

DetECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS SUELOS SEDIMENTARIOS DE LA EXTENSIÓN DE INVESTIGACIÓN DE TOCUMEN DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ MEDIANTE LA IMAGINERÍA BIDIMENSIONAL DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA Y REFRACCIÓN SÍSMICA DURANTE LA ÉPOCA SECA

Alexis Mojica Ábrego, Jorge Solís

Laboratorio de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
Miembro del Sistema Nacional de Investigación
alexis.mojica@utp.ac.pa, jorge.solis3@utp.ac.pa

Fidedigna Vergara, Bolivar Duarte

Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
f i d e d i g n a . v e r g a r a @ u t p . a c . p a ,
bolivar.duarte@utp.ac.pa

José Harris

Laboratorio de Geotecnia, Centro Experimental de Ingeniería, Universidad Tecnológica de Panamá
jose.harris@utp.ac.pa

Louis Pastor

Coopération Géophysique pour l'Amérique Centrale, Laboratoire Sisyphe UMR 7820, Université Pierre et Marie Curie Paris VI
louis.pastor@upmc.fr

Resumen - La ocurrencia de ciertos eventos meteorológicos inusuales en estos últimos años durante la época seca, ha sido la principal causa de serios daños a las instalaciones de una de las más importantes potabilizadoras del país, lo que generó la interrupción del suministro de agua potable en la ciudad de Panamá y poblaciones aledañas. La falta de abastecimiento de agua en esta zona conllevó al planteamiento de nuevas estrategias para la búsqueda de fuentes de agua natural, entre ellas la subterránea. Ante esta problemática, se presentó la posibilidad de detectar y parametrizar dichas fuentes a través de la utilización de técnicas geofísicas, generando imágenes bidimensionales de los estratos y el posible nivel freático de una zona ubicada en el sector Noreste de la ciudad de Panamá. Una tomografía de resistividad eléctrica y otra de refracción sísmica fueron realizadas a lo largo de un perfil de 30 m de longitud, en los suelos oligocénicos que caracterizan dicha área. El método de inversión robusta fue adoptado para la tomografía eléctrica mientras que el de imagerie de tiempo de trayectoria no lineal fue empleado para la generación de la tomografía de refracción sísmica.

Los resultados obtenidos por ambas pruebas revelan que el nivel freático característico de la zona oscila entre 1,0 y 2,0 m de profundidad durante la época seca, con un rango de valores de resistividad eléctrica calculada comprendida entre los 8,0 y 12,1 Ω .m, y velocidades de onda primaria superior a los 698 m/s. Ambas pruebas ofrecieron información lateral y en profundidad referente a un suelo superficial caracterizado por la presencia de roca meteorizada y arcilla, seguido de roca sedimentaria meteorizada y finalmente roca sedimentaria fracturada.

Palabras claves – Aguas subterráneas, inversión robusta, Panamá, prospección geofísica, tiempo de trayectoria no lineal, tomografía de refracción sísmica, tomografía de resistividad eléctrica.

Abstract - The occurrence of some unusual meteorological events in recent years during the dry season has been the leading cause of serious damage to the facilities of one of the most important water purification plants of the country. Such damage has interrupted the supply of drinkable water in the city of Panama and nearby communities. The lack of water supply in this zone led to the search for new strategies of locating natural water, including groundwater. Faced with these water-supply problems, we tested the possibility of detecting and parameterizing these sources using geophysical techniques, generating two-dimensional images of the strata and the possible groundwater levels of a zone located northeast of the city of Panama. Electrical resistivity and seismic refraction tomographies were used along a 30 m long area, in the oligocenic soils that characterize the above-mentioned area. For the electrical resistivity tomography, the robust inversion method was used and for the seismic refraction tomography, the non-linear traveltime method was used. The results obtained by both tests reveal that the water table level in that area ranges from 1,0 to 2,0 m deep during the dry season—with a range of electrical resistivity between 8.0 and 12,1 Ω .m, and primary top wave velocities up to 698 m/s. Both tests offered lateral and depth information about the superficial soil characterized by the presence of weathered rock and clay, followed by weathered sedimentary rock and finally a fractured sedimentary rock.

Keywords - Electrical resistivity, geophysical prospecting, groundwater, non-linear traveltime, Panama, robust inversion method, seismic refraction tomography.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 30 de julio de 2012

Fecha de Aceptación: 5 de febrero de 2013

1. Introducción

La incidencia negativa de los eventos meteorológicos sobre las sociedades actuales, constituye un tema que ha sido fuertemente abordado en estas últimas décadas. Los resultados se reflejan en pérdidas humanas y económicas que afectan el desarrollo de las sociedades. Gran parte de los países asentados en las zonas tropicales del continente americano han experimentado los embates de dichos eventos, y por tal razón se han venido desarrollando estrategias focalizadas en mitigar sus efectos.

