



LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

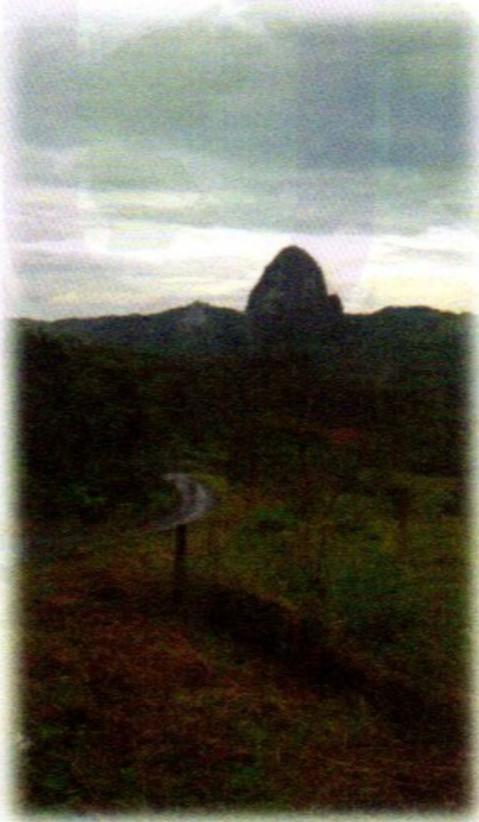
*Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación*

*Telefax: 290-8443*

## INFORME No.: CEI-07-2156-2017

07 de diciembre de 2017

TIPO DE SERVICIO: Prospección Geoeléctrica  
SOLICITUD DE TRABAJO: CEI-07-056-2017  
SOLICITADO POR: 3P Sociedad Ltda.  
RESPONSABLE: Ing. Eduardo Silva  
DIRECCIÓN DEL CLIENTE: Cerro Viento, Calle 22, Local 1941  
PROYECTO: Proyecto Hidrogeofísico  
DIRECCIÓN: Cuenca de Río Indio



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1 GENERALIDADES .....	5
1.2 OBJETIVOS .....	6
1.3 TÓPICOS TEÓRICOS .....	6
<b>2. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS .....</b>	<b>8</b>
2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS DE INTERÉS.....	8
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO DEL SITIO .....	9
2.3 LAS ZONAS DE INTERÉS.....	11
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
3.1 DISPOSITIVOS DE PROSPECCIÓN.....	12
3.2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	13
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>15</b>
4.1 SITIO 1 (LOS CHORROS) .....	15
4.2 SITIO 2 (BOCA DE URACILLO) .....	17
4.3 SITIO 3 (LA ENCANTADA) .....	19
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>22</b>



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución generalizada de los electrodos de corriente ( $C_1$ y $C_2$ ), los electrodos de potencial eléctrico ( $P_1$ y $P_2$ ) sobre la superficie de un terreno homogéneo y las líneas de corriente eléctrica y las equipotenciales generadas en el subsuelo (Díaz, 2011). .....	7
Figura 2 Ubicación geográfica de los sitios de interés, Costa Abajo de Colón y Norte de la provincia de Panamá Oeste. ....	9
Figura 3 Mapa geológico del área de interés y alrededores, Norte de la provincia de Panamá Oeste y Costa Abajo de Colón (fuente: Dirección de Recursos Minerales, Ministerio de Comercio e Industria). ....	10
Figura 4 Características físicas de Sitios: (a) 1 – Los Chorros, sector Norte de la provincia de Panamá Norte, (b) 2 – Boca de Uracillo y (c) 2 – La Encantada, éstos dos últimos en Costa Abajo de Colón.....	12
Figura 5 Resistivímetro Syscal R1 – switch 48 de IRIS Instruments y accesorios empleados en este estudio. ....	13
Figura 6 Metodología para la medición de la resistividad eléctrica aparente para las diferentes posiciones de los electrodos de corriente eléctrica (representados a través de los círculos rojos), manteniendo la misma posición de los electrodos de potencial eléctrico (círculos azules). Todas las mediciones se realizan sobre la superficie del terreno y la marca central constituye el punto en donde se obtiene el sondeo eléctrico. ....	14



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

*Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación*

*Telefax: 290-8443*

- Figura 7 (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 1 – Los Chorros, sector Norte de la provincia de Panamá Oeste. ....17
- Figura 8 (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 2 – Boca de Uracillo, Costa Abajo de Colón.....18
- Figura 9 (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 3 – La Encantada, Costa Abajo de Colón.....20



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Generalidades

Las capas más superficiales de nuestro planeta constituyen una zona geológica de gran importancia, ya que ella produce una vasta fuente de agua, sostiene nuestra agricultura y los ecosistemas e influye nuestro clima. De acuerdo a [Slater et al., \(2006\)](#) estas capas contienen una zona crítica en donde se dan lugar un conjunto de complejas interacciones de tipo hidrogeológica, geoquímica y geobiológica. Hoy día, para poder identificar con mayor precisión las fuentes de agua subterránea, se hace necesaria una rigurosa evaluación de sus características biológicas y químicas, de igual forma sus fronteras y propiedades de flujo; en este mismo horizonte, es bien conocido que los pozos y las perforaciones solas no pueden cumplir con este objetivo. Estos proveen un muestreo básico in situ a través de registros piezométricos; no obstante, estos métodos invasivos pueden modificar la circulación del agua y por ende proveer dispersión en la información. Las técnicas geofísicas son no invasivas y son de bajo costo. De aquí que la prospección geofísica posee un gran potencial para complementar los datos recabados en un estudio hidrogeológico.

