



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Centro de Estudios de Postgrado

**ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS
ELÉCTRICOS Y ELECTROMAGNÉTICOS EN LA
INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS Y PROBLEMAS
AMBIENTALES.**

Alumno/a: González Mesa, Yigani

Tutor/a: Prof. Javier Rey Arrans

Dpto: Geología. Universidad de Jaén.

Tutor/a: Prof. Julián Martínez López

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad de Jaén.

Jaén, 2021.

Con **Dios** está la sabiduría y el poder;
suyo es el consejo y la inteligencia.

Job 12:13

...todo lo que el hombre **sembrare**, eso
también **segará**...

Gálatas 6:7

Dedicatoria

Primeramente, dedico esta tesis a Dios, por permitirme llegar hasta este momento, por darme esa plenitud de paz en los tiempos de tensión, por su gracia y misericordia ante toda adversidad y por su fidelidad, cumpliendo todas sus promesas y haciéndome más que vencedora un día como hoy.

A mi abuela Esperanza, aunque ya no está entre nosotros le dedico todo lo que soy, a mi mamá por su apoyo y amor, por estar siempre conmigo y por acreditar en mí; y a mis hermanitos que los amo, por hacerme sentir un ejemplo a seguir para ellos.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, ese Padre Celestial que tengo, por permitirme coger éste máster y darme las fuerzas necesarias para llegar hasta el final. Por su amor, su paciencia y su paz, las cuales nunca me faltaron, gracias.

Gracias mami, porque de no ser por tus regaños y consejos no hubiese querido llegar hasta el final. Por darle todo tu cariño a tu única hija y sentirte orgullosa de lo que has sembrado en ella.

A mis tutores, gracias profes, por la paciencia y la dedicación ante cada cambio que hubo de la tesis y ante cada urgencia que necesité. Gracias por su atención.

A toda mi familia, apoyándome siempre; le agradezco porque siempre creyeron en mí a pesar de mis locuras.

Agradezco además a mis compañeros de aula y de escuela, en especial a Taiia y Juan, por sus explicaciones y por la paciencia.

A Dayana y Nati amigas del grado, a Yanisbel geofísica de la primera graduación, Pablo geofísico de la segunda graduación, a ustedes que estuvieron ahí ayudándome en todo lo que hiciera falta y dándome ánimo en todo momento y a otros geofísicos del grado, por aclararme dudas.

A los profes del Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana; y el Departamento de Geodesia de la Universidad de Jaén, gracias por sus señalamientos y recomendaciones.

A Greidy, las jimaguas (Yeini y Jenifer), Nápoles, Yoli Andrés, Diame, Cesia, Karlos Abel, por estar todo el tiempo dándome ánimo y aliento para seguir hacia adelante.

A las amistades de mi mamá, a amigos y amigas que directa o indirectamente se preocuparon y contribuyeron a este resultado.

A todos ustedes, Dios les bendice y un millón de gracias.

RESUMEN

Dentro de los métodos de prospección geofísica, los métodos eléctricos y electromagnéticos, resultan ser de los más resolutivos para la realización de investigaciones ambientales. En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación que posibilitan y potencian las aplicaciones de los mismos, tanto para estudios en acuíferos, como en minas y temas medioambientales, entre otros.

Con el objetivo principal de este TFM, es el de realizar un análisis comparativo entre técnicas eléctricas (Tomografía Eléctrica ERT) y electromagnéticas (en el Dominio del Tiempo TDEM) aplicadas a problemas hidrogeológicos y ambientales:

El presente Trabajo Fin de Máster consta de cuatro capítulos, además de las conclusiones y referencias bibliográficas. Cada capítulo constituye una etapa de la investigación; los cuales a su vez están fraccionados en epígrafes y subepígrafes.

El primer capítulo presenta los resultados de la investigación bibliográfica realizada; exponiendo los principales conceptos generales sobre la base teórica de los métodos eléctricos y electromagnéticos en sus distintas modalidades, describiéndose los dispositivos, configuraciones y profundidad de investigación a la ERT y al TDEM.

Los capítulos posteriores presentan la información geológica y geofísica disponible, el equipamiento usado y las tareas a resolver con cada técnica geofísica, el procesamiento y la metodología de interpretación aplicada, para los diferentes casos de estudios.

Teniendo como base toda esta información se muestran los resultados obtenidos en el cuarto capítulo exponiendo la resolución de cada método.

Palabras claves: métodos geofísicos, técnica electromagnética, tomografía eléctrica, investigaciones medioambientales, acuífero.

ABSTRACT

Within the geophysical prospecting methods, the electrical and electromagnetic methods, turn out to be the most decisive for conducting environmental investigations. In recent years, new acquisition, processing and interpretation techniques have been developed that enable and enhance their applications, both for studies in aquifers, as well as in mines and environmental issues, among others.

With the main objective of this TFM, it is to carry out a comparative analysis between electrical techniques (ERT Electrical Tomography) and electromagnetic (in the TDEM Time Domain) applied to hydrogeological and environmental problems:

This Master's Final Project consists of four chapters, in addition to the conclusions and bibliographic references. Each chapter constitutes a stage of the investigation; which in turn are divided into headings and subheadings.

The first chapter presents the results of the bibliographic research carried out; exposing the main general concepts on the theoretical basis of electrical and electromagnetic methods in their different modalities, describing the devices, configurations and depth of research to the ERT and the TDEM.

Later chapters present the geological and geophysical information available, the equipment used and the tasks to be solved with each geophysical technique, the processing and the interpretation methodology applied, for the different case studies.

Based on all this information, the results obtained in the fourth chapter are shown, exposing the resolution of each method.

Keywords: geophysical methods, electromagnetic technique, electrical tomography, environmental investigations, aquifer.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
1.Métodos geofísicos	12
1.1 Métodos geoelectricos.....	13
❖ Dispositivos y configuraciones.....	16
1.1.1 Tomografía Eléctrica (ERT).....	18
➤ Principios Generales del método.....	18
➤ Adquisición de datos	19
➤ Profundidad de Investigación.....	20
➤ Procesamiento de datos.....	21
1.2 Métodos Electromagnéticos.....	25
1.2.1 Método electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM)	28
➤ Principios Generales del Método.....	29
➤ Configuraciones y dispositivos.....	30
➤ Profundidad de investigación.....	31
➤ Adquisición de datos	33
➤ Procesamiento de datos TEM (Tratamiento).....	33
CAPÍTULO II: TÉCNICAS TDEM Y ERT EN INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS	35
2. Aplicación de técnicas TDEM y ERT en la investigación de Acuíferos.....	35
CAPÍTULO III: TÉCNICAS TDEM Y ERT EN LA INVESTIGACIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES.....	43
3. Aplicación de técnicas TDEM y ERT en la investigación de Problemas Ambientales	43
3.1 Investigación de Intrusiones Marinas	43
3.2 Investigación de Presas Mineras y Vertederos	50
3.3 Investigación de otros Problemas Ambientales	56
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
4. Resultados y discusiones	61
4.1 Análisis de las técnicas TDEM y ERT en la investigación de Acuíferos	61
4.2 Análisis de las técnicas TDEM y ERT en la investigación de Problemas Ambientales	62
CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de dispositivos geoelectricos.	17
Figura 2. Profundidad media de investigación en función de los parámetros geométricos del dispositivo.....	20
Figura 3. Ejemplos de detección de puntos atípicos en las medidas de campo.....	22
Figura 4. Esquema de la disposición de los aparatos en el campo.	23
Figura 5. Pseudosección de la distribución de resistividades reales del subsuelo. ..	24
Figura 6. Esquema general del campo electromagnético.....	30
Figura 7. Bajada de resistividades por la presencia de agua.....	36
Figura 8. Modelo 3D de la distribución de resistividad del subsuelo en el suroeste de Fogo.....	37
Figura 9. Perfiles de resistividad y ubicación respectiva en el noreste de Santo Antão.	38
Figura 10. Modelo interpretativo de la superficie del nivel freático en el noreste de Santo Antão. La ubicación del perfil está marcada con una línea roja en el mapa geológico.....	38
Figura 11. Ubicación del área de estudio	39
Figura 12. Perfil de tomografía eléctrica 2D con pseudosección aparente, modelo de resistividad interpretado y sección de sensibilidad relativa. La resistividad del registro se incluye en la posición del pozo exploratorio con el propósito de una comparación directa.....	40
Figura 13. Modelo geoelectrico 1.....	41
Figura 14. Modelo geoelectrico 2.....	41
Figura 15. Secciones del modelo de resistividad inversa calculadas para las pseudosecciones del modelo geoelectrico 1 y 2. Ambas pseudosecciones dan como resultado modelos inversos muy similares.....	42
Figura 16. Sección geológica a lo largo del perfil de tomografía eléctrica, definida sobre la base de datos geofísicos y de pozo	42
Figura 17. Esquema gráfico de la interfase agua dulce agua salada.	43
Figura 18. Comportamiento geoelectrico de cada fase.....	44
Figura 19. Área de estudio.....	45
Figura 20. (a) Vista general de los perfiles TDEM en el área de estudio, (b) 5 perfiles N-S detrás de la presa y (c) 3 perfiles N-S enfrente de la presa hacia el mar y 2 perfiles E-O.....	45
Figura 21. Sección 2D del perfil central detrás de la presa AlKhod.....	46
Figura 22. Distribución de la resistividad con profundidad en el nivel superior de la presa AlKhod hacia el mar	46

Figura 23. Gráfica 3D TDEM, que muestra la distribución de la resistividad con la profundidad en la parte norte del área de estudio cerca del mar, correlacionada con el registro de conductividad eléctrica de una esquina SE del área de estudio	46
Figura 24. Distribución de resistividad lateral con profundidad en la parte norte del área de estudio hacia el mar	47
Figura 25. Distribución de resistividad lateral con profundidad en aguas abajo que muestra el efecto de sedimentación cerca de la superficie.....	47
Figura 26. Área de estudio.....	48
Figura 27. Estudio de los SEV.	49
Figura 28. Resultado de la tomografía eléctrica.....	49
Figura 29. Zona afectada por el agua salada.	50
Figura 30. Comportamiento geoelectrico de una presa minera con agua y sin agua.	51
Figura 31. Perfil electromagnético multicanal.	52
Figura 32. Mapa de anomalías de la primera derivada vertical.	53
Figura 33. Modelo geológico interpretado.....	53
Figura 34. Ubicación geográfica del área de estudio	54
Figura 35. Perfil tomográfico de la balsa Monte Romero.....	55
Figura 36. Perfil tomográfico de la balsa La Nava	55
Figura 37. Perfil de TDEM.....	57
Figura 38. Corte horizontal de resistividad aparente	57
Figura 39. Área de estudio.....	58
Figura 40. Perfil de tomografía de resistividad eléctrica. Configuración Wenner-Schlumberger.	59
Figura 41. Parte superior: trazas del parcelario que sugieren la existencia de un meandro abandonado en el paraje de Santa Cruz (VMS) y localización del perfil de tomografía eléctrica. Parte inferior: Sección de resistividades aparentes 2D del perfil N° 13.....	60

INTRODUCCIÓN

Mediante la aplicación de métodos de exploración geofísica es posible obtener información sobre la distribución espacial de una o más propiedades físicas (susceptibilidad magnética, contrastes de densidad, conductividad y permitividad eléctrica) en el interior de la tierra, a partir de un conjunto limitado de mediciones de campos físicos (Telford et al, 1990).

Durante la última década, se ha producido una notable adecuación en la aplicación de técnicas geofísicas en la resolución de estudios.

En este trabajo nos centraremos en dos técnicas de prospección geofísica, la tomografía eléctrica y el método electromagnético, y su aplicación en la investigación de acuíferos y problemas ambientales.

Con respecto a los métodos eléctricos, partimos de la premisa que la resistividad real para un medio determinado cambia en todas las direcciones debido a la anisotropía y heterogeneidad del subsuelo. La resolución de estos casos generales implica considerar en el planteamiento y en la resolución del problema una mayor cantidad de variables, no tomadas en cuenta en los métodos utilizados en 1D los cuales la consideran constante en cada estrato o capa del subsuelo. Para poder modelar al subsuelo con una distribución arbitraria de resistividades y tomar en cuenta también la variación de otros parámetros que influyen notoriamente en ella, se utiliza para su cálculo los métodos de elementos finitos y de diferencias finitas. A través de estos algoritmos se puede optimizar la interpretación de los estudios geoeléctricos, pudiéndose obtener la respuesta de ambientes geológicos y anomalías complejas, las cuales no pueden ser solucionadas satisfactoriamente considerando modelos de distribución de resistividad en una (1D) o a veces en dos dimensiones (2D) (Aracil et al, 2005).

Concretamente, la prospección eléctrica de resistividades mediante corriente continua ha experimentado un notable avance con la aparición de sistemas automáticos de adquisición de datos y programas informáticos para la obtención de imágenes del subsuelo con estimación de la distribución real de la resistividad en una sección del terreno (Aracil et al, 2005).

La implantación de dispositivos eléctrico-resistivos para la localización de contactos entre materiales del subsuelo se ha venido utilizando con éxito desde 1950, si bien las técnicas modernas permiten establecer cada vez más la aproximación entre los resultados obtenidos y la verdadera disposición de los materiales en el subsuelo. Con todo, el éxito de una campaña de investigación geofísica de resistividad mediante las diferentes técnicas eléctricas depende en gran medida de múltiples factores, tales como la selección de la configuración tetraelectródica más sensible para el propósito a estudiar, la determinación de un espaciado interelectródico adecuado para el objetivo a localizar, la densidad y número de medidas o, por supuesto, la interpretación de los resultados. De este modo, se puede decir que la investigación dará buenos resultados o

fracasará estrepitosamente en función de diversas decisiones que han de tomarse desde el inicio de una campaña de prospección (Orellana, 1982).

Por otro lado, los métodos electromagnéticos vienen siendo utilizados desde hace décadas proporcionando información precisa del subsuelo a diferentes escalas. De este modo, las técnicas electromagnéticas aerotransportadas se utilizan con frecuencia en la investigación de reconocimiento de grandes áreas a veces poco accesibles, mientras que las técnicas electromagnéticas convencionales son aplicadas en la investigación de yacimientos minerales y aguas. Finalmente, las que utilizan altas frecuencias se pueden utilizar en estudios geotécnicos y arqueológicos para localizar objetos enterrados, (Nabighian, 1988 GeologiaWeb, 2020).

Hoy en día, la mayoría de las aplicaciones de los métodos electromagnéticos de superficie se concentra en la exploración de minerales y agua subterránea o en el mapeo medioambiental somero. No obstante, la adquisición de registros electromagnéticos o eléctricos es la técnica principal utilizada en la exploración de petróleo para medir el volumen de hidrocarburos presentes en los poros de los yacimientos subterráneos. Los métodos electromagnéticos (EM) inductivos incluyen una diversidad de técnicas de baja frecuencia (que abarcan desde algunos Hz a varios kHz), que despliegan cables de bobina grandes o pequeños en la superficie o cerca de ésta. (Oilfield Glossary, 2020).