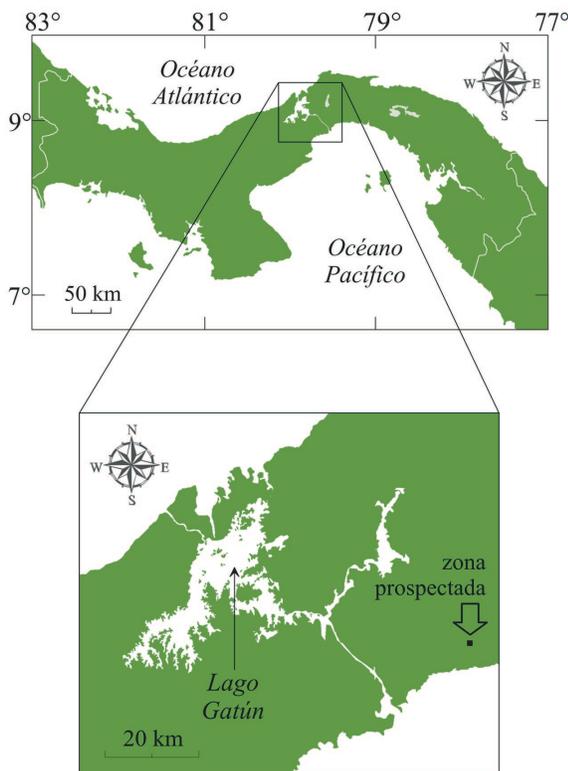


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

En el sector agrícola por ejemplo, se plantea la utilización de modelos adecuados de gestión de riesgo para mitigar el efecto de los eventos meteorológicos sobre las zonas de alto rendimiento agrícola [1]; desde el punto de vista de la biodiversidad, se menciona la reducción del tamaño de las poblaciones silvestres [2]. En el caso de los

problemas de abastecimiento de agua potable, como el que se dio en el sector central del Istmo de Panamá, el cual fue causado por los altos niveles de turbidez provocados por la presencia de partículas en suspensión en las zonas de reserva natural, como producto de las fuertes lluvias que se dieron lugar al final de la época lluviosa del año 2010 y que se extendió por meses incluyendo la época seca y de transición. Problema que planteó la necesidad de desarrollar proyectos encaminados a detectar fuentes de aguas subterráneas en los suelos sedimentarios de la Extensión de Investigación de Tocumen – UTP, sector Noreste de la ciudad de Panamá (ver Figura 1). En este mismo aspecto, la utilización de técnicas no invasivas como la prospección geofísica ha jugado un papel importante en la detección y parametrización de recursos hídricos; en la actualidad existe una extensa referencia bibliográfica relacionada a la aplicación de estas técnicas a problemas de agua [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [9].

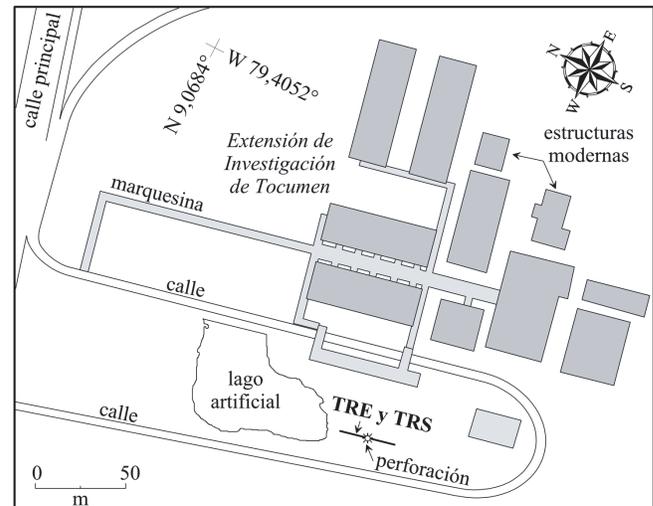


Figura 2. Plano que muestra el perfil y el punto de perforación, en donde se desarrollaron las pruebas geofísicas que incluyen una tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y de refracción sísmica (TRS).

Las pruebas geofísicas de tipo eléctrica y sísmica fueron desarrolladas en conjunto con el objetivo de detectar la extensión lateral y en profundidad tanto del nivel freático como los estratos que caracterizan el subsuelo, en término de sus características eléctricas y elásticas. Cabe destacar que las heterogeneidades laterales de las rocas presentes en este tipo de ambientes

geológicos hace inapropiado el solo uso de las perforaciones para una caracterización más completa. Los métodos geofísicos que se presentan en este trabajo se caracterizan por presentar un incremento en el muestreo espacial. Estas pruebas fueron efectuadas a lo largo de un perfil de 30 m de longitud ubicada en una de las áreas abiertas de la Extensión de Investigación de Tocumen (Noreste de la ciudad de Panamá) tal como lo muestra la Figura 2.

El área de interés se encuentra ubicada en las cercanías de un lago artificial que experimenta niveles nulos en sus volúmenes de agua durante la época seca.

2. Contexto geológico del sitio

El sitio de interés reposa sobre una compleja cuenca compuesta de rocas sedimentarias del Terciario conocida con el nombre de Cuenca de Juan Díaz, extendiéndose sobre el límite tectónico de los bloques Chorotega y Chocó de la subplaca de Panamá [10].