Las disciplinas hidrogeofísicas han emergido en años recientes para investigar el potencial de los métodos geofísicos en proveer información cuantitativa acerca de los parámetros y procesos hidrogeológicos del subsuelo. De todos los métodos de prospección geofísica, el eléctrico es el más empleado en la detección de aguas subterráneas ([Arias, 2002](#); [Binley y Kemna, 2005](#); [Brunet et al., 2010](#)). Existe una extensa bibliografía referente al tema, por ejemplo caben citarse los trabajos de: [Telford et al., \(1990\)](#); [Stadelhofen, \(1991\)](#); [Kemna et al., \(2002\)](#); [Giudici et al., \(2003\)](#); [Rubin y Hubbard, \(2005\)](#); [Jim Yeh et al, \(2008\)](#);



Centro Experimental  
de Ingeniería

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000

www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

Robinson *et al.*, (2008); Kirsch, (2009). En este trabajo nos hemos focalizado en la parametrización de los estratos y la posible presencia de humedad mediante el uso del sondeo eléctrico en tres importantes zonas ubicadas dos de ellas en Costa Abajo de Colón y la tercera en el sector Norte de la Provincia de Panamá Oeste.

### 1.2 Objetivos

- Realizar tres (3) sondeos eléctricos para la caracterización de los estratos y la posible presencia de humedad en 3 puntos ubicados en Costa Abajo de Colón y el Norte de la Provincia de Panamá Oeste.
- Utilizar el método de Marquart-Levenberg o inversión 1D con la finalidad de obtener modelos unidimensionales de terreno que muestren la estratigrafía de los sitios mencionados con anterioridad pero en término de sus características eléctricas.

### 1.3 Tópicos teóricos

El objetivo de la aplicación del método geoelectrico se centra en obtener información del subsuelo en términos de la distribución de sus resistividades eléctricas y espesores. Esta representación 1D muestra las variaciones de la resistividad de la corteza terrestre en profundidad, hecho que permite detectar y caracterizar los posibles horizontes que tengan considerables niveles de humedad. Estos poseen características eléctricas muy diferentes al medio circundante, lo que los hace potencialmente detectables. La generación de este tipo de distribución unidimensional requiere la utilización de una fuente artificial



Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

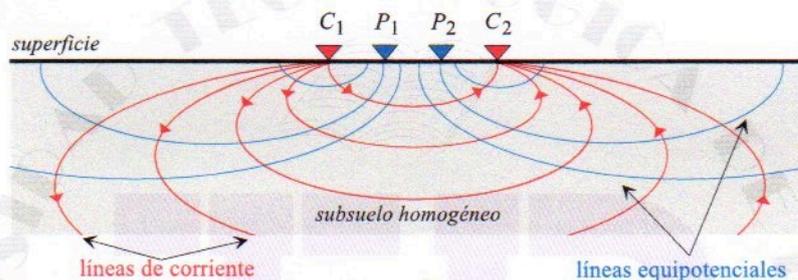
Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

de corriente continua mediante a partir de la cual se inyecta una intensidad de corriente eléctrica ( $i$ ) a través de un par de electrodos  $C_1$  y  $C_2$ ; cuando dicha corriente circula en el interior del suelo, se genera una diferencia de potencial o voltaje ( $\Delta V$ ) el cual es medido a través de otro par de electrodos  $P_1$  y  $P_2$  (ver Figura 1).



**Figura 1** Distribución generalizada de los electrodos de corriente ( $C_1$  y  $C_2$ ), los electrodos de potencial eléctrico ( $P_1$  y  $P_2$ ) sobre la superficie de un terreno homogéneo y las líneas de corriente eléctrica y las equipotenciales generadas en el subsuelo (Díaz, 2011).

Si se conoce la intensidad de la corriente eléctrica que circula en el terreno, la diferencia de potencial generada por dicha intensidad y la geometría de los electrodos enterrados unos pocos centímetros en el suelo, entonces es posible calcular el valor de la resistividad eléctrica aparente del subsuelo ( $\rho_{ap}$ ) como:

$$\rho_{ap} = \kappa \frac{\Delta V}{i}$$

El nombre de resistividad eléctrica aparente obedece al hecho de que en la práctica se obtiene un valor promedio debido a las heterogeneidades del terreno. En esta ecuación  $\kappa$  corresponde a un factor que depende de la geometría de los electrodos empleados en campo. El mismo está dado por:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\left\{ \frac{1}{C_1 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} \right\}}$$



Centro Experimental  
de Ingeniería

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

En el caso de estar en presencia de un suelo no homogéneo, la corriente atraviesa medios con diferentes resistividades por lo que el valor obtenido depende de la distribución de resistividades y no da cuenta de ninguna en particular. Además el valor obtenido de  $\rho_a$  varía si se cambia la disposición de los electrodos. A parte de lo mencionado con anterioridad, es por esto también que a cada medición realizada en el campo se la denomina resistividad eléctrica aparente ( $\rho_a$ ). Es importante recalcar que la resistividad aparente no es una propiedad física de los distintos medios sub-superficiales sino que depende de la distribución de las resistividades reales del subsuelo. Por lo tanto, la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en una prospección geoelectrica es la resistividad eléctrica aparente y los valores reales de resistividad eléctrica que se obtienen mediante las diferentes técnicas de interpretación y análisis de estos datos. La generación de un sondeo eléctrico consiste en obtener los valores de resistividad aparente a diferentes distancias entre los electrodos de emisión de corriente ( $C_1$  y  $C_2$ ) manteniendo una distancia constante para el par de electrodos de voltaje ( $P_1$  y  $P_2$ ). Para una configuración electródica tipo Schlumberger (que fue la utilizada en este estudio) la distancia media entre los electrodos  $C_1C_2/2$  se incrementa de tal forma que a mayor separación, la profundidad de investigación tenderá a incrementarse. El análisis final consiste en resolver el problema inverso 1D a través de un algoritmo de inversión basado en el criterio de mínimos cuadrados.

## 2. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS

### 2.1 Ubicación geográfica de las zonas de interés

La prospección eléctrica 1D se desarrolló en tres áreas ubicadas dos de ellas en Costa Abajo de Colón y la otra en el Norte de la provincia de Panamá Oeste.



