

Monitoring of levels moisture soil based on Electro-resistive methods: Case of the area Gamboa, Panama Canal.

Monitoreo de los niveles de humedad de los suelos basado en métodos Electro-resistivos: Caso de la zona de Gamboa Canal de Panama.

Irving Díaz

Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Tecnológica de Panamá
Ave- Ricardo J. Alfaro Campus

(507) 560 – 3105

irving.diaz@utp.ac.pa

Alexis Mojica

Laboratorio de Ingeniería Aplicada
Centro Experimental de Ingeniería
Vía Domingo Díaz – Tocumen

(507) 290 - 8423

alexis.mojica@utp.ac.pa

Carlos Ho

3rd author's affiliation

1st line of address

2nd line of address

(507) 290 - 8423

carlos.ho@utp.ac.pa

ABSTRACT

The main goal of this first phase of research focuses on obtaining information of the characteristics of groundwater levels in two important areas of the site Gamboa - Panama Canal area: Cerro Pelado, Gamboa, using geophysical techniques. This project will strengthen the research studies in the tropics, because do little information referenced on this area and many times there is not enough, Allowing a detailed comparison with other countries. In those areas, a set of electrical tomography were developed during the dry season and once during the rainy season generating information about the different strata in terms of their electrical and elastic soil properties.

Keywords Gamboa, phreatic level, electrical tomography.

RESUMEN

El objetivo principal de esta primera etapa de investigación se centra en obtener información referente a las características de los niveles freáticos en dos importantes zonas del sitio de Gamboa – área del Canal de Panamá: Cerro Pelado, Gamboa. Utilizando las técnicas de prospección geofísica. Este proyecto fortalecerá las líneas de investigación de estudios realizados en el Trópico, debido a que se tiene poca información referenciada sobre esta zona, permitiendo de esta manera establecer una comparación detallada con otras latitudes. En dichas zonas, un conjunto de tomografías eléctricas fueron desarrolladas durante la estación seca y otra durante la estación lluviosa obteniéndose información referente a los diferentes estratos en términos de sus características eléctricas y elásticas.

Palabras claves: Gamboa, nivel freático, tomografía eléctrica.

Categories and Subject Descriptors

5. Fuentes de energías alternativas y Tecnología de Información

5.11. Metodologías de Diseño y Herramientas para servicios de Uso Eficiente de Energía

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones hidrológicas han sido una de las más importantes aplicaciones de los métodos eléctricos y electromagnéticos, en lo que a geofísica ambiental se refiere [1]. Estas investigaciones se extienden desde el mapeo geológico de formaciones que contienen los acuíferos a la estimación del volumen de la estructura interna y externa de los mismos; también es posible cuantificar el nivel de contaminación de las aguas subterráneas [2]. En el caso de la caracterización de las aguas subterráneas a través de los métodos de prospección geofísica, se destacan un gran número de trabajos. [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10]

Este trabajo de prospección geofísica se encuentra enmarcado dentro, de un proyecto de investigación científica que viene desarrollando el Centro de Investigaciones Hidráulicas y Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. El objetivo de la investigación en general se centra en el estudio del efecto que la estación lluviosa tiene sobre los volúmenes de agua subterránea en la cuenca del Canal de Panamá, específicamente en el área de Gamboa (ver Figura 1). Se seleccionaron dos zonas en particular denotadas por G1 y G2 y en ellas se aplicaron las técnicas de prospección eléctrica.



Figura 1. Ubicación geográfica del área de Gamboa – Cuenca del Canal de Panamá.

Para cumplir con tal objetivo, se desarrollaron un conjunto de tomografías de tipo eléctrica durante la época seca sobre 3 perfiles seleccionados para este estudio (denotados por P₁ en la Zona G1, y P₂ y P₃ en la Zona G2 – ver Figura 2); posteriormente, se tiene planificado desarrollar las mismas pruebas sobre dichos perfiles con el fin de observar las variaciones que sufren los niveles freáticos a lo largo del año.

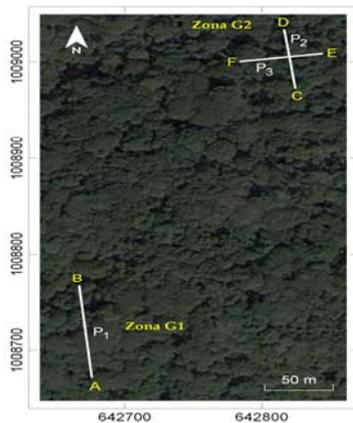


Figura 2 Superposición de los tres perfiles analizados en la época de verano 2009 con una imagen satelital de la zona de Gamboa, cuenca del Canal de Panamá.