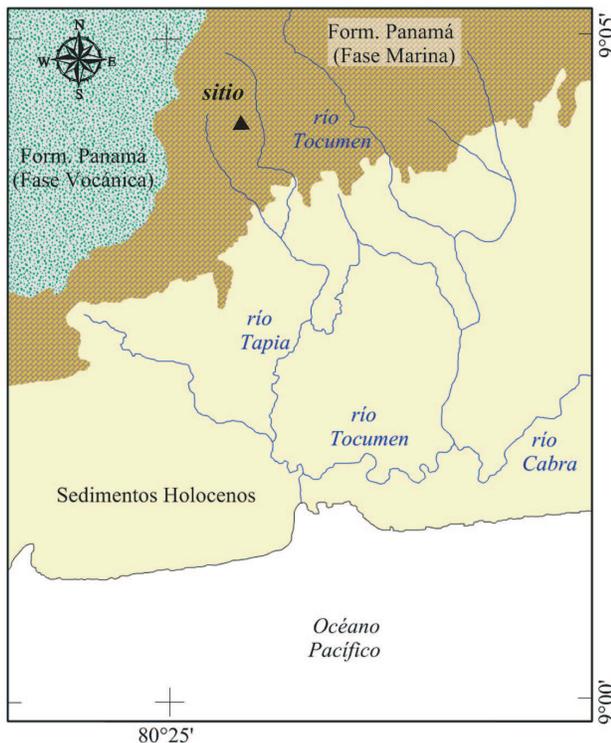


Figura 3. Mapa geológico generalizado del sector Noreste de la ciudad de Panamá y el sitio de interés para este estudio [13].

De acuerdo a [11] la formación de esta subplaca se debió al hundimiento de varias placas oceánicas

durante el Cretáceo y el Cenozoico. Su complejidad tectónica se ubica entre las placas de Andes del Norte, Nazca, Coco y la del Caribe [12]. El sector Noreste de la ciudad de Panamá se encuentra influenciado por elementos geológicos de la Formación Panamá, Fase Marina, propia del Oligoceno inferior a superior; en ella se hacen presentes las areniscas tobáceas, lutitas tobáceas, caliza algácea y foraminífera. En los alrededores del sitio se presentan los aglomerados (andesíticos en tobas de grano fino) y los conglomerados depositados por corrientes, todos éstos propios de la Formación Panamá Fase Volcánica. En el sector Sur se encuentran los sedimentos Holocenos no diferenciados, constituidos principalmente de aluviones [13]. La Figura 3 ilustra un mapa geológico generalizado del sitio de interés y alrededores.

3. La prospección Geofísica

3.1 La tomografía de resistividad eléctrica

El objetivo de la tomografía de resistividad eléctrica se focaliza en generar una imagen bidimensional del subsuelo con información referente a los estratos en términos de sus características eléctricas.

Esto se obtiene gracias a la inversión de los datos de resistividad eléctrica aparente medidos en campo; dichos datos de resistividad se obtienen a partir de la circulación de una determinada intensidad de corriente eléctrica en el subsuelo a través de un par de electrodos; otro segundo par de electrodos es utilizado para el registro del voltaje sobre la superficie del sitio. Esta información en conjunto con la geometría del cuadrupolo, ofrece información sobre el valor de la resistividad eléctrica aparente del subsuelo medida en $\Omega.m$. Dicho parámetro depende de la porosidad del material, grado de fractura y meteorización, saturación y de factores termodinámicos [14].

Una tomografía de resistividad eléctrica se obtiene a partir de un proceso de inversión de una serie de datos de resistividad eléctrica aparente obtenidos a lo largo de un perfil de forma sistemática, esto incluye un proceso de medición para diferentes separaciones entre los electrodos dispuestos en dicho perfil. Entre las rutinas de inversión más comúnmente empleadas para la interpretación de tomografías de resistividad eléctrica, se encuentra la de optimización por mínimos cuadrados regularizado [15], [16], [17], [18], [19]. Esta rutina de optimización cuenta con

dos métodos basados en restricciones diferentes: el modelo de inversión suave y la inversión robusta. Esta última se basa en la suposición de una distribución exponencial en los errores de los datos y en la minimización de la Norma-L1.

De acuerdo a [20] la inversión robusta tiende a producir modelos de regiones con tramos constantes y límites fuertes. En este trabajo de investigación, se aplicó este método a los datos de resistividad eléctrica aparente medidos en superficie. Uno de los objetivos principales en el proceso de inversión de datos de resistividad aparente es el de encontrar un modelo de resistividad cuya respuesta (datos calculados) se ajuste mejor a los datos medidos en campo. La bondad de este ajuste puede ser caracterizada mediante la raíz del error cuadrático (RMS) el cual se define como:

$$RMS = 100 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^j (\rho_j^{cal} - \rho_j^{ap}) / \rho_j^{ap}}{n}} \quad (1)$$

Donde n corresponde al número total de datos registrados, j define cada dato medido, ρ_j^{ap} y ρ_j^{cal} corresponden a los valores de resistividad eléctrica aparentes (medidos) y calculados, respectivamente.

3.2 La tomografía de refracción sísmica

Debido a que las ondas sísmicas primarias u ondas P penetran la tierra, parte de su energía golpea las capas geológicas bajo la superficie y luego son refractadas de vuelta a la superficie [21]. Los modelos bidimensionales de velocidad de onda P se obtienen del análisis e interpretación de las primeras llegadas de estas ondas críticamente refractadas en las interfases de dichas capas. En estudios subsuperficiales, este método se emplea para calcular la profundidad y la velocidad de estas ondas primarias en dichas capas. La velocidad de la onda sísmica en los suelos y rocas se encuentra ligada a la porosidad, densidad, saturación del fluido y su nivel, estado de meteorización, la tensión efectiva y nivel de fractura [22]. Estos métodos han sido extensamente empleados en estudios geotécnicos para la caracterización de las rocas [21], [22], [23] y [24]; a pesar de que el método no ha sido muy utilizado en estudios de agua subterránea en relación a la prospección eléctrica, se han reportado algunos trabajos importantes como por ejemplo: [25] y [26], entre otros.

