

## ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

www.revistaglosa.com

### Estudio geoelectrico de la conexión hidráulica entre el agua superficial y agua subterránea en un tramo del Río Lerma, Estado de México

Lázaro Raymundo Reyes-Gutiérrez, Oscar, Delgado-Martínez, Marlen Colín-Ramos, Omar González-Velázquez, Efrain Pérez Almeyda, Elizabeth Teresita Romero-Guzmán,

*Recibido: 11/12/2017, Aceptado: 5/02/2018.*

*Publicado en la web: 28/08/2018.*

#### RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos con la utilización del método del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), de resistividad eléctrica en su modalidad del arreglo tetraelectrónico Schlumberger, para el estudio y caracterización de la posible conexión hidráulica entre el Río Lerma y el acuífero libre subyacente, identificando zonas de infiltración o ventanas de comunicación hidráulica, que actúan como conductos de circulación preferencial del agua o fluido que transporta el Río Lerma hacia el subsuelo en sentido vertical y lateral, así como para obtener información de los materiales geológicos aluviales a una profundidad de 60 m en un tramo de aproximadamente 1.0 km aguas abajo, a partir de la intersección de la carretera federal 55 México-Toluca con el Río Lerma donde se ubica la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, RECICLAGUA (PTAR). El SEV, al producir un corte de resistividades en dos dimensiones (2D), es una técnica adecuada para el estudio del movimiento del agua en el subsuelo. En este trabajo se realizaron 5 SEV's, separados cada 200 m para construir un perfil geoelectrico-geológico que vincula la resistividad de los distintos horizontes del subsuelo con el contenido de electrolitos. Mediante la realización de los SEV's, se han podido obtener perfiles continuos donde se presenta humedad. A partir de los SEV's efectuados fue posible detectar siete capas, las zonas donde se presenta un pasaje preferencial del agua superficial hacia el agua subterránea y el grado de permeabilidad de los estratos geológicos.

*Palabras clave: SEV, Resistividad Eléctrica, Infiltración, Humedad, Trayectorias Preferenciales.*

#### INTRODUCCIÓN

La investigación geofísica se define como un método para deducir las condiciones del subsuelo a través de la observación de fenómenos físicos, bien sea naturales o artificiales, directa o indirectamente relacionados con la estructura geológica del subsuelo. Existen diferentes técnicas de exploración geofísica para estudios del subsuelo tales como los métodos sísmicos, gravimétricos, magnéticos, geoelectricos, electromagnéticos, radiométricos, de flujo de calor, y de registros de pozos. De todos los métodos geofísicos que proporcionan información confiable cualitativa y cuantitativa de la variación de las propiedades físicas de las rocas con la profundidad para evaluar los recursos hídricos subterráneos son los sondeos eléctricos verticales (SEV) y los métodos sísmicos de refracción y reflexión (Dobrin, 1976; Koefoed, 1979; Sheriff y Geldart, 1995). En este estudio se emplea el método de resistividad eléctrica.

Una de las principales ventajas del método geoelectrico es que no es invasivo, es decir, no altera las características hidráulicas naturales del medio poroso en estudio, se aplica para mapear la estructura resistiva del subsuelo (Kirsch, 2009). La resistividad eléctrica es una propiedad que se relaciona con la composición y arreglo de los componentes del suelo, el contenido de agua y de sales y la temperatura (Rhoades et al., 1989). Por ello, también es importante realizar ensayos en laboratorio para los tipos de materiales geológicos detectados y el contenido de sales que contienen.

Los métodos geoelectricos presentan un gran potencial para discriminar la presencia entre agua dulce y agua contaminada, roca masiva y material arcilloso, entre acuíferos de roca porosa y roca fracturada, entre acuíferos permeables e impermeables, así como la detección de la migración de solutos y contaminantes tanto en forma vertical como lateral (Wendroth et al., 2006). La representación en perfil de las resistividades del subsuelo permite diferenciar la disposición de los materiales geológicos, las condiciones de humedad de los mismos, la conductividad eléctrica del agua que contienen y el grado de permeabilidad en términos del aumento o

*División of Ciencias Básicas e Ingeniería, Department of Recursos de la Tierra, Universidad Autónoma Metropolitana-Lerma (UAM-L), Lerma, México*

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

disminución de la textura del medio poroso a partir de la distribución vertical y horizontal de la resistividad eléctrica.

