los lentes de alta resistividad (en colores rojo y morado) probablemente corresponden a grava y bloques más grandes.

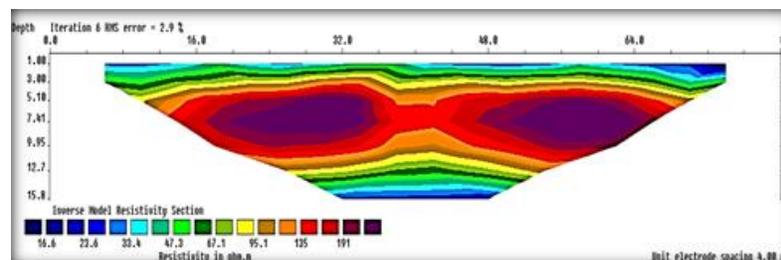
Figura 6
 Tomografía de resistividad eléctrica



Nota: Imagen Izquierda: Tomografía de resistividad eléctrica número uno (TE1). El rectángulo representa la ubicación aproximada y profundidad medida del pozo con agua limpia, la “x” marca la intersección entre la TE1 y TE2. Imagen Derecha: Tomografía de resistividad eléctrica número dos (TE2). La “x” marca la intersección entre TE1 y TE2. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de la TE3 (**Figura 7**) mostró a su vez 5 unidades resistivas; la primera que comprende 1-2 m debajo de la superficie con resistividades bajas, las cuales pueden atribuirse a la presencia de arcillas conductivas y humedad del suelo superficial (1, color azul). Por debajo un horizonte de sedimentos (sección 2, color verde, amarillo, marrón y café) que se observa como una discontinuidad con resistividades menores, en forma de “U”, que sugieren la presencia de una zona rellena de sedimentos, en donde la infiltración de agua podría presentarse más fácilmente y que por su geometría podría indicar la presencia de un paleocanal. Las siguientes capas corresponden al depósito pétreo (sección 3 y 4, color amarillo y verde) de aluvión o lahar. En estas unidades mayores a 12 m debajo de la superficie, las resistividades bajas podrían indicar una zona de saturación por agua, ya que es improbable que se deba a la presencia de arcillas (las arcillas indicarían un ambiente de baja energía, lo que es improbable, ya que los depósitos encima de las rocas carbonatadas del basamento deberían ser de alta energía, correspondiendo al primer evento de lahar). Finalmente, la sección 5 muestra humedad en los poros de las rocas alrededor de los 16 m de profundidad.

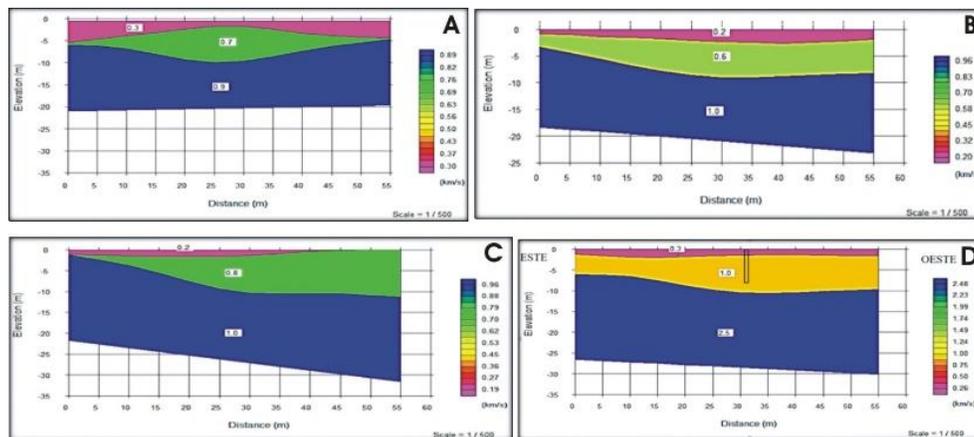
Figura 7
 Tomografía de resistividad eléctrica TE3



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados de sismica de refracción, en los perfiles T1, T2 y T3 (**Figura 8**) se puede observar la presencia de una primera capa superficial con velocidades de 200 y 300 m/s. Estas fueron asociadas, a partir de la velocidad de las ondas P, a suelo vegetal con sedimentos producto de la erosión. El segundo refractor dio como resultado velocidades que van de 600 a 800 m/s, con un espesor de alrededor de 5 m y con una geometría ondulada. Por último, la tercera capa, con velocidades de 900 a 1000 m/s, se asoció al mismo depósito pétreo localizado en las tomografías de resistividad eléctrica.

Figura 8
Modelo de velocidades



Nota: A. Modelo de velocidades uno (S1), con tres capas refractoras, obtenido del perfil sísmico número uno (T1). B. Modelo de velocidades dos (S2), con tres capas refractoras, obtenido del perfil sísmico número dos (T2). C. Modelo de velocidades tres (S3), con tres capas refractoras, obtenido del perfil sísmico número tres (T3). D. Modelo de velocidades cuatro (S4), con tres capas refractoras, obtenido del perfil sísmico cuatro (T4). El rectángulo representa la posición aproximada y profundidad medida del pozo con mejor calidad. Fuente: Elaboración propia.

En tanto que el perfil que se hizo cerca al pozo con agua limpia (T4, **Figura 8**), el primer horizonte corresponde igual que en los demás modelos de velocidad, a una capa de suelo. El segundo estrato corresponde al depósito pétreo, que podría ser parte de un depósito fluvial, con un espesor de alrededor de 5 a 8 m, mientras que la tercera capa, con la velocidad mayor de 2500 m/s se podría asociar a la presencia de roca carbonatada del basamento, tal vez suficientemente porosa para mostrar cierta saturación con agua. Cuando existe una inclusión de fases líquidas, en este caso el agua, en una roca seca, se genera un aumento en la velocidad de onda P.

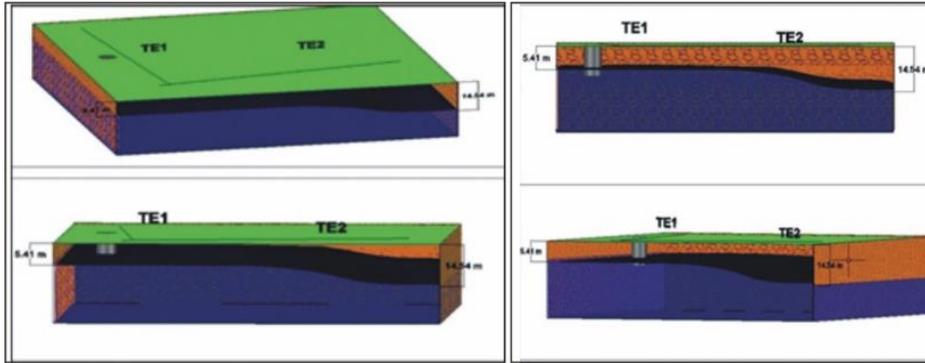
4. Conclusiones y Discusión

La profundidad a la que se encuentra la zona saturada de agua, en el predio donde se ha excavado el pozo con mejor calidad de agua (predio 1), de acuerdo a la interpretación de las velocidades en el modelo cuatro (S4) y las tomografías de resistividad eléctrica TE1, se localiza entre los 6 a los 10 m

de profundidad, mientras que en la tomografía TE2 se halló entre los 9 a los 12 m de profundidad aproximadamente (**Figura 9** y **Figura 10**).

Figura 9

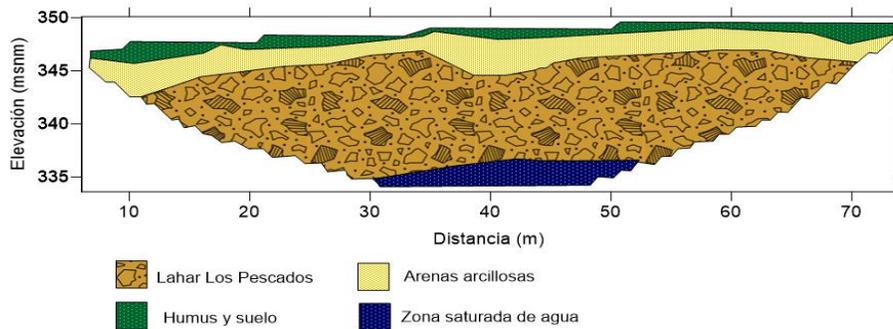
Aproximación 3D de la distribución y geometría del espejo de agua en el predio con el pozo de agua sin problemas de contaminación (construido a partir de TE1 y TE2)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10

Perfil geoelectrico sugerido del modelo de resistividades eléctricas TE3



Nota: Los datos provenientes de los estudios geofísicos se pueden solicitar al primer autor del presente trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar que ambos métodos geofísicos se corresponden con el nivel piezométrico medido en el pozo 1, a los 5.43 m de profundidad. En lo que respecta a la profundidad en la que aparentemente empieza a haber saturación de agua en el segundo predio, de acuerdo a la interpretación de la tomografía TE3 se encuentra localizada a los 16 m de profundidad. Esto debe considerarse una profundidad mínima para un posible nivel freático en esta zona. Dado que la elevación de la superficie del suelo en este lugar es de 337 m s. n. m. y el nivel del río está a 317 msnm (150 m al norte), esto coloca un posible nivel freático a 321 m s. n. m. Esta situación sugiere que el gradiente hidráulico está hacia el norte, o que el agua subterránea se mueve desde las tierras altas hacia el río.

Mediante la interpretación de los modelos sísmicos de velocidades (S1, S2, S3), junto con la tomografía de resistividad tres (TE3), se logró determinar la presencia de una unidad con geometrías onduladas y profundidades que van de los 7 m a los 10 m, en diferentes puntos de la locación en el predio donde se podría excavar un pozo sin problemas de contaminantes provenientes del río. A partir de la construcción de los modelos de velocidad, con el método de

resistividad eléctrica se determinó que en el predio en donde se tiene planeado desarrollar el nuevo pozo existe una unidad geológica superficial con valores de resistividad que llegan a 295.78 Ωm , atribuidos a un depósito pétreo, así como tres capas refractoras en los primeros 35 m con los modelos de velocidad, que coinciden con cambios significativos en los valores de resistividad a los 2 y 7 m aproximadamente.

En el lugar donde se encuentra el pozo con el agua de mejor calidad (pozo 1), se concluyó que igualmente se encuentra localizado un depósito pétreo, que alcanza valores de 1486 Ωm debido a que existen zonas de alta resistividad en forma de lentes irregulares; sin embargo, la mayoría de valores en el perfil no exceden los 350 Ωm . Así mismo, se determinaron tres capas refractoras en los primeros 35 m, de los que el refractor con velocidades de 2500 m/s coincidió, tanto en geometría y profundidad con los valores de resistividades asociadas a la zona saturada de agua y/o correspondiendo al basamento local que consiste en rocas carbonatadas, que a su vez corresponden con la profundidad del nivel piezométrico tomado del pozo blanco para calibrar los modelos.

Debido a que el nivel de saturación de agua que mostraron las unidades geológicas estudiadas y caracterizadas fue demasiado somero, se sospecha una amplia influencia de actividades antropogénicas tales como el uso de pesticidas, plaguicidas o el no contar con conexión a la red de drenaje podrían dar como resultado la contaminación del cuerpo hídrico superficial. Para estudiar capas estratigráficas más profundas, habría que emplear estudios geofísicos adicionales en un futuro.

Referencias

- Castany, G.** (1975). *Prospección y exploración de las aguas subterráneas*. Omega.
- CEIEG.** (2019). Cuadernillos Municipales 2019, Jalcomulco.
<http://ceieg.veracruz.gob.mx/2019/05/09/cuadernillos-municipales-2019/>
- CONAGUA.** (2019). Aguas Subterráneas.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/A_Subterranea.html
- Kearey, P., Brooks, M. y Hill, I.** (2002). *An introduction to geophysical exploration* (3ª edición). Blackwell Science.
- Ortigoza-González, J.** (2021). Delimitación de aguas subterráneas a partir de sísmica de refracción y métodos geoelectrónicos en el municipio de Jalcomulco-Veracruz”, [tesis Licenciatura], Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Servicio Geológico Mexicano [SGM]** (2002). Carta Geológico-Minera, Veracruz E14-3. Escala 1:250,000.
- Servicio Geológico Mexicano [SGM].** (2010). Carta Geológico-Minera, Coatepec E14-B37. Escala 1:50000.
- Sieron, K., Weissling, B., Gutiérrez-Anguiano, R., González-Hernández, J. C., Martínez-Báez, C., Monfil-León, E. U., y Montiel, F. C.** (2021). Estudios Geofísicos en el techo de México. *UVserva*, (12), 54-61. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi12.2817>