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**2 muestra la ubicación geográfica de estos sitios.



Figura 2 Ubicación geográfica de los sitios de interés, Costa Abajo de Colón y Norte de la provincia de Panamá Oeste.

## 2.2 Contexto geológico del sitio

El mapa geológico de la Figura 3 presenta las formaciones en donde reposan los sitios de interés.



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

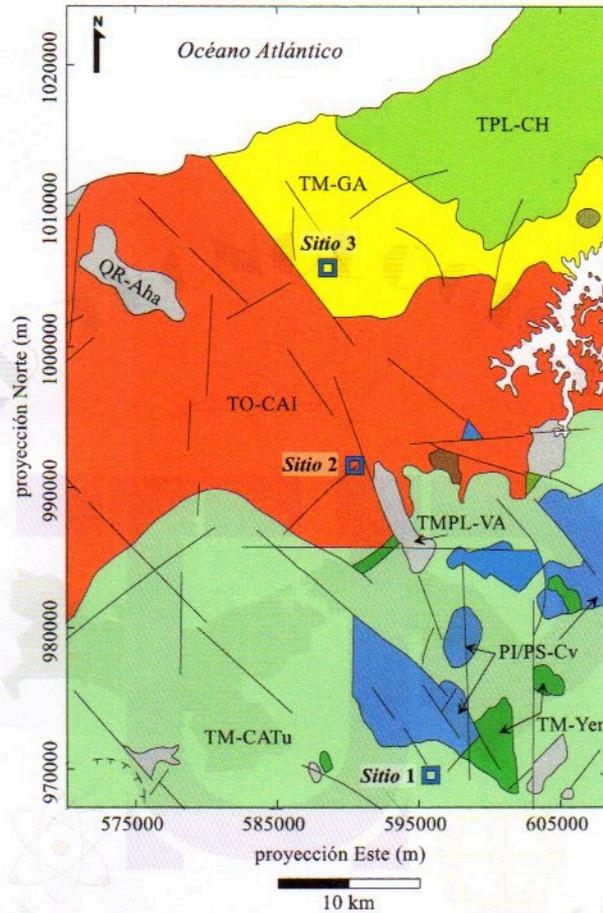
Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443



**Figura 3** Mapa geológico del área de interés y alrededores, Norte de la provincia de Panamá Oeste y Costa Abajo de Colón (fuente: Dirección de Recursos Minerales, Ministerio de Comercio e Industria).

De acuerdo al Mapa Geológico de la Dirección de Recursos Minerales (Ministerio de Comercio e Industria), dos de estos sitios se caracterizan por encontrarse caracterizadas por formaciones de tipo sedimentaria (Sitios 2 y 3), mientras que el Sitio 1, por una formación de tipo volcánica; a continuación los detalles:



Informe No. CEI-07-2156-2017

**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

*Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación*

*Telefax: 290-8443*

**Sitio 1:** Se ubica en la comunidad de Los Chorros (Norte de la provincia de Panamá Oeste), estando la misma caracterizada por la presencia de andesitas/basaltos, lavas, brechas, tobas y plugs, propios de la Formación Tucué (TM-CATu) de tipo volcánica.

**Sitio 2:** Se encuentra ubicado en la comunidad de Boca de Uracillo, reposando la misma sobre la Formación Caimito (TO-CAI) que es de tipo sedimentaria; en ella figuran las areniscas tobáceas, lutita tobácea, toba y caliza foraminífera.

**Sitio 3:** Se encuentra localizado en la comunidad de La Encantada, estando la misma caracterizada por la Formación Gatún (TM-GA) que es de tipo sedimentaria también; en ella se encuentran elementos geológicos de tipo arenisca, lutita, toba, conglomerados y arcillita arenosa.

### 2.3 Las zonas de interés

Con el objetivo de conocer la distribución de los estratos en las áreas de interés ya anteriormente mencionadas, en cada una de ellas se desarrolló un sondeo eléctrico tipo Schlumberger. Las características físicas de estos lugares se pueden apreciar en el conjunto de fotografías de la Figura 4.



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
[www.utp.ac.pa](http://www.utp.ac.pa)

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443



(a)



(b)



(c)

**Figura 4** Características físicas de Sitios: (a) 1 – Los Chorros, sector Norte de la provincia de Panamá Norte, (b) 2 – Boca de Uracillo y (c) 2 – La Encantada, éstos dos últimos en Costa Abajo de Colón.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Dispositivos de prospección

El desarrollo de este trabajo involucró la utilización de los siguientes dispositivos y programas:

- Un resistivímetro Syscal R1 (de IRIS Instruments) y accesorios (dos carretes con cables de conexión, electrodos de acero inoxidable y batería externa de 12 V).
- Softwares: Electre II, Prosys II (para la configuración y descarga de datos), un código de inversión y Grapher 8.0 (de Golden Software) para la interpretación final de los resultados obtenidos.

La Figura 5 presenta las características generales del resistivímetro y los accesorios utilizados en este estudio.



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443



Figura 5 Resistivímetro Syscal R1 – switch 48 de IRIS Instruments y accesorios empleados en este estudio.