4. Fase Experimental

4.1 La prospección eléctrica

La adquisición de los datos de resistividad eléctrica aparente se llevó a cabo con un dispositivo LandMapper ERM-02 de Landviser LTD conectado de un conmutador y éste a un sistema de cableado que conecta a 31 electrodos espaciados una distancia de 1 m; la longitud total del perfil fue de 30 m. Con el objetivo de controlar las corrientes telúricas provocadas por las fuentes del centro y cubrir un rango de profundidad intermedio, se seleccionó una configuración electródica tipo Wenner- α . Un total de 4 registros por estación fueron realizados para los 123 cuadrupolos establecidos en este ensayo.

Los datos de resistividad eléctrica aparente fueron interpretados utilizando el método de inversión robusta del programa EarthImager 2D de Advanced Geoscience Inc. Un total de 6 niveles de profundidad fueron registrados, obteniéndose una profundidad de aproximadamente 4 m.

4.2 La prospección sísmica

La adquisición de los datos fue realizada con un sísmógrafo SmartSeis de Geometrics Inc. con un total de 12 geófonos espaciados una distancia de 2,5 m. La fuente sísmica se estableció mediante un impacto de un mazo de 10 lb sobre una placa de aluminio ubicada en el suelo. Un total de 7 puntos de impacto se establecieron sobre el perfil de 30 m, dos de ellos fueron realizados a 1,25 m del primer y último geófono (en los extremos), mientras que los otros 5 puntos de impacto se llevaron a cabo entre cada 2 geófonos. Los registros de tiempo de recorrido son posteriormente transferidos y tratados con el programa Pickwin de SeisImager 2D para determinar las primeras llegadas de las ondas; la Figura 5 muestra los registros obtenidos en los puntos de impactos en 0; 5; 15 y 30 m a lo largo del perfil.

El posterior análisis de estos primeros resultados incluye la resolución del problema inverso para la obtención de una tomografía de refracción sísmica el cual se describe a continuación.

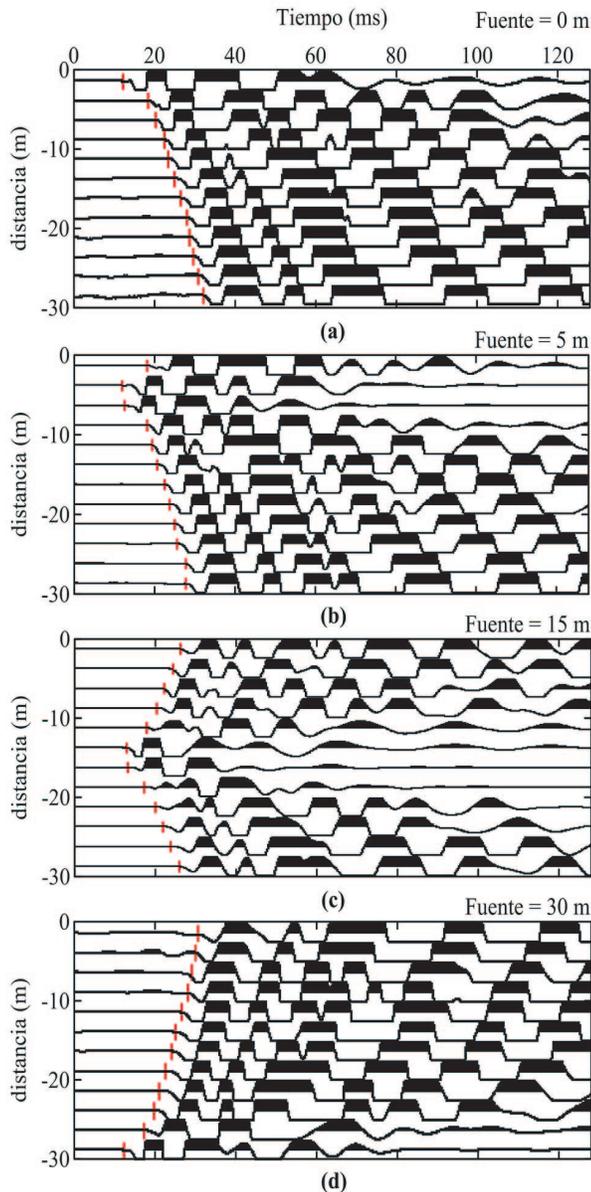


Figura 5. Registros crudos obtenidos a lo largo del perfil para los puntos de impacto o fuente en (a) 0, (b) 5, (c) 15 y (d) 30 m.

Para el proceso de modelado 2D, se utilizó el software Plotrefa de SeisImager 2D. Este software está basado en una metodología de tomografía de tiempo de recorrido no lineal [24], [27]. El modelado directo se encuentra basado en un algoritmo de camino más corto y el proceso de inversión se resuelve a través de la técnica de reconstrucción iterativa simultánea. El modelo de velocidad inicial se genera al convertir los resultados a un modelo de celda bidimensional a través de un algoritmo de tiempo de duración [28].

La rutina de inversión empleada en este análisis ajusta el modelo de velocidad hasta obtener un nivel de dispersión aceptable entre los primeros tiempos de recorrido calculados con respecto a los medidos. El error cuadrático RMS obtenido al utilizar el algoritmo de tiempo de duración en cada cálculo está dado por:

$$RMS = \sqrt{\frac{\Delta\Gamma^T \Gamma}{n}} \quad (2)$$

Donde $\Delta\Gamma$ corresponde a un vector residual que contiene los valores de los primeros tiempos de recorrido medidos y calculados, y n es el número total de datos medidos.