Este trabajo presenta los primeros resultados geofísicos correspondientes a la estación seca del año 2009.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DEL ÁREA DE INTERÉS

El Istmo de Panamá se encuentra ubicado en una compleja región tectónica que reposa en una microplaca conocida con el nombre de Bloque de Panamá. En esta microplaca convergen cuatro placas litosféricas: Caribe ubicada al norte, Cocos localizada al suroeste, Nazca al sur y la de Sur América ubicada al este y sureste. La localización geográfica del Bloque de Panamá entre los dos continentes y dos océanos ha sido motivo de interés desde el punto de vista científico y económico [11]. Históricamente el Istmo de Panamá se consideró como una ruta de comercio entre las riquezas provenientes de Suramérica y Europa como resultado de la conquista española realizada durante los siglos XVI y XVII; posteriormente, el éxito de la construcción de un canal interoceánico a través del istmo, ubicó a Panamá como una de las principales rutas navieras a nivel mundial y para esto, fue necesario represar el río Chagres. El área de Gamboa se encuentra ubicada en una curva prominente de dicho río, en un punto en donde se alimenta el Lago Gatún tal como lo muestra la Figura 3.

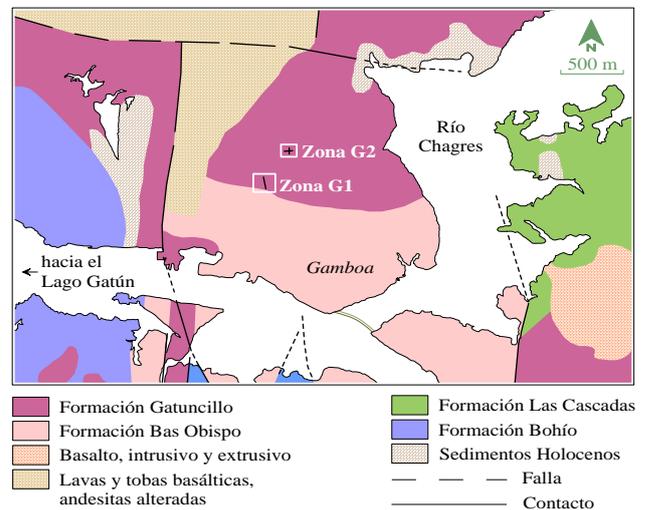


Figura 3. Mapa geológico generalizado del área de Gamboa y sus alrededores, con las zonas analizadas en este estudio. [12]

Las zonas de interés (G1 y G2) se encuentran influenciadas por la Formación Gatuncillo en la cual se hacen presentes los esquistos arcillosos, lutitas, areniscas de cuarzo, caliza algárea y foraminífera; esta es una formación geológica propia del Eoceno Medio – Superior.

Otra formación geológica importante que predomina en el área es la Pre-Terciaria, en donde figuran las lavas y tobas basálticas y andesitas alteradas; se incluyen además las rocas intrusivas dioríticas y dacíticas [12]. El mapa de la Figura 3 ilustra las principales formaciones geológicas del área.

3. LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA – METODOLOGÍA

3.1 La prospección eléctrica

La elección del método de prospección eléctrica para este trabajo se basa en la sensibilidad del mismo a la presencia de agua en los estratos terrestres. Dicho método mide la resistividad aparente, que

en el fondo corresponde a una integración volúmica de la resistividad eléctrica del subsuelo; este parámetro, que se expresa en Ωm , mide la capacidad que posee un cierto volumen de terreno al pasaje de la corriente eléctrica. Factores propios de los geomateriales como la granulometría, la cantidad de agua, la mineralización del agua y la cantidad de arcilla, afectan el valor de su resistividad eléctrica. [13, 14]

La prospección eléctrica consiste en inyectar corriente continua (A,B) por medio de un dispositivo tetraelectródico en el terreno y medir la diferencia de potencial (M,N) que se genera. Los cambios de la resistividad calculados permiten modelizar la estructura del subsuelo. Dicho registro es representativo de un determinado volumen de terreno y depende de la posición y la geometría del arreglo de electrodos utilizado.

