



TOMOGRAFÍA SÍSMICA DE REFRACCIÓN APLICADA A HIDROGEOLOGÍA EN EL RINCÓN DE SANTA MARÍA

Edward Humberto^{1,3,6}, Tapia Arkin³, Cedeño Juan^{1,3}, Rodríguez Anthony^{3,6}, Luque Néstor^{2,3}, Ballester Idania⁴, Batista Rodríguez José Alberto⁵, Almaguer Carmenates Yuri⁵; Cedeño Ivan⁷ y Caballero Alberto^{1,3}

¹Universidad de Panamá, Laboratorio de Hidrología Isotópica y Geofísica Aplicada, Panamá. humberto.edwardh@up.ac.pa  juan.cedeño@up.ac.pa 
alcaba99@yahoo.com 

²Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá. aalaint@hotmail.com 
nestor.luque@up.ac.pa 

³Universidad de Panamá, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá. rodriguez@up.ac.pa 

⁴Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Azuero, Panamá. idania.ballesteros@up.ac.pa 

⁵Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería, México. josebatista@uadec.edu.mx  y y_almaguer@uadec.edu.mx 

⁶Docente del Ministerio de Educación de Panamá.

⁷Anteriormente Instituto de Acueducto y Alcantarillados Nacionales, Panamá. juan.cedenoc@up.ac.pa 

RESUMEN

La comunidad de El Rincón, en la provincia de Herrera, utiliza las aguas subterráneas como principal fuente de suministro de agua potable y para sus actividades agroindustriales. No obstante, la gestión integral del recurso conlleva al empleo de técnicas geofísicas, como la tomografía sísmica de refracción. Técnica implementada en esta investigación, con el objetivo de determinar la distribución de los estratos geológicos presentes en la zona y caracterizar el acuífero en explotación. Para esto se realizaron perfiles sísmicos, utilizados para elaborar un modelo de velocidades entre los 350 m/s y 4500 m/s, que al correlacionarse con la descripción litológica de los sondeos mecánicos del área (pozos), permite inferir la litología, destacando dos acuíferos, el primero, es el más somero, de tipo granular (areniscas), mientras que el segundo, es de tipo fisurado (aglomerado tobáceo fracturado). Ambos presentan diferentes profundidades y espesores. El acuífero somero, se encuentra sobreyacido por arcillas, indicando un acuífero con pocas probabilidades de contaminación.

PALABRAS CLAVES

Tomografía sísmica de refracción, acuífero, geología, estratigrafía, aguas subterráneas, pozos, métodos geofísicos.

SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY APPLIED TO HYDROGEOLOGY AT EL RINCÓN DE SANTA MARÍA, PANAMA

ABSTRACT

The community of El Rincón, in the province of Herrera, uses groundwater as the main source of drinking water supply and for its agro-industrial activities. However, the integral management of the resource leads to the use of geophysical techniques, such as seismic refractive tomography. Technique implemented in this research, with the objective of determining the distribution of the geological strata present in the area and characterize the aquifer in exploitation. For this purpose, seismic profiles were made, used to develop a model of velocities between 350 m/s and 4500 m/s, which, when correlated with the lithological description of the mechanical boreholes of the area (wells), allows inferring the lithology, highlighting two aquifers, the first, is the shallower, granular type (sandstone), while the second, is fissured type (fractured tobaceous agglomerate). Both have different depths and thicknesses. The shallow aquifer is overlain by clays, indicating an aquifer with little chance of contamination.

KEY WORDS

Seismic refraction tomography, aquiferous, geology, stratigraphy, underground waters, wells, geophysical methods.

INTRODUCCIÓN

En la región del Arco Seco de la República de Panamá, el desarrollo de las actividades agroindustriales y el consumo de agua potable depende de la extracción de agua subterránea (pozos). En esta región, se localiza el Corregimiento de El Rincón (figura 1), comunidad que supera los 1 700 habitantes y pertenece a la Provincia de Herrera (INEC, 2010).