4.3 La perforación

Con el objetivo de correlacionar la información obtenida a partir de la prospección geofísica, se realizó una perforación en la posición 15 m a lo largo del perfil de interés y hasta una profundidad de 6,0 m.

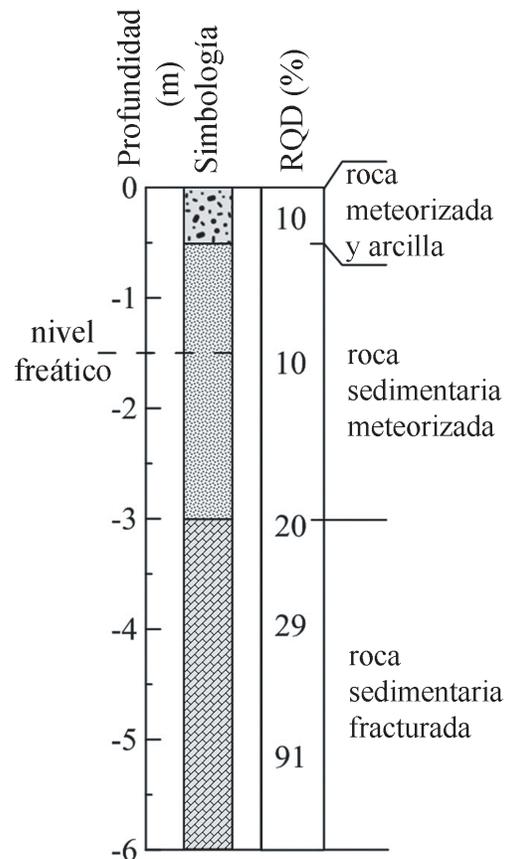


Figura 4. Esquema geotécnico de la perforación realizada en la posición 15 m, con las profundidades de los estratos e índice de calidad de la roca (RQD).

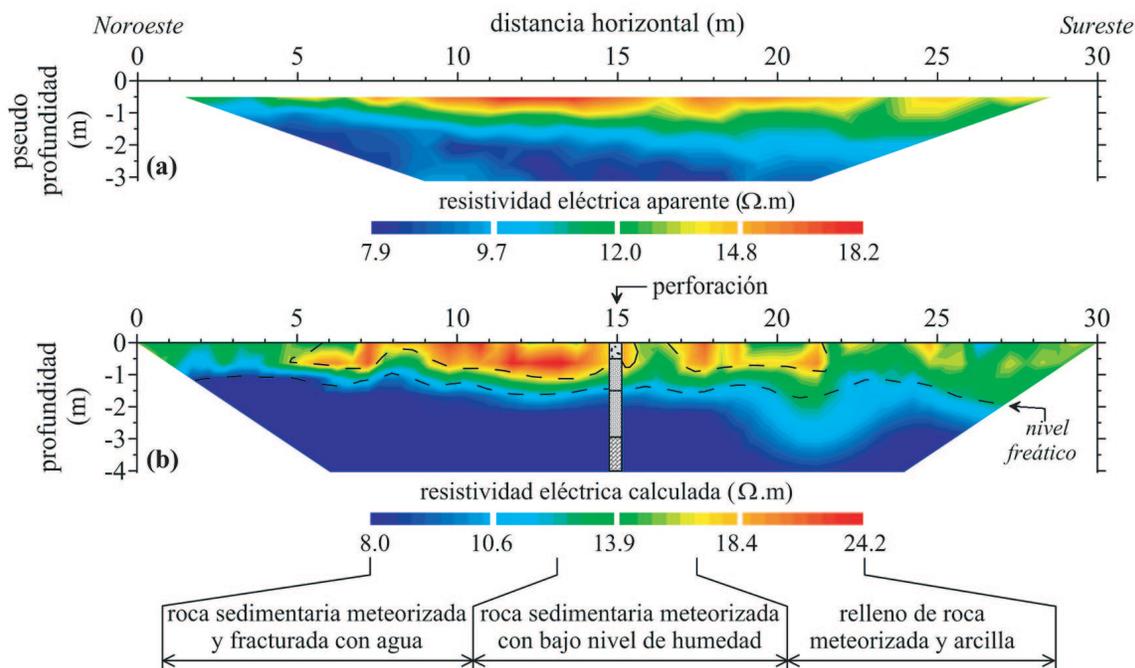


Figura 6. (a) Pseudo-sección de resistividad eléctrica aparente obtenida en el perfil de interés y (b) resolución del problema inverso mediante una inversión robusta para 8 iteraciones y un error RMS de 2,19%.

En esta perforación se detectó un primer nivel de relleno de roca meteorizada y arcilla de 0,50 m de espesor. De acuerdo a la “Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core”, esta capa superficial presentó un índice de calidad de roca muy pobre (10%); seguido, se detectó una segunda capa que se extiende desde 0,50 hasta 3,0 m la cual se asocia a una roca sedimentaria meteorizada también con el mismo índice de calidad de roca (10%). La tercera capa comprendida entre los 3,0 hasta 6,0 m de profundidad se encuentra asociada con una roca sedimentaria fracturada, caracterizada por presentar un gradiente de calidad de roca (20-91%). La Figura 4 presenta los resultados de la perforación realizada en el sitio. El nivel freático detectado en esta perforación fue de 1,50 m con respecto al nivel actual del terreno.