El método de la tomografía eléctrica permite el registro de una notable cantidad de datos correspondientes a las diferentes combinaciones posibles de los cuatro electrodos. Los registros se representan a través de una pseudo – sección de resistividad aparente en donde el eje vertical corresponde a una pseudo – profundidad; por convención, los registros se ubican a una profundidad que está en función a la separación de los electrodos y el tipo de dispositivo (Figura 4a). Estos registros se someten a un complejo proceso matemático que involucra el uso de los conceptos del problema inverso; su resolución permite obtener una imagen bidimensional sobre las capas verticales de resistividad verdadera en una escala de profundidades reales.

Para esto, es necesario determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo y por lo tanto, se requiere encontrar un modelo \mathbf{m} capaz de reproducir los registros de resistividad aparente medidos en superficie \mathbf{d} para un grado específico de incertidumbre [15]

De acuerdo a [16] para encontrar dicho modelo, es necesario calcular los valores de resistividad aparente para el modelo presente los cuales se obtienen utilizando el método de diferencia finita o elementos finitos (subdividiendo el terreno en bloques rectangulares). Luego se calcula la matriz jacobiana \mathbf{J} de derivadas parciales y finalmente se resuelve el sistema de ecuaciones lineales de la expresión:

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \alpha \mathfrak{S}^T \mathfrak{S})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (1)$$

En esta ecuación, \mathbf{g} es un vector de discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre los datos medidos \mathbf{d} y calculados \mathbf{y} , en decir que $\mathbf{g} = \mathbf{d} - \mathbf{y}$. En esta misma ecuación, \mathbf{J} es la matriz jacobiana que puede expresarse como:

$$J_{i,j} = \frac{\partial y_i}{\partial m_j} \quad (2)$$

donde m_j representa las resistividades reales de los bloques en que se divide la malla y y_i que corresponde a las resistividades calculadas a partir de los parámetros iniciales de \mathbf{m} . α es un factor de amortiguamiento y \mathfrak{S} un filtro que suaviza las perturbaciones del modelo de parámetros para cierto valor constante.

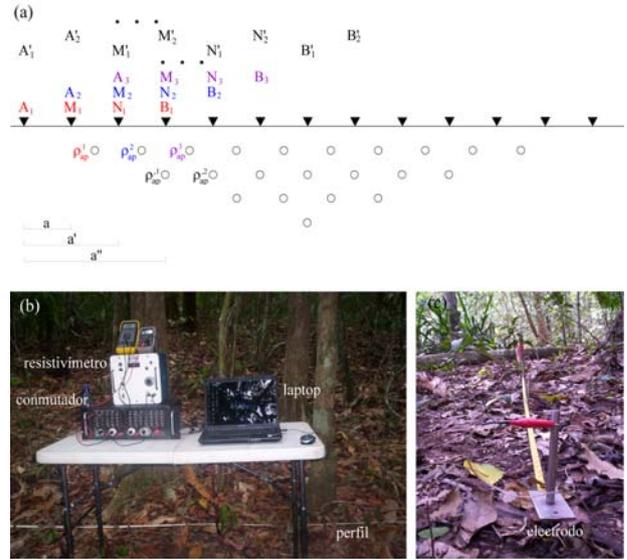


Figura 4 (a) Convención para la representación de las resistividades eléctricas aparentes en el caso de la tomografía eléctrica (dispositivo electródico Wenner Alfa); (b) resistivímetro de 400 V para la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo, conmutador de 48 posiciones y laptop para la visualización de los espectros en campo, y (c) electrodos de acero inoxidable.

En este trabajo, se utilizó un arreglo electródico tipo Wenner Alfa en donde los cuatro electrodos se encuentran alineados con $AM = MN = NB = a$, una vez obtenida la primera lectura, el conjunto de los 4 electrodos se desplaza a la siguiente posición y se procede en llevar a cabo la segunda lectura, y esta mecánica se repite hasta el final del perfil. Este primer conjunto de datos corresponderán al primer nivel de profundidad ($n = 1$). Para obtener las lecturas del segundo nivel ($n = 2$), se repite la misma operación pero con $AM = MN = NB = a'$ y así sucesivamente hasta cubrir con el perfil bajo estudio.