## OBJETIVO DE ESTE ESTUDIO

El objetivo de este estudio geofísico fue detectar la posible conexión hidráulica entre el Río Lerma con el acuífero somero subyacente, así como identificar las trayectorias preferenciales del flujo de agua infiltrada hacia el acuífero somero subyacente, detectar las variaciones de la resistividad eléctrica de los materiales geológicos por debajo de la superficie del terreno, los espesores de las capas geológicas y su profundidad, mostrando la geometría y distribución lateral de los materiales mediante un perfil geofísico-geológico.

## ÁREA DE ESTUDIO

Se describe la posible conexión hidráulica entre el Río Lerma y el acuífero somero libre subyacente constituido por materiales aluviales granulares, lo que conduce a la hipótesis que cantidades significativas de agua contaminada descargan al acuífero somero como flujo de agua subterránea, en un tramo de aproximadamente 1.0 km a partir de la planta de tratamiento RECICLAGUA, donde se descargan aguas industriales y que en particular contienen un colorante industrial no caracterizado Figura 1.

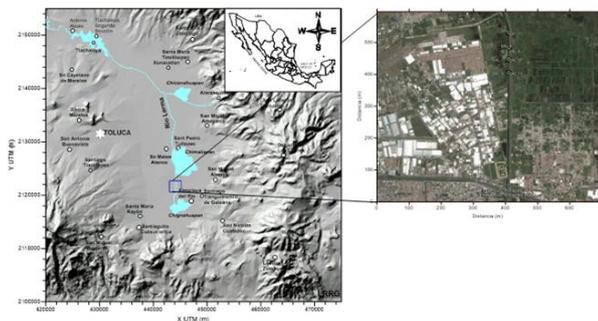


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio.

Con el aumento de la población y de las actividades humanas en el municipio de Lerma de Villada, Estado de México, ha aumentado la demanda de agua, en particular en el sector urbano e industrial en las cercanías del Río Lerma. Cabe mencionar que antes de que se construyera la autopista del libramiento Lerma-Iztlahuaca, la población aledaña al Río Lerma consumía agua subterránea de norias particulares (información personal de colonos). El agua subterránea es la única fuente confiable de agua para consumo humano y para el suministro industrial y agrícola en las inmediaciones del Río Lerma, que tiene su nacimiento en el humedal Almoloya del Río y corre en dirección hacia el noroeste del valle de Toluca.

Para tener un buen entendimiento de la circulación del agua, debe considerarse el ciclo hidrológico (Figura 1).

Una diferencia entre las aguas superficiales y subterráneas es

el tiempo de residencia en un sitio, mientras que las aguas superficiales escurren y transitan rápidamente a través de la superficie del terreno a zonas o cuencas topográficamente más bajas, las aguas subterráneas se movilizan muy lentamente en sentido vertical desde la superficie del terreno hasta el acuífero, donde transitan en sentido horizontal.

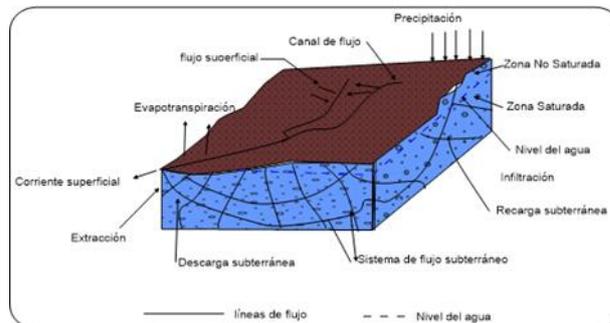


Figura 2. Ciclo del agua (modificado de Freeze y Cherry, 1974).