5. Resultados experimentales y discusión

Con los dos métodos de prospección geofísica en realizados, se obtuvieron los siguientes resultados: La Figura 6(a) presenta la pseudo-sección de los valores de resistividad aparente medidos en superficie. La Figura 6(b) corresponde al resultado de la resolución del problema inverso utilizando el método de inversión robusto, con su respectiva interpretación.

En este resultado se aprecia un conjunto de anomalías superficiales en tonalidad rojo-amarillo con un rango de resistividad calculada que se extiende desde 16,0 hasta 24,2 $\Omega \cdot m$ y espesores que no sobrepasan 1 m; dicho horizonte se encuentra asociado a un relleno de roca meteorizada y arcilla de acuerdo a la perforación realizada en la posición 15 m (ver Figura 4). El segundo horizonte que se presenta posee tonalidades en amarillo-verde y posee un rango de resistividad calculada que oscila entre 12,1 y 16,0 $\Omega \cdot m$; la profundidad de este horizonte oscila entre 1 y 2 m asociándose el mismo con roca sedimentaria meteorizada con bajo contenido de agua.

Finalmente se identifica el tercer horizonte en tonalidad azul el cual corresponde a una anomalía conductora, con un rango de resistividad eléctrica que se extiende desde 8,0 hasta 12,1 $\Omega \cdot m$. Los resultados de la perforación indican que este último horizonte se asocia a la roca sedimentaria meteorizada con un alto contenido de humedad, cuyo límite se identifica a través de la línea punteada de la Figura 6(b).

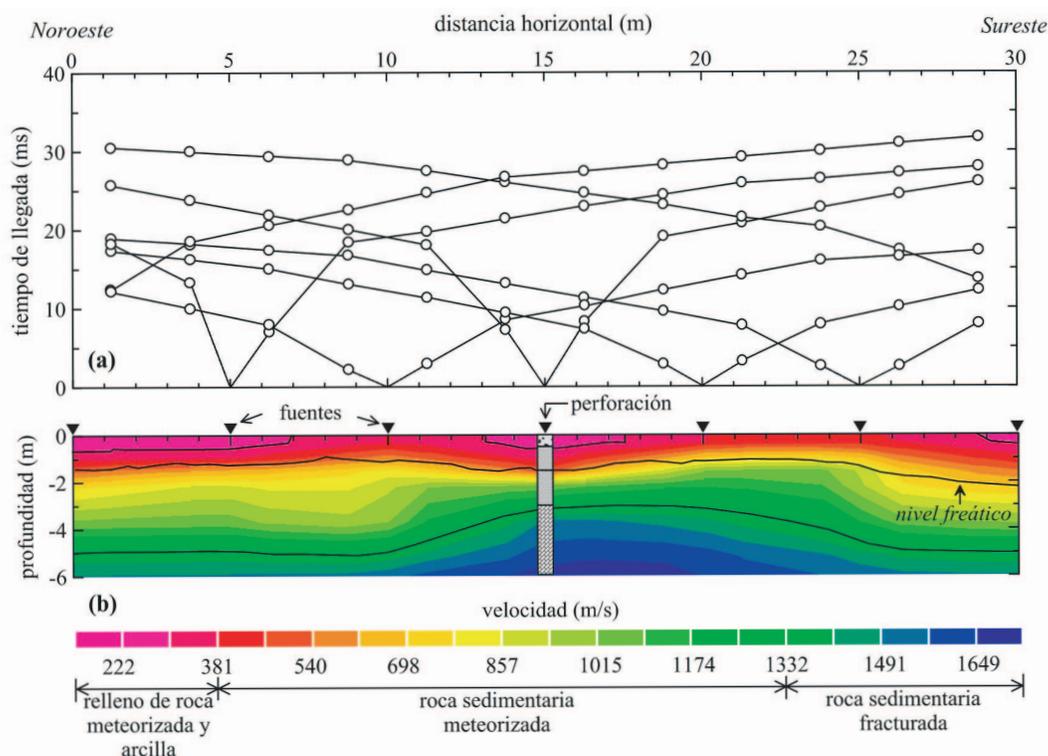


Figura 6. (a) Pseudo-sección de resistividad eléctrica aparente obtenida en el perfil de interés y (b) resolución del problema inverso mediante una inversión robusta para 8 iteraciones y un error RMS de 2,19%.

La no identificación del límite entre la roca sedimentaria meteorizada y fracturada se debe a la presencia significativa de agua; además se observa una débil variación en el índice de calidad de la roca hasta los 4 m.

Referente a la prospección sísmica, las curvas de tiempo de recorrido obtenidas en este análisis se presentan en el gráfico de la Figura 7(a) con un error RMS de 0,57 ms entre los valores observados y calculados. La resolución del problema inverso para esta prueba de refracción sísmica se presenta en el tomograma de la Figura 7(b).

En este resultado se puede identificar un conjunto de tres anomalías superficiales definidas en tonalidad rojo claro y con un rango de valores de velocidad de onda P comprendido entre 143 y 381 m/s; las mismas poseen espesores que no superan los 0,60 m. Estas anomalías, las cuales se encuentran asociadas con el relleno de roca meteorizada y arcilla, se localizan a ambos extremos del perfil y en la parte central.

Las anomalías descritas con anterioridad reposan sobre un horizonte en tonalidades rojo oscuro y naranja cuyo rango de velocidad de onda primaria se extiende desde los 381 hasta 698 m/s;

en este límite superior de velocidad se detectó el nivel freático (1,5 m de profundidad). Dicho horizonte se encuentra asociado con roca sedimentaria meteorizada.

Seguido de dicho límite, una capa en tonalidades amarillo, verde y azul oscuro se extiende hasta un rango de profundidad comprendido entre 3 y 5 m, las velocidades de onda primaria se extienden desde los 698 y 1332 m/s. Dicho horizonte corresponde también a roca sedimentaria meteorizada; la interfase entre ambas podría estar asociada al nivel freático existente en el sitio el cual no es muy profundo de acuerdo a la perforación realizada en el sitio. Para el rango de velocidad de onda primaria comprendido **entre los** 1332 y 1729 m/s (tonalidad azul) se define la roca sedimentaria fracturada.

Finalmente, una comparación conjunta entre los resultados geofísicos de las Figuras 6(b) y 7(b) fue llevada a cabo para su correlación final con la información suministrada por la perforación (ver Figura 8).

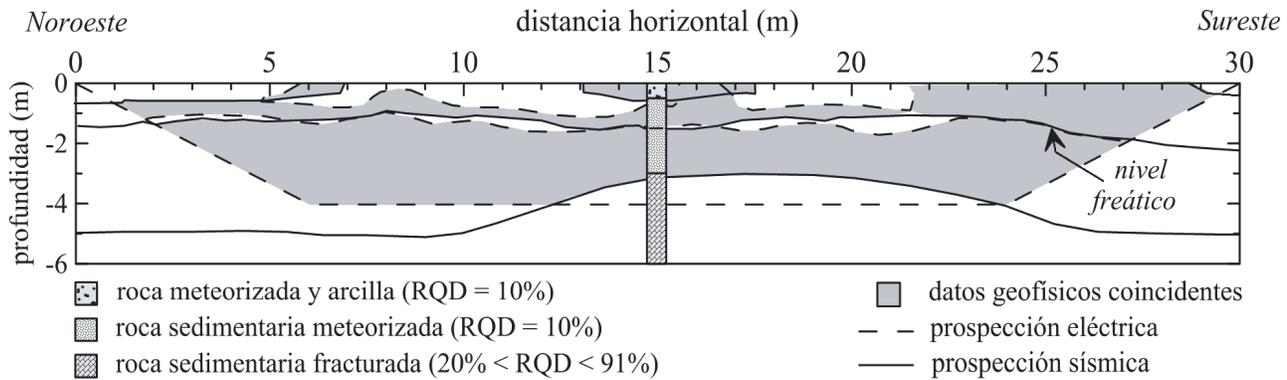


Figura 8. Comparación conjunta de los dos resultados geofísicos y su asociación con la información de la perforación.

De acuerdo a esta comparación, se presentan un conjunto de anomalías superficiales que parecen corresponder en algunas zonas, y que corresponden a roca meteorizada y arcilla, con un pobre índice de calidad de la roca (10%). Estas anomalías eléctricas y elásticas se encuentran contenidas en un primer horizonte constituido por roca sedimentaria meteorizada. Por otro lado, es posible observar una analogía entre los límites del nivel freático detectados a través de las dos pruebas geofísicas.

6. Conclusiones

Los métodos de prospección geofísica juegan un papel muy importante, no solamente en la detección de los niveles de humedad presentes en el subsuelo sino también en la identificación y parametrización de los diferentes estratos con que cuenta un determinado sitio de interés. En el caso especial del sector Sur del lago que se encuentra en las instalaciones del Centro de Investigación de Tocumen, fue posible identificar las características de los suelos oligocenos con que cuenta el sitio.

La prueba eléctrica reveló un fuerte nivel de humedad en un rango de profundidad que se extiende desde aproximadamente 1,0 y 2,0 m, el cual se asocia de forma notable con la prueba de refracción sísmica desarrollada en el sitio. Ambos métodos permitieron también comprender la extensión lateral y en profundidad de los diferentes estratos sedimentarios que caracteriza el sitio.

Para este ensayo se nota que ante el aumento en el valor de la velocidad de la onda sísmica, existe un incremento en los valores de RQD. La presencia de altos niveles de humedad identificados a través de la tomografía de

refracción eléctrica indica que este sector posee un notable potencial hídrico que puede ser utilizado en las instalaciones de la extensión de investigación de Tocumen ante emergencias que se presenten aun en épocas seca y de transición donde los niveles de precipitación son muy bajos.

7. Agradecimiento

Deseamos extender nuestro agradecimiento a la Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT) por el apoyo económico suministrado para llevar a buen puerto este proyecto de investigación. Al Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá por la ayuda ofrecida a lo largo de este trabajo. Los autores agradecen de forma especial a la Licda. Josefina Iglesia del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (Centro Experimental de Ingeniería) por la revisión detallada del texto.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] R. D. Ponvert - Delisles, A. Lau y C. Balamaseda, "La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres. Reflexiones generales", Zonas Aridas, vol 11, pp. 147 - 194, 2007.
- [2] A. H. Ehrlich y P. R. Ehrlich, P. R. "Causes and consequences of the disappearance of biodiversity. En J. Sarukhán y R. Dirzo (ed.), México Ante los Retos de la Biodiversidad. CONABIO México, 1992.
- [3] R. Guérin, M. Descloitres, A. Coudrain, A. Talbi y R. Gallaire, "Geophysical surveys for identifying saline groundwater in the semi-arid region of the central Altiplano, Bolivia",

- Hydrological Processes, vol 15, pp. 3287-222223301, Diciembre 2001.
- [4] I. F. Louis, P. A. Vafidis, F. I. Louis y N. Tassopoulos, "The use of geophysical prospecting for imaging the aquifer of Lakka carbonates, Mandouki Euboea, Greece", *Journal of the Balkan Geophysical Society*, vol 5, pp. 97-106, Agosto 2002.
- [5] W. Al-fares, M. Bakalowicz, R. Guérin y M. Dukhan, "Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (He'Rault, France) with ground penetrating radar", *Journal of Applied Geophysics*, vol 51, pp. 97-106, Agosto 2002.
- [6] H. Benjoud i, P. Weng, R. Guérin y J. F. Pastre, "Riparian wetlands of the middle reach of the Seine river (France): historical development, investigation and present hydrologic functioning. A case study", *Journal of Hydrology*, vol 263, pp. 131-155, Junio 2002.
- [7] R. Guérin, "Borehole and surface - based hydrogeophysics", *Hydrogeology Journal*, vol 13, pp. 251-254, Febrero 2005.
- [8] Y. L. Ekinci, A. Demirci y C. Ertekin, "Delineation of the Seawater-Freshwater Interface from the Coastal Alluvium of Kaleköy-Gökçeada, NW Turkey", *Journal of Applied Sciences*, vol 8, pp. 1977-1981, 2008.
- [9] K. Wattanasen y S. Elming, "Direct and indirect methods for groundwater investigations: A case-study of MRS and VES in the southern part of Sweden", *Journal of Applied Geophysics*, vol 66, pp. 104-117, Diciembre 2008.
- [10] A. G. Coates, "Lithostratigraphy of the Neogene strata of the Caribbean coast from Limon, Costa Rica, to Colon, Panama", *Bulletins of American Paleontology*, vol 357, pp. 5-16, Diciembre 1999.
- [11] P. Mann, "Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America", *Geological Society of America, Special Paper*, pp. 295, 349, Marzo 1995.
- [12] T. L. Pratt, M. Holmes, E. S. Schweig, J. Gomberg y H. Cowan, "High resolution seismic imaging of faults beneath Limon Bay, northern Panama Canal, Republic of Panama", *Tectonophysics*, vol 368, pp. 211 - 227. Junio 2003.
- [13] R. H. Stewart, J. L. Stewart y W. P. Woodring, "Geologic Map of Panama Canal and Vicinity, Republic of Panama", Department of the Interior United States Geological Survey, 1980.
- [14] G. Nover, "Electrical properties of crustal and mantle rocks - A review of laboratory measurements and their explanation", *Surveys in Geophysics*, vol 26, pp. 593-651, Noviembre 2005.
- [15] Y. Sasaki, "Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole - dipole resistivity data", *Geophysics*, vol 54, pp. 254-262, Febrero 1989.
- [16] C. deGroot-Hedlin y S. Constanle, "Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data", *Geophysics*, vol 55, pp. 1613 - 1624, Diciembre 1990.
- [17] D. W. Oldenburg y Y. Li, "Inversion of induced polarisation data", *Geophysics*, vol 59, pp. 1327-1341, Septiembre 1994.
- [18] M. H. Loke y R. D. Barker, "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion", *Geophysical Prospecting*, vol 44, pp. 499-523, Mayo 1996.
- [19] M. H. Loke, I. Acworth y T. Dahlin, "A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys", *Exploration Geophysics*, vol 34, pp. 182-187, 2003.
- [20] R. G. Ellis y D. W. Oldenburg, "Applied geophysical inversion", *Geophysical Journal International*, vol 116, pp. 5-11, Enero 1994.
- [21] D. W. Steeples, "Shallow Seismic Methods", en: *Hydrogeophysics* (Y. Rubin y S. S. Hubbard, eds.), pp. 215-251, 2005.
- [22] J. Olona, J. A. Pulgar, G. Fernández-Viejo, C. López-Fernández y J. M. González - Cortina, "Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods", *Near Surface Geophysics*, vol 8, pp. 585-599, Diciembre 2010.
- [23] S. G. Lee y M. H. Freitas, "Seismic refraction surveys for predicting the intensity and depth of weathering and fracturing in granitic masses", en: *Field Testing in Engineering Geology* (E. G. Bell, M. G. Culshaw y J. R. Coffey, eds.), pp. 241-256, 1990.
- [24] K. Hayashi y T. Takahashi, "High resolution seismic refraction method using surface and borehole data for site characterization of rocks", *International Journal of Rock*

- Mechanics and Mining Sciences, vol 38, pp. 807-813, Septiembre 2001.
- [25] F. P. Heani, "Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in New England", Geophysics, vol 51, pp. 236-249, Febrero 1986.
- [26] C. A. Zelt, A. Azaria y A. Levander, "3D seismic refraction travelttime tomography at a groundwater contamination site", Geophyscs, vol 71, pp. H67-H78, Noviembre Diciembre 2006.
- [27] D. R. Hiltunen, N. Hudyma, T. P. Quigly y C. Samakur, "Ground proving three seismic refraction tomography programs", TRB 86th Annual Meeting, Enero 2007.
- [28] J. R. Sheehan, W. E. Doll y W. A. Mandell, "An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis", Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol 10, pp. 21-34. Marzo 2005.