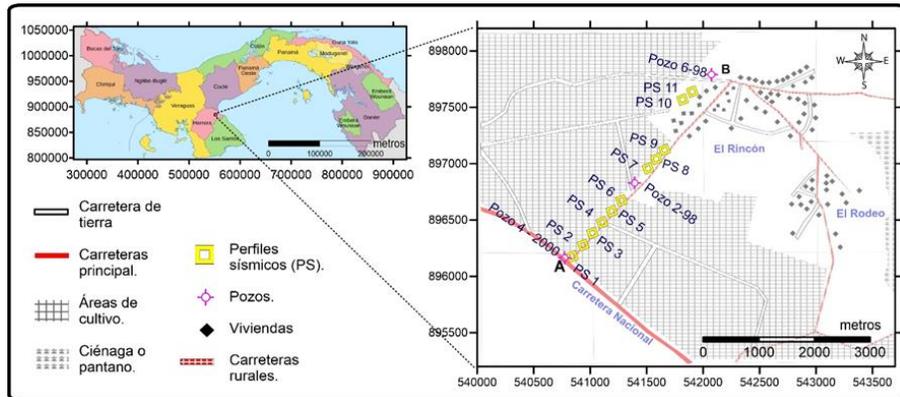


Figura 1. Ubicación del área de estudios, de perfiles sísmicos realizados y pozos existentes en el área. A y B son los extremos del perfil estratigráfico a desarrollar.

La gestión integral, explotación y sostenibilidad del recurso hídrico, permite un desarrollo socioeconómico sostenible y mejora la calidad de vida de la comunidad. Para ello, se requiere monitorear el recurso, mediante estudios hidro geofísicos previos y posteriores a las perforaciones.

Este estudio tiene el objetivo de determinar la distribución de los estratos geológicos presentes en la zona, caracterizar el acuífero en explotación y su posible vulnerabilidad (a los contaminantes, producidos por las actividades agrícolas).

Los estudios geofísicos de prospección son metodologías no invasivas, entre las que se incluye la tomografía sísmica de refracción. Técnica que correlaciona la velocidad de propagación de las ondas sísmicas $[v(x, y, z)]$ con las propiedades físicas del subsuelo. Permitiendo establecer las características del material geológico, su comportamiento y su potencial hidrogeológico (Reynolds, 2011).

CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA

Las características peculiares del surgimiento y formación del istmo de Panamá derivaron en una compleja distribución geológica y geomorfológica. Resaltando el contraste existente entre la Cordillera Central o cadenas montañosas y las zonas de acumulación de sedimentos o llanuras (IGNTG, 2016).

La comunidad de El Rincón, desde el punto de vista topográfico (altitud y pendiente), estructural (litología y tectónica) y su historia geológica se ubica en la Región Baja y Planicie Litoral (figura 2.a). Siendo un área de acumulación de sedimentos recientes, ya litificados, donde predominan las llanuras, aunque pueden encontrarse colinas aisladas, diques y depósitos de rocas ígneas, las cuales han sido elevadas por el tectonismo (MiAmbiente, 2010).

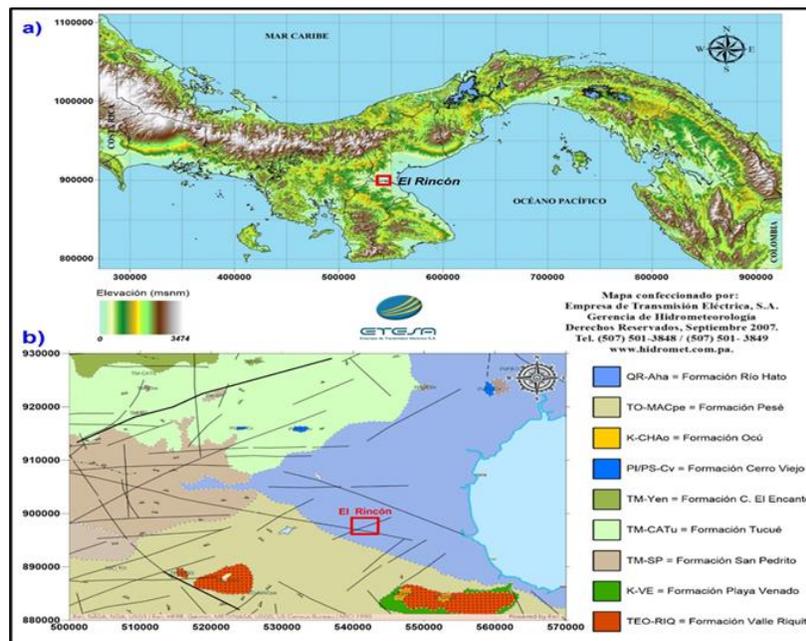


Figura 2. Características físicas del área de estudio. a) Mapa físico, b) mapa geológico (Adaptados de ETESA 2007; MiAmbiente 2010; MICI 1991).

Desde la perspectiva geológica, El Rincón está ubicado sobre la Formación Río Hato (figura 2.b), del Grupo Aguadulce del Holoceno, donde se identifican estratos de arenas, lutitas, tobas, conglomerados, pómez y areniscas poco consolidadas, los cuales forman acuíferos permeables (donde están saturados) y permite obtener buenos caudales con pozos pocos profundos (ETESA, 1999).

Basados en el mapa geológico de la República de Panamá, en el área se observa un sistema de fallas o elementos morfoestructurales mayores,

con rumbo preferencial NW-SE. De igual manera, se observa un sistema secundario con dirección SW-NE, de manera casi perpendicular a la primera. Se debe señalar que estas condicionan la dirección de los ríos Escotá y Santa María (MICI, 1991).

En resumen, es importante señalar que la ocurrencia de agua subterránea está determinada por las condiciones geológicas de la zona, tales como la naturaleza y características de la roca. Las rocas presentes en esta área describen un acuífero volcano-sedimentario y han sido afectadas por una intensa fracturación, consecuencia de los sucesivos eventos que se han desarrollado; asociados a la actividad tectónica, la cual es manifestada por las fracturas y fallas (locales y regionales).

METODOLOGÍA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

La técnica sísmica de refracción consiste en provocar un sismo artificial (fuente sísmica), en el que la mayor parte de la energía de las ondas sísmicas se transforma en ondas longitudinales, ondas P (Telford, et al., 1990). Estas ondas se refractan en la interface sísmica, que pueden coincidir con interfaces de los estratos. Esta refracción provoca que dichas ondas regresen a la superficie y sean captadas por sensores (geófonos), alineados linealmente de manera equidistante. Los geófonos miden el tiempo de arribo de las ondas p (figura 3.a), lo que permite generar gráficos del tiempo (arribo) vs distancia (sensor-fuente); estos gráficos son denominados dromocronas (figura 3.b).

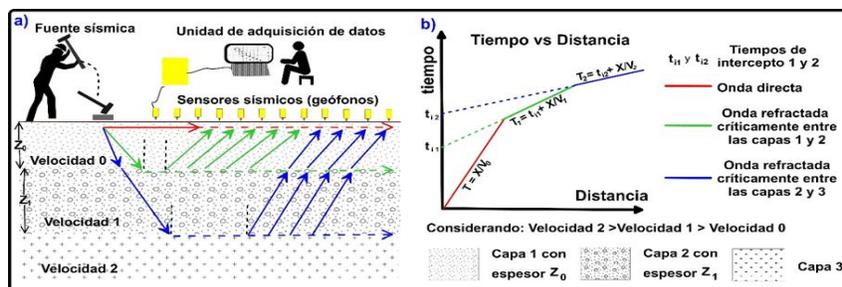


Figura 3. Fundamento de sísmica de refracción para el caso de tres capas horizontales. a) Trayectoria en el subsuelo de las ondas sísmica, b) Dromocrona correspondiente (adaptado de Kearey, et al, 2009; Zeta, et al, 2016).

Para el estudio de las dromocronas, en el caso general de un número n de capas horizontales ($n \in \mathbb{Z}$), el tiempo total de viaje de una onda (T_n) se expresa como (Mussett & Khan, 2000; Kearey et al., 2009; Everett 2013):

$$T_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{2Z_i \sqrt{v_n^2 - v_i^2}}{v_i v_n} \quad [1]$$

Donde Z_i es el espesor de cada capa recorrida, el término $\sum_{i=0}^{n-1} \frac{2Z_i \sqrt{v_n^2 - v_i^2}}{v_i v_n}$ es denominado tiempo de intercepción y $\frac{x}{v_n}$ es el tiempo sobre la superficie de separación, considerando un gradiente de velocidad en profundidad.

A partir de la expresión [1] y las dromocronas, se calcula el espesor de las capas o interfaces de refracción [profundidad (z)], mientras que, analizando las pendientes, se obtienen sus velocidades [$v(x, y)$], valores utilizados para desarrollar modelos bidimensionales de la discontinuidad de la velocidad del subsuelo en profundidad (que pueden coincidir con la variación estratigráfica).

Actualmente, la alternativa para secciones geológicas complejas es la tomografía de refracción sísmica (Sheehan et al., 2005). Debido a que la técnica utiliza algoritmos iterativos para solucionar el problema de la no linealidad entre los tiempos de viajes sísmicos y la heterogeneidad del subsuelo (Reynolds, 2011).

Algoritmos como el “recocido simulado generalizado” (Bohachevsky et al., 1986), basado en el método de Monte Carlo (Metropolis et al., 1953), es utilizado por softwares como SeisOpt[®]@2D[™] (Optim Inc.) para calcular un modelo inicial de velocidades sísmicas, simular los rayos propagados, calcular los tiempos de recorrido y determinar los parámetros (m), de la función objetivo ($\varphi[m]$), para cualquier iteración i , de la forma siguiente:

$$\varphi[m]_i = \frac{\sum_{j=1}^n (t_j^{med} - t_j^{cal})^2}{n} \quad [2]$$

Donde n es el número total de mediciones, j es el contador de cada medición, t^{cal} los tiempos calculados y t^{med} los tiempos medidos (Pullammanappallil & Louie, 1994).

De esta manera, mientras $\varphi[m]$ no alcanza un valor de convergencia, ni sobrepase determinadas iteraciones o su valor no sea el mínimo global, el algoritmo modificará el modelo inicial, agregando aleatoriamente velocidades constantes (dentro del rango preestablecido) en diferentes celdas vecinas y repitiendo iterativamente el procedimiento, hasta obtener el modelo óptimo (Pullammanappallil & Louie, 1994; Kirsch, 2006).

Previo a la adquisición de datos y las giras de campo, se realizó la revisión sistemática del material bibliográfico concerniente a los estudios geofísicos, hidrogeológicos y ambientales de la región y la información de los sondeos mecánicos realizados en la zona (IDAAN, 2012), la litología de estos es presentada en la figura 4.

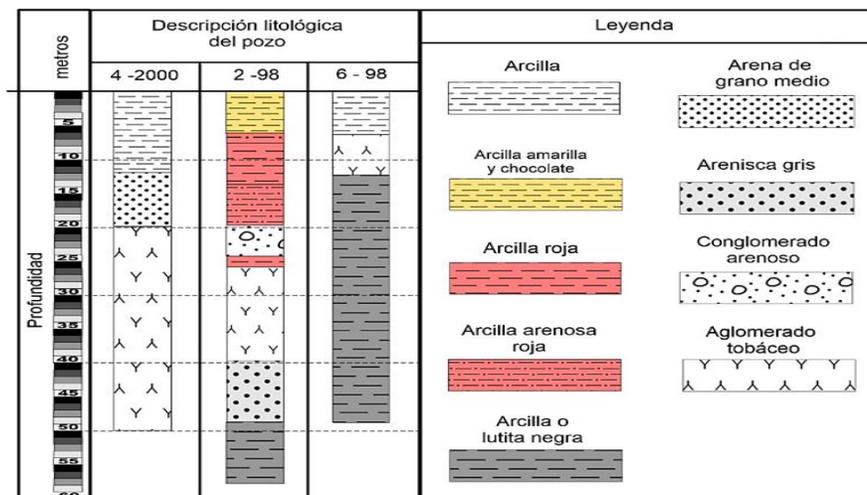


Figura 4. Sondeos mecánicos en las proximidades de El Rincón (adaptado de IDAAN 2012).

Basado en esta información, se determinó la ubicación de los perfiles (figura 1) y el número de perfiles sísmicos (11), todos numerados con la *Tecnociencia, Vol. 24, N°2* 40

denominación PS; de igual manera la separación entre los sensores (10 m) y el número de impactos (3). La posición de los perfiles se realizó con el objetivo de comparar los resultados sísmicos con los sondeos mecánicos existentes (figura 4) y verificar la continuidad de los estratos geológicos.

La adquisición de datos se realizó utilizando el sismógrafo DAQ LINK III[®], el cable sísmico de 110 m de extensión máxima, un mazo de 6,0 kg, con un “trigger” adherido, una placa de metal de 0,04 m², 12 geófonos de 10 Hz y la unidad de adquisición de datos (ordenador).

En cada perfil los impactos se distribuyeron 5 m anterior al primer geófono, 5 m posterior al último y en el punto medio del perfil (entre los geófonos 6 y 7), simultáneamente a cada impacto el “trigger” activa la captura de datos en tiempo real con el programa VibraScope[®], lo que permite asegurar la calidad de los datos, tal como se muestra en la Figura 5.

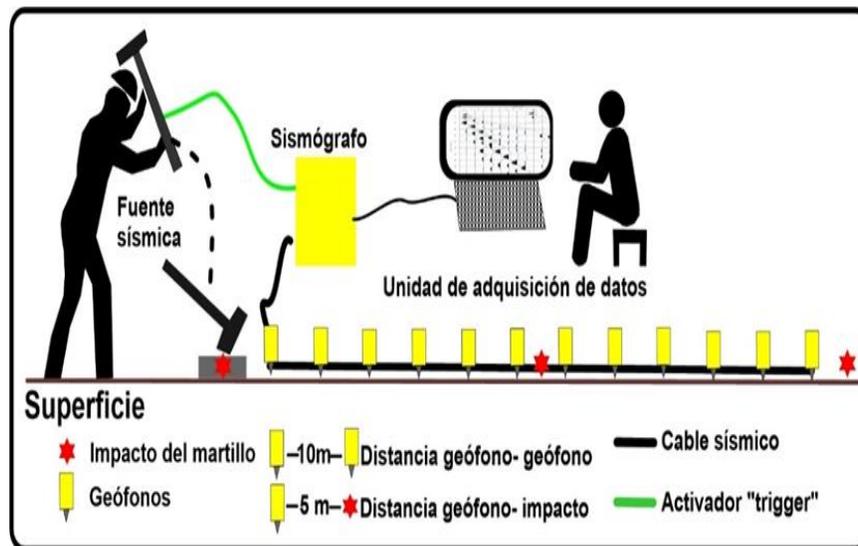


Figura 5. Equipos y metodología implementada para cada perfil.

Para la elaboración de los modelos sísmicos resultantes se utilizaron los softwares de acuerdo con el orden y función siguiente:

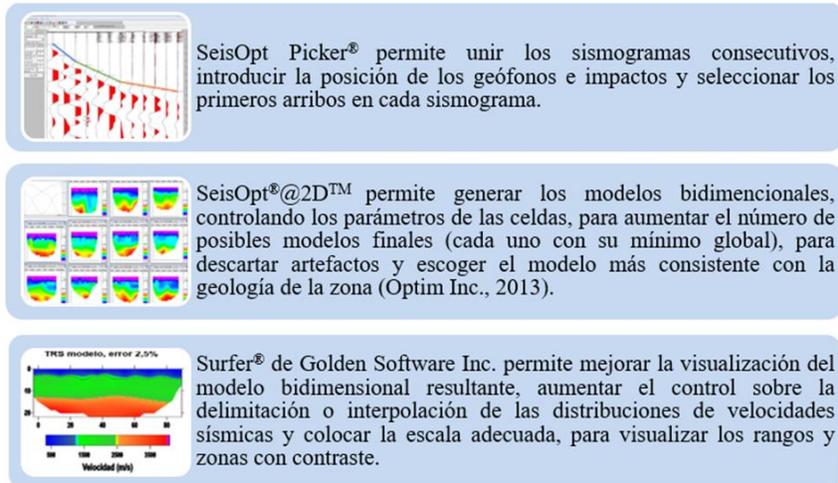


Figura 6. Softwares utilizados para elaborar los modelos sísmicos de refracción.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los perfiles sísmicos se procesaron de manera individual y luego conjunta (en base a su ubicación), lo que permite verificar la continuidad de los estratos y unificar el rango de valores de velocidad.

El modelo bidimensional resultante de las tomografías de refracción sísmicas (figura 7), permiten inferir tres (3) estratos que se distribuyen a lo largo de todo el perfil y un cuarto estrato que se encuentra por debajo de la profundidad de exploración.

Panamá. Utilizando los softwares de acuerdo con el orden y función siguiente: en SeisOpt Picker® se seleccionaron los primeros arribos o primeras llegadas en cada sismograma, exportando la posición de los geófonos e impactos y los pickers realizados. En SeisOpt@2D® se utilizó métodos como Optimización Global y el Recocido Simulado (Simulated-annealing (SA)) para crear modelos bidimensionales de la distribución de la velocidad en el subsuelo y en GSview 5.0® se exportaron los resultados en formato JPG.

En la quinta sección se correlacionaron los modelos de velocidad con los datos de los sondeos mecánicos adyacentes (ejemplo el modelo SM1 con el pozo 4-200) y se desarrollaron los perfiles estratigráficos basados en su ubicación.

Para inferir la distribución de los estratos geológicos en la zona, se elaboró un perfil estratigráfico entre los puntos extremos A y B (figura 7), desde la Av. Dr. Belisario Porras hasta las proximidades de la iglesia del pueblo, basado en el modelo de velocidad (figura 7) y la descripción de los tres sondeos mecánicos (figura 4), obteniendo el perfil geológico mostrado en la figura 8:

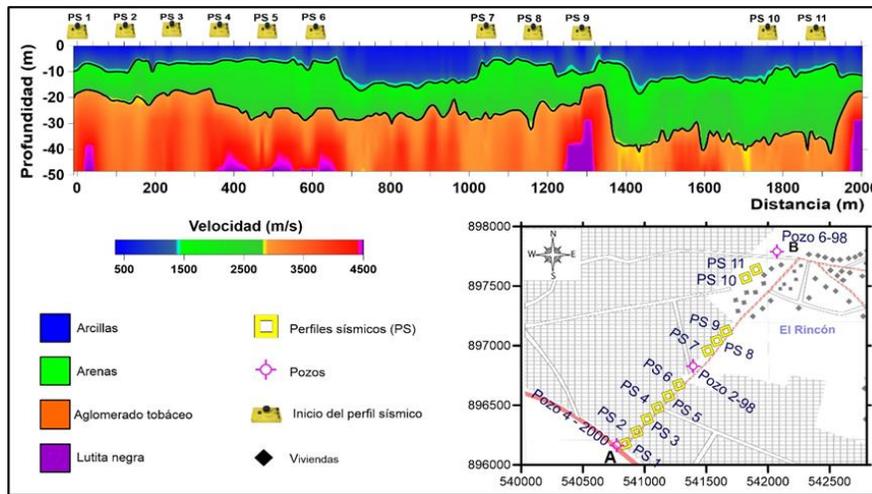


Figura 7. Perfil sísmico y modelo de velocidades

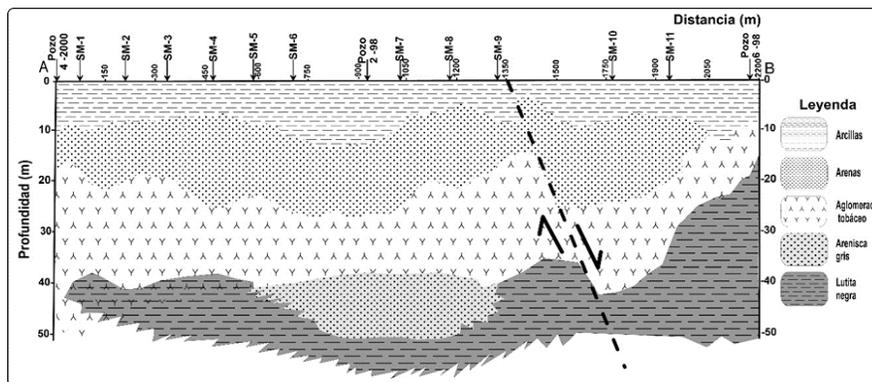


Figura 8. Perfil geológico entre los puntos A y B.

El perfil AB (figura 8) tiene una profundidad de exploración de 50 m y 2 200 m de largo, en él se identifican cinco (5) estratos. Los estratos de arcillas, arenas y el aglomerado tobáceo se distribuyen a lo largo de casi todo el perfil. Mientras que se identifican a mayor profundidad lentejones (descritos en las perforaciones) de arenisca gris, arcilla y lutita negra con espesores variables.

Se puede indicar que: las arcillas que se encuentran en la parte superior (acuitardos) sirven como un sistema protector del sistema acuífero principal (arenas). Impidiendo la infiltración del agua de las quebradas presentes en la zona y los surcos del sistema de riego; así como la contaminación por fertilizantes y otros productos químicos utilizados por los agricultores.

El aglomerado tobáceo muestra una distribución irregular en diferentes sectores, esto puede deberse a la erosión producto de antiguos causes abandonados del Rio Santa María (paleocanales). Esta distribución irregular es un fuerte indicador de que el aglomerado de esta zona puede encontrarse fracturado, aumentando la posibilidad de ocurrencia de agua subterránea (acuífero fisurado).

De igual forma la distribución de estos estratos (la ubicación de las arenas), permite clasificar el acuífero como confinado y la falla con desplazamiento normal, descrita preliminarmente, se debe al cambio abrupto de los estratos y su profundidad entre los perfiles PS 9 y PS 10.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los perfiles sísmicos realizados permitieron inferir la distribución de las diferentes litologías presentes en el subsuelo y la posible ocurrencia de aguas subterráneas. Debido a la correlación entre los valores de los modelos de velocidad y la litología de las perforaciones, se elaboró un modelo de la distribución estratigráfica de la zona. Estos aspectos identifican las siguientes características:

1. En la zona se tiene un espesor considerable de arcillas en la parte superior del acuífero (10 m – 15 m). Esto implica que, el acuífero no debería ser vulnerable a la contaminación, pero no descarta la necesidad de proteger las zonas de recarga.
2. La capa acuífera (areniscas) varía de profundidad y espesor. La misma no es homogénea, lo que podría ser indicativo de que se originó en

diferentes eventos y en algunos sectores podría contener un alto porcentaje de arcilla (evidenciado en la litología de las perforaciones).

3. La distribución irregular del aglomerado tobáceo es un fuerte indicador de que este puede estar fracturado y podría ser parte del sistema acuífero (acuífero fisurado).

De igual forma debemos señalar que es indispensable reforestar las regiones altas o cercanas al cerro Paso del Rey (posible área de recarga del acuífero) y mantener estudios periódicos para determinar los niveles de salubridad, salinidad y contaminación del acuífero.

Igualmente es oportuno recomendar la planificación y explotación racional de los pozos en la zona, ya que se puede estar explotando el mismo estrato, provocando la sobreexplotación de este. Así como, llevar un control eficaz del uso y cumplimiento de las normas vigentes para la explotación de un determinado pozo.

Finalmente se destaca que la metodología utilizada en esta investigación permitió cumplir con los objetivos propuestos, por lo cual puede utilizarse como referente para otras áreas con características similares. Así como la necesidad, de desarrollar nuevas investigaciones multidisciplinarias, para aumentar el conocimiento cualitativo y cuantitativo de los recursos hídricos subterráneos de la región.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la SENACYT el apoyo de esta Investigación con el Proyecto ITE10-005. A la VIP de la Universidad de Panamá por el apoyo brindado.

Al Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales por el apoyo brindado y el suministro de datos.

De igual manera al Dr. Eduardo Camacho y todo el personal que apoyo en el proceso de adquisición de datos.

Al área de geofísica aplicada, en el Instituto Andaluz de Geofísica, de la Universidad de Granada, España y la Escuela Superior de Ingeniería “Lic. Adolfo López Mateos, de la Universidad Autónoma de Coahuila,

México; por la capacitación del personal para el procesado, análisis e interpretación de los datos.

Se agradece la revisión y recomendaciones del revisor.

REFERENCIAS

Bohachevsky, I., Mark, J., & Myron, S. (1986). Generalized simulated annealing for function optimization. *Technometrics*, 209-217.

ETESA. (1999). *Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.* Retrieved Marzo 25, 2020, from Mapa Hidrológico de Panamá escala 1:1000000: http://hidromet.com.pa/documentos/Nota_Explicativa_Hidrogeologico.pdf

ETESA. (2007). *Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.* Retrieved Marzo 27, 2020, from ETESA: Mapas Hidrometeorológicos: <https://www.hidromet.com.pa/mapas.php>

Everett, M. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.

IDAAN. (2012). Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacional. *Base de datos de pozos*. Herrera, Panamá.

IGNTG. (2016). Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia". *Atlas nacional de la República de Panamá*. Panamá.

INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censo de Panamá*. Retrieved Agosto 20, 2019, from Panamá en Cifras: http://www.contraloria.gob.pa/inec/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID_SUCATEGORIA=17

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2009). *Una introducción a la exploración geofísica* (3 ed.). (J. W. Sons, Ed.) Estados Unidos de América.

Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology*. (S. S. Media, Ed.) Berlin.

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics* (2 ed.). (C. U. Press, Ed.)

Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 1087-1092.

Mi Ambiente. (2010). Ministerio de Ambiente. *Atlas Ambiental de la República de Panamá*. Panamá: Novo Art, S.A.

MICI. (1991). Ministerio de Comercio e Industrias, Dirección Nacional de Recursos Minerales. *República de Panamá, mapa geológico, 1: 250 000. Ed. 1, Panamá*. Panamá.

Mussett, A., & Khan, K. M. (2000). *Looking into the earth: an introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press.

Optim Inc. (2013). Optim Software and Data Solutions, USA. *SeisOpt@2D Version 6.0 Users Manual and Software for Windows*. USA. Retrieved from SeisOpt Pro Version 3.0 Users Manual and Software for Windows.

Pullammanappallil, S., & Louie, J. (1994). A generalized simulated-annealing optimization for inversion of first-arrival times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1397-1409.

Reynolds, J. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Sheehan, J., William, D., & Wayne, M. (2005). An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 21-34.

Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. (C. U. Press, Ed.)

Zeta, M., Rubio, R., & García, Y. (2016). Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. *Civilizate*, 8.

Recibido el 18 de abril de 2022

Aceptado el 30 de mayo de 2022

Editor Responsable: Dr. Eduardo Camacho Astigarrabia