## METODOLOGÍA

### Resistímetro y mediciones de la resistividad

Se definieron cinco estaciones de SEV en su modalidad del arreglo eléctrico Schlumberger. Este método se basa en el estudio del comportamiento de la resistividad aparente de las rocas presentes en el subsuelo y por las características del dispositivo eléctrico de medición utilizado. El trabajo en campo mediante el dispositivo Schlumberger, ilustrado en la Figura 2, consiste de un arreglo co-líneal con cuatro electrodos (AMNB), que mide repetidas veces en un punto central "O" de observación, la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) entre MN, al aplicar una intensidad de corriente (I) en AB, para una sola posición de los electrodos de medición, variando la distancia entre los electrodos de corriente, hasta una distancia de  $AB/2 = 200$  m. Para la toma de datos en la prospección realizada, se utilizó un resistímetro con corriente continua modelo "SAS1000" de la marca ABEM. La resistividad aparente de los materiales del subsuelo se calcula con la siguiente ecuación (Orellana, 1982):

$$\rho_a = K \Delta V / I \quad (1)$$

Donde K es una constante geométrica del dispositivo empleado, que depende de la posición entre los electrodos de corriente y de potencial. Para el arreglo Schlumberger empleado está dado por la siguiente relación:

$$K = 2\pi (AB^2 - MN^2) / MN \quad (2)$$

Mediante esta metodología se pueden observar las variaciones del contenido de agua en perfil así como, los pasajes preferenciales del agua en un suelo con presencia de horizontes de material granular no consolidado.

## RESULTADOS

El estudio geoelectrico consistió en realizar 10 sondeos eléctricos verticales (SEVs), con el arreglo tetraelectrónico Schlumberger. La interpretación de datos se llevó a cabo con el modelo de computadora IX1D para obtener el modelo de capas. Los datos de campo se grafican en escala bilogarítmica, donde el eje de las ordenadas corresponde a los valores de la resistividad aparente (Ohm-m), y en el eje de las abscisas los valores de  $AB/2$  (m), son las diferentes aberturas del dispositivo Schlumberger. La Figura 3 muestra los resultados del proceso de inversión de dos SEV's, indicando la presencia de 7 capas en el subsuelo del área de estudio.

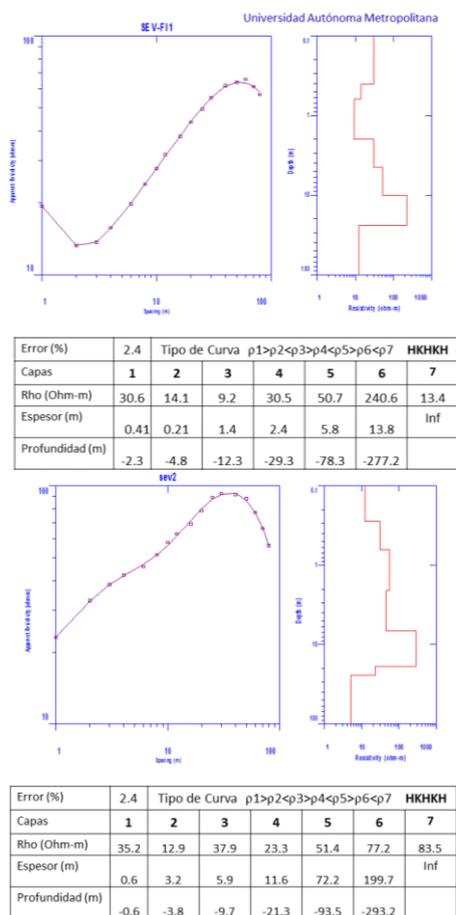


Figura 3. Inversión de datos de campo indicando representación gráfica de las curvas SEV y su modelo teórico (a la izquierda) y perfil de capas (a la derecha).

En un esquema hidrogeológico como el de la Figura 3, la propiedad operativa que varía con la profundidad es la resistividad eléctrica del agua subterránea. La mezcla de agua mineralizada con un cuerpo de agua dulce aumenta su salinidad y densidad dando lugar a un mínimo resistivo. La salinidad también disminuye la resistividad eléctrica del agua y de esta manera, la resistividad eléctrica disminuye con la profundidad.