La Figura 4(a) ilustra este mecanismo de registro. Es importante señalar que la elección de este arreglo electródico obedece a una serie de ventajas que se obtienen si se compara con otros arreglos; entre dichas ventajas, se puede obtener (i) un rango intermedio de profundidad en relación a otros arreglos electródicos, (ii) una resolución intermedia y (iii) una moderada sensibilidad al ruido geológico [17]; en este mismo aspecto, [18] señalan que con este arreglo, se obtiene una respuesta suave en el resultado final. El equipo de prospección eléctrica utilizado está constituido de un resistivímetro de 400 V en la salida y de un dispositivo de conexión de 48 electrodos o conmutador (Figura 4(b)). La Figura 4(c) ilustra la disposición de los electrodos de acero inoxidable a lo largo de un perfil. En este estudio, una tomografía eléctrica de 96 m de longitud fue desarrollada en la Zona G1 (sobre el perfil P_1) y dos tomografías de 47 m de longitud y dispuestas perpendicularmente entre si fueron desarrolladas en la Zona G2 (sobre los perfiles P_1 y P_2).

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 La prospección eléctrica

La primera inconveniente detectada en el perfil P₁ de la Zona G1, fue la naturaleza del subsuelo; la porosidad, abundancia de raíces y la existencia de espacios vacíos entre algunos cúmulos de rocas, fueron algunos de los factores que impidieron una circulación óptima de corriente eléctrica a través del subsuelo; este tipo de fenómenos puede generar anomalías de muy alta resistividad eléctrica. No obstante, considerando la potencia eléctrica del resistímetro, la prueba se llevó a cabo y el resultado del proceso de inversión 2D se presenta en la Figura 6. La tomografía eléctrica obtenida ofrece información hasta aproximadamente 15,5 m de profundidad con un total de 360 registros de resistividad aparente. La separación entre los 48 electrodos utilizados en esta prueba se fijó a 2 m.

El estudio de este perfil geoelectrico permitió identificar dos horizontes de resistividad verdadera diferentes que reflejan la naturaleza litológica de los terrenos subyacentes y la distribución lateral.

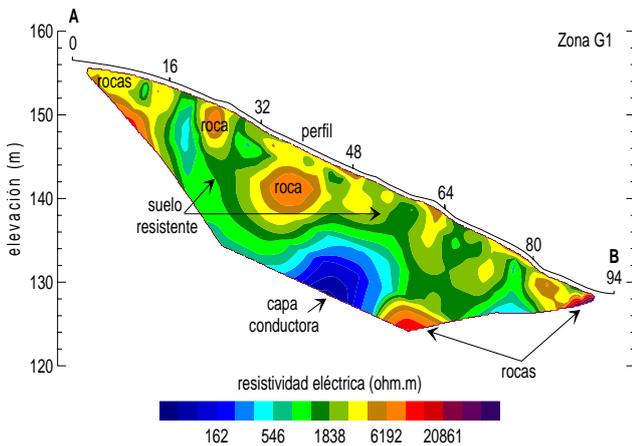


Figura 6 Tomografía de resistividad eléctrica obtenida en el perfil P1 de la Zona G1, sector de Gamboa – cuenca del Canal de Panamá.

Se observa en este resultado:

(i) Una capa superficial con un notable grado de heterogeneidades, con resistividades superiores a los 700 ohm.m y que se extienden hasta los 15,5 m de profundidad en algunos sectores (ver tonalidades verde/violeta).

(ii) Una capa conductora en tonalidades celeste/azul con resistividades inferiores a los 500 ohm.m, ubicado entre los 48 y 60 m a lo largo del perfil. Dicha capa se encuentra ubicada en una profundidad de aproximadamente 10 m.

Al final de este perfil se presentan fuertes anomalías con valores que superan los 25000 ohm.m, esto se debe a la acumulación de rocas en ese sector y por ende, a la existencia de espacios vacíos en el medio.

Por otro lado, el proceso de inversión 2D realizado sobre los datos de resistividad eléctrica en la Zona G2 (perfiles P₂ y P₃) dio por

resultado, las tomografías eléctricas de la Figura 7 (a) y (b). Como puede visualizarse, ambos resultados ofrecen información valiosa referente a los estratos húmedos en esta zona; un total de 48 electrodos fueron utilizados (separados una distancia de 1 m) para la generación de cada una de estas tomografías.