De acuerdo a este enfoque, se van a exponer los aspectos fundamentales de los métodos más habituales en los trabajos de **investigación de acuíferos y problemas ambientales**. La temática a cubrir expone, de manera práctica, las técnicas que actualmente se están utilizando en el campo de la exploración eléctrica, en lo referente a la Tomografía Eléctrica y en los métodos electromagnéticos, en el dominio del Tiempo (TDEM).

Con el objetivo de:

Analizar técnicas eléctricas y electromagnéticas, en sus distintas variantes y dispositivos, permitiendo elegir la más adecuada para cada problema hidrogeológico o ambiental concreto.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se procederá a explicar los métodos geofísicos a comparar, sus bases teóricas, las distintas técnicas geofísicas disponibles, sus configuraciones de medición, la adquisición de datos en campo y su procesamiento.

1. Métodos geofísicos

La prospección geofísica puede describirse como un conjunto de técnicas que permiten efectuar un diagnóstico indirecto del subsuelo a partir de la interpretación de unos datos que son resultado de unas mediciones, o bien, se puede definir como una rama de la física aplicada que se ocupa del estudio de las estructuras internas de la Tierra y de la localización, en ésta, de cuerpos delimitados por el contraste de alguna de sus propiedades físicas con las del medio circundante, en ambos casos a partir de mediciones realizadas en superficie, o en el interior de sondeos (Martínez,2006).

Cuando hablamos de la Geofísica hay que tener en cuenta que existen dos ramas principales:

La Geofísica Pura o física de la Tierra sólida, la cual a partir de los fenómenos físicos observados se deducen las propiedades físicas de las diferentes capas del globo terrestre hasta los 6371 km de profundidad del centro de la misma.

Geofísica Aplicada o prospección Geofísica, se centra en la investigación de los primeros kilómetros (0-10 km) del subsuelo, para la exploración o búsqueda de sustancias o estructuras que sean útiles para el hombre.

La prospección geofísica ha ganado un importante lugar en el campo de las ciencias de la tierra para resolver diversos problemas asociados a las condiciones físicas y mecánicas de las estructuras geológicas del subsuelo, tales como; la exploración de las aguas subterráneas, el monitoreo de plumas de contaminación, la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales geológicos, la ubicación de cavidades o contactos verticales que puedan poner en peligro una obra civil, estudios de intrusión salina, reconocimientos de zonas de rellenos, entre otros (González, 2011).

Las diferentes técnicas disponibles para la prospección geofísica en superficie pueden clasificarse en siete grandes grupos:

- métodos gravimétricos
- métodos magnéticos
- métodos sísmicos
- métodos radiométricos
- métodos geotérmicos

- métodos geoeléctricos
- métodos electromagnéticos

considerando también la testificación geofísica para la obtención de registros geofísicos o diagráfias, como otra gran rama de la prospección geofísica para ser aplicada en sondeos (Martínez,2006).

Para el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster nos centraremos en los métodos geoeléctricos y electromagnéticos, los cuales se expondrán a continuación.

1.1 Métodos geoeléctricos

Los primeros estudios se deben a Gray y Wheeler, cuando en 1720 realizaron medidas de resistividad en rocas, tabulando sus resultados.

Posteriormente, en 1746, el descubrimiento de que la Tierra actuaba como un conductor se debe a Watson, que consiguió medir una corriente errática que pasaba a través de dos electrodos hincados en el terreno conectados por un cable y separados varios kilómetros, observando que cuando se cerraba el circuito el flujo era diferente.

El uso comercial de los métodos eléctricos se debe a Marcel y Conrad Schlumberger en 1913, cuando durante la Primera Guerra Mundial lo aplicaron en la detección de minas y boyas marinas (Manilla, 2003). Los trabajos de los hermanos Schlumberger, propiciaron el uso de las técnicas eléctricas a partir de los años veinte del siglo pasado en la prospección e investigación de yacimientos minerales. En 1930, la contribución hecha por el rumano Sabba Stefanescu, supuso un gran desarrollo de la teoría de la exploración eléctrica por corriente continua al desarrollar el método de cálculo de los campos eléctricos de fuentes puntuales en terrenos estratificados horizontalmente. En este mismo sentido, en 1943 el ruso Andrei Tikhonov también contribuyó de forma importante en el desarrollo teórico de los métodos eléctricos de corriente continua al estudiar la resolución del problema inverso para los datos geoeléctricos (Martínez, 2006).

A partir de esta época, la prospección eléctrica por corriente continua se centró, principalmente, en la ejecución e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) y calicatas eléctricas (CE). En los años 1970 aparece una nueva forma de presentar los datos de la prospección eléctrica por corriente continua y fue bajo la forma de pseudosecciones. Sin embargo, hubo que esperar hasta principios de los años de la década de 1990 con el importante desarrollo de los medios informáticos y electrónicos, y la implementación de algoritmos de inversión lo que dio lugar a los métodos de tomografía eléctrica 2D y 3D (Martínez, 2006).

La prospección eléctrica se emplea actualmente, de una manera habitual en múltiples campos de investigación; hidrogeología, exploración minera, caracterizar la fracturación, detectar cavidades o estructuras heladas, obtener imágenes 2D sobre intrusiones de agua salada en el subsuelo, detectar la presencia de vestigios arqueológicos, estudiar la estructura de los suelos y de

la superficie próxima, estudiar la contaminación de acuíferos por fuentes antrópicas, investigaciones sobre depósitos de estériles mineros, o incluso delimitar las descargas de los vertidos contaminantes en el subsuelo y revelar su evolución en el mismo (Martínez, 2006).

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas, con la finalidad de detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El principio de medida consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada (Gasulla, 1999).

La finalidad de una prospección geoeléctrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie de la resistividad aparente, lo que nos informa sobre las estructuras que subyacen en él.

La prospección geoeléctrica se divide en:

- Métodos de campo natural
- Métodos de campo artificial

Dentro de los métodos de *campo natural* se encuentra, el método de **Potencial Espontáneo (PE)** conocido también como campo eléctrico natural está basado en la observación de los campos eléctricos creados por las fuerzas eléctricas naturales de procedencia electroquímica, generadas por filtración y adsorción-difusión (Díaz, 2014). Por tal razón, el método no requiere de electrodos de alimentación, solo de medición. En la práctica no se emplean los electrodos metálicos convencionales por su gran polarización, lo cual perturbaría el valor del potencial espontáneo, sino electrodos impolarizables.

Aunque es uno de los métodos más antiguos de los métodos eléctricos sigue empleándose en la actualidad con gran eficacia. Tiene aplicación en grandes campañas de prospección de yacimientos de minerales metálicos, en la cartografía geológica y estudios en los procesos de filtración y movimiento de las aguas (Díaz, 2014).

Para los de *campo artificial* está el método de **Perfilaje Eléctrico** o también llamado Calicatas Eléctricas (CE), el cual reside en desplazar un dispositivo electródico, con dimensiones fijas, a lo largo de un perfil, para estudiar las variaciones laterales de la resistividad a una profundidad constante. Esto lo

hace idóneo para la ubicación de contactos verticales, tales como fallas, fracturas, etc., o bien cuerpos y estructuras que presentan heterogeneidades laterales de resistividad (Gasulla, 1999). Orellana (1982) resalta que la zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad aproximadamente constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

La utilización de este método ha dado buenos resultados en la delimitación de las zonas de fallas, zonas brechificadas y arcillosas, zonas cuarcificadas, piritizadas, presencia de grafito y otras, contactos verticales en general y objetos o estructuras enterradas y en estudios de estructuras para la búsqueda de yacimientos diapiros, anticlinales, sinclinales, depresiones y otras (Gasulla, 1999).

El **Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)**, consiste en aumentar la abertura entre los electrodos A y B de un cuádruplo AMNB, dejando fijos los electrodos M y N, así como el punto O de medición, de tal forma que se pueda estudiar la variación vertical de la resistividad ρ_a en función de la distancia $L=AB/2$. El aumento de la abertura de los electrodos A y B hace que las líneas de corriente penetren en profundidad en el subsuelo (Orellana, 1978).

Estos permiten tener una visión general de las unidades geoeléctricas y litológicas en el subsuelo del área bajo estudio hasta una determinada profundidad; además de identificar la presencia de zonas eléctricamente conductoras que pueden estar asociadas a la presencia de agua subterránea e incluso de contaminantes; decidir la conveniencia de efectuar o no pozos o perforaciones, y en caso afirmativo señalar la ubicación y profundidad más favorable (Orellana, 1978).

En las mediciones de resistividad, cuando se envía corriente al terreno, a menudo se observa un significativo retraso en el establecimiento del campo estable, por lo cual, para efectuar las mediciones se debe considerar un tiempo de espera que depende de la longitud de la línea y de la resistividad aparente.

De igual modo, cuando se interrumpe la corriente abriendo el circuito externo, el voltaje observado en la superficie del terreno no cae inmediatamente a cero. Este efecto se conoce como **Polarización Inducida (PI)** (Marín et al, 2017).

El método de la PI ha encontrado su principal aplicación en la búsqueda y exploración de yacimientos de minerales metálicos, principalmente de cobre, plomo, cinc, hierro. También se ha aplicado en los estudios hidrogeológicos y en las investigaciones ambientales, y con menor empleo en la exploración petrolera (Díaz, 2014).

Cuando se requiere realizar una investigación detallada 2D, el proceso se vuelve muy lento, pues se necesitan realizar varios SEV o varias CE a lo largo de un perfil.

Y es cuando surge en la década de los 90 precisamente para realizar la adquisición automática de los datos de resistividad utilizando un gran número

de electrodos, separados a igual distancia unos de otros, la **Tomografía Eléctrica (ERT)** (Díaz, 2014).

Los datos de resistividad aparente adquiridos en el campo son procesados automáticamente mediante herramientas informáticas, las que a través de un proceso iterativo aproximan la sección medida del subsuelo a un modelo teórico real. El resultado final es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad eléctrica real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos (Díaz, 2014).

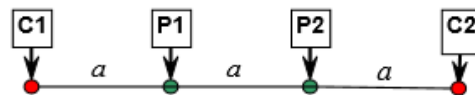
Esta técnica ha suscitado un interés creciente en ámbitos de la ingeniería civil e hidrogeología.

❖ **Dispositivos y configuraciones**

Para adquirir información sobre un parámetro físico característico, se pueden llevar a cabo diferentes técnicas, las cuales varían según la distribución que requiera ésta.

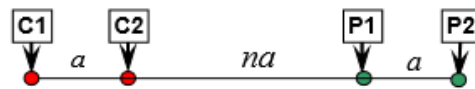
Se conoce como “Dispositivo Geoeléctrico” al conjunto de electrodos que inyecta corriente en el subsuelo y registra el potencial generado en el mismo. Generalmente los dispositivos suelen disponer de cuatro electrodos, aunque también suelen emplearse los dispositivos de tres o de sólo dos electrodos.

Los diferentes tipos de dispositivos empleados en el método geoeléctrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En la Figura 1 se muestran los dispositivos empleados con mayor frecuencia: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo (Rodríguez, 2004).



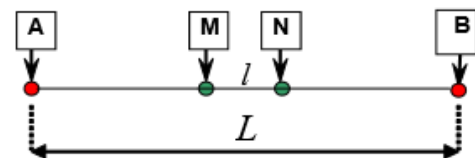
$$\rho_a = 2a\pi \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO WENNER



$$\rho_a = a\pi \cdot n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO DIPOLO-DIPOLO



$$\rho_a = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{\Delta V}{I}$$

DISPOSITIVO SCHLUMBERGER

Figura 1. Tipos de dispositivos geoeléctricos (Rodríguez, 2004).

Dispositivo Wenner.

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden C1P1P2C2. El sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de la separación interelectródica “a” simétricamente con respecto al centro del dispositivo que permanece fijo (Gasulla, 1999).

Dispositivo Schlumberger

Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos de potencial MN es mucho menor que la de los inyectores de corriente AB (Figura 1). En la práctica, $AB > 5MN$. Dado el dispositivo Schlumberger, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectores A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos entorno a un punto central fijo. En este sondeo el efecto de las heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos inyectores A y B (Gasulla, 1999).

Existe un dispositivo mixto denominado Wenner-Schlumberger, dispositivo híbrido entre un Wenner en su sentido estricto y un dispositivo gradiente, es decir, aquel que posee una distancia MN suficientemente pequeña como para

respetar la hipótesis matemáticas y suficientemente grande como para que la medida del potencial pueda ser realizada (Martínez, 2006).

Dispositivo dipolo-dipolo

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden C1C2P1P2 formando así un doble dipolo (Figura 1), también conocido como dispositivo dipolo-dipolo. Este dispositivo se implementa normalmente con $n \gg 1$ (entonces C1C2 y P1P2 se comportan como un dipolo de corriente y de tensión respectivamente). Dado el dispositivo doble dipolo, el sondeo consiste en la separación creciente de los centros de los dipolos respecto a un punto fijo origen (Gasulla, 1999).

1.1.1 Tomografía Eléctrica (ERT)

La Tomografía eléctrica es un método de resistividad multielectrónico, basado en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas.

La aparición de la Tomografía eléctrica ha supuesto un salto cualitativo espectacular con respecto a los métodos de resistividad convencionales, técnicas que, aunque se han estado utilizando durante varias décadas, su limitada resolución 1D y 2D les confería en general un papel secundario frente a otras (Serrano, 2003).

Este avance se debe fundamentalmente a dos razones (Serrano, 2003):

- En primer lugar porque estos métodos convencionales solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno (proceso relativamente lento y pesado). En cambio, el método de Tomografía eléctrica es una técnica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.

Esto nos permitirá poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2D de gran resolución.

- En segundo lugar porque el empleo de técnicas numéricas nos permitirá poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información.

➤ Principios Generales del método

El objetivo de este método se basa en obtener una sección 2D de resistividades reales del subsuelo.

Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el que transformar las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real (Serrano, 2003).

Independientemente de que la Tomografía eléctrica sea una técnica multielectrónica, la base teórica de su funcionamiento es análoga al de los métodos de resistividad convencionales.

Partiendo de estos conceptos básicos, la gran innovación del método de Tomografía eléctrica con respecto a los métodos convencionales, reside en que

cómo se ha indicado anteriormente, ahora todas las medidas se realizarán de forma totalmente automatizada, es decir sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo. Ello se debe a que por un lado trabajaremos con un gran número de electrodos en el terreno (dispuestos equiespaciadamente), y por otro lado a que nuestro dispositivo de medida de resistividades, se encargará de realizar automáticamente toda la secuencia de medidas preestablecida, formando para ello y según las especificaciones predefinidas, todas las posibles combinaciones de 4 electrodos.

De esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente (Serrano, 2003).

Descripción de los componentes del equipo de campo

➤ **Adquisición de datos**

En primer lugar, se procede a colocar los electrodos en superficie de forma equiespaciada, intentando siempre que formen una línea recta. Se deben definir cuál es el origen y final del perfil a fin de no tener problemas en la fase de interpretación. Se intentará además que la topografía del terreno sea lo más plana posible para evitar tener fenómenos anómalos en las medidas de resistividad. En el caso que esto sea inevitable, el software permite minimizar este fenómeno mediante el ajuste de la malla.

Los electrodos se clavarán en el terreno lo suficiente como para garantizar un buen contacto electrodo-suelo. A través del resistivímetro y el software de campo "RESECS32" configuraremos todas las variables del dispositivo: número de electrodos utilizados, distancia entre ellos, dispositivo electródico de medida, así como el número de medidas que queremos realizar (destacar que podemos suprimir aquellas medidas que creamos oportunas, aspecto que supone un ahorro de tiempo significativo) (Serrano, 2003).

Como se ha comentado, una adquisición 2D emplea en general un gran número de electrodos conectados a un cable multiconductor, colocados según un perfil. La secuencia de medidas se habrá programado en el resistivímetro, que, con una unidad de conmutación, selecciona automáticamente los electrodos empleados para la inyección de la corriente y la medida del potencial.

Ya que existen distintas variables de configuraciones de electrodos, el dispositivo Wenner-Schlumberger, es moderadamente sensible a estructuras horizontales y verticales, por lo que suele utilizarse con frecuencia, aunque cabe decir que las configuraciones dependerán del objetivo a buscar.

Concluida la configuración, antes de iniciar las mediciones, se procede previamente a la verificación de que todas las conexiones funcionen correctamente, y que la resistividad entre electrodo-suelo es suficientemente baja como garantizar unos buenos resultados y se inicia la secuencia de medidas que se haya predeterminado, proceso que tardará más o menos tiempo en función del número de medidas a realizar, tiempo de inyección, ciclos de medidas, etc. (Serrano, 2003).

➤ Profundidad de Investigación

Se han definido distintos procedimientos matemáticos para determinar la profundidad de investigación de los distintos métodos geoelectricos. Algunos autores han considerado que la profundidad no depende de la resistividad aparente medida.

Diversos autores han empleado la función de sensibilidad, para determinar las propiedades penetrativas de los distintos tipos de dispositivos geoelectricos en problemas bidimensionales. El valor de pseudoprofundidad está basado en los valores de sensibilidad de la derivada de Frechet para un semiespacio homogéneo, y puesto que este método parece tener una base matemática, es el método que se emplea para representar pseudosecciones de los valores de resistividad aparente obtenidos en campo. En este sentido, se han publicado unas tablas (Figura 2) en las que se estima la profundidad media de investigación “ Z_e ”, en función de los parámetros geométricos del dispositivo:

Donde “ Z_e ” es la profundidad media de investigación, “ L ” la longitud del dispositivo geoelectrico, “ n ” es el factor de separación y “ a ” corresponde al espaciado entre electrodos (Rodríguez, 2004).

Tipo de Dispositivo	n	Z_e / L	Z_e / a
Wenner	-	0,173	0,519
Dipolo-Dipolo	1	0,139	0,416
	2	0,174	0,697
	3	0,192	0,962
	4	0,203	1,220
	5	0,211	1,476
	6	0,216	1,730
	7	0,220	1,983
	8	0,224	2,236
Polo-Polo	-	-	0,867

Figura 2. Profundidad media de investigación en función de los parámetros geométricos del dispositivo (Rodríguez, 2004).

La profundidad a la que se sitúa cada medida de resistividad es un tema de cierta ambigüedad, dado que ésta no solo depende de la disposición de los electrodos (más espaciados mayor profundidad), sino también de la propia resistividad del terreno.

Como primer paso, se procede a situar cada medida a una profundidad aparente, que corresponde a la profundidad de investigación óptima en el caso de un terreno homogéneo. Posteriormente el programa de inversión no solo transformará las resistividades aparentes a reales, sino también situará cada medida a su profundidad real (Serrano, 2003).

En la práctica, y una vez definidos los parámetros de estudio, el software nos permite visualizar la distribución lateral y en profundidad de todas las medidas a lo largo del perfil, de forma que, en función de nuestras exigencias, podremos adecuar la profundidad máxima aparente de investigación eliminando los puntos de medida que creamos conveniente.

El dispositivo electródico también influye en la profundidad máxima de investigación. En este sentido con Wenner-Schlumberger se consigue un aumento del 10-15% (Serrano, 2003).

Se concluye que, incrementando el valor del espaciado entre electrodos se incrementa la profundidad de investigación, pero se pierde resolución, ya que, al haber mayor separación entre electrodos, los puntos de la pseudosección estarán más separados.

Es importante señalar, que lo expuesto es estrictamente válido solamente para subsuelos homogéneos, pero constituye una buena aproximación en la planificación de campañas de reconocimientos geoelectricos (Rodríguez, 2004).

➤ **Procesamiento de datos**

Nuestro objetivo es obtener un modelo 2D de resistividades reales a partir de la pseudosección de resistividades aparentes obtenida del terreno.

La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es una relación compleja, por lo que, para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la “inversión”.

El objetivo de la inversión geofísica es, como se acaba de indicar, el de encontrar un modelo de distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, que genere una respuesta similar a los valores de resistividad aparente medidos. Las relaciones matemáticas entre los valores de resistividad aparente medidos y la resistividad verdadera del subsuelo se obtienen a partir de métodos de elementos finitos o diferencias finitas.

El procedimiento de generación de una tomografía eléctrica mediante inversión, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de pseudoperfil (Rodríguez, 2004).

Los perfiles de tomografía eléctrica aún no invertidas se representan habitualmente bajo la forma de pseudosecciones (secciones eléctricas del subsuelo expresadas en resistividades aparentes) y con la ayuda de un programa informático de inversión se consigue representar el modelo de resistividades reales.

La rutina de inversión de los datos se realiza con el programa RES2DINV, basada en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado. El modelo bidimensional usado por el programa de interpretación RES2DINV divide la superficie del terreno en bloques rectangulares. La resistividad calculada se asigna a cada uno de los bloques de la pseudosección de resistividades, hasta hacerla coincidente con la medida (Pellicer, 2015).

El programa permite visualizar las medidas obtenidas a fin de poder eliminar posibles valores erróneos (se distinguen por presentar valores muy diferenciados al de los puntos adyacentes). (Figura 3)

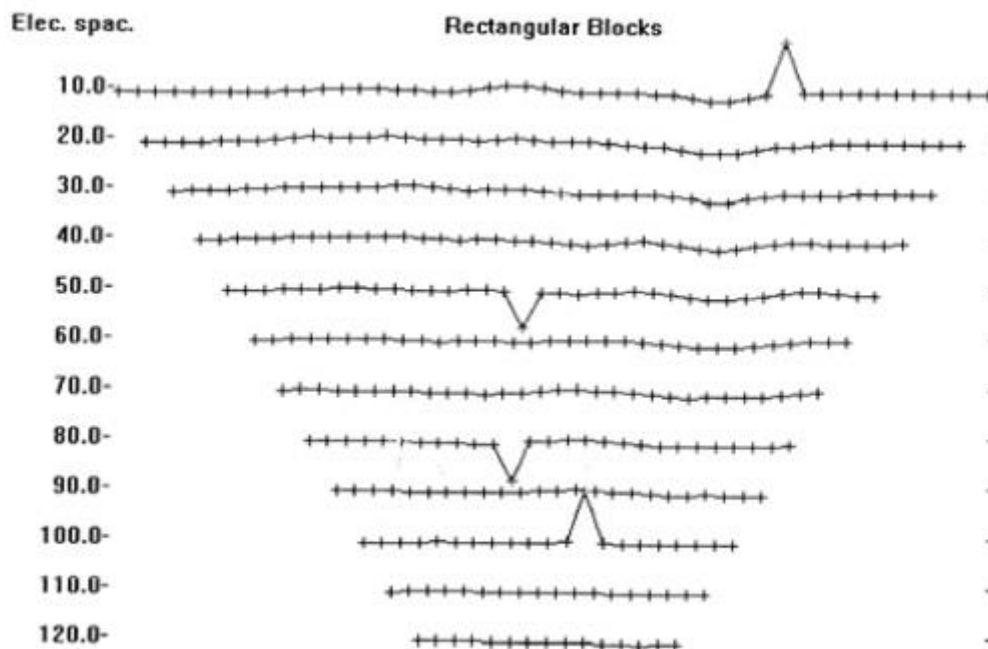


Figura 3. Ejemplos de detección de puntos atípicos en las medidas de campo (Pellicer, 2015).

Para los dispositivos Wenner y Schlumberger, el espesor del primer nivel de bloques se establece como 0,5 veces el espaciado entre electrodos. Para el Polo-Polo, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo, los espesores son de 0.9, 0.3 y 0.6 respectivamente. El espesor de la capa más profunda se aumenta normalmente un 10% o 25%, aunque el usuario puede elegir otro valor distinto. Como se ha comentado, el método de optimización intenta básicamente reducir la diferencia entre los valores de resistividades aparentes calculada y la medida, mediante el ajuste de la resistividad del modelo de bloques y cabe destacar que antes de realizar la inversión de los datos con el software RES2DINV, es necesario realizar una serie de ajustes para conseguir una inversión de los datos más refinada (Pellicer, 2015).

Otra opción importante antes de realizar la inversión de los datos es aplicar el factor de amortiguamiento. Dicha opción se utiliza si los datos obtenidos en campo presentan una gran cantidad de ruido. Dicho factor puede seleccionarse por el usuario entre unos valores de 0,1 y 0,3 escogiéndose la menor cuando haya una buena relación señal/ruido. La introducción de este valor es importante para poder estabilizar el proceso de inversión.

El programa permite elegir entre el método de elementos finitos (M.E.F.) y el método de diferencias finitas (M.D.F.) (que es más rápido) para calcular los

valores de resistividad aparente y trabaja con o sin él logaritmo de la resistividad aparente, por defecto el programa utiliza el del logaritmo (Pellicer,2015).

Para mejorar el proceso de inversión de los datos; cuando los valores de sensibilidad del modelo de bloques se encuentran distorsionados por grandes variaciones de resistividad, se puede combinar con los métodos de Marquardt y/o Occan de inversión, que mejoran las distorsiones, ya que cuanto mayor sea el valor de la sensibilidad, será más fiable el valor del modelo de resistividad. Esta opción debe usarse sólo si el resto de operaciones no consiguen unos datos con una calidad suficiente.

En el proceso de adquisición de datos se dispusieron 56 electrodos de medida a lo largo de una línea recta y se conectaron a una unidad central de medida o resistivímetro mediante el cable multicanal compuesto por cuatro secciones de 14 electrodos. El resistivímetro se coloca en el centro del dispositivo tal y como se observa en la Figura 4 (Pellicer,2015).

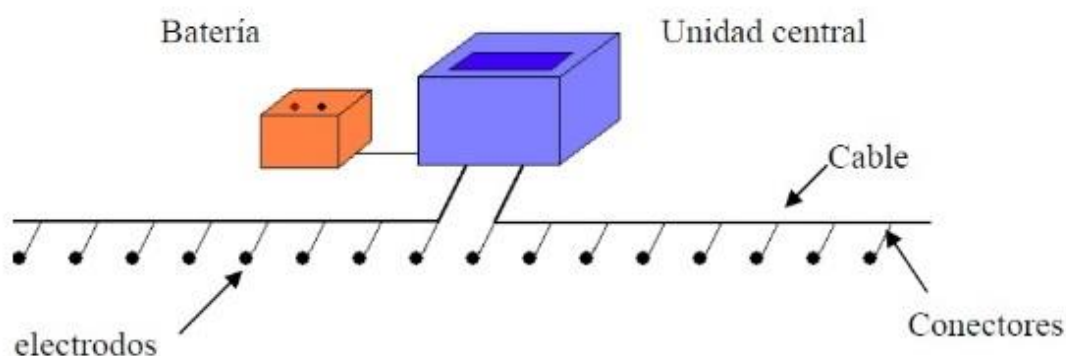


Figura 4. Esquema de la disposición de los aparatos en el campo (Pellicer,2015).

El resistivímetro, que posee un software para medidas de campo, tiene programada la secuencia de medidas predefinida y creada bajo la forma de un fichero de texto, que define la secuencia de los electrodos de corriente y potencial activos para cada inyección de corriente. Previamente a que el resistivímetro empiece la recopilación de datos sobre las resistividades del terreno, se realiza un test de resistencia de contacto entre los electrodos y el terreno. Si esta resistencia no es muy alta se procede con la adquisición de los datos. Se consideran óptimos para la correcta inyección de corriente al terreno y por lo tanto para el desarrollo del ensayo de tomografía eléctrica, los valores de resistencia inferiores a 2.000Ω . A lo largo de la adquisición, el resistivímetro selecciona automáticamente, y según la secuencia de comandos de medida predefinida, la posición de los pares de electrodos encargados de la inyección de corriente y de los pares encargados de medir la diferencia de potencial (Pellicer,2015).

Una pseudosección proporciona una imagen muy aproximada de la distribución de resistividades reales del subsuelo. Sin embargo, esta imagen (Figura 5) es

una distorsión del subsuelo ya que depende, además de la distribución de las resistividades también del dispositivo de medida empleado, por lo que resulta ser un modelo la distribución de las resistividades reales del subsuelo. Por ello, es importante no emplear la pseudosección de resistividades aparentes como una imagen segura de la resistividad real del subsuelo.

