



## I CONGRESO NACIONAL COMEII 2015

### Reunión anual de riego y drenaje

Jiutepec, Morelos, México, 23 y 24 de noviembre

#### ANÁLISIS DE PRESAS CON CORTINAS DE ARCILLA MEDIANTE TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Lucila Ávila Martínez<sup>1</sup>; Juan Carlos Mora Chaparro<sup>2</sup>; Víctor Manuel Marín Sevilla<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Estudiante de la Maestría en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales, E. S. I. A. Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional. Av. Ticomán No. 600, Col. San José Ticomán, 07340, Del. Gustavo A. Madero, México, Distrito Federal.

<sup>2</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, Distrito Federal.

<sup>3</sup> Proyecto Externo, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, Distrito Federal.

#### Resumen

En México existen presas con cortinas de arcilla compactada como principal material de construcción, con o sin corazón de mampostería; un elevado número de estas son antiguas, por lo que es necesario realizar inspecciones de las condiciones de los materiales que las componen. En la actualidad las inspecciones se limitan a identificar las filtraciones de agua que afloran en sus paredes, su existencia puede asociarse a diferentes factores entre los que pueden estar que el flujo de agua ha superado la capacidad de saturación de las arcillas, a que las arcillas muestran disminución en su compactación e incremento en su permeabilidad, fracturamiento, o remoción de materiales; entre otros. Una manera de analizarlas indirectamente, sin afectar su estructura, es mediante Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). El resultado de la aplicación de esta técnica nos permitirá registrar las zonas saturadas con agua (en los poros o en su estructura) y las zonas donde hay mayor concentración del fluido. Éstas, al correlacionarse con los puntos de filtración, nos indicarían áreas de fracturas o de flujo y erosión de los materiales, los cuales al ser muy puntuales nos pueden servir de herramienta para futuras reparaciones. La aplicación de TRE se basa en que los materiales térreos de las cortinas tienen la capacidad de transmitir una corriente eléctrica a través de ellos. En el presente trabajo se exponen los resultados de la evaluación de la cortina de arcilla de la presa San Antonio en Huasca de Ocampo, Hidalgo utilizando el método de TRE.

**Palabras clave.** Saturación de agua, zonas de filtración, compactación de arcilla, porosidad.

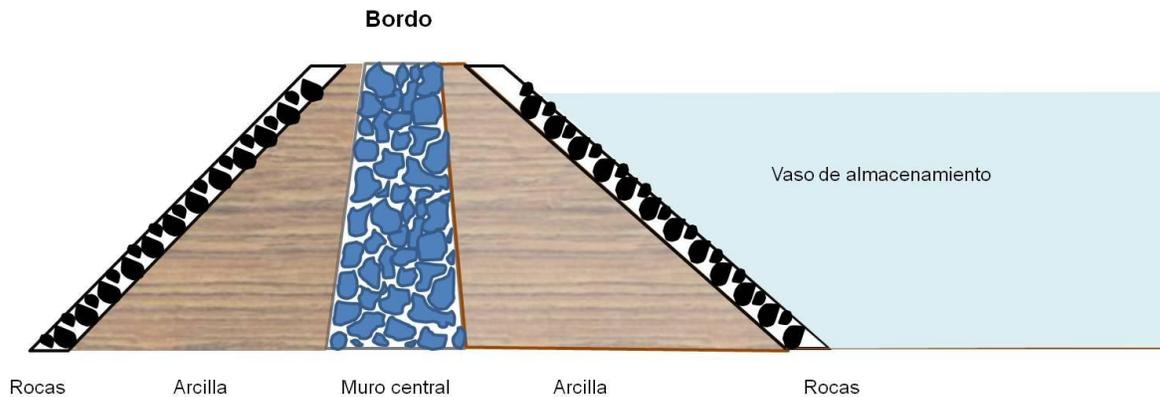
## Introducción

El uso de la resistividad eléctrica (la oposición que presentan los materiales al flujo de una corriente eléctrica) como parámetro de control en los materiales de construcción ha sido ampliamente usado (Andrade y Andrea, 2011), no obstante esta propiedad física varía en función del contenido de agua, la salinidad y la distribución de ambas en los poros, de la presión y de la temperatura (Serrano, 2009).

Durante la construcción de las presas con cortina de arcilla compactada la cantidad de poros disminuye significativamente, por lo que el contenido de agua es muy bajo (SAGARPA, 2012); lo anterior da como resultado una resistividad eléctrica mayor en las arcillas debido a que este parámetro físico está supedito a la relación de poro-fluido-sales.

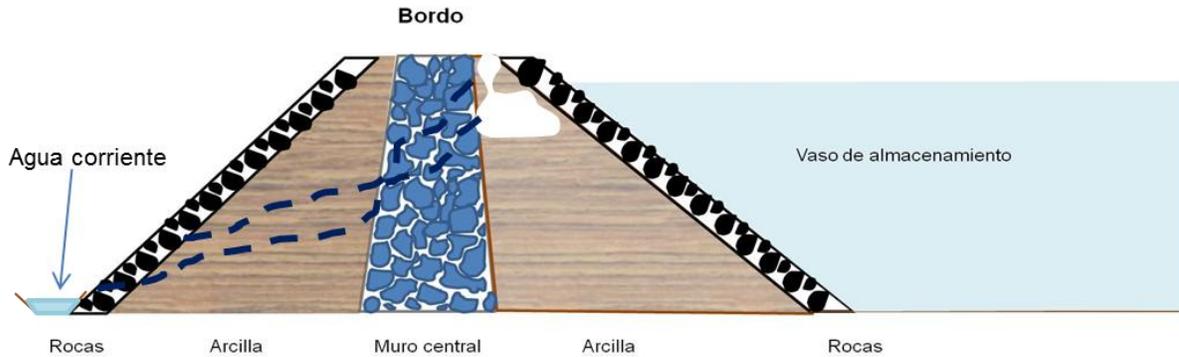
En el mes de julio del presente año se realizó una visita a la presa San Antonio Regla, ubicada en el Estado de Hidalgo; para realizar observaciones acerca de las condiciones en las que se encuentra el bordo de la misma, debido a que apareció una oquedad en su superficie.

El bordo de la presa fue construido en la segunda década del siglo pasado (Figura 1), y está compuesto por una zona de rocas basálticas de color negro (zampeado) que se encuentran sobre una capa de arcilla comprimida, y en el centro se encuentra un muro de roca con mortero (corazón).



**Figura 1.** Modelo del bordo de la presa San Antonio Regla.

La parte externa del bordo debe presentar arcillas con saturación muy baja a medida que se avanza hacia el corazón de mampostería impermeable; sin embargo si existen zonas de filtración en el corazón del bordo las arcillas de la parte exterior estarán húmedas y, por lo tanto su resistividad eléctrica disminuirá. Se planteó la posibilidad de que el agua filtrada puede disolver y transportar el material arcilloso hacia el exterior propiciando la formación de oquedades (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema interpretado de la oquedad y filtración de agua

Para conocer las condiciones de resistividad eléctrica en la parte externa del borde de arcilla compactada de la presa San Antonio Regla se hizo uso del método de prospección eléctrica de corriente continua. Conjuntamente con el agua se pueden filtrar

### Métodos

El método de prospección eléctrica de corriente continua consiste principalmente en introducir a través de dos electrodos una corriente de intensidad conocida, y medir la diferencia de potencial con otro par; a medida que la separación entre los electrodos aumenta la corriente circula por zonas de mayor profundidad; este método hace uso de una propiedad fundamental de los materiales, la resistividad eléctrica, que condiciona la cantidad de corriente que atraviesa un material terrígeno (Dobrin, 1969). Tanto la intensidad de la corriente eléctrica ( $I$ ) y el voltaje ( $V$ ) se relacionan en la Ley de Ohm donde se obtiene la resistencia ( $R$ );

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica,  $l$  distancia entre electrodos y  $A$  el área transversal del paso de la corriente. La resistividad eléctrica queda entonces determinada por la siguiente fórmula:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

Siendo  $k$  el factor geométrico que se determina por la siguiente fórmula:

$$k = \pi n a (n + 1) (n + 2)$$

Donde  $\pi$ , es una constante geométrica;  $a$ , es la separación que existe entre electrodos y que se mantiene constante; y  $n$ , es el número de niveles que se profundiza (Mussett, 2000).

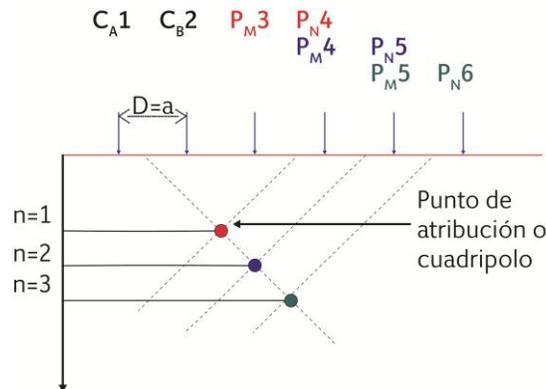
La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelación 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas) para generar imágenes denominadas pseudosecciones (Serrano, 2003). Existen diversos tipos de arreglos geométricos que permiten la obtención de una TRE, para la evaluación de la cortina de la presa San Antonio se utilizó el arreglo **dipolo-dipolo**.

*Arreglo Dipolo-Dipolo.* al igual que otras variables de prospección eléctrica utiliza un arreglo dado por cuatro electrodos (tetraelectrónico), dos de corriente ( $C_A$  y  $C_B$ ) y dos de potencial ( $P_M$  y  $P_N$ ) separados por una distancia  $nD$  (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help*, Iris Instruments, 2012; Figura 3).



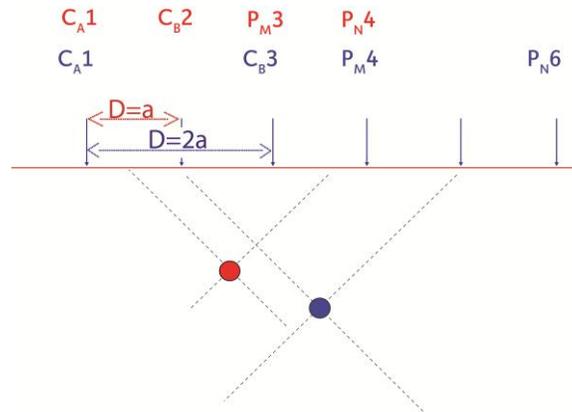
**Figura 3.** Disposición de los electrodos de corriente ( $C_A$ ,  $C_B$ ) y los electrodos de potencial ( $P_M$ ,  $P_N$ ) (*ELECTRE Pro software Help*, Iris Instruments, 2012).

Los electrodos de potencial se mueven de la siguiente manera: el electrodo  $P_M$  ocupará el lugar del electrodo  $P_N$ , y  $P_N$  avanzará una distancia  $D$  (Figura 4). Para determinar la profundidad del punto de atribución o cuadrípulo, que es un valor de  $\rho_a$  que se obtiene con un dispositivo dipolar, suele atribuirse a un punto de intersección de dos semirrectas que parten desde los centros de cada dipolo con un ángulo de  $45^\circ$  (Perdomo, 2009); Figura 4.



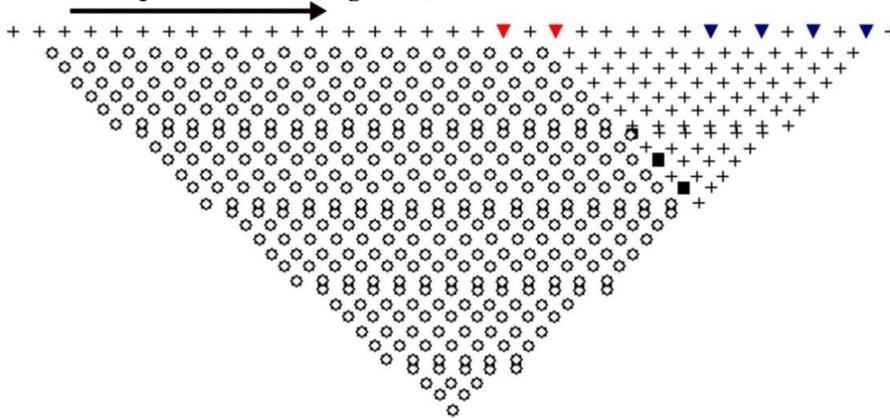
**Figura 4.** Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (*ELECTRE Pro software Help*, Iris Instruments, 2012).

El electrodo de corriente  $C_A$  se moverá extendiendo su separación con el electrodo  $C_B$  al doble de la distancia inicial ( $D=2a$ ) (Figura 4).



**Figura 4.** Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 electrodos ( $C_{A1}$ ,  $C_{B2}$ ,  $P_{M3}$ ,  $P_{N4}$ ) para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadrípolo azul ( $C_{A1}$ ,  $C_{B3}$ ,  $P_{M4}$ ,  $P_{N6}$ ) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

El arreglo Dipolo-Dipolo, es altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales) y ofrece una mayor densidad de puntos de atribución (Constantino, *óp. cit.*). Al final de los distintos desplazamientos secuenciales de los electrodos a lo largo de la línea de la Tomografía eléctrica se obtiene una malla con los distintos puntos de atribución a diferentes niveles de profundidad (Figura 5).



**Figura 5.** Modelo de puntos de atribución (Iris Instruments, Software ELECTRE Pro, 2012).

### Materiales

El equipo utilizado para el estudio geofísico (TRE) fue el siguiente:

Resistímetro automático multielectrodo *Syscal Pro* de la marca *Iris Instruments*, con 48 electrodos de acero impolarizable, cables de superficie de 12 conexiones cada uno; y Navegador GPS modelo *etrex legend Hcx* de la marca *Garmin*.

Se utilizaron los siguientes programas computacionales:

*Electre Pro*, sirve de interfaz entre el ordenador y la consola del resistímetro

*Prosys*, permite la obtención de datos de la consola del resistímetro y el ordenador.

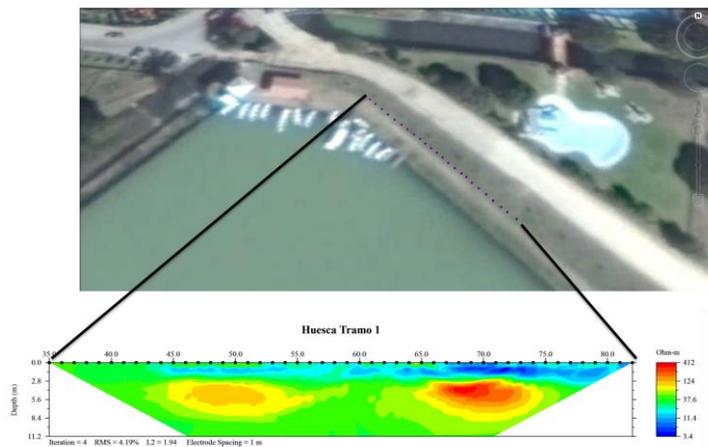
*EarthImager* permite la inversión de los datos de resistividad eléctrica durante el modelado.

### Análisis y discusión de resultados

El desarrollo del estudio geofísico se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se realizaron cuatro Tomografías de Resistividad Eléctrica iniciando desde la parte norte, con una profundidad de 10 m aproximadamente y separación entre electrodos de 1m, con un traslape de 12 electrodos, es decir, 11 metros.

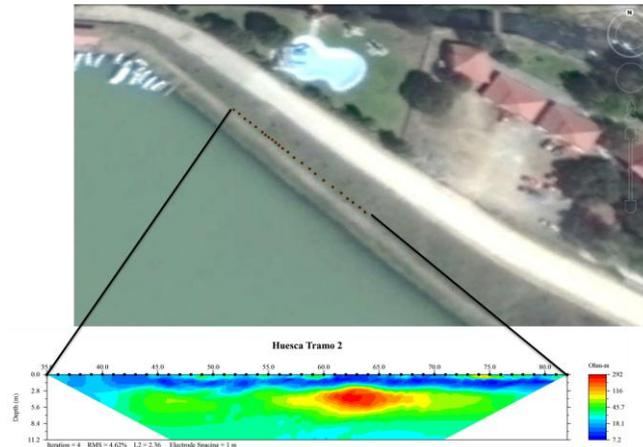
*Huasca 1*



**Figura 6.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

La TRE muestra en la parte superficial una zona de baja resistividad (color azul), que se puede asociar a la infiltración pluvial, en la parte inferior se observa una amplia zona de color verde con una resistividad de rango 20 a 100 Ohms m, corresponde a arcillas secas. Existen dos zonas de alta resistividad (color rojo) que puede corresponder a materiales pétreos compactados (gravas y arenas).

Huasca 2

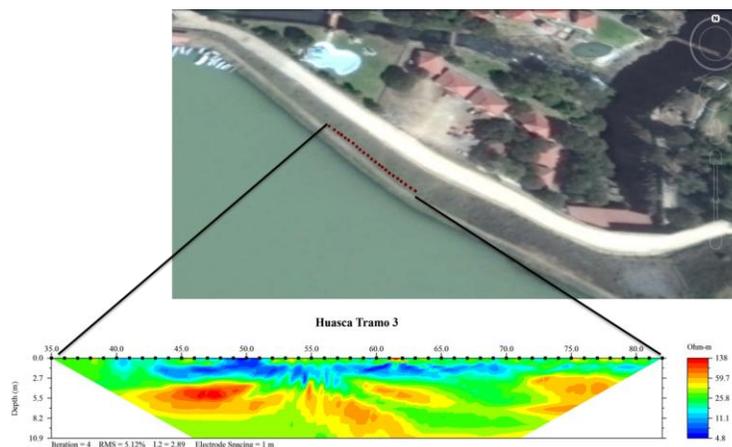


**Figura 7.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En la TRE se puede apreciar una zona de baja resistividad asociada a infiltración pluvial. En color verde y con un rango de resistividad de 20 a 100 Ohms m, encontramos una capa de arcilla compacta; en color rojo y amarillo y con resistividad cuyo rango oscila entre los 100 y los 300 Ohms m zonas de alta resistividad que hemos asociado a materiales pétreos compactados (gravas y arenas)

En la parte inferior (base del estudio y la cortina) podemos observar una zona de baja resistividad, que no se observa relacionada a la infiltración superficial; denotamos esto como una anomalía ya que las capas inferiores tienen una mayor compactación que las superiores, sin embargo en este caso existe una zona de baja resistividad que puede asociarse a presencia de fluidos (agua).

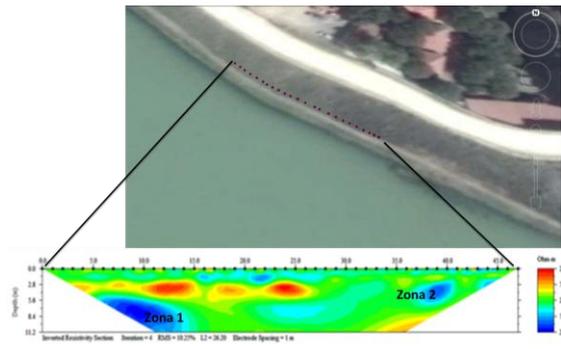
Huasca 3



**Figura 8.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En color azul y con resistividades menores de 20 Ohms m encontramos una zona de aparente infiltración superficial. En color Verde y con resistividades comprendidas en el rango de 20 a 50 Ohms m un material que se puede asociar a arcillas compactas. En color rojo y amarillo en un rango de 50 a 100 Ohms m, a arenas compactas.

#### Huasca 4



**Figura 9.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En la parte superior de la TRE encontramos zonas de color azul correspondiente a bajas resistividades (menores a 20 Ohms m, infiltración pluvial), en la parte media encontramos una zona de resistividad media (20 a 50 Ohms m) rango en que se encuentran las arcillas compactas y secas (Orellana, *Op. cit.*). En color rojo y amarillo podemos observar una franja cuya resistividad eléctrica (50 -250 Ohms m) que podemos asociar a arenas compactas (*supra*).

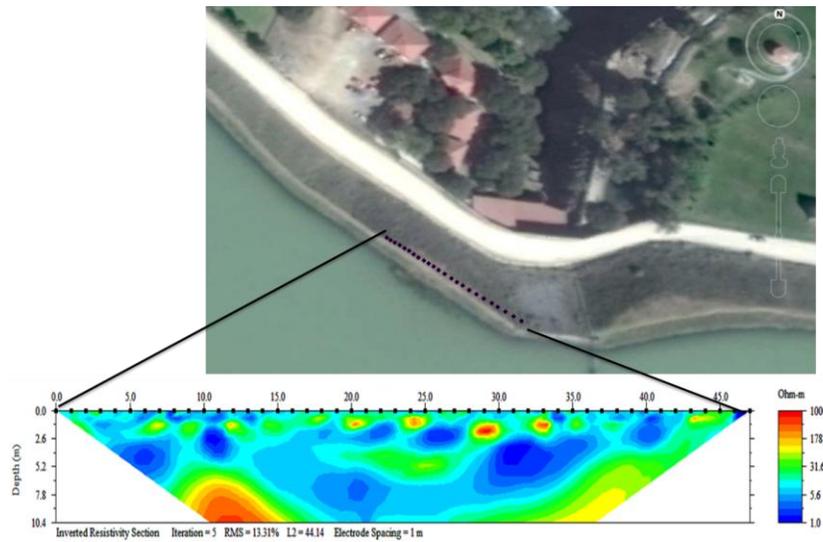
En la parte inferior hemos denotado dos zonas que a continuación describimos:

**Zona 1:** Tiene una altura de 5 m y una longitud de 15 m aproximadamente; se observa un rango de resistividad eléctrica de menos de 10 Ohms m; se localiza en la parte inferior (base) de la TRE.

**Zona 2:** se localiza a una profundidad entre los 3 y 5 m aproximadamente, se extiende por una longitud aproximada de 5 m, su resistividad eléctrica es menor de 10 Ohms m, lo que se puede asociar a zonas con saturación hídrica.

- Se llevó a cabo una TRE, con una profundidad de 10 m aproximadamente y separación entre electrodos de 1m, que corresponde a la zona que presentó afectaciones el pasado mes de julio.

*Huasca zona de reparación*

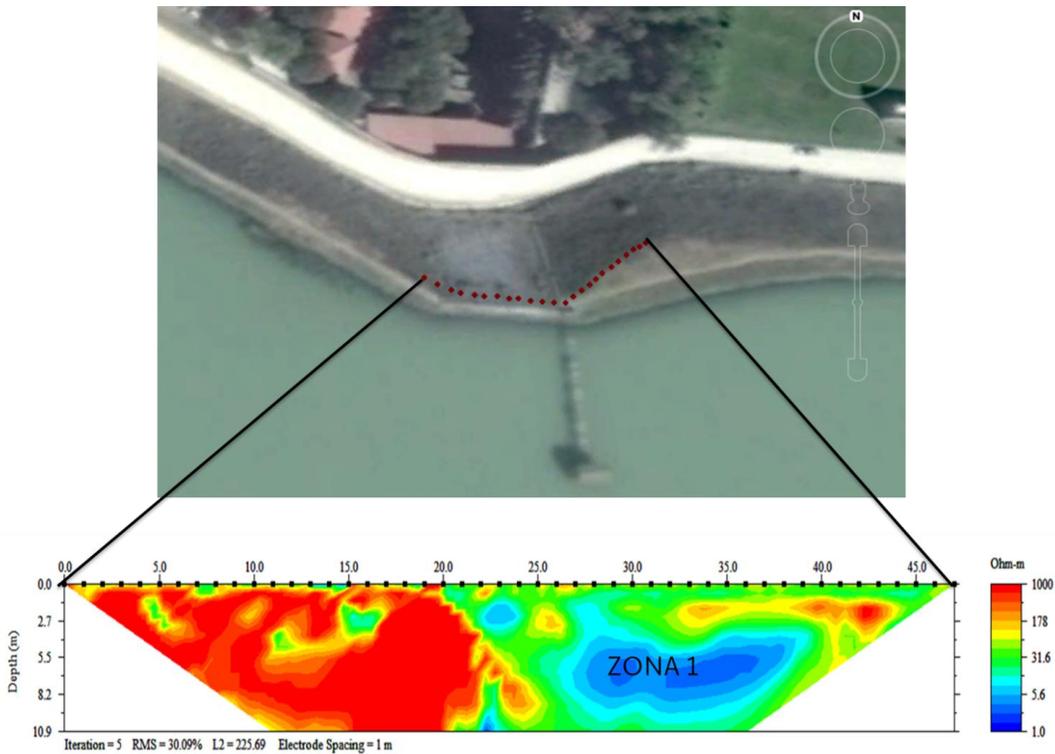


**Figura 10.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En la imagen resistiva podemos observar zonas con baja resistividad eléctrica, se puede asociar a la reparación con arcilla húmeda (color azul) entre mezclada con arcilla seca (color verde) y la cubierta de piedra (zampeado y muro de mampostería, en color amarillo y rojo).

- En la parte de la compuerta se realizó una TRE, con una separación entre electrodos de 1 m y una profundidad aproximada de 10 m.

*Huasca zona de compuerta*



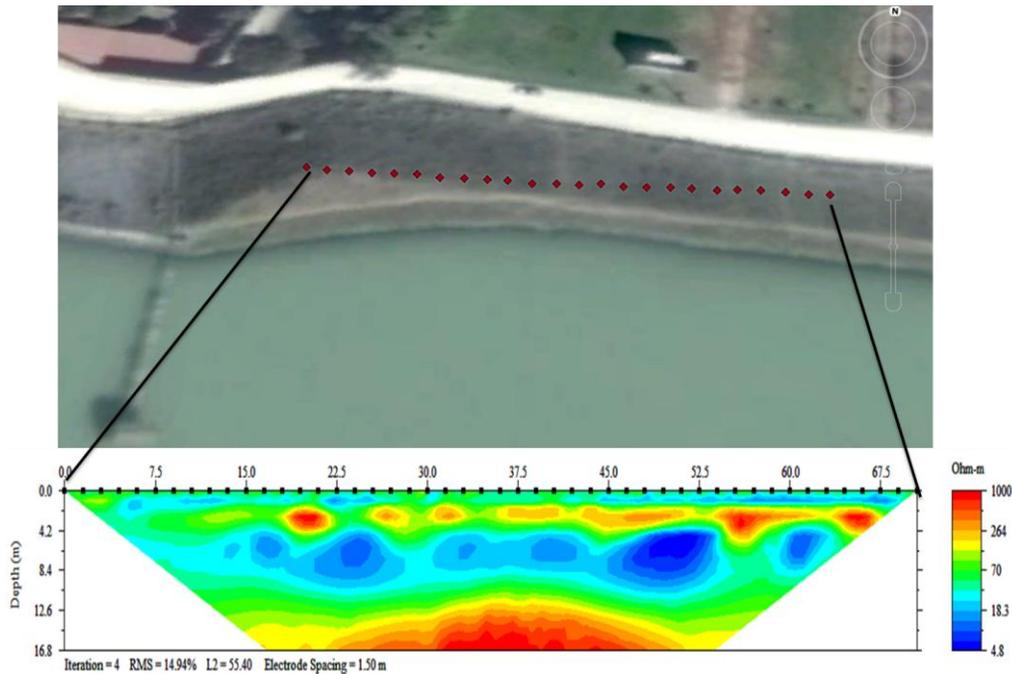
**Figura 11.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En la imagen resistiva podemos observar zonas con alta resistividad eléctrica (color rojo, resistividades eléctricas entre 200 – 1000 Ohms m), corresponde a la capa de mampostería. En color verde y con resistividades eléctricas entre 20 y 150 Ohms m, una zona que se observa con arcillas compactas. En la parte central destaca una zona que a continuación se describe:

*Zona 1:* su cima se localiza a una profundidad de 5 m y su base a 8 m aproximadamente, tiene una longitud de 15 m, su resistividad se puede asociar a una zona de arcillas húmedas,

- Posterior a la compuerta se hizo una TRE, con una separación entre electrodos de 1.5 m y una profundidad de 16 m.

Huasca 1.5 m



**Figura 12.** Croquis de localización de la línea de TRE e imagen resistiva (fuente Google Earth modificada).

En la parte superior de la TRE podemos observar una zona de baja resistividad (color azul); inmediatamente encontramos una zona donde predominan el color rojo asociado a altas resistividades eléctricas envuelta en un material cuya resistividad se encuentra entre los 20 y 100 Ohms, lo cual se puede asociar a arcillas compactas con poca humedad; a una profundidad aproximada a 6 m inicia una capa donde predominan las bajas resistividades y se extiende hasta los 12 m.

En la parte inferior a esta capa se muestra una zona cuya resistividad se puede asociar a arcillas compactas. Inmediatamente en la parte inferior se encuentra una zona de alta resistividad asociado a rocas o mampostería. En esta zona se encuentra una fuga en la parte de la base de mampostería (Figura 12 y 13), la cual erosiona la parte inferior de la base.



**Figura 13.** Croquis de localización de la línea de TRE y la ubicación de la fuga (fuente Google Earth modificada).

### Conclusiones

El método de prospección eléctrica en su arreglo dipolo- dipolo permitió identificar zonas de posibles fugas de manera oportuna; la afectación de la estructura (cortina) fue mínima sin poner en riesgo su funcionalidad; la evaluación fue realizada en lapso de tiempo breve, durante el estudio las actividades de la población beneficiada por la presa trascurrieron de manera cotidiana.

### Referencias bibliográficas

- Andrade, C. y D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Alconpat*, 1 (2): 93-101.
- Auge, M. (2008). *Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea*. Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Constantino R., L. D. (2011). *Método de tomografía eléctrica para determinar estructuras volcánicas, México*. (Tesis inédita de Licenciatura). UNAM. México, D. F.
- Fernández R., D. S, et al. (2012). *Presas con cortina de tierra compactada*. SAGARPA, México.
- Iris Instruments, *ELECTRE Pro software Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Instruments, *Prosys Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Instruments. (2012). *Syscal Pro, User's Manual*. Francia.



Musset, A. y Khan, M. (2000). Looking into the earth. An introduction to Geological Geophysics. Cambridge. United States of America.

Orellana, E. (1972). Prospección geoelectrica en corriente continua. España: Paraninfo.

Perdomo, S. (2009) Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.

Serrano O., J. (2003). Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña. España.