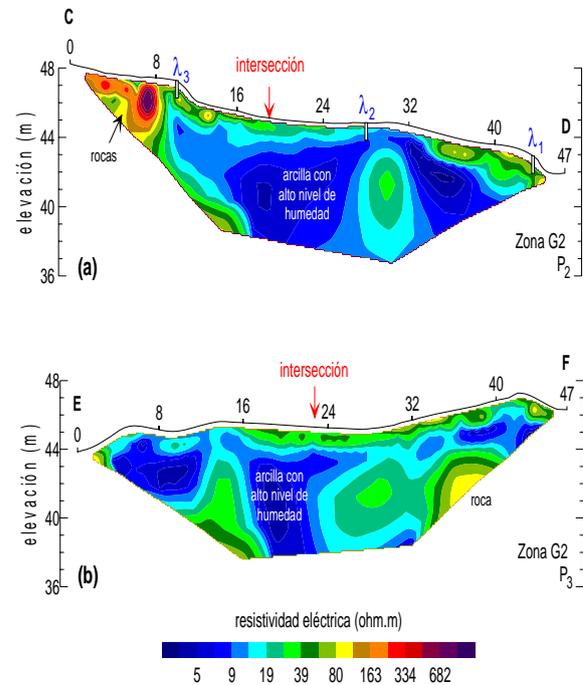


Figura 7 Tomografías eléctricas obtenidas en los perfiles P2 (con la posición de los 3 piezómetros λ₁, λ₂ y λ₃) y P3 de la Zona G2, sector de Gamboa – Canal de Panamá.

Como en el ensayo anterior, un total de 360 datos de resistividad aparente fueron generados en la época de verano en cada uno de estos perfiles. La nomenclatura λ₁, λ₂ y λ₃ corresponden a los piezómetros ubicados a lo largo del perfil P₂.

En ambos resultados, se presentan 3 horizontes de resistividades reales:

(i) Una capa superficial con un rango de resistividad eléctrica comprendido entre 27 y 80 ohm.m (en tonalidad verde claro/oscuro). Para el perfil P₂ dicha capa se extiende desde la posición 10 hasta 24 m a lo largo del perfil; la profundidad en esta zona no supera los 2 m. En este mismo perfil se presenta nuevamente la misma característica entre la posición 34 y 47 m con una profundidad no superior a los 3,5 m; esta es la parte del perfil que se encuentra más cercana al arroyo. Para el perfil P₃, este rango se refleja entre las posiciones 16 y 47 m a lo largo del perfil, con profundidades que no superan los 3 m.

(ii) Un terreno de baja resistividad (inferiores a los 20 ohm.m en tonalidad celeste/azul) el cual ocupa gran parte de los perfiles P₂ y P₃, las anomalías eléctricas representadas en esta gama de tonalidades no presenta una geometría Figure 1. Insert caption regular.

(iii) Un conjunto de fuertes anomalías eléctricas (superiores a los 80 ohm.m en tonalidad amarillo/violeta) ubicadas entre las posiciones 0 y 10 m en P₂ y a una profundidad que no supera los 6 m. En P₃ se presenta una anomalía eléctrica de 80 ohm.m en tonalidad amarillo a una profundidad de 8 m.

Con las ubicaciones exactas de los perfiles definidos en esta última zona, fue posible desplegar de forma tridimensional estos perfiles. Dicha representación se ilustra en la Figura 8.

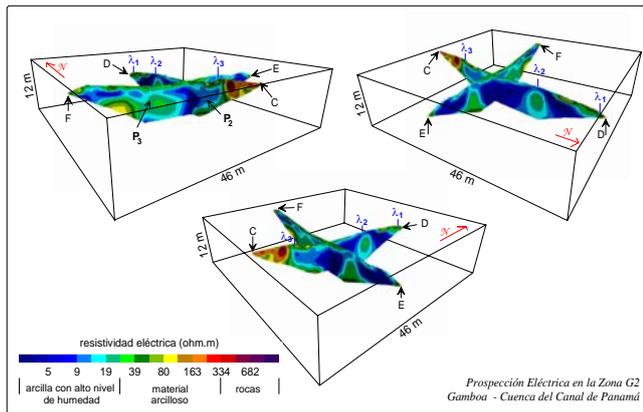


Figura 8 Representación tridimensional de las tomografías eléctricas desarrolladas sobre los perfiles P1 y P2 en la Zona G2 para tres orientaciones diferentes.