### 3.2 Metodología de investigación

El objetivo de un sondeo eléctrico es obtener un modelo unidimensional (1D) del subsuelo a partir de un ajuste por mínimos cuadrados de los valores de resistividad eléctrica aparente (o medidos en campo) con una curva teórica que obedece a un modelo de terreno tabular; esto significa que los valores de resistividad eléctrica aparente se representan en un gráfico bilogarítmico en función de la separación media de los electrodos de corriente ( $C_1C_2/2$ ). El modelo unidimensional obtenido una vez se ajusten los datos a la mencionada curva teórica, debe mostrar la distribución de los valores de resistividad eléctrica calculados o valores de resistividad eléctrica real de los estratos en función de sus espesores reales en 1D. La manera de obtener un conjunto dado de valores de resistividad eléctrica aparente sobre la superficie del área de interés, es variando (para cada medición) la separación entre los electrodos de corriente  $C_1$  y  $C_2$ , manteniendo el la distancia media entre los electrodos de potencial eléctrico  $P_1P_2/2$ , constante. El sistema es simétrico, de forma tal que a

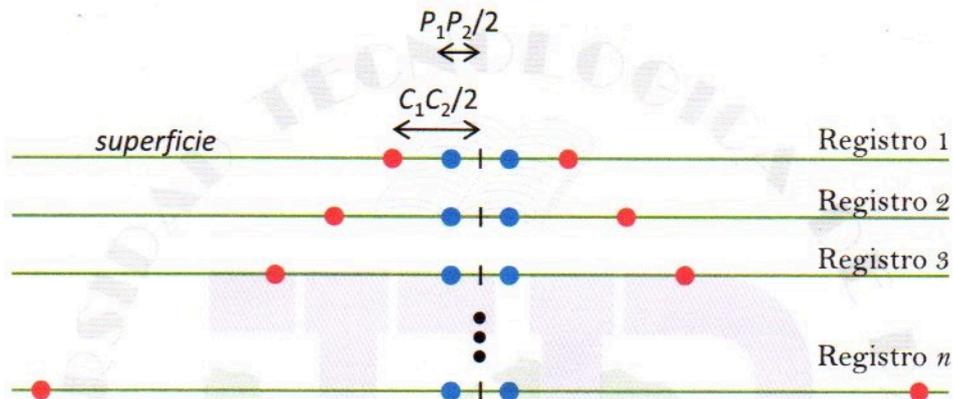


## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

medida que se incrementa la distancia  $C_1C_2/2$ , la profundidad de investigación aumenta. Con esto, se obtiene una tabla de datos de la resistividad eléctrica aparente en función de la distancia  $C_1C_2/2$ . La Figura 6 ilustra esta metodología.



**Figura 6** Metodología para la medición de la resistividad eléctrica aparente para las diferentes posiciones de los electrodos de corriente eléctrica (representados a través de los círculos rojos), manteniendo la misma posición de los electrodos de potencial eléctrico (círculos azules). Todas las mediciones se realizan sobre la superficie del terreno y la marca central constituye el punto en donde se obtiene el sondeo eléctrico.

Posterior al proceso de medición de los valores de resistividad aparente (en  $\Omega.m$ ) en función de la separación media entre los electrodos de corriente  $C_1C_2/2$  (en m), se procede a la resolución del problema inverso. Si consideramos un vector  $\mathbf{d}$  constituido por estos valores medidos en campo y que se representan como:  $d_1, d_2, \dots, d_n$ , y  $\mathbf{m}$  los parámetros del modelo que no se conocen y que se tratan de calcular ( $m_1, m_2, \dots, m_l$ ) que en el caso de los sondeos eléctricos correspondería a las resistividades eléctricas reales de los estratos y sus espesores. Si se conoce una solución inicial aproximada  $\mathbf{m}_0$  ya sea a través de un modelo de interpretación cualitativa el cual se encuentra descrito mediante funciones tangenciales, asintóticas o con curvas patrones, entonces es posible



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

conocer su nivel de validez mediante el cálculo de la respuesta del modelo, el cual se encuentra representado a través de los valores de resistividad eléctrica aparente sintética y que se representa a través del vector  $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{m}_0)$ . La discrepancia  $\mathbf{g}$  es otro vector que muestra la diferencia existente entre los datos medidos en campo (resistividad eléctrica aparente -  $\mathbf{d}$ ) y la respuesta del modelo (resistividad eléctrica aparente sintética -  $\mathbf{F}$ ), y cuya ecuación vectorial corresponde a la forma  $\mathbf{g} = |\mathbf{d} - \mathbf{F}|$ . Esta diferencia o discrepancia debe ser minimizada y para ello se utilizan diferentes métodos de optimización como por ejemplo el de mínimos cuadrados y cuyas soluciones se deben estabilizar a través de métodos de regularización (Constable *et al.*, 1987). El código de inversión 1D utilizado en estos ensayos lleva a cabo la interpretación de los sondeos eléctricos en función de un modelo tabular; por su parte la curva teórica se puede obtener calculando la transformada de Hankel a través de una convolución empleando filtros; el código permite seleccionar entre el filtro de Anderson (Anderson, 1979) y los filtros corto y largo de Guptasarma y Sing (1997). El código ofrece la libertad de elegir el número  $n$  de capas con sus respectivos valores de resistividad eléctrica y espesor; posteriormente, se evalúa la correspondencia entre la respuesta del modelo (curva teórica) y los datos de campo. El método de optimización utilizado es el de pendiente máxima por iteraciones sucesivas.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1 Sitio 1 (Los Chorros)

En este sector, la separación entre los electrodos de potencial eléctrico se fijó a 5 m ( $P_1P_2/2 = 2,5$  m) y permaneció constante durante todo el proceso de



Centro Experimental  
de Ingeniería

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

*Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación*

*Telefax: 290-8443*

adquisición de los datos. Para el primer par de datos, la distancia media entre los electrodos de corriente eléctrica ( $C_1C_2/2$ ) fue de 7,5 m; luego este valor se fue incrementando cada 5 m hasta una apertura máxima de  $C_1C_2/2 = 82,5$  m obteniéndose un total de 16 pares de valores de resistividad eléctrica aparente vs  $C_1C_2/2$ . La distribución de estos 16 pares de valores se observan en el gráfico bilogarítmico de la Figura 7(a), y la inversión de este conjunto dio por resultado un error de cálculo de 2,3%. La curva teórica obtenida se presenta en la misma figura y el modelo final 1D se ilustra en la Figura 7(b).

El ajuste de los datos de campo con la curva teórica sugiere la existencia de 3 horizontes: el superficial, caracterizado por presentar un valor de resistividad eléctrica calculada intermedia, propia de la geología volcánica del sitio:  $146 \Omega.m$  y con un espesor de 6 m; luego se presenta un segundo horizonte que se extiende desde 6 hasta 14 m y con un valor de resistividad eléctrica calculada de  $13,5 \Omega.m$ , el bajo valor de resistividad de este horizonte podría sugerir la presencia de humedad en el sitio; y finalmente, el tercer horizonte, caracterizado por presentar un valor de resistividad eléctrica cercano al primero ( $150 \Omega.m$ ).



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

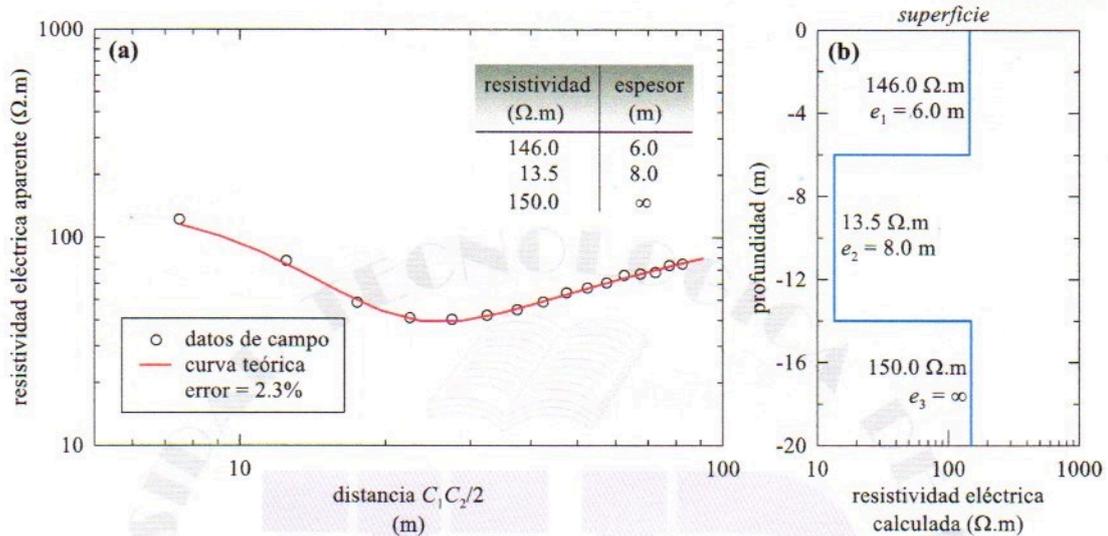
Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
[www.utp.ac.pa](http://www.utp.ac.pa)

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443



**Figura 7** (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 1 – Los Chorros, sector Norte de la provincia de Panamá Oeste.

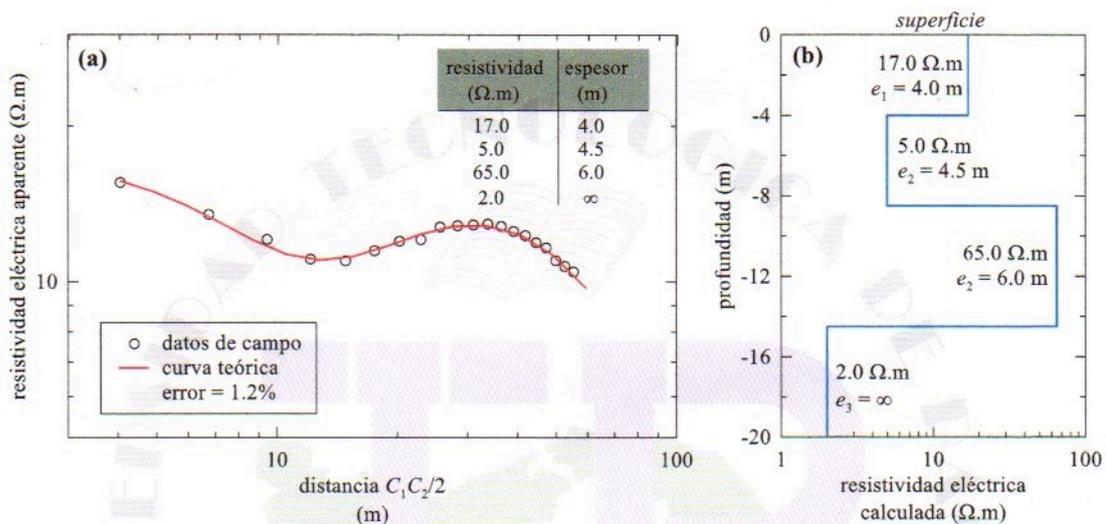
### 4.2 Sitio 2 (Boca de Uracillo)

En este sitio, la extensión no fue suficiente debido a obstáculos a lo largo de la línea y casa por ejemplo; la separación entre los electrodos de potencial eléctrico se fijó a 2,7 m ( $P_1P_2/2 = 1,35$  m) y como en el sondeo anterior, permaneció constante durante todo el proceso de adquisición de los datos. Para el primer par de datos, la distancia media entre los electrodos de corriente eléctrica ( $C_1C_2/2$ ) fue de 4,05 m y posteriormente, este valor se fue incrementando cada 2,7 m hasta una apertura máxima de  $C_1C_2/2 = 55,35$  m obteniéndose un total de 20 pares de valores de resistividad eléctrica aparente vs  $C_1C_2/2$ . La distribución de estos 20 pares de valores se observan en el gráfico bilogarítmico de la Figura 8(a); por su parte, la inversión de estos datos

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Via Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

dio por resultado un error de cálculo de 1,2%. El modelo final 1D se presenta en la Figura 8(b).



**Figura 8** (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 2 – Boca de Uracillo, Costa Abajo de Colón.

La resolución del problema inverso sugiere la existencia de 4 horizontes: el superficial el cual presentar un valor de resistividad eléctrica calculada de 17  $\Omega.m$  y con un espesor de 4 m; dicho horizonte se encuentra asociado al suelo sedimentario característico del sitio; luego se presenta un segundo horizonte que se extiende desde 4 hasta 8,5 m de profundidad y con un valor de baja resistividad eléctrica calculada (5  $\Omega.m$ ) el cual podría estar asociado al suelo característico del área pero con notable presencia de humedad. Seguido, un tercer horizonte más resistente (65  $\Omega.m$ ) y comprendido entre 8,5 y 14,5 m, el mismo podría encontrarse asociado con material más denso en relación a los horizontes superficiales ya antes definidos. Finalmente, nos encontramos con



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

*Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación*

*Telefax: 290-8443*

un cuarto horizonte el cual se caracteriza por presentar un valor de resistividad eléctrica muy bajo ( $2 \Omega \cdot m$ ), posiblemente asociado a la presencia de humedad.

### 4.3 Sitio 3 (La Encantada)

En la comunidad de la Encantada, la separación entre los electrodos de potencial eléctrico se fijó a 5 m ( $P_1P_2/2 = 2,5$  m) manteniéndose esta distancia como constante durante todo el proceso de adquisición de los datos. Para el primer par de datos, la distancia media entre los electrodos de corriente eléctrica ( $C_1C_2/2$ ) fue de 7,5 m y luego, dicho valor se fue incrementando cada 5 m hasta una apertura máxima de  $C_1C_2/2 = 117,5$  m obteniéndose un total de 23 pares de valores de resistividad eléctrica aparente vs  $C_1C_2/2$ .

La distribución de estos valores se puede apreciar en el gráfico bilogarítmico de la Figura 9(a); el error de cálculo obtenido una vez resuelto el problema inverso fue de 2,0%. El modelo tabular final 1D se presenta en la Figura 9(b).

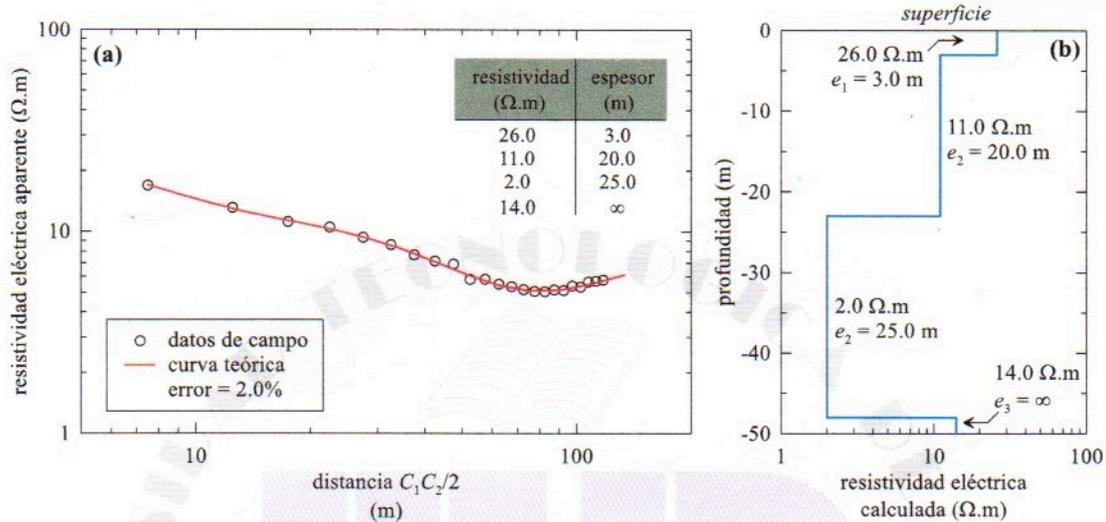


**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443



**Figura 9** (a) Representación bilogarítmica de los datos de campo y la curva teórica y (b) representación gráfica del modelo tabular o modelo 1D obtenido en el Sitio 3 – La Encantada, Costa Abajo de Colón.

Para esta prueba, la resolución del problema inverso sugiere la existencia de 4 horizontes también: el superficial, constituido por el suelo sedimentario característico del sitio, con un valor de resistividad eléctrica calculada de 26  $\Omega \cdot m$  y 3 m de espesor. Más abajo se presenta un segundo horizonte que se extiende desde 3 hasta 23 m de profundidad (20 m de espesor) y con un valor de resistividad eléctrica calculada de 11  $\Omega \cdot m$  el cual podría estar asociado al mismo tipo de suelo sedimentario pero con cierto contenido de humedad.

Seguido de esto, se puede identificar un tercer horizonte más conductor (2  $\Omega \cdot m$ ) y comprendido entre 23 y 48 m (25 m de espesor), su bajo valor de resistividad eléctrica calculada sugiere la existencia de humedad a esas profundidades, y finalmente el cuarto horizonte que también presenta un valor de resistividad



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

eléctrica no muy alto ( $14 \Omega.m$ ) el cual podría estar asociado a un substrato no muy resistente por la fuerte presencia de humedad.

### 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en estas pruebas indican la sensibilidad del método empleado ante la presencia de horizontes estratigráficos con cierto nivel de humedad. El Sitio 1 correspondiente a la comunidad de Los Chorros (sector Norte de la provincia de Panamá Oeste), el segundo horizonte comprendido entre los 6 y 14 m muestra una anomalía de baja resistividad ( $13.5 \Omega.m$ ) posiblemente asociado a la presencia de humedad. De igual forma este efecto se manifiesta de forma más notable en el Sitio 2 (Boca de Uracillo) y 3 (La Encantada) en donde los valores de resistividad eléctrica tienen a caer hasta 5 y 2  $\Omega.m$ , respectivamente. Dichos rangos fueron correlacionados con la [Norma ASTM \(Designación D 6431 – 2006\)](#) en donde estas zonas presentan valores que se extienden desde 1 hasta 100  $\Omega.m$  para suelos con un determinado grado de humedad; en esta misma norma se establecen además los límites para sedimentos no consolidados los cuales se extienden desde 1 hasta 100  $\Omega.m$ .

**DR. ALEXIS MOJICA**

Responsable Técnico y Jefe  
Laboratorio de Investigación en  
Ingeniería y Ciencias Aplicadas

**DR. RAMIRO VARGAS**

Director Encargado  
Centro Experimental de Ingeniería



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
[www.utp.ac.pa](http://www.utp.ac.pa)



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

### 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, W. L. 1979. Computer program. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptative digital filter. *Geophysics*, 44, 1287 – 1305.
- Arias, M. 2002. La prospección geoeléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Rev. Geol. América Central*, 27, 21 – 26.
- ASTM International Designation D 6431 – 2006. Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation. 14 p.
- Binley, A. y Kemna, A. 2005. DC Resistivity and induced polarization methods. En *Hydrogeophysics* (Y. Rubbin y S.S. Hubbard – editores), 129 – 156.
- Brunet, P.; Clément, R. y Bouvier, Ch. 2010. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology*, 380, 146 – 153.
- Constable, S.; Parker, R. y Constable, C. 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models for electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 53, 289 – 300.
- Díaz, I. 2011. *Análisis de las variaciones del nivel freático en la zona de Gamboa a través de la imaginería bidimensional y tridimensional de resistividad eléctrica del subsuelo*. Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Panamá, 153 p.



Centro Experimental  
de Ingeniería

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación  
Telefax: 290-8443

- Giudici, M.; Manera, M. y Romano, E. 2003. The use of hydrological and geoelectrical data to fix the boundary conditions of a ground water flow model: a case study. *Hydrology & Earth System Sciences*, 7 (3), 297 – 303.
- Guptasarma, D. y Singh, B. 1997. New digital linear filters for Hankel 0 and 1 transforms. *Geophysical Prospecting*, 45, 745 – 762.
- Jim Yeh, T.; Lee, Ch.; Hsu, K. y Wen, J. 2008. Fusion of hydrologic and geophysical tomographic surveys. *Geosciences Journal*, 12 (2), 159 – 167.
- Kemna, A.; Vanderborght, J.; Kulesa, B. y Vereecken, H. 2002. Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models. *Journal of Hydrology*, 267, 125 – 146.
- Kirsch, R. 2009. *Groundwater Geophysics – A tool for hydrogeology*. Holanda: Springer, 568 p.
- Robinson, D.A.; Binley, A.; Crook, N.; Day – Lewis, F.D.; Ferré, T.P.A.; Grauch, V.J.S.; 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, 3604 – 3635.
- Rubin, Y. y Hubbard, S.S. 2005. *Hydrogeophysics*, Holanda: Springer, 521 p.



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000  
www.utp.ac.pa



## LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

Slater, L.; Nturlagiannis, D. y Wishart, D. 2006. On the relationship between induced polarization and surface area in metal-sand and clay-sand mixtures. *Geophysics*, 71 (2), A1 – A5.

Stadelhofen, C. M. 1991. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. Francia: Tec Doc Lavoisier, 183 p.

Telford, W.M.; Geldart, L.R. y Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Inglaterra: Cambridge University Press, 770 p.



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Informe No. CEI-07-2156-2017

Apdo. 0819-07289, Panamá, República de Panamá

Central Telefónica: 560- 3000

[www.utp.ac.pa](http://www.utp.ac.pa)

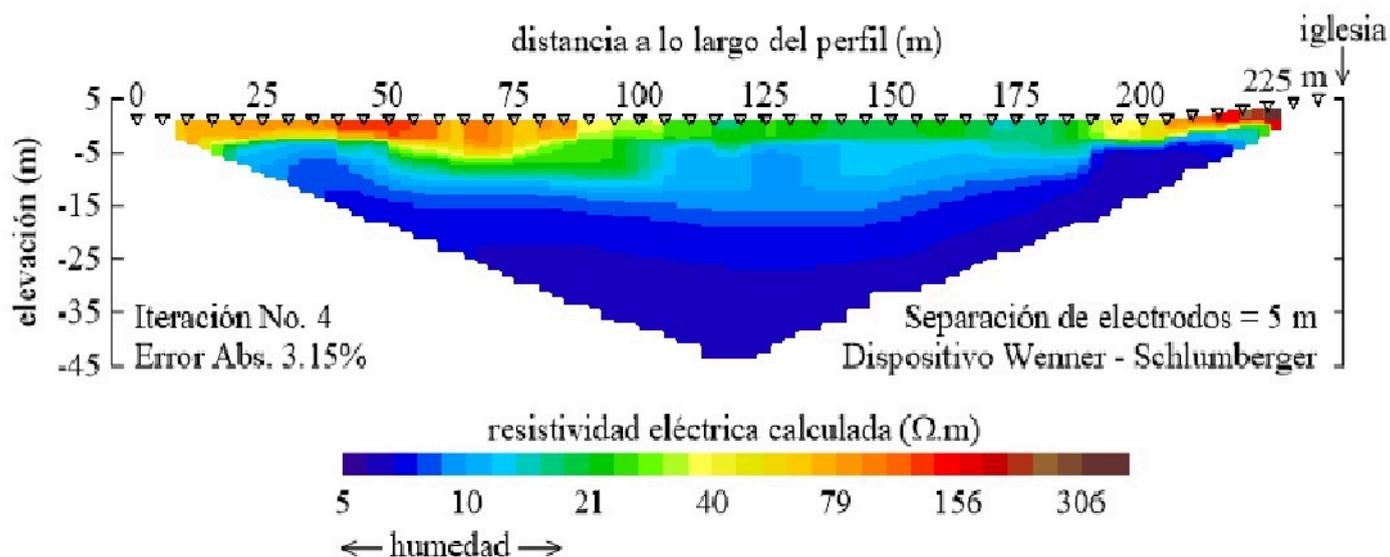


LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

## Sitio No. 3 - La Encantada



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

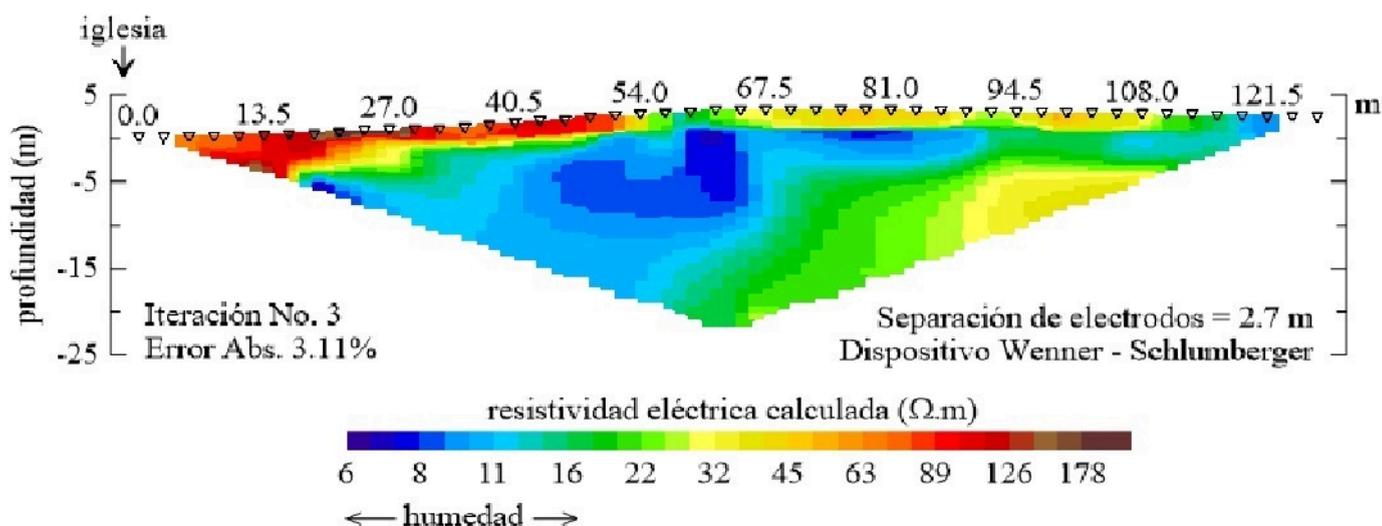


LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

## Sitio No. 2 - Boca de Aracillo



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

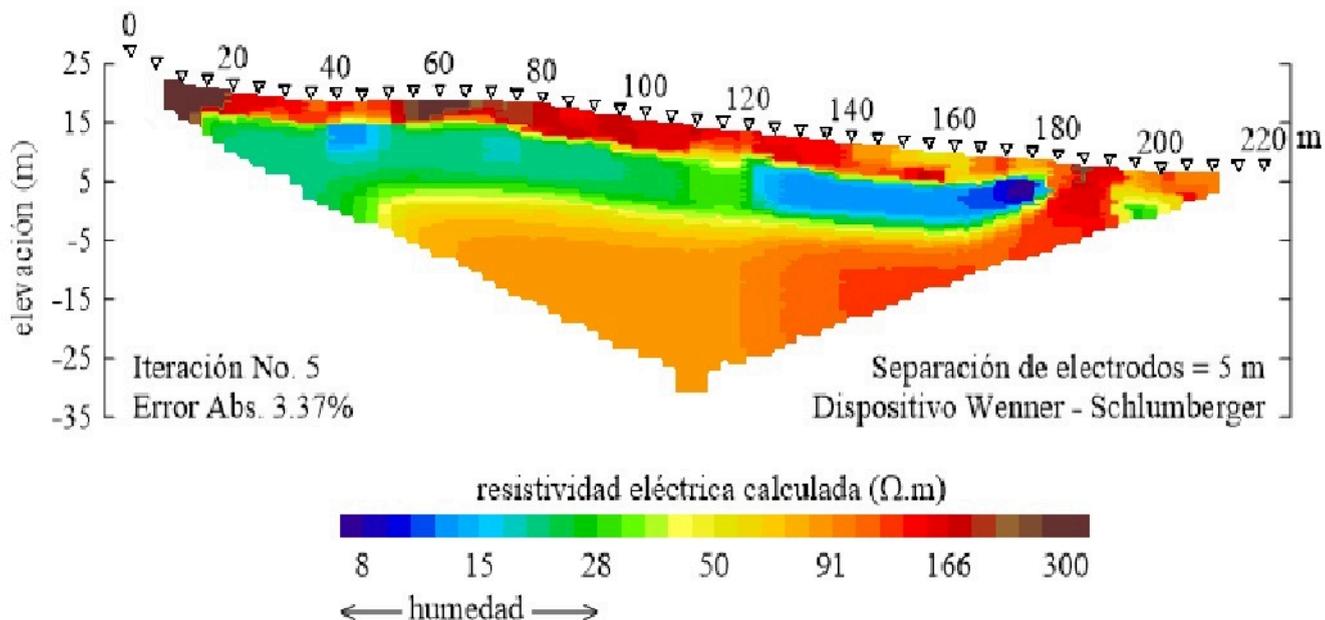


LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS - CEI

Dirección: Vía Tocumen, Campus de Investigación

Telefax: 290-8443

## Sitio No. 1 – El Barino (Norte de La Chorrera)



**Centro Experimental  
de Ingeniería**

Laboratorio de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas