

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

www.revistaglosa.com

IMPORTANCIA DE LA PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA PARA LA BÚSQUEDA DE AGUA SUBTERRÁNEA**Lázaro Raymundo Reyes-Gutiérrez^{1*}, Daniel González-Rivera²***Recibido: 25/11/2019, Aceptado: 16/12/2019**Publicado en la web: 6/2/2020.***RESUMEN**

En este estudio se presentan los beneficios de la prospección geofísica como herramienta de la exploración hidrogeológica en dos dimensiones en el predio “El Relicario” municipio de Atlatlautla Estado de México, en la porción occidente del volcan Popocatepetl, obteniendo una visión clara de las variaciones laterales y a profundidad de las características resistivas del subsuelo. Se realizaron 8 sondeos eléctricos verticales (SEV) con resistivímetro SAS1000 ABEM y 4 perfiles geoelectricos sobre un basamento complejo de basalto. Los SEV, se realizaron con el arreglo tipo Schlumberger mostrando la heterogeneidad lateral y vertical del sistema hidrogeológico investigado e interpretado por medio de las resistividades reales resultantes de la inversión de los datos de campo evaluados mediante el programa IX1D, obteniendo los modelos de capas resultantes con su modelo geofísico-geológico correspondiente. Se detectaron cinco capas geoelectricas. La primera capa o unidad geoelectrica con valores de resistividad y espesores variables de 227-784 Ohm-m y 0.4-1.6 m, consiste de arena media a gruesa, arena limosa y arena arcillosa, la segunda con valores de 66-823 Ohm-m y 1.06-6.6 m de espesor, se asocia con brecha volcánica o flujo de escombros, la tercera capa de 59-2140 Ohm-m y 3.6-14.8 m de espesor consiste de arena y grava, la cuarta capa de <1000 Ohm-m y 5.8-31.6 m de espesor, consiste de basamento alterado y/o fracturado y la quinta con valores de >1000-<3613 Ohm-m y espesor no detectado se asocia con la capa del basamento fresco no alterado, respectivamente. La profundidad al basamento fue variable de 13 a 37 m en los SEVs 3 y 7, respectivamente. La capa 3 de arena y grava y la capa 4 de basamento alterado y/o fracturado pueden constituir una unidad acuífera. Sin embargo, debido a la fuerte pendiente que presenta el terreno, el agua que precipita en el área y su infiltración, tiende a escurrir hacia las partes bajas, quedando retenida una baja cantidad de agua en estas unidades, lo que constituye un acuífero de bajo potencial de almacenamiento. Una alternativa es colectar agua de lluvia y almacenarla para su uso en época de riego de las hortalizas.

*Palabras clave: SEV, Resistividad eléctrica, Basamento complejo de basalto.***INTRODUCCIÓN**

Avances significativos en la geofísica aplicada han surgido por la demanda a los impactos locales y regionales de la intervención humana sobre los recursos hídricos y su entorno ambiental.

Con ello se obtienen resultados de una manera rápida el número de los estratos o capas del subsuelo y los cambios geológicos a profundidad, siempre y cuando estén apoyados con un levantamiento geológico y la metodología geofísica adecuada.

En este trabajo se presenta un estudio geoelectrico para la búsqueda de agua subterránea en la porción poniente del municipio de Atlautla, en las faldas del volcán Popocatepetl, para el riego de hortalizas. Se describe la metodología específica del método geoelectrico, las características litológicas y las posibilidades de almacenamiento de agua subterránea en el sustrato investigado, hasta 60 m de profundidad. Adicionalmente, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2017) ha detectado que en diversas regiones, entidades federativas y localidades del país, los volúmenes de

¹Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma (UAML). Av. De las Garzas 10, Colonia El Panteón, 52005, Lerma de Villada, Estado de M México.

²Activo de Exploración Aguas Someras, Subdirección de Aseguramiento Operativo Dirección de Exploración, Col. Petrolera, 24179, Cd. Del Carmen, Campeche, México.

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

agua concesionados superan el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, situación que genera escasez del recurso, conflictos entre los usuarios y diversos defectos perjudiciales.

Atlautla se encuentra en la Región Hidrológica-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México con una superficie de 18,229 km², constituida por tres entidades federaivas, México, Hidalgo y Tlaxcala y las 16 Alcaldías Políticas de la Ciudad de México. Esta región hidrológica-administrativa es la más poblada de las 13 del país, donde el 90% son asentamientos rurales con una población menor o igual a 2,500 habitantes con poblados aislados.

En cuanto a disposición de agua potable, a nivel de zona rural, se tiene el porcentaje más bajo de población con agua de aproximadamente el 7%. La disponibilidad natural media se estima en 101 m³ por habitante (Estadísticas Agua Valle de Mexico, 2014). Es por ello que se buscan alternativas de aguas subterráneas, para abastecer a los habitantes de las comunidades rurales o particulares. Razón por la cual, CONAGUA está realizando nuevas guías que coadyuven en el cuidado, preservación y calidad del agua subterránea, ya que es la principal agua que extrae para el consumo humano.

Aunque en los últimos años, han surgido nuevas técnicas geofísicas, especialmente en dos dimensiones (2D) como la tomografía eléctrica de resistividades, la técnica del SEV, sigue siendo una herramienta valiosa que ayuda a resolver problemas que se presentan con gran frecuencia al hidrogeólogo, como son la caracterización de la contaminación, su evolución temporal y espacial y origen del problema del deterioro de las aguas subterráneas. La resistividad del terreno está relacionada con diversos parámetros geológicos como el contenido mineral y fluido, la porosidad, la naturaleza y el grado de saturación de agua en la roca. El levantamiento de resistividad eléctrica es una operación geofísica en la que las mediciones de la resistividad se realizan desde la superficie del terreno (Michael, 1978).

El uso del método geoelectrico para mapear la presencia y distribución de agua subterránea ha sido importante con el desarrollo reciente en los avances de los microprocesadores y soluciones de modelación numérica. Una de las ventajas del método geoelectrico es que proporciona información de propiedades físicas distribuidas especialmente en regiones que son difíciles de muestrear utilizando los métodos hidrogeológicos convencionales a partir de pozos que son más costosos y difíciles de implementar (Butler, 2005; K'Orwe *et al.*, 2011).

El presente estudio se llevó a cabo con el propósito de la búsqueda de aguas subterráneas en el predio “El Relicario” para el cultivo de amaranto y su desarrollo vegetativo a una altura de 2,300 msnm en el sector suroeste del volcán Popocatepetl y al sureste del municipio de Atlautla, Estado de México.

El estudio geofísico consiste en detectar y determinar el espesor de las capas permeables y sus límites tanto lateralmente como en profundidad, en el paraje “El Relicario” y con los resultados obtenidos, se indicaran las posibilidades de almacenamiento de agua subterránea.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y GEOLOGÍA

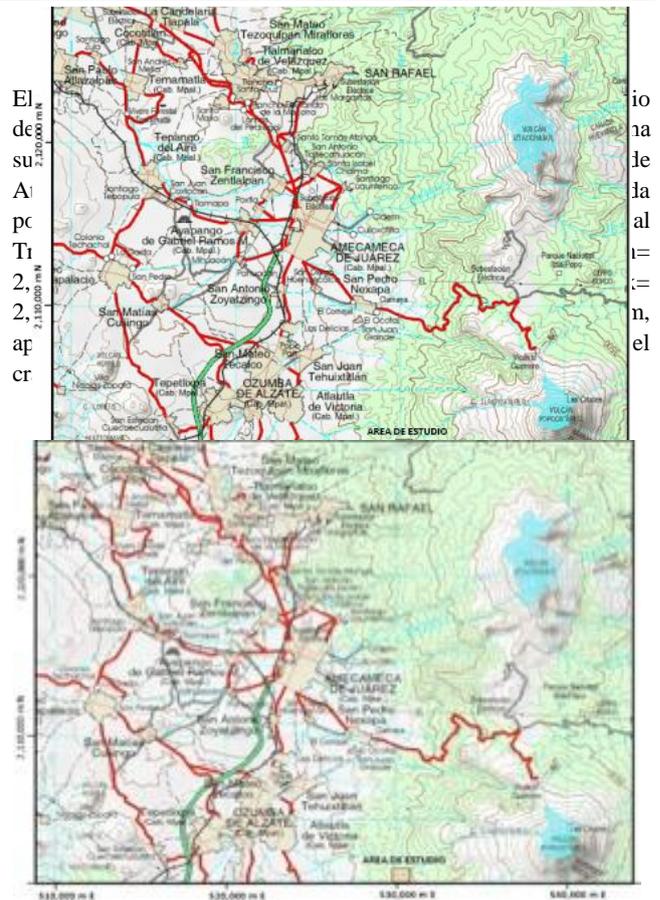


Figura 1. Área de estudio (modificado de INEGI, 2018).

En Atlautla, la temporada de lluvias es nublada, la temporada seca es parcialmente nublada y es húmedo durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 5 °C a 25 °C. Se presenta una precipitación de 150 mm.

El volcán Popocatepetl tiene una elevación de 5,419.43 msnm, es la tercera cima más alta de México. Es un estratovolcán producto de la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa continental de Norteamérica de composición andesítico-dacítica localizado en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), en las coordenadas 19°01'23" N y 98°37'22" W. El volcán constituye el extremo sur de la Sierra Nevada, que se extiende de N a S por más de 80 km, funcionando como parteaguas de los valles de México, al W y de Puebla, al E (Álvarez, 1962; López-Ramos, 1983). El basamento de la Sierra Nevada en el sector del Popocatepetl comprende calizas cretácicas (Formaciones Cuautla y Morelos), arenitas y evaporitas del Terciario y aflora al sur del volcán en altitudes entre los 1,200 y 1,700 msnm. Estas formaciones fueron plegadas por la orogenia Laramide y cubiertas discordantemente por los sedimentos terrígenos del Grupo Balsas en el Eoceno-Oligoceno (Fries, 1960; 1966).

La zona de estudio se considera como sísmica presentando movimientos desde microsismos a sismos fuertes o movimientos telúricos como el ocurrido el 17 de septiembre de 2017, afectando zonas someras a profundas provocando agrietamiento del terreno, formación de oquedades o cavernas de gran tamaño, deslizamientos, colapsos de suelo y hundimientos, dando lugar a

la erosión del suelo, esto derivado de la sismicidad o vulcanismo del volcán Popocatepetl, por lo que es poca la posibilidad de encontrar zonas de almacenamiento de agua subterránea a elevaciones intermedias aunado a la pendiente abrupta que presenta la zona de estudio, dando lugar a un escurrimiento hacia las partes bajas. Una alternativa es captar el agua de lluvia para el cultivo en temporada de secas.

Por lo general, en un área de basamento complejo, el agua subterránea es contenida en la columna de rocas alteradas/fisuradas del basamento. Estos procesos geológicos alteran la roca para reducir la resistividad y aumentar la porosidad y permeabilidad de dichas unidades para la acumulación de agua subterránea. El área de estudio está cubierta con una variedad de suelo laterítico; suelo que se desarrolla por la meteorización intensa y de larga duración de la roca madre subyacente y material piroclástico.

MATERIALES Y METODOS

Las actividades en campo, consistieron en realizar el levantamiento de 8 sondeos eléctricos verticales integrados por 4 perfiles con arreglo tetraelectródico Schlumberger utilizando el Terrameter sueco "Abem" SAS 4000. Los perfiles de SEV se integraron a partir de la disposición de los SEV's en terreno, distribuidos en dirección suroeste-noreste, como se muestra en la Figura 2 en un lomerío ubicado en la porción oriente de las faldas del volcán Popocatepetl. Los SEV's se dispusieron cada 50 m para una longitud de medición $AB/2=100$ m y $MN= 5-0$ y 10.0 m. La distribución de los tendidos dependió de las características del terreno (debido a las dimensiones del terreno o estructuras que obstruyeran el tendido de los electrodos), con el fin de alcanzar profundidades de investigación de aproximadamente 30-60 m reales.



Figura 2. Imagen de satélite con ubicación de los SEV's en el área de estudio.

RESULTADOS

La Figura 3 muestra la interpretación de las curvas representativas de los puntos de SEV mediante la inversión de resistividad aparente, resultando en dos grupos muy similares; el primero en seis de ellos (SEVs 1, 2, 3, 4, 6 y 7), y el segundo en dos de ellos (SEVs 5 y 8), las diferencias obedecen a la variación en los espesores de las capas asumidas en el modelo. Las curvas con concavidad más acentuada sugieren profundidades mayores del techo del basamento, el cual está representado en el tramo final ascendente de las mismas.

Se realizaron mediciones geoelectricas en su modalidad del arreglo Schlumberger para la búsqueda de agua subterránea en el predio "El Relicario" ubicado en el sector suroeste de las faldas del volcán Popocatepetl, un volcán activo, al sureste del municipio de Atlautla, Estado de México.

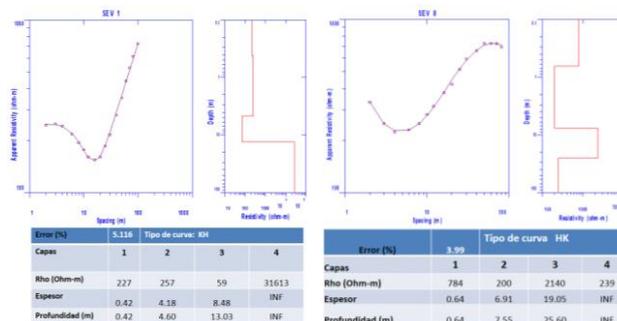


Figura 3. Resultado de la inversión de la resistividad aparente medida en el SEV-1 y SEV-8. A la izquierda datos medidos (\circ) y respuesta del modelo teórico propuesto (línea sólida) en representación log-log. A la derecha es el perfil de resistividad eléctrica con la profundidad correspondiente a la respuesta mostrada en representación log-log. La tabla de abajo representa los resultados de la inversión del problema. El error en el ajuste del modelo es de 5.0 y $\sim 4.0\%$, respectivamente.

El presente estudio consistió en determinar de manera indirecta las unidades geológicas del subsuelo, así como sus características hidrogeológicas de las mismas que presenten posibilidades de alumbramiento de agua subterránea, aplicando la técnica geofísica en la modalidad del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Las curvas tipo fueron de tipo complejo KH, HK, KQHA, QHA, KHK, HAA y KHA. La interpretación en computadora de las curvas de SEV ha revelado una secuencia 5 capas en el subsuelo, constituidas por una capa de suelo con significado hidrogeológico limitado, favorable para la recarga de agua de lluvia, una capa de brecha o flujo de escombros, una capa de arena y grava, una capa, la capa de basamento parcialmente alterado/fracturado y el basamento fresco. La capa de arena y grava y la capa alterada, se supone que constituyen la unidad acuífera del área de estudio. El espesor de las capas, el contenido de arcilla y el grado de fracturamiento, juegan un papel importante en el rendimiento de las unidades acuíferas.

Geológicamente el área de estudio se caracteriza por presentar rocas volcanoclásticas tipo granulares e ígneas; principalmente depósitos de tobas arcillo arenosas, los cuales están cubiertos por un estrato de brecha volcánica o derrames de basaltos, subyaciendo por basalto alterado y su base corresponde al basamento fresco. Como parte de los resultados alcanzados, la prospección de aguas subterráneas en el área de estudio se ha zonificado como potencial alto, medio y bajo. Se considera que las zonas donde el espesor de cobertura (por encima del techo del basamento) sea mayor a 25 m y contenido bajo de arcilla (valores promedio de resistividad entre 100 y 300 Ohm-m) se consideran zonas con alto potencial de aguas subterráneas. Las zonas con espesor entre 10 a 25 m y valores promedio de resistividad entre 80 y 120 Ohm-m, son zonas de potencial medio de aguas subterráneas y aquellas zonas con espesor menor de 10 m y valores de resistividad menores que 80 Ohm-m, son consideradas de bajo potencial de agua subterránea.

A partir de los resultados de la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales y representados en la sección de resultados geofísicos, muestran desde el punto de vista hidrogeológico, que la unidad que presentan las mayores posibilidades acuíferas son las tobas arenosas con intercalaciones de arcillas (Unidad 3) con valores de resistividad entre 62-91 Ohm-m que se encontraron a una profundidad entre 5.1-13.3 m. Sin embargo, por su espesor delgado de la Unidad 3, menor a 10 m y a la fuerte pendiente que presenta la zona de estudio, el agua escurre gradiente abajo disminuyendo la posibilidad de almacenar agua, quedando parcialmente saturada como se observa en la Figura 4.

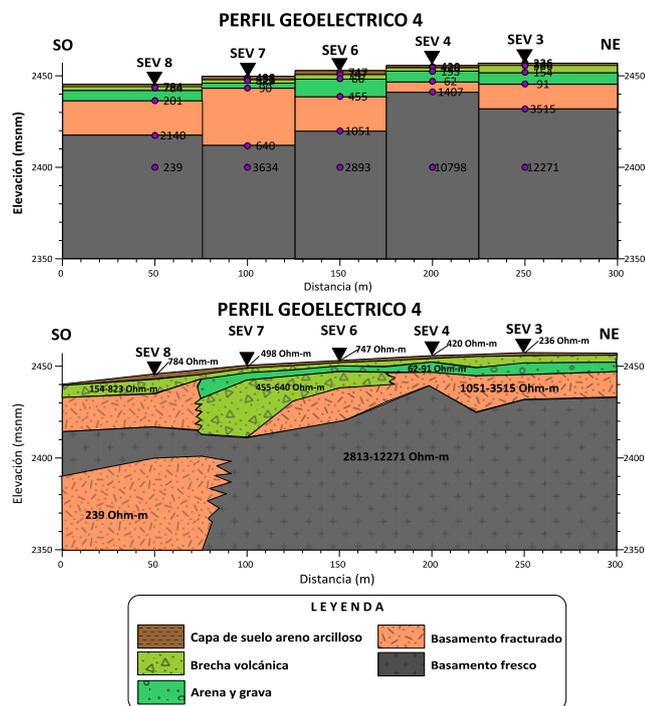


Figura 4. Configuración geoelectrica del Perfil 2 integrado por los SEV-7, SEV-6, SEV-4 y SEV-5.

La basaltos alterados/fracturados (Unidad 4) con resistividades de 239-640 Ohm-m y detectados a una profundidad de 11.5-37.2 m, también es una capa de interés con posibilidades para almacenar agua subterránea en los SEV-6, SEV-7 y SEV-8, y presenta un espesor de 18.7 a 31.6 m. Sus posibilidades se ven reducidas por la pendiente que presenta el terreno y un grado moderado de fracturamiento.

Por lo anteriormente descrito y de acuerdo al análisis geofísico, esto sugiere una prospección de agua subterránea en general baja para el área de estudio. Una opción que se recomienda realizar excavación o perforación exploratoria a la profundidad de 25 m en el sitio donde se realizó el SEV-7 o de 80 m en el sitio del SEV-8, donde la resistividad eléctrica determinada para esta formación podría indicar la presencia de agua en fisuras por debajo de los basaltos más resistivos. Sin embargo, de acuerdo al estudio, a pesar de que es la zona con buenas posibilidades acuíferas, es de mucho riesgo por la profundidad a perforar y por las características descritas en el apartado de resultados.

El análisis de los SEV permitió determinar la litología y geometría de los depósitos granulares y la profundidad del techo del basamento cristalino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por la UAM Lerma y a las autoridades del Municipio de Atlautla para realizar el presente estudio.

REFERENCIAS

- Álvarez, M. 1962. Provincias Fisiográficas de la República Mexicana. Instituto de Geología, UNAM, México, D.F.
- Astier Jean Louis. 1984. Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Paraninfo; Madrid, España.
- Bhattacharya, P.K. y Patra, H.P., (1968). *Direct Current Geoelectric Sounding. Principles and Interpretation*, Amsterdam: Elsevier.
- Burger, H. R., A. F. Sheehan, and C. H. Jones, *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface*, New York, W. W. Norton & Company, 2006.
- Butler, D. K. (2005). *Near-surface Geophysics* (No. 13). SEG Books.
- Butler, J. J. Jr. (2005). Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity. *Hydrogeophysics*, edited by Y. Rubin and S. S. Hubbard, Springer, Netherlands, Central ground water board of India, 2003, 'Occurrence, Genesis and Control Strategies of Fluoride, Waipalli Watershe Zd, Nalgonda District Andhra-Pradesh, India', Central Groundwater Board, Ministry of Water resources, Government of India, 23-58.
- CONAGUA, (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Chalco-Amecameca DR-1506, pp. 28.
- Demant, A., 1979, Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico: Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 3, 39-57.

-
- Espinasa-Pereña, R., Martín-del Pozzo, A.L., 2006, Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México, en: Siebe, C., Macías, J.L., Aguirre-Díaz, G. (eds.), Neogene-Quaternary continental margin volcanism: a perspective from México: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, 402, 101–123, doi:10.1130/2006.2402(05).
- Fries, C., Jr., (1960). Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México, UNAM. Inst. Geol., Bol. 60, p. 236.
- Fries, C., Jr., (1966). Resumen de la Geología de Cuernavaca, Estado de Morelos. Hoja Cuernavaca 14 Q-h (8), Esc. 1:100 000. Inst. Geol. UNAM, México, D.F.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Carta Topográfica Escala 1:50,000. Hoja Amecameca de Juarez, Clave: E14B41.
- K’Orowe, M. O., Nyadawa, M. O., Singh, V. S. and Ratnakar, D. (2011). Hydrogeophysical parameter estimation for aquifer characterisation in hard rock environments: A case study from Jangan sub-watershed, India. *Journal of Oceanography and Marine Science*, 2(3): 50-62.
- Koefoed, O., (1980). *Geosounding Principles: Resistivity Sounding Measurements*, Elsevier Science Ltd.
- López-Ramos, E., (1983). Geología de México, Tomo 2 UNAM, México, D.F.
- Lloyd, J. W., (1999). Water resources in hard rock aquifers in arid and semi-arid areas. UNESCO Studies and Reports in Hydrogeology No. 58. UNESCO, Paris. Martinelli y Hubert.
- Macías, J. L., (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana Tomo LVII, núm. 3, 2005, pp. 379-424.
- Michael AM. Irrigation Theory and Practice. New Delhi; Vikas Publishing House, 1978.
- Orellana E. 1982. Prospección Geoeléctrica por corriente continua DC. Paraninfo. Madrid, España.
- Orellana E. y Mooney H. 1982. Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos Verticales sobre terrenos estratificados. Interciencia. Madrid, España.
- Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México: *Geofísica Internacional*, 28, 133–174.