Sondeos eléctricos verticales.

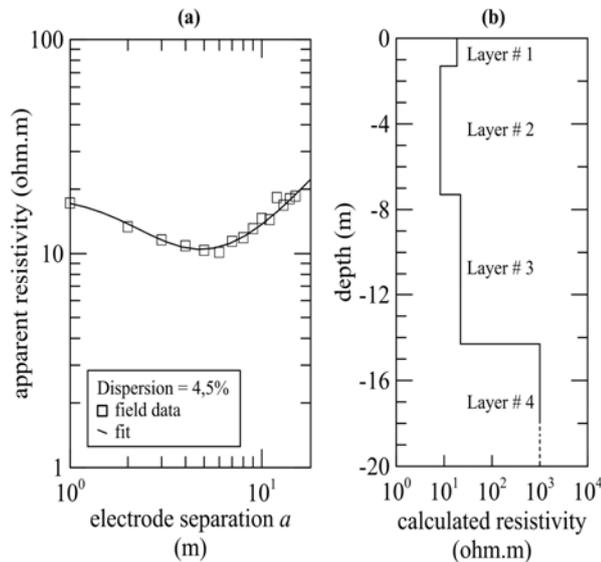


Figura 9 Sondeos eléctricos en Gamboa (a) representación asintótica (b) modelo de las diferentes capas resistivas

Estos datos son procesados con el programa Qwseln de J Tabbagh donde se presenta los cambios bilogarítmicos en función de las resistividades. En la figura 9 (b) se representa las 4 capas, la primera de 18.6 ohm.m y una pequeña de 1.3 ohm.m y otra capa de 7 ohm.m y una sub-estrato un poco más resistiva de 1000 ohm.m.

5. DISCUSIÓN

5.1 Zona G1

En el perfil P₁ la prospección eléctrica (Figura 6) mostró 2 horizontes de resistividad real con las siguientes características:

(i) La capa superficial con diversas heterogeneidades asociadas a rocas dispersas y enterradas (propias de la Formación Bas Obispo). Los altos valores de resistividades eléctricas parecen asociarse a un suelo arcilloso muy granulado. Las fuertes anomalías eléctricas presentes al final de esta prueba se asocian a cúmulos de rocas y los vacíos que existen en ella.

(ii) La anomalía en tonalidad azul parece asociarse a suelo con cierto contenido de humedad. Cabe destacar que para este análisis, se obtuvieron rangos inferiores de corriente eléctrica (< 50 mA), lo que dificultó aun más la interpretación.

5.2 Zona G2

En los perfiles P₂ y P₃, la prospección eléctrica arrojó niveles confiables en los resultados debido a la buena conducción de corriente eléctrica a través del subsuelo en la época de verano. En ambos perfiles, los horizontes de resistividad eléctrica real obtenidos poseen las siguientes características:

(i) La capa superficial en tonalidades verde (claro/oscuro) se asocia a material arcilloso, propio de la Formación Gatuncillo.

(ii) Las anomalías eléctricas en tonalidad azul/celeste se asocian al mismo material arcilloso pero con un notable contenido de agua. Los límites superiores de estas anomalías (presentes en ambos perfiles) definen el nivel freático de esta zona, la cual es bastante amplia.

(iii) Las anomalías en tonalidades amarillo/rojo/violeta se asocian a rocas ubicadas a poca profundidad. En la sección inferior izquierda de la tomografía desarrollada en P₂, se puede identificar parte del manto rocoso.

6. CONCLUSIONES

Los métodos de prospección geofísica juegan un papel muy importante en la exploración del subsuelo para la identificación y parametrización de las aguas subterráneas; sin embargo, los resultados obtenidos en la Zona G1 sobre prospección eléctrica presentan diferencias notables en cuanto a la definición de sus horizontes; este hecho se encuentra estrechamente ligado a las condiciones físicas del terreno. En la Zona G1, la capa superficial presenta un nivel muy alto de resistencia al paso de las cargas eléctricas, lo que genera anomalías con altos valores de resistividad eléctrica; a pesar de esta inconveniente, la información generada en la prospección sísmica ha podido definir la geometría del manto rocoso. En la Zona G2, los resultados geofísicos presentan un mayor nivel de confiabilidad; la prospección eléctrica permitió definir la geometría del nivel freático a lo largo de los perfiles P2 y P3 (entre 0,5 y 3,5 m). Puede decirse que aproximadamente el 75% del subsuelo prospectado se encuentra sujeto a altos niveles de humedad.

7. AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Laboratorio de Ingeniería Aplicada (Centro Experimental de Ingeniería – UTP) y al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas por el apoyo brindado para el desarrollo de esta primera fase de este proyecto.

8. REFERENCIAS

- [1] Pellerin, L. 2002. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, 23, 101-132.
- [2] Vogelsang, D. 1995. *Environmental Geophysics*. Alemania: Springer – Verlag, 173 p.
- [3] Stadelhofen, C. M. 1991. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Francia: Lavoisier, 183 p.
- [4] Williams, J. H.; Lapham, W.W. y Barringer, T. H. 1993. Application of electromagnetic logging to contamination investigations in glacial sand – and – gravel aquifers. *Ground Water Monitoring and Remediation Review*, 13 (3), 129-138.
- [5] Haenni, F. P. 1996. Use of ground – penetrating radar and continuous seismic – reflection profiling on surface – water bodies in environmental and engineering studies. En *Groundwater Geophysics (Journal of Environmental and Engineering Geophysics)*. Carpenter Ph. editor, 1 (1), 27-35.
- [6] Louis, I. F.; Louis, F. I. y Grambas, A. 2002a. Exploring for favorable groundwater conditions in hardrock environments by resistivity imaging methods: synthetic simulation approach and case study example. *International Conference on Earth Science and Electronics (ICESE – 2002)*, 1-15.
- [7] Louis, I. F.; Vafidis, A. V.; Louis, F. I. y Tassapoulos, N. 2002b. The use of geophysical prospecting for imaging the aquifer of Lakka carbonates, Mandoudi Euboea, Greece. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 5 (3), 97-106.
- [8] Oliveira, A. 2006 Resistivity (dc) method applied to aquifer protection studies. *Revista Brasileira de Geofísica* 24 (4), 573-581
- [9] Ekinci, Y. L.; Demirci, A. y Ertekin, C. 2008. Delineation of the seawater – freshwater interface from the coastal alluvium of Kaleköy – Gökçeada, NW Turkey. *Journal of Applied Science*, 8 (10), 1977-1981.
- [10] Robinson, D. A.; Binley, A.; Crook, N.; Day – Lewis, F. D.; Ferré, T. P.; Grauch, V. J.; Knight, R.; Knoll, M.; Lakshmi, V.; Miller, R.; Nyquist, J.; Pellerin, L.; Singha, K. y Slater, L. 2008. Advancing process – based watershed hydrological research using near – surface geophysics. A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. *Hydrological Processes*, 22 (18), 3604–3635.
- [11] Pratt, T. L.; Holmes, M.; Schweig, E. S.; Gombert, J. y Cowan, H. 2003. High resolution seismic imaging of faults beneath Limón Bay, northern Panama Canal, Republic of Panama. *Tectonophysics*, 368, 211 – 227.
- [12] Stewart, R. H.; Stewart, J. L. y Woodring, W. P. 1980. Geologic Map of Panama Canal and Vicinity, Republic of Panama. *Department of the Interior United States Geological Survey*.
- [13] McNeill, J. D. 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. *Technical note TN – 5. Geonics Limited*, 22 p.
- [14] Samouëlian, A.; Cousin, I.; Tabbagh, A.; Bruand, A. y Richard, G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83 (2), 173–193.
- [15] Binley, A. y Kemna, A. 2005. DC resistivity and induced polarization methods. En *Hydrogeophysics*. Editado por Rubin, Y. y Hubbard, S. Springer, 523 p.
- [16] Loke, M. H. y Barker, R. D. 1995. Least – squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*. 60 (6), 1682-1690.
- [17] Barker, R. D. 2001. Principles of electrical imaging. *Research Note 1*, 1-3.
- [18] Guérin, R.; Panissod, C.; Thiry, M.; Benderitter, Y.; Tabbagh, A. y Huet – Taillanter, S. 2002. La friche industrielle de Mortagne – du – Nord (59) – III – Approche méthodologique d'étude géophysique non – destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées. *Bull. Soc. Géol. France*, 173 (5), 471-477.