Con la información anterior se elaboró una sección geoelectrica y su correspondiente modelo geológico (Figura 4). El perfil geoelectrico muestra que a lo largo de todo el perfil existe una disminución de la resistividad, indicando la comunicación hidráulica entre el río Lerma y el acuífero somero subyacente y la posible contaminación del agua subterránea. Los resultados obtenidos en perfil geológico-geoelectrico consisten en una capa de relleno con valores de resistividad de 31 a 658 Ohm-m y espesor variable de 1.7 a 2 m, y una sucesión de arenas finas con resistividad de 8 a 35 Ohm-m y espesor variable de 1 a 7 m, arenas medias de espesor variable de 3 a 10 m y resistividad de 5 a 31 Ohm-m, arena limosa de espesor variable de 5 a 12 y resistividad de 14 a 74 Ohm-m, arena media de espesor de 15 a 40 m y resistividad de 7 a 205 Ohm-m, arena gravosa con espesor no identificado y resistividad de 34 a 97 Ohm-m y debajo de esta capa se presenta una formación de grava con resistividad de 224 a 367 Ohm-m. El espesor de la cobertura varía de 2 a 60 m a través del área de estudio.

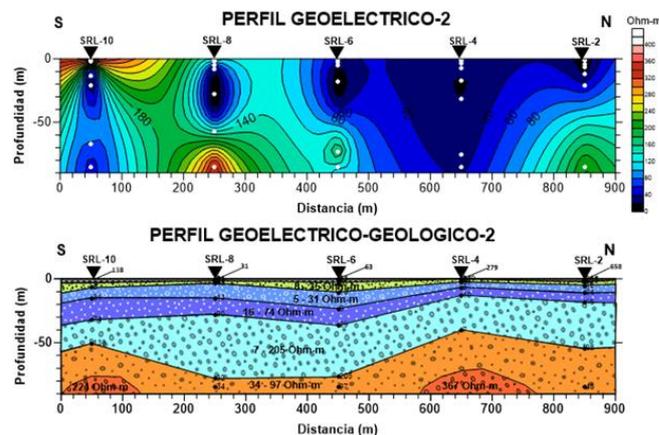


Figura 4. Perfil geoelectrico y Perfil geoelectrico-geológico.

## CONCLUSIONES

Con esta información fue posible identificar zonas de infiltración y zonas contaminadas por fluidos contaminantes provenientes del cauce del río Lerma lo que indica una conexión hidráulica entre el lecho del río y el acuífero somero subyacente constituido por material granular (arcillas, limos, arena y gravas) en un espesor de aproximadamente 60 metros que fue la profundidad investigada por el resistímetro utilizado. El método del SEV por tanto, se considera una herramienta apropiada para detectar la distribución lateral y evolución en profundidad de la resistividad.

## REFERENCIAS

- 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.
- Freeze y Cgerry (1974). Groundwater.
- Josberger, E. G., Shuchman, R.A., Meadows, G.A., Savage, S., Payne, J., Hydrography and Circulation of Ice-marginal Lakes at Bering

- 
- Glacier, Alaska, U.S.A. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 38(4), 547-560, 2006.
- Kirsch, Reinhard (et al.) Geoelectrical methods. In Groundwater Geophysics A Tool for Hydrogeology. Kirsch, Reinhard (Ed.), p. 556.
- Koefoed, O., 1979. Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurements. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- Orellana, E. 1982. Prospeccion geoelectrica en corriente continua. Paraninfo. Madrid. 578 p.
- Rhoades, J.D., Mantegui, N.A., Shouse, P.J. and Alves, W.J. 1989. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:433-439.
- Sheriff RE, Geldart LP (1995) Exploration Seismology (2nd. ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Wendroth, O., S. Koszinski, and E. Pena-Yewtukhiv (2006), Spatial association between soil hydraulic properties, soil texture and geoelectric resistivity, Vadose Zone J., 5, 341 – 355.