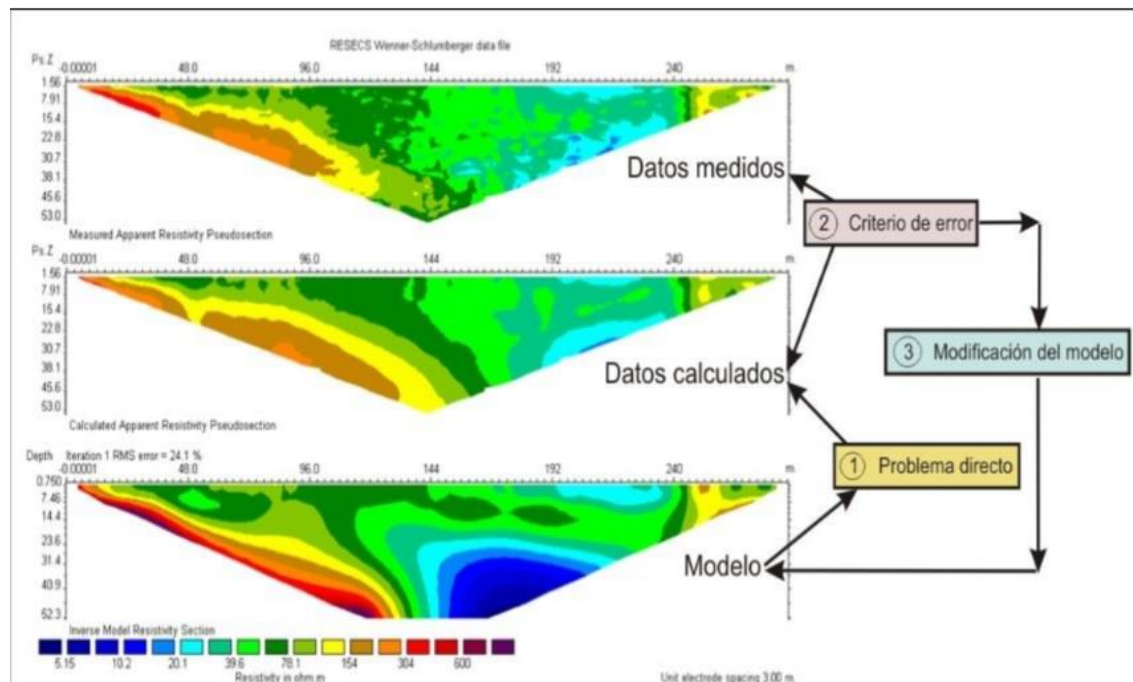


Figura 5. Pseudosección de la distribución de resistividades reales del subsuelo (Martínez,2006).

Con la tomografía eléctrica 2D se resuelve en gran medida el inconveniente que tienen las técnicas geoelectricas convencionales (sondeos eléctricos verticales y calicatas eléctricas), en cuanto a que es capaz de ofrecer una imagen invertida (algoritmos iterativos de mínimos cuadrados) de las resistividades reales del subsuelo, aunque éste posea una geología compleja (fallas, fluidos, cambios de facies, etc.) con cambios laterales y verticales de resistividad. Por ello, esta técnica resulta ser una buena herramienta que facilita enormemente la interpretación de estructuras geológicas más o menos complejas (Martínez, 2006).

Debido a que las estructuras geológicas son realmente objetos 3D y, no una simplificación de la naturaleza en 2D, cabe pensar que la aplicación de la tomografía eléctrica 3D debería ofrecer mejores resultados. Este tipo de adquisiciones todavía no ha alcanzado el grado equivalente de desarrollo que tiene la tomografía eléctrica 2D. Además, una adquisición 3D demanda la adquisición y procesado de muchísimos más datos y, ello conlleva un coste y un consumo de tiempo más elevados, aunque actualmente se trabaja para conseguir mejor aplicabilidad de este método:

El procedimiento descrito para las adquisiciones de tomografía eléctrica 2D se mantiene válido para la tomografía eléctrica 3D. No obstante, en esta ocasión los electrodos se disponen siguiendo una malla cerrada cuadrada o rectangular. La forma y dimensiones de la malla pueden variar en función del objeto a estudiar, siendo el espaciamiento interelectrónico idéntico según los ejes x e y del dispositivo.

Es también posible el hecho de obtener modelos 3D a partir de una combinación de perfiles paralelos de tomografía eléctrica 2D, cuya separación será igual al espaciamiento entre los electrodos, que posteriormente serán combinados con el programa para obtener un bloque 3D de resistividad.

Los modelos tridimensionales son modelos complejos, que se emplean para problemas muy específicos en los que no es suficiente una modelización 2D, pero se prevé grandes resultados en un futuro (Martínez, 2006).

1.2 Métodos Electromagnéticos.

Históricamente, el desarrollo de las técnicas electromagnéticas comenzó en los años 20 en los países Escandinavos, Estados Unidos y Canadá para la detección de yacimientos metálicos. Hasta los años 60 prácticamente todos los equipos electromagnéticos se basaban en la medición en una frecuencia determinada; serían los primeros equipos de sondeos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia (Cimadevilla, 2017).

La investigación de métodos inductivos (la inducción electromagnética es la producción de corrientes eléctricas por campos magnéticos variables con el tiempo) comienza a desarrollarse en Rusia en los años 80. Aseveran que las primeras investigaciones por parte de la URSS comenzaron en el año de 1958, atribuyéndoles, en el año de 1960, la creación de la modalidad bobina simple, el cual utilizaba un transmisor y receptor en un mismo lazo. No obstante, fue hasta mediados de la década de los ochenta que el método se perfeccionó más exhaustivamente, como resultado de los avances tecnológicos y a la problemática que presentaban los métodos en el dominio de la frecuencia al penetrar recubrimientos conductores; por lo que a partir de 1985 se empezó a aplicar en la geología, ingeniería y temas medio ambientales (Arango, 2018).

La prospección electromagnética es especialmente útil en la exploración de acuíferos colgados, cartografiado de contaminantes industriales, medición de salinidad e intrusión marina. Sus mayores ventajas sobre los métodos de corriente continua son la mayor sensibilidad a pequeñas variaciones de resistividad, las mediciones se pueden hacer más rápidamente y facilitan las investigaciones a mayor profundidad, además; son más efectivos en la detección de cuerpos conductores que de resistivos. Dentro de ellos, la variedad de sondeos electromagnéticos en el dominio temporal es menos influenciados por efectos laterales y son de especial ayuda en la delimitación del contacto de sedimentos aluviales con el basamento, cartografiado de lentes arenosos, así como de la interfase agua dulce/agua salada (Arias et al, 2003).

Los métodos electromagnéticos constituyen el grupo de mayor diversidad tanto en metodologías como en instrumental, resultando ser herramientas eficaces a la hora de abordar una gran variedad de problemas.

La esencia de los métodos electromagnéticos inductivos es la variación en tiempo de un campo magnético, denominado campo primario. Acorde a las ecuaciones de Maxwell, este campo genera un flujo de corriente en todos los conductores presentes en el subsuelo. A los campos magnéticos asociados al decaimiento de las corrientes de inducción, a menudo son referidos como el campo secundario. En particular, el campo secundario contiene la mayoría de la información sobre la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo, debido a que las corrientes de inducción son diferentes para los diferentes materiales de la Tierra. Por tanto, el objetivo de estos métodos es extraer esta información y dar una interpretación pertinente de la distribución de resistividad eléctrica en función de la profundidad (Arango, 2018).

Este campo y el campo secundario asociado, son registrados con ayuda de un receptor en varios puntos en el espacio. No obstante, a medida que el conductor se encuentre a mayor profundidad, el campo magnético secundario será cada vez más débil, razón por la cual, puede ser complicado detectar un campo secundario en presencia de un campo primario mucho más fuerte, pero el método EM en el dominio del tiempo es una alternativa muy eficaz para detectar campos secundarios débiles. Esto simplemente, apagando de manera repetitiva la corriente del transmisor y observando el decaimiento del campo secundario.

Los métodos geofísicos en corriente variable pueden ser agrupados, ya sea en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo (Arango, 2018).

Dentro del conjunto de técnicas electromagnéticas de *campo uniforme* se encuentra el **Método Magnetotelúrico (MT)**, técnica geofísica que consiste en medir simultáneamente en un mismo punto de la superficie de la Tierra las variaciones temporales naturales de los campos eléctrico y magnético. El resultado es producir una sección de resistividad (Carraz, 2014).

Desarrollado originalmente para el estudio de cuencas sedimentarias (ambientes geológicos relativamente simples, con predominio de la estratificación horizontal).

Otra técnica es el **Método Radiomagnetotelúrico (RMT)**, miden la fase y la resistividad aparente con el fin de generar un estimado de la resistividad en el subsuelo. Hoy en día, el método RMT es ampliamente utilizado en investigaciones poco profundas, debido a la alta resolución lateral y/o vertical que se alcanza (Carraz, 2014).

El Método Audiomagnetotelúrico (AMT) es una técnica electromagnética que utiliza corrientes y tormentas eléctricas que ocurren de manera natural en la

ionosfera (fuentes pasivas de energía) para mapear eléctricamente estructuras geológicas hasta profundidades de 500 metros o más (Introducción, 2015).

Otra técnica es el **Método Audiomagnetotelúrico de Fuente Controlada (CSAM)** el cual emplea los sistemas de registro convencionales del audiomagnetotelúrico (AMT), pero con señales generadas por un transmisor de gran potencia (fuente artificial) que incrementa la intensidad de la señal.

El tipo de transmisor depende del levantamiento a realizar. En la exploración profunda generalmente se emplea un cable de 1-2 km con los extremos enterrados. En la exploración superficial se trabaja con un dipolo magnético horizontal (DMH) (Carraz, 2014).

El **Método Very Low Frequency (VLF)** es una técnica electromagnética que emplea transmisores militares de gran potencia para producir campos electromagnéticos. En realidad, se trata de un método de inducción pasivo, que utiliza una fuente externa artificial, debido a que los campos electromagnéticos de muy baja frecuencia son generados por transmisores muy distantes, aunque en algunos textos se considera el método VLF como un método de fuente natural.

Además de detectar la presencia de cuerpos conductores (como fallas llenas de minerales arcillosos), este método también es muy sensible a cambios laterales en facies (contactos litológicos muy diferentes) (Carvalho et al, 2007).

Otros métodos de campo uniforme son el **Método AFMAG (Audiofrequency Magnetic)**, basado en el estudio de los campos magnéticos de audiofrecuencias producidos por las descargas eléctricas en las tormentas que aparece en las zonas tropicales y subtropicales. Aunque el método fue creado originalmente para la detección de cuerpos de sulfuros masivos, ha encontrado una gran aplicación en la cartografía de sistemas de fallas y grietas de gran extensión (Carraz, 2014); y el **Método TURAM**, el cual utiliza dos bobinas, generalmente horizontales, que se trasladan punto a punto. Ideal para la detección de yacimientos poco profundos y con buzamiento, a una profundidad de investigación hasta 200 o 300 metros (Carraz, 2014).

Y dentro del conjunto de técnicas electromagnéticas de *campo móvil* se encuentra el **Sistema Slingram**, técnica geofísica de baja frecuencia que emplean transmisores y receptores móviles. Su aplicación fundamental es la búsqueda de metalizaciones conductoras, por ejemplo, cuerpos de sulfurosos. También en la cartografía geológica, tareas ingeniero geológicas e hidrogeológicas (Carraz, 2014) y los **Sistemas Aéreos**, basados en el desplazamiento sobre un vehículo aéreo del emisor y el receptor sobre el terreno. Aplicable en diversos ambientes geológicos, excepto donde las rocas sobreyacentes son muy conductoras. Útil en la cartografía geológica, así como en una buena variedad de problemas ingenieros (ej. exploración de agua subterránea) (Carraz, 2014).

El **Georadar**, radar de subsuelo o GPR (Ground-penetrating radar) es una técnica relativamente nueva que permite la investigación a poca profundidad del subsuelo. Aunque las primeras aplicaciones del georadar estuvieron orientadas a resolver el grosor de la capa de hielo en los glaciares (Casas, 1998; Annan, 2003). Las aplicaciones del Georadar de subsuelo como técnica ecológica, no destructiva y de alta resolución están ampliamente documentadas, también por la gran versatilidad que lo caracteriza y uno de los desafíos a los que se enfrenta esta técnica es ser capaz de obtener información a mayor profundidad de la que se obtiene actualmente. (Annan, 2003)

1.2.1 Método electromagnético en el Dominio del Tiempo (TDEM)

Dentro de los métodos electromagnéticos existen diferentes clasificaciones de acuerdo a diferentes parámetros, una de ellas es el dominio en el cual se trabaje, el cual puede ser la frecuencia o en el dominio del tiempo. En el caso del dominio de la frecuencia, la corriente varía sinusoidalmente con el tiempo en una frecuencia fija que es seleccionada, la cual se relaciona con la profundidad que se quiera alcanzar. El método utilizado trabaja en el dominio del tiempo, es decir, la corriente en el transmisor se mantiene periódica. En el presente Trabajo Fin de Máster se describe de forma más detallada la manera de operar en el dominio del tiempo conforme avanza el capítulo.

La primera manifestación en el uso del método en el dominio del tiempo viene de Wait en 1951, para la determinación de los parámetros de yacimientos de sulfuros masivos. No fue hasta 1962 cuando se desarrolló por primera vez, de forma satisfactoria, el método Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT), que consistía en un gran transmisor y una antena compacta con varias vueltas, cabe destacar que la técnica SEDT se clasifica dentro de los métodos activos, por lo que es necesario una fuente de energía que estimule una respuesta en el terreno. Utiliza como fuente emisora una señal periódica y amplitud constante que por medio de ciclos de encendido-apagado, en pocos microsegundos; genera, según las leyes de Maxwell, una fuerza electromotriz en el subsuelo (Cimadevilla, 2017).

En 1977 Australia desarrolló el primer sistema TEM (o técnica TEM la cual consiste en construir una espira o bobina con un cable en forma de cuadrado, por la que se deja pasar una corriente continua de gran intensidad que cree un campo magnético primario invariable) con microprocesador de control que operaba con un lazo en la configuración single-loop y ya en los años sucesivos fueron saliendo al mercado diferentes equipos con nuevas posibilidades en el procesamiento de datos y capacidad de investigación (Cimadevilla, 2017).

La utilización de los métodos electromagnéticos en España comenzó en los años 80, con carácter de ensayo en diversos proyectos del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y de otras organizaciones; proyectos de prospección Geotérmica y de otros recursos del subsuelo que incluían la aplicación sistemática de métodos geofísicos y entre ellos el de los Sondeos

Eléctricos Verticales, con serios problemas asociados al efecto de pantallas resistivas (Granda et al).

Las características del nuevo método geofísico en la modalidad Electromagnética de Dominio de Tiempos (TEM) resultaban muy atractivas, para salvar el problema mencionado y en consecuencia se estudió el asunto con el mayor interés, consultando a los expertos extranjeros de mayor prestigio (Granda et al).

En un principio, el método transitorio se limitó exclusivamente a la exploración minera, en la actualidad, se utiliza ampliamente para fines geotérmicos e hidrogeológicos, y en el mapeo geológico general.

Entre las ventajas que ofrecen los sondeos TEM sobre los métodos convencionales de ondas continuas se puede mencionar que: la adquisición en campo es más rápida, posee una mejor resolución lateral, es más sensible a pequeñas variaciones de resistividad, es menos sensible a la topografía, a las heterogeneidades superficiales, y facilita las investigaciones a mayor profundidad. Sin embargo, no exhibe un buen funcionamiento en materiales resistivos muy elevados, y más aún, si son capas muy delgadas. Aunque podemos destacar la capacidad de un mayor poder de penetración y su productividad, ya que pueden medirse entre 30 y 50 sondeos por día de campo (Arango, 2018).

➤ Principios Generales del Método

Para comprender las bases y técnicas de interpretación del método electromagnético es necesario tener conocimiento sobre las herramientas de la teoría electromagnética. Todos los fenómenos electromagnéticos son gobernados por las ecuaciones de Maxwell; y estas se utilizan para realizar una modelación del campo magnético y eléctrico del subsuelo (Telford, 1990; Yáñez, 2017).

El principio operativo del método TDEM (Time domain EM) consiste (Figura 6) en hacer circular cíclicamente, en cortos períodos de tiempo, un campo eléctrico alterno alrededor de una bobina transmisora. Durante el período de conexión se establece un campo magnético estable en subsuelo. Cuando se corta de forma instantánea la corriente que circula por la bobina transmisora (y por tanto cesa el campo magnético primario) el campo EM inducido en el subsuelo causa corrientes parásitas que se propagan tanto a través del terreno como en los conductores próximos. Como consecuencia de pérdidas de resistencia calórica estas corrientes disminuyen con el tiempo, provocando un campo magnético decreciente en la superficie. Como el campo magnético secundario se genera cuando el campo primario está desconectado, puede medirse con relativa facilidad. Cuando en el subsuelo hay cuerpos de conductividad eléctrica elevada, la atenuación de las corrientes parásitas es significativamente menor que en malos conductores. Por tanto, la medida de la relación de decrecimiento del campo secundario proporciona una forma de

detectar la presencia de cuerpos conductores en el subsuelo y estimar su conductividad (Casas, 1998).

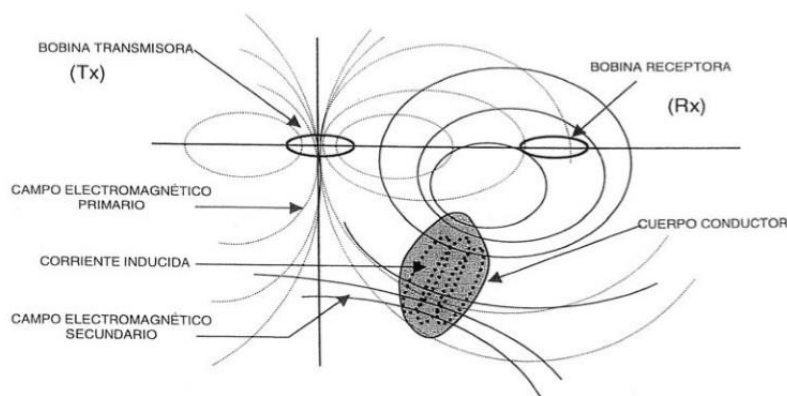


Figura 6. Esquema general del campo electromagnético (Telford et al, 1990).

➤ Configuraciones y dispositivos

El arreglo geométrico que se utiliza en todas las técnicas electromagnéticas inductivas en el dominio del tiempo es una bobina con forma rectangular casi perfecta, la cual sirve como transmisor. Existen varios tipos de arreglos para TEM, que están en función de la configuración que presenten el transmisor y receptor, y son los siguientes:

Bobina simple: La configuración de este arreglo consta de una sola bobina, que se utiliza como receptor y transmisor, donde la bobina actúa como transmisora y fluye la corriente a través de ella. Una vez que se corta la corriente, la bobina mide la señal transitoria durante todo el período en el que el transmisor está en reposo. Las bobinas pueden presentar forma cuadrada o rectangular donde cada lado tiene una longitud que puede variar de 5 a 300 m (Hernández, 2016).

Bobina coincidente: Tiene la misma geometría y respuesta que el arreglo de bobina simple, pero aquí el transmisor y receptor son bobinas independientes que coinciden en tamaño.

Bobinas separadas: Transmisor y receptor se encuentran separados a una distancia fija y las bobinas tienen longitudes de hasta unas cuantas decenas de metros por lado. La variante principal en este arreglo es que el dipolo receptor permanece fijo a una distancia en el exterior de la bobina transmisora.

Bobina central: Es variante de la bobina coincidente; se utiliza como un dipolo múltiple que se coloca en el centro de la bobina transmisora (Hernández, 2016).

Bobina doble: Para este arreglo se utilizan dos bobinas adyacentes y conectadas en paralelo. Con esta configuración se reduce significativamente el ruido causado por fuentes remotas que interfieren con la señal: sin embargo, en zonas donde la conductividad varía lateralmente dicho ruido no se logra reducir.

Transmisor largo fijo con receptor móvil: Consiste en una bobina grande y fija que funciona como transmisora, mientras que el receptor es pequeño y móvil para tomar mediciones a lo largo de líneas perpendiculares a la bobina. La longitud de cada lado de la bobina va de unos cuantos metros hasta un máximo de 2 km, aunque también han sido utilizadas bobinas de hasta 5 km (Hernández, 2016).

TEM en pozo: Es una extensión del arreglo del transmisor fijo, en donde el dipolo receptor se baja a lo largo de un pozo. De esta manera se puede medir a diferentes profundidades la componente del campo magnético transitorio orientada a lo largo del eje del pozo.

➤ **Profundidad de investigación**

En efecto, estimar la profundidad de investigación es de suma importancia para planear e interpretar los sondeos electromagnéticos. No obstante, existen diferentes parámetros, que como sugiere, controlan la profundidad de investigación, como, por ejemplo: la precisión y sensibilidad del instrumento, la complejidad de la sección geológica, la intensidad de la señal y el nivel de ruido ambiental (Nabighian, 1988; Spies, 1989; Arango, 2018).

La profundidad de penetración de un *campo electromagnético* depende de su frecuencia y la conductividad eléctrica del medio a través del cual se está propagando. Los campos electromagnéticos se atenúan durante su paso por el suelo, su amplitud disminuye exponencialmente con la profundidad. La profundidad de penetración se puede definir como la profundidad a la cual la amplitud del campo disminuye en un factor en comparación con su amplitud de superficie (Spies 1989).

La máxima profundidad de investigación en los sondeos TEM está limitada por el tiempo en el cual la señal decae al nivel de ruido, el momento magnético de la fuente y la resistividad del subsuelo.

La profundidad de investigación es proporcional al momento magnético. En líneas generales, la profundidad de investigación es del orden de 2-3 veces el lado del transmisor. Sin embargo, deben de tenerse en cuenta otros factores y se comentan a continuación.

1. Del momento magnético va a depender la capacidad de un campo de alcanzar mayores profundidades.
2. Otro de los factores que afecta a la profundidad de investigación es la conductividad de los materiales. La propagación de campos EM depende de la conductividad/resistividad del terreno. La difusión de campos en medios conductivos es más lenta que en terrenos resistivos (en materiales resistivos se observa mayor decaimiento de la señal).

Se observa como para los mismos tiempos de difusión, la profundidad es menor en terrenos conductivos. Esta relación viene definida a partir del

concepto de profundidad de difusión, concepto que hace referencia al máximo de densidad de corriente en un tiempo determinado (Nabighian, 1988).

$$d = \sqrt{2t/(\mu\sigma)}$$

Donde:

d es la profundidad de difusión (m)

t es el tiempo (s)

μ es la permeabilidad magnética en el vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ en el vacío (Henry/m)

σ es la conductividad en S/m

$$d = 1261,6 \sqrt{t/\sigma}$$

A partir de esta ecuación, si se tiene en cuenta un medio homogéneo, la profundidad de difusión está en función de $\sqrt{t}$, lo que hace que en medios resistivos la velocidad de difusión sea más rápida y por lo tanto sea necesario muestrear en tiempos tempranos (Nabighian, 1988).

El ruido EM es el factor limitante en la profundidad de investigación. En términos generales se encuentra entre 0,1 y 10 nV/m². (Spies, 1989), da la siguiente relación general para la profundidad de investigación teniendo en cuenta el nivel de ruido.

$$d \sim 0.55((I \cdot A)/(\sigma \cdot N_r))^{1/5}$$

Donde:

I es la corriente del transmisor en Amperios

A es el área efectiva del transmisor en m²

σ conductividad del medio en S/m

N_r , nivel de ruido en V/m²

Para un nivel de ruido estándar de 0.5 nV/m²

$$d \sim 40(I A / \sigma)^{1/5}$$

En definitiva, la profundidad de investigación de un dispositivo TDEM aumenta con:

- La superficie del bucle emisor

- La intensidad de corriente inyectada en el bucle de emisión
- El tiempo de medida (dependiente del período T y de la forma de la señal en el bucle de emisión)

➤ **Adquisición de datos**

A la hora de realizar sondeos TEM es necesario tener en consideración algunas especificaciones tales como: lugar donde se realizarán los sondeos, tipo de arreglo que se utilizará, cantidad de puntos que se van a medir, profundidad que se requiere explorar, resistividad que presenta el terreno y geología del terreno.

De lo anterior se puede configurar la medición, utilizando el tamaño y/o forma del loop transmisor acorde a la profundidad que se requiera explorar, la corriente, entre otros parámetros, como el número de vueltas de la bobina. Teniendo en cuenta esto, hay mayor probabilidad de éxito en la obtención de datos para realizar una correcta interpretación (Yáñez, 2017).

Cuando se aplica el método TEM es necesario saber lo siguiente:

- En el caso que se necesite aumentar la profundidad de exploración se debe incrementar el momento magnético ($M=IAN$), donde I es la corriente que circula por el loop, A es el área del loop y N es el número de vueltas de la bobina o espira. Lo anterior se puede realizar de tres formas; La primera es aumentando la corriente, la segunda es aumentando el tamaño del loop transmisor y la tercera es aumentando el número de vueltas de la bobina.
- 1) Esto se puede realizar cuando nuestro loop transmisor no cumple con las necesidades del caso de estudio.
 - 2) Se aplica en caso que las condiciones del terreno sean favorables.
 - 3) Esto se lleva a cabo en casos donde por condiciones topográficas y restricción en el tamaño del loop transmisor no se alcance llegar a la profundidad deseada.
- Cables de alta tensión generan ruido en las mediciones por lo que se recomienda alejarse de esta fuente de ruido (ya que provoca error en las mediciones) (Yáñez, 2017).

➤ **Procesamiento de datos TEM (Tratamiento)**

El procesamiento de datos geofísicos es un procedimiento que tiene como objetivo transformar las mediciones de campo o lecturas crudas, a una distribución de las propiedades físicas en el subsuelo. Para explicar cómo se realiza el procesamiento de datos, se dará un resumen sobre cómo tratar datos de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo obtenidos en campañas de medición (Yáñez, 2017).

1. Los datos almacenados en el instrumento de medición se exportan mediante conexión USB a la computadora.

2. Una vez traspasados los datos en la computadora, son cargados en el programa que viene por defecto con el equipo, el cual es de uso comercial. Estos datos son mostrados en las coordenadas que fueron adquiridos, de no aparecer, se pueden agregar la ubicación.

3. Cada sondeo es interpretado de forma independiente utilizando programas matemáticos complejos, los cuales permiten obtener una relación entre resistividad y profundidad ajustando los valores de la curva del modelo a los valores obtenidos en el campo.

4. Obteniendo el modelo de la curva que mejor se ajusta se tiene un registro apropiado sobre la zona de estudio. Es importante tener noción técnica y experiencia ya que la interpretación de sondeos TEM es más compleja que la de otros métodos de exploración eléctrica (Yáñez, 2017).

5. Por consiguiente, para cada sondeo, se obtiene una sola curva de voltaje inducido en función del tiempo; curva que es transformada por la misma herramienta a una curva de resistividad aparente dependiente del tiempo (Arango, 2018).

Posteriormente, las curvas de decaimiento de voltaje y resistividad aparente de cada sondeo se cargan en el mismo software, en donde, a cada curva se le aplica un segundo proceso de edición para erradicar los voltajes asociados con resistividades aparentes fuera de tendencia.

Los valores finales de resistividad aparente de cada sondeo se invierten suponiendo modelos unidimensionales suavizados y de capas, obteniendo un modelo para cada sondeo de la distribución de resistividad eléctrica con respecto a la profundidad. (Arango, 2018).

Es decir, los procedimientos de interpretación generalmente utilizan "modelado directo". Se genera un modelo hipotético de tierra estratificada y luego se calcula la respuesta teórica para ese modelo. Luego, el modelo se refina hasta que la respuesta calculada coincide con el campo observado o medido. Los refinamientos del modelo se pueden realizar mediante un proceso iterativo automatizado o "inversión"

En concepto, la "resistividad aparente" es la resistividad de una tierra uniforme que producirá la respuesta observada del instrumento. Sin embargo, el campo TDEM observado es una función no lineal del tiempo y la resistividad de la tierra. De hecho, la respuesta del instrumento no es una función de valor único de la resistividad en el rango de tiempo de medición. Para la mayoría de los sondeos TDEM usamos una resistividad aparente de "etapa tardía", que es una resistividad aparente "verdadera" solo para la última etapa de la curva de caída. Por lo general, tratamos de realizar mediciones en este rango de tiempo, pero a menudo la primera parte de la curva no se encuentra realmente en la etapa tardía, por lo que los valores numéricos pueden no indicar la resistividad de la tierra para las primeras puertas de tiempo (Rowland et al, 2002).

El modelado y la inversión de datos TEM suelen ser análisis unidimensionales. La suposición 1D es razonable para este estudio dada la naturaleza de la geología regional, es decir, una estratigrafía relativamente simple que se puede aproximar por capas horizontales y propiedades eléctricas asociadas, huella compacta del método TEM, y profundidad de investigación limitada (Matthew et al, 2014)

Actualmente, una de las principales debilidades de TDEM es la dificultad para interpretar datos sobre estructuras geológicas tridimensionales. La mayoría de los programas de modelado asumen una tierra con capas horizontales. Sin embargo, con los pequeños bucles de transmisión que se utilizan para la mayoría de las aplicaciones de aguas subterráneas, geotécnicas y ambientales, la tierra a menudo se puede aproximar con precisión como una tierra en capas sobre las dimensiones del sondeo. Las aplicaciones mineras de TDEM utilizan diferentes técnicas de modelado que a menudo asumen un conductor restringido en un medio más resistivo (por ejemplo, un cuerpo de mineral dentro de una roca huésped resistiva). Estas aplicaciones permiten el modelado tridimensional restringido (Rowland et al, 2002).

CAPÍTULO II: TÉCNICAS TDEM Y ERT EN INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS

Algunos métodos geofísicos de prospección resultan de gran utilidad para comprender el proceder del agua subterránea. Entre estos, la tomografía eléctrica (ERT) y el transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM). En el presente capítulo se muestran casos de aplicación de las técnicas para la investigación de acuíferos, evidenciando su poder resolutivo en el área de estudio.

2. Aplicación de técnicas TDEM y ERT en la investigación de Acuíferos

TDEM

A través de los años se ha demostrado que los métodos electromagnéticos funcionan muy bien para las investigaciones hidrogeológicas. Estos métodos permiten mostrar la distribución de las rocas en subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la resistividad. Son varias las investigaciones donde se ha podido observar heterogeneidades debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturación de la roca, donde además la presencia del agua provoca cambios importantes en la resistividad eléctrica medida (Guevara et al, 2017).

En este sentido, el método electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM) ha sido empleado de forma satisfactoria en la prospección de aguas subterráneas. Un ejemplo es el estudio realizado en las islas de Fogo y Santo Antao de Cabo Verde, titulado, Prospección Acuífera en Islas Volcánicas mediante levantamiento electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM):

Caso de Estudio de las Islas Fogo y Santo Antao de Cabo Verde (Martínez-Moreno et al, 2016).

Esta región está formada por lava basáltica con intercalaciones de capas sedimentarias y piroclásticas. Presenta un basamento formado por rocas volcánicas intrusivas del Plioceno. En esta investigación se empleó el método TDEM, utilizando el equipo TDEM-Fast48. Las mediciones fueron adquiridas empleando con bucle único, combinando transmisor y receptor, con medidas del bucle de 50x50 metros o 100x100 metros dependiendo de las características del terreno y la profundidad que se pretende alcanzar. Este método permitió alcanzar una profundidad de investigación de alrededor 250 metros en la isla Fogos, con unas dimensiones de bucle de 100 x100 metros. Mientras que en Santo Antao se logró una profundidad de investigación de alrededor de 100 metros con unas dimensiones de bucle de 50 x 50 metros. Para cada una de estas configuraciones se pudo obtener una señal geoelectrónica de la zona superior del acuífero.

Como resultado de este estudio se descubrieron en la isla de Fogo altas resistividades hasta los primeros 100 metros, lo que indica la ausencia de agua en este tramo. La presencia de agua aparece por primera vez a los 150 metros, donde se advierten bajas resistividades (ver Figura 7). Estas resistividades se van haciendo más bajas a medida que se va descendiendo en profundidad (ver Figura 8). Sin embargo, en las zonas topográficas más bajas, el nivel freático se encuentra entre los 100 y 150 metros de profundidad, mientras que en las más altas se encuentra entre los 250 metros. Al extrapolar esta tendencia a la costa, el acuífero se puede encontrar a profundidades menores de 100 metros, mientras que cerca del borde la caldera se localiza a mayores profundidades.

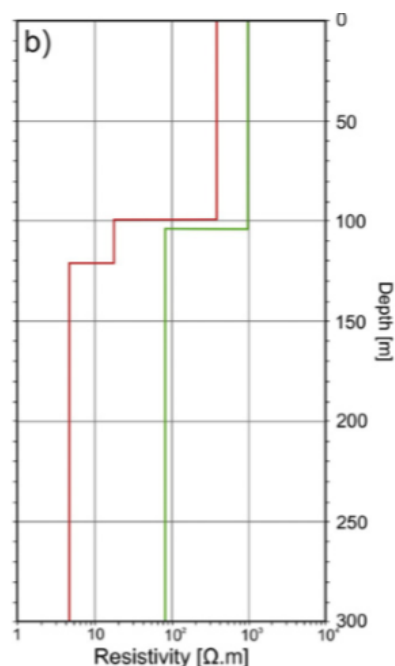


Figura 7. Bajada de resistividades por la presencia de agua (Martínez-Moreno et al, 2016).

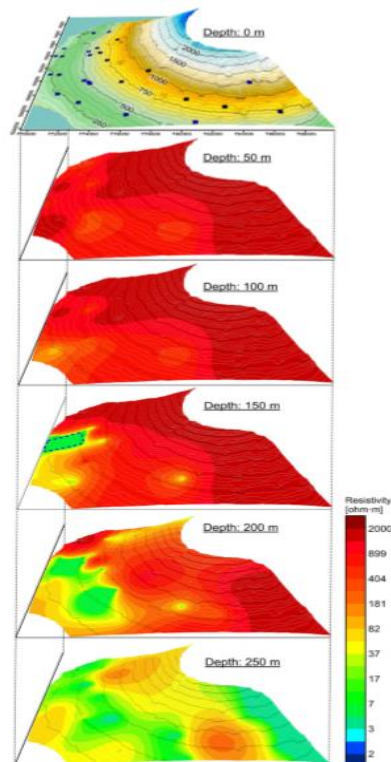


Figura 8. Modelo 3D de la distribución de resistividad del subsuelo en el suroeste de Fogo (Martínez-Moreno et al, 2016).

Las capas muestran la resistividad cada 50 metros de profundidad hasta 250 metros. Los puntos azules en la superficie del mapa topográfico muestran la ubicación de las estaciones TDEM. La línea discontinua azul indica el área que debe interpretarse con precaución debido a los efectos del kriging (Martínez-Moreno et al, 2016).

En el caso de Santo Antao se realizaron perfiles localizados en las vertientes norte y sur del área. En la pendiente norte el acuífero se encontraba más somero que en el sur. En este caso, los datos de TDEM permitieron detectar una importante intrusión salina en los perfiles ubicados en el norte del área, así como estimar la geometría del acuífero principal. En las figuras 9 y 10 se muestran los modelos interpretativos del acuífero en el suroeste y noreste respectivamente en Santo Antao.

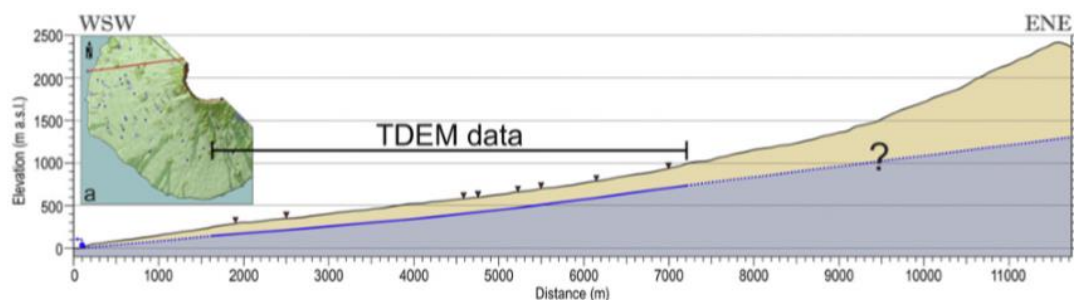


Figura 9. Perfiles de resistividad y ubicación respectiva en el noreste de Santo Antão (Martínez-Moreno et al, 2016).

Las líneas punteadas superiores indican la ubicación de la capa freática y las inferiores marcan la interfaz agua dulce-agua salada.

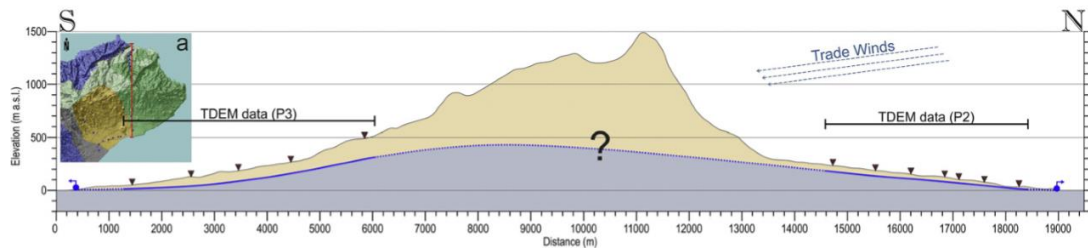


Figura 10. Modelo interpretativo de la superficie del nivel freático en el noreste de Santo Antão. La ubicación del perfil está marcada con una línea roja en el mapa geológico (Martínez-Moreno et al, 2016).

En este estudio, a partir del empleo de estos métodos se logró un modelo de aproximación de la distribución del acuífero en esta zona. Por lo que se puede decir que en este caso el método de TDEM fue una buena solución para este problema, ya que, mediante el estudio de las resistividades, no solo se logró determinar de forma aproximada la profundidad del acuífero, sino también su geometría. Sin embargo, se hace necesario el empleo de otros métodos geofísicos que ofrezcan un mayor detalle a esta investigación.

ERT

Un método que también funciona muy bien en el estudio de acuíferos es la tomografía eléctrica (ERT). Este método permite diferenciar entre distintas litologías de rocas, así como la calidad del agua contenida en ellas, ya que un aumento en la mineralización del agua, se traduce en una disminución de la resistividad, como es el caso de intrusiones salinas. Por estos motivos durante décadas se han aplicado, de manera satisfactoria, estos métodos para este tipo de estudios. Un ejemplo es la investigación realizada por Franjo Sumanovac en el 2005, con el título: Cartografía de acuíferos de arenas finas usando sísmica de reflexión de alta resolución y tomografía eléctrica 2D. En este caso se utilizan varios métodos geofísicos compuestos por sondeos eléctricos, tomografía eléctrica, sísmica de reflexión y datos de pozos. Este estudio se realiza en la cuenca Panonian (ver Figura 11).

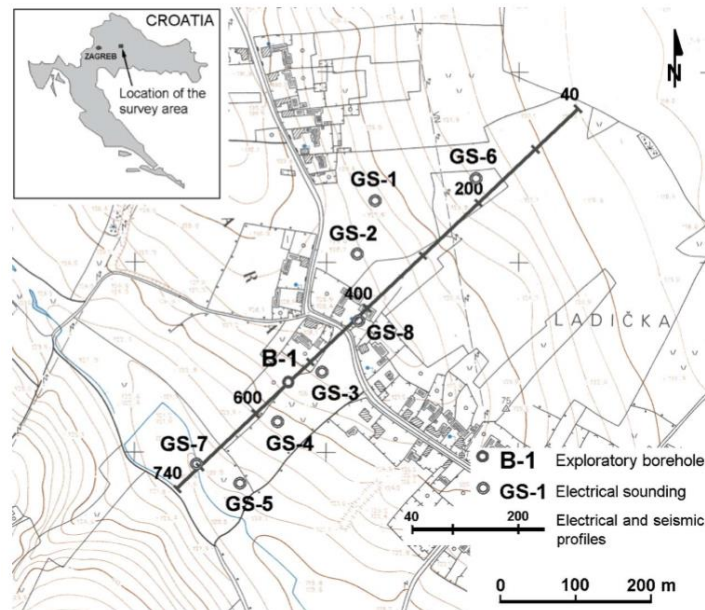


Figura 11. Ubicación del área de estudio (Sumanovac, 2005).

Esta área se encuentra compuesta por una mezcla de arenas, arcillas y limos, estos dos últimos componen los sedimentos superficiales, con edad Cuaternario, sedimentos aluviales del Holoceno (10 metros de espesor), limos del Pleistoceno (40 metros de espesor), sedimentos del Plioceno y calizas y rocas metamórficas del Terciario. Los acuíferos se encuentran formados por capas finas de arenas en un paquete de sedimentos arcillosos. En el área se definen dos unidades litoestratigráficas: Rhombodia y Abichi. Rhombodia se encuentra compuesta por arcillas, margas arcillosas y finos granos de arena, que pueden encontrarse desde pocos metros hasta 500 metros de espesor, mientras que Abichi contiene margas, arenas y margas arenosas y su espesor oscila entre los 100 y 200 metros de espesor.

Para esta investigación se realizó el sondeo eléctrico con el dispositivo Schlumberger, con una distancia máxima de medio electrodo ($AB/2$) de 1000 metros. Por otro lado, la tomografía eléctrica se realizó usando un arreglo Wenner con un espaciamiento entre electrodos de 20, 40, 60, 80, 120, 160 y 200 metros y una longitud del perfil de 700 metros. En el caso de la investigación sísmica, la misma se realizó con un gran offset, debido a que la profundidad a la que se encontraba el objetivo era mayor de 40 metros (Sumanovac, 2005).

A partir de la tomografía se definieron tres zonas en la vertical. La primera se encuentra cerca de la superficie, hasta los 10 metros, donde es posible observar una intercalación de altas y bajas resistividades, generalmente presentes en los extremos del perfil, mientras que en el centro las resistividades son muy bajas. La segunda zona se encuentra entre los 10 y los 40 metros de profundidad, donde se observan bajas resistividades (5-30 ohm.m) y grandes cambios laterales. La tercera zona se extiende hasta los 100 metros, con resistividades entre 30 y 60 ohm.m (Figura 12).

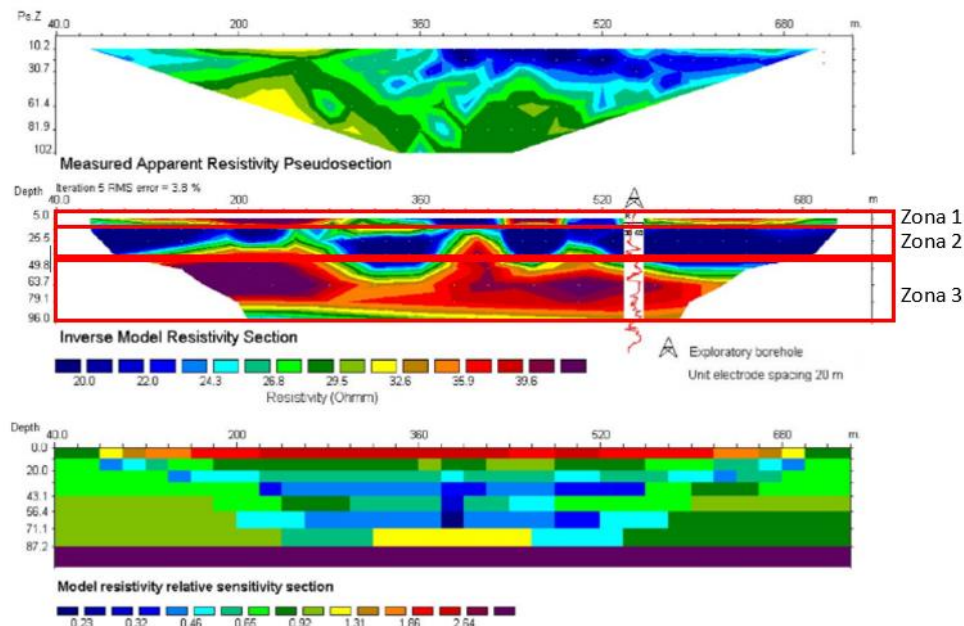


Figura 12. Perfil de tomografía eléctrica 2D con pseudosección aparente, modelo de resistividad interpretado y sección de sensibilidad relativa. La resistividad del registro se incluye en la posición del pozo exploratorio con el propósito de una comparación directa (Sumanovac, 2005).

Se realizaron 2 modelos eléctricos. En el primero se definió una capa masiva de arenas o arcilla limosa (Figura 13), mientras que en el segundo se propuso la existencia de arcillas hasta la profundidad de 40 metros y la intercalación de capas finas de arena y arcilla desde los 40 a los 100 metros de profundidad (Figura 14). Ambos modelos mostraron la misma respuesta resistiva al realizar la inversión (Figura 15). Sin embargo, desde el punto de vista hidrogeológico, el segundo modelo se ajusta mejor a las condiciones de un acuífero. Para resolver esta duda se empleó el método sísmico, el cual puede discriminar mejor entre los modelos, además puede brindar resultados en profundidades mayores de 100 metros. El mismo arrojó que el segundo modelo era el más adecuado.

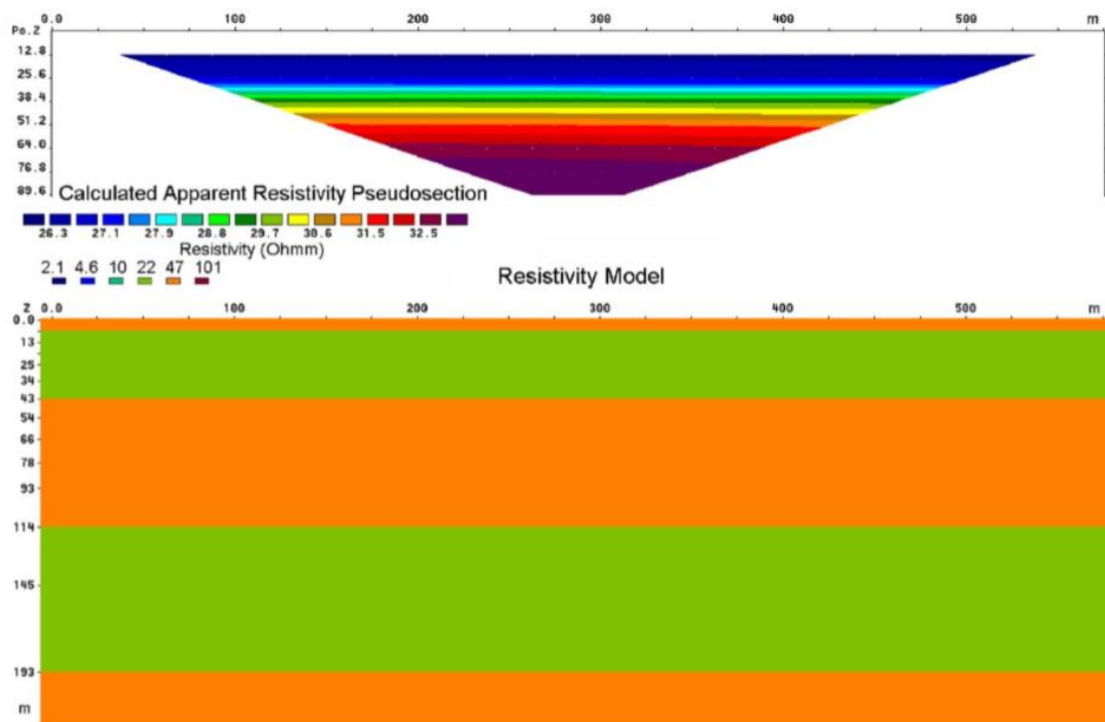


Figura 13. Modelo geoelectrico 1(Sumanovac, 2005).

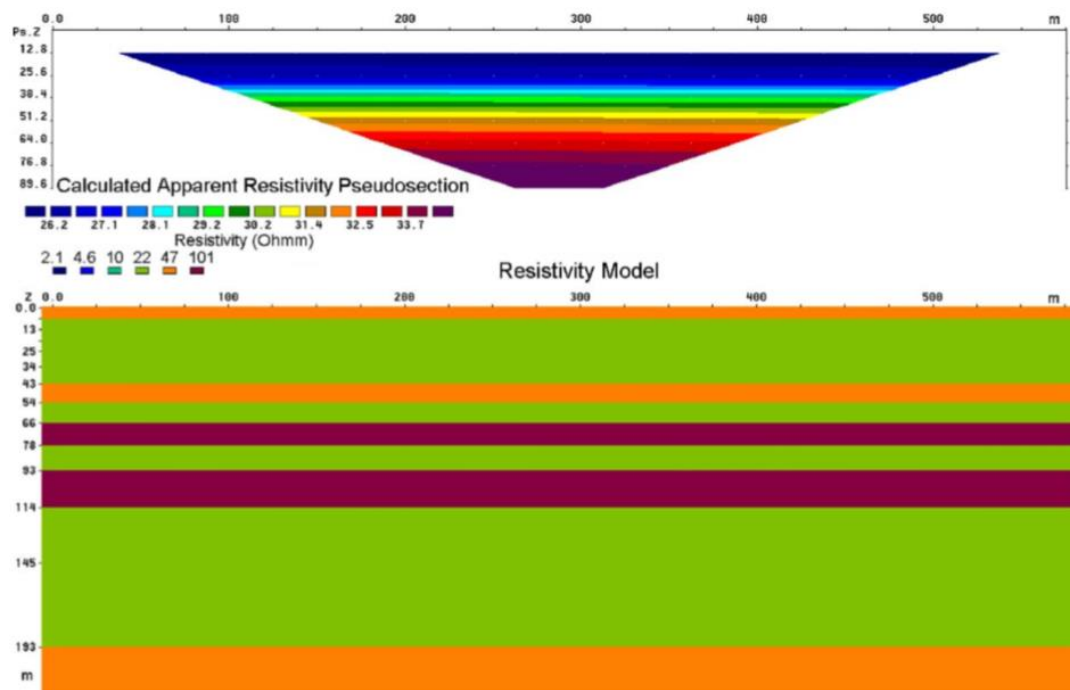


Figura 14. Modelo geoelectrico 2 (Sumanovac, 2005).

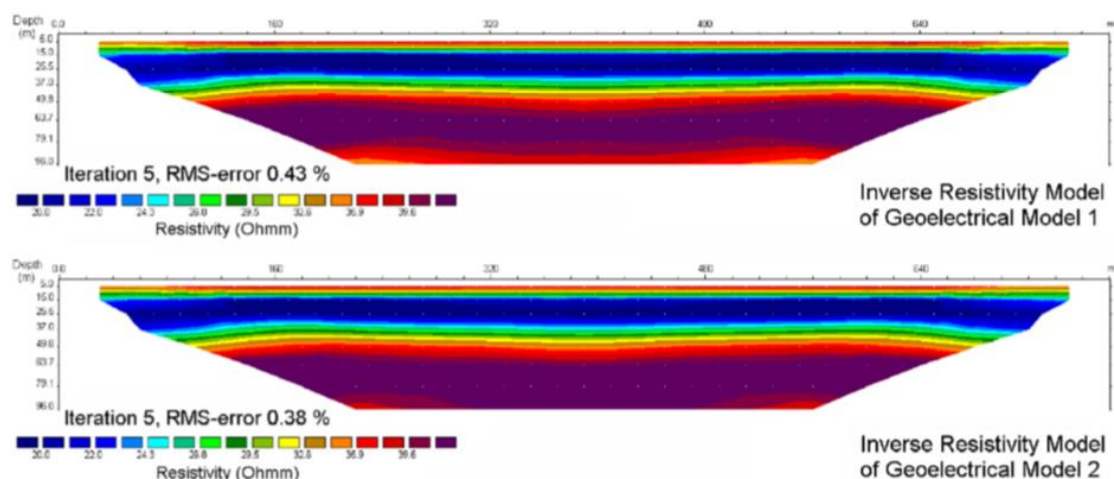


Figura 15. Secciones del modelo de resistividad inversa calculadas para las pseudosecciones del modelo geoelectrico 1 y 2. Ambas pseudosecciones dan como resultado modelos inversos muy similares (Sumanovac, 2005).

Finalmente, a partir del conjunto de métodos empleados en esta investigación (métodos eléctricos, sísmicos y resultados de pozos) se concluyó que el área se compone en su parte más somera por capas irregulares de arcillas con lentes de arenas, hasta los 40 metros, esta área fue investigada con el método de tomografía eléctrica, ya que la sísmica no es resolutive a poca profundidad. En la Figura 16 se muestra la sección geológica del área interpretada.

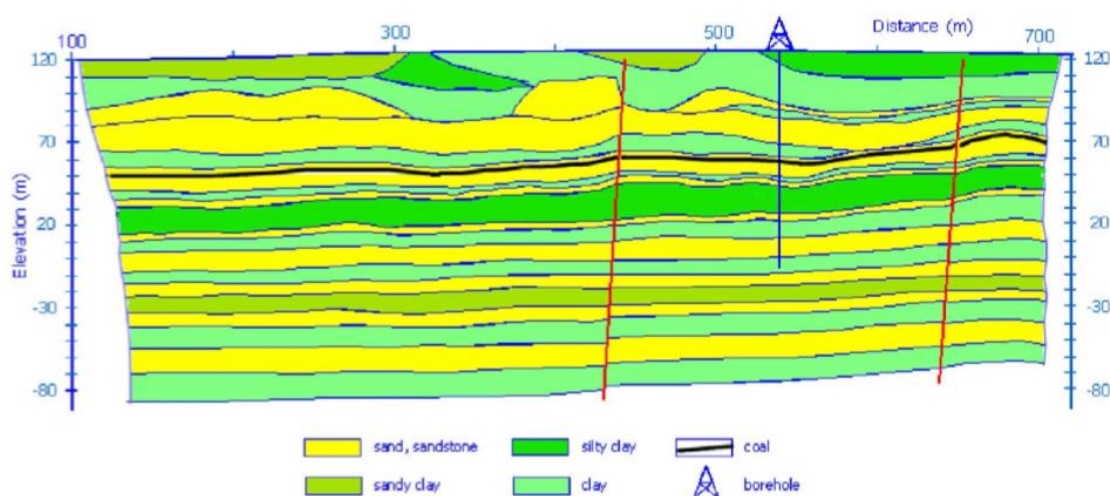


Figura 16. Sección geológica a lo largo del perfil de tomografía eléctrica, definida sobre la base de datos geofísicos y de pozo (Sumanovac, 2005).

En esta investigación se evidencia de forma muy satisfactoria como la tomografía eléctrica puede constituir un método muy eficaz para las investigaciones hidrogeológicas. Sin embargo, como en la mayoría de las investigaciones geofísicas, este método presenta ciertas limitaciones, por lo que se hace necesario soportar los resultados con los obtenidos por otros métodos, en este caso el método sísmico de reflexión y los datos de pozos.

CAPÍTULO III: TÉCNICAS TDEM Y ERT EN LA INVESTIGACIÓN DE PROBLEMAS AMBIENTALES

En este capítulo se presentan resultados obtenidos por varios casos de estudio, mediante la aplicación de técnicas eléctricas (ERT) y electromagnéticas (TDEM) y así comprender cual método es el indicado para cada investigación medioambiental.

3. Aplicación de técnicas TDEM y ERT en la investigación de Problemas Ambientales

3.1 Investigación de Intrusiones Marinas

La intrusión marina provoca que el agua salada (procedente del mar) fluya hacia el subsuelo continental, mezclándose con las reservas de agua dulce. Eso se debe a la mayor densidad del agua del mar (debido a que contiene más solutos) que el agua dulce y ocurre cuando se produce un aumento de la columna de agua salada respecto a la de agua dulce o la sobreexplotación de un acuífero (El-Kaliouby et al, 2015).

La interfase entre agua dulce y agua salada se produce debido a la presencia, en una zona costera, de agua dulce en el continente y agua salada en el mar. Estos dos tipos de agua se mezclan en una zona denominada interfase, donde es posible encontrar agua salobre (ver Figura 17).

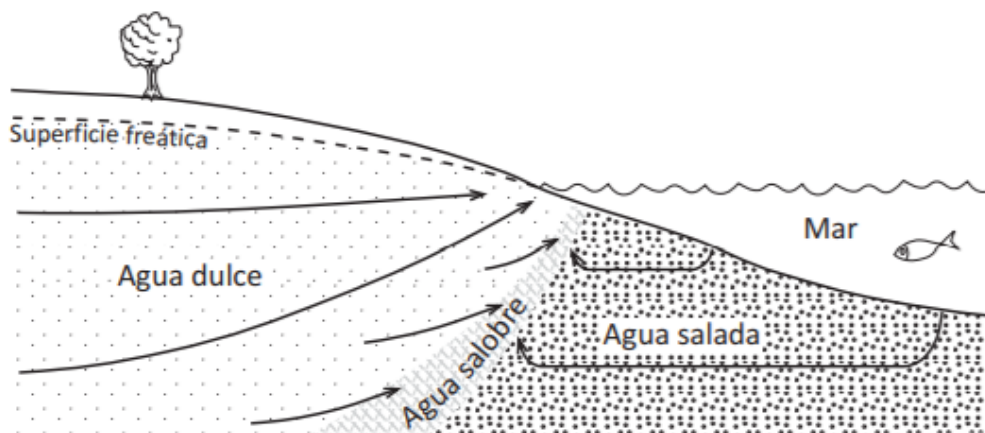


Figura 17. Esquema gráfico de la interfase agua dulce agua salada (Sánchez, 2009).

En este sentido los métodos geoelectrónicos muestran una muy marcada señal para cada fase (Ver Figura 18).

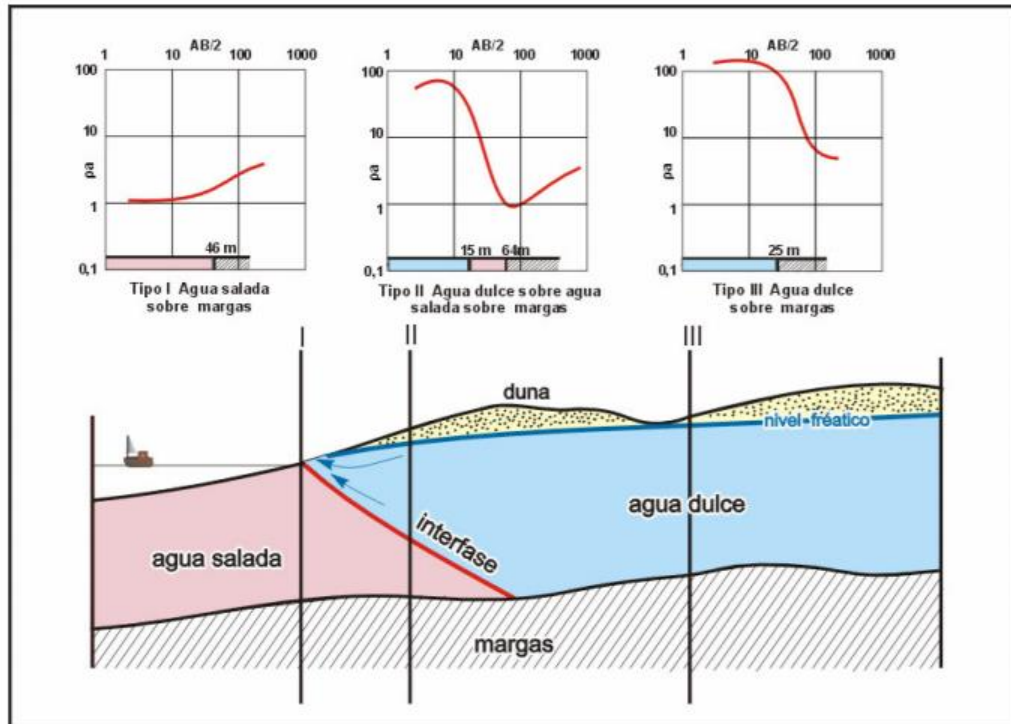


Figura 18. Comportamiento geoelectrico de cada fase (Auge, 2008).

TDEM

Otra de las investigaciones donde el método TDEM funciona es en los estudios de intrusiones salinas, debido a la gran capacidad de este método de diferenciar distintas unidades de rocas con distintas resistividades, o en este caso la respuesta eléctrica diferente entre el agua dulce y salada. Esto, unido a la capacidad del método de tomar datos sin técnicas invasivas ni destructivas, hacen que el mismo sea muy interesante para estos tipos de estudios.

Un ejemplo es la investigación realizada por Hesham El-Kaliouby y Osman Abdala, titulada: Aplicación del método electromagnético en el dominio del tiempo en la cartografía de intrusiones salinas en un acuífero aluvial costero en el norte de Omán. El área de estudio se encuentra localizada en la presa de Alkhod, en la parte inferior de Samail Catchment, el cual se extiende desde la región interior de la montaña de Omán, hasta la llanura costera (Figura 19).

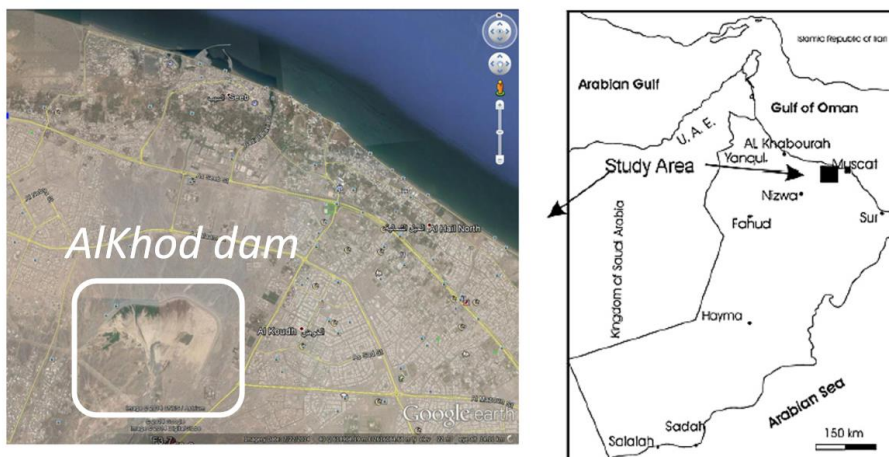


Figura 19. Área de estudio (El-Kaliouby et al, 2015).

La región se caracteriza por presentar tres grandes unidades litológicas, denominadas gravas superiores, medias e inferiores. Las gravas superiores presentan gran permeabilidad, lo que la convierte en la principal zona acuífera. En el caso de la unidad central, presenta intercalaciones de arcillas, mientras que **en** la unidad inferior se presentan gravas cementadas. En esta región el agua de mar avanza unos kilómetros hacia la tierra, contaminado de esta forma, la principal fuente de abastecimiento de agua de Omán (El-Kaliouby et al, 2015).

Para realizar esta investigación se empleó el sistema Geonics Protem-47, usando un bucle transmisor de 20x20 metros cuadrados. Se realizaron 7 perfiles desde la presa de Alkhod hacia el mar, 5 en dirección N-S y dos en dirección E-O (ver Figura 20).

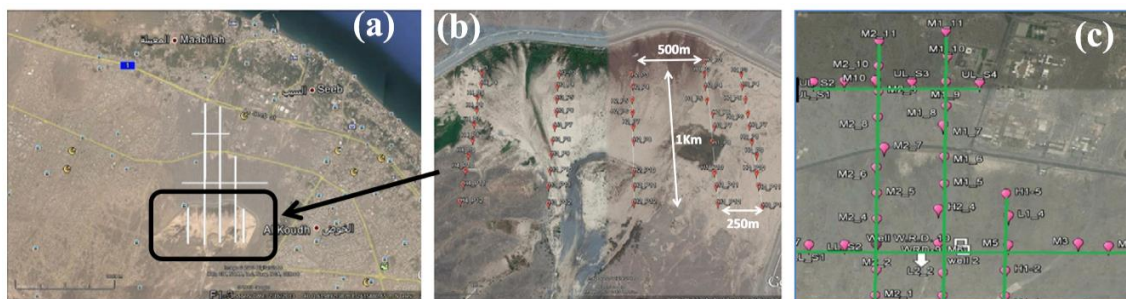


Figura 20. (a) Vista general de los perfiles TDEM en el área de estudio, (b) 5 perfiles N-S detrás de la presa y (c) 3 perfiles N-S enfrente de la presa hacia el mar y 2 perfiles E-O (El-Kaliouby et al, 2015).

En los perfiles realizados en la dirección N-S, se aprecia, en el perfil central, la presencia de un rango de resistividades que se extienden desde los 200 ohm.m hasta los 5 ohm.m. En la Figura 21, es posible identificar en dicho perfil la presencia de tres zonas con características distintas de resistividad. La primera zona, que se extiende desde la superficie hasta los 20 metros aproximadamente, se caracteriza por la presencia de resistividades entre (100-200 ohm.m), correspondiendo con gravas secas. La segunda zona presenta un rango menor de resistividades (20-40 ohm.m), representado por gravas saturadas de agua fresca, mientras que la última zona presenta resistividades bajas (5-10 ohm.m), atribuible a la presencia de arcillas infiltradas con agua de la superficie y la presencia de gravas arcillosas.

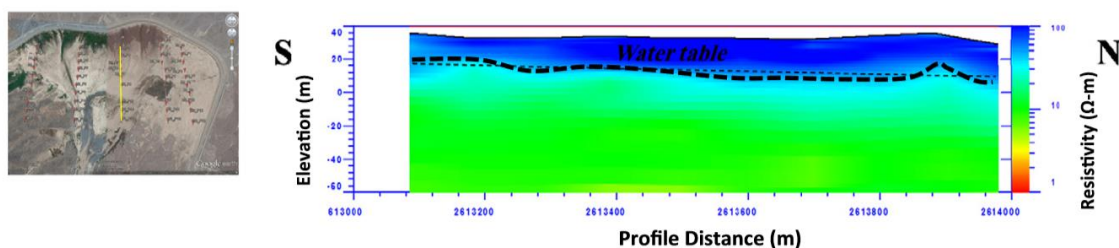


Figura 21. Sección 2D del perfil central detrás de la presa AlKhod (El-Kaliouby et al, 2015).

Al analizar otro perfil del área de estudio (Figura 22), se advierte que el mismo presenta un comportamiento muy similar al anterior, sin embargo, en la zona más al norte se observa una disminución de la resistividad, atribuible a la interface agua salda/agua fresca, con una distancia hacia el mar de 3 km. A medida que se alejan de la costa estas resistividades van aumentando, indicando un decrecimiento de la salinidad.

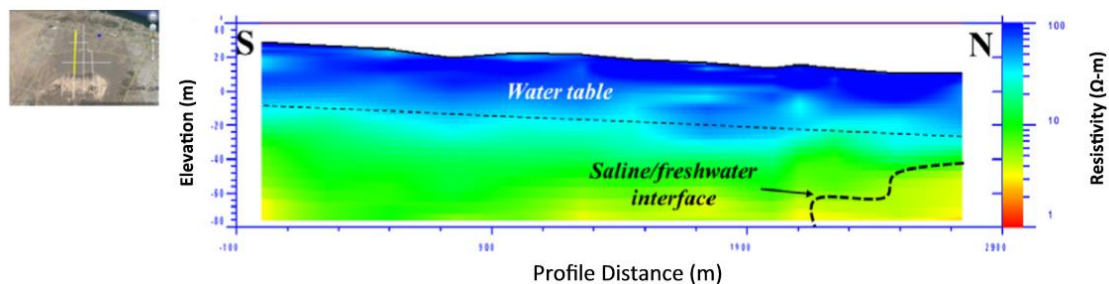


Figura 22. Distribución de la resistividad con profundidad en el nivel superior de la presa AlKhod hacia el mar (El-Kaliouby et al, 2015).

Este comportamiento se mantiene y se intensifica a medida que se acercan a la costa. Para ello, los autores realizaron un modelo 3D, donde es posible observar el avance de la intrusión salina desde la costa hasta, aproximadamente unos 3 km hacia la tierra (Figura 23). Este modelo fue correlacionado con los datos de la medida de la conductividad eléctrica en un pozo localizado al sur del área, quedando sin determinar la base del agua salada.

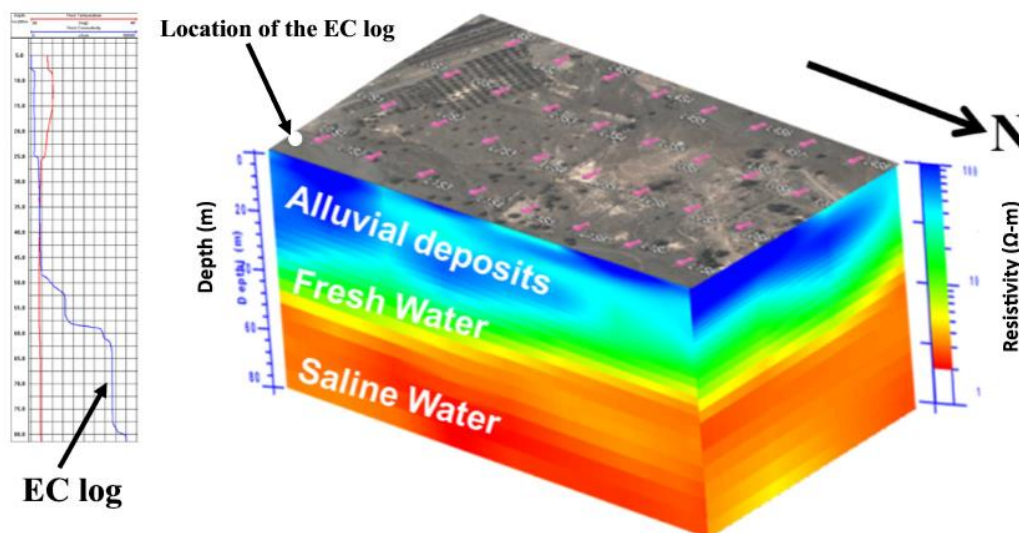


Figura 23. Gráfica 3D TDEM, que muestra la distribución de la resistividad con la profundidad en la parte norte del área de estudio cerca del mar, correlacionada con el registro de conductividad eléctrica de una esquina SE del área de estudio (El-Kaliouby et al, 2015).

En el estudio de los perfiles en dirección E-O, se advirtió en el primero la presencia de altas resistividades, debido al flujo de agua dulce proveniente de la presa al agua salina hacia el mar. Sin embargo, en el segundo perfil (Figura 24) se observa valores más bajos de resistividad, tal vez debido a la presencia de agua salobre o la presencia de gravas arcillosas.

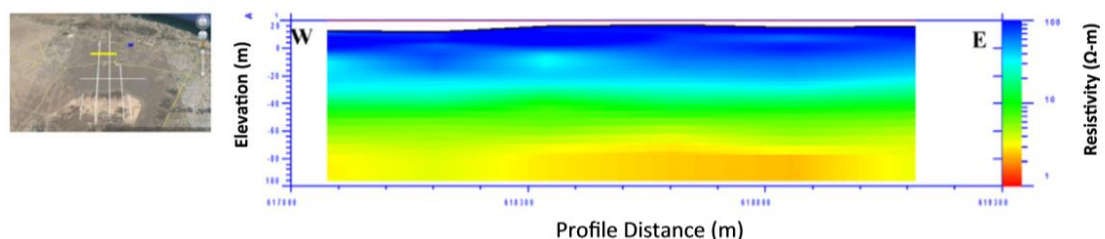


Figura 24. Distribución de resistividad lateral con profundidad en la parte norte del área de estudio hacia el mar (El-Kaliouby et al, 2015).

En esta investigación los autores también estudiaron la infiltración provocada por las partículas de limo que producen una disminución de la porosidad y por tanto de la permeabilidad dentro de la presa (Figura 25). Sin embargo, para un mayor estudio de esta zona se hace necesario realizar una investigación con un tamaño de malla más pequeño que el empleado para lograr una mayor resolución.

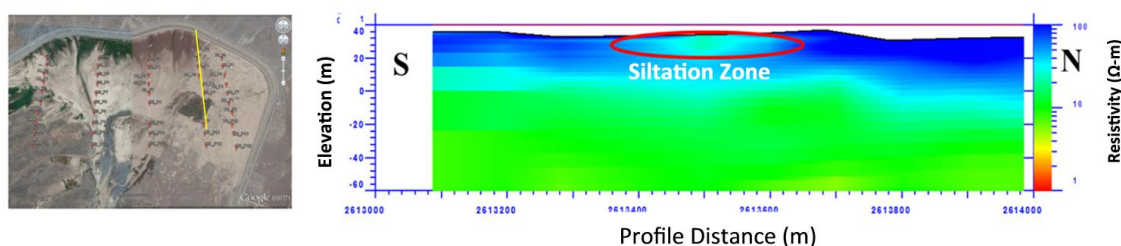


Figura 25. Distribución de resistividad lateral con profundidad en aguas abajo que muestra el efecto de sedimentación cerca de la superficie (El-Kaliouby et al, 2015).

En este estudio se demostró de forma muy satisfactoria como el método de TDEM funciona para descubrir la interfase entre el agua salada y el agua fresca. Es un método que, al emplearlo de forma adecuada, según el objetivo de investigación, proporciona resultados más favorables que otras técnicas de medición de resistividad, las cuales presentan problemas por la gran superficie de contacto entre los electrodos y el terreno. Además, con un dispositivo adecuado se puede obtener una gran resolución a profundidades considerables.

ERT

La tomografía eléctrica constituye una poderosa herramienta para determinar la interfaz entre agua dulce y agua salada, pues no solo brinda una valiosa información geológica y estructural, sino también permite definir la geometría y profundidad de dicha interfaz (Gómez et al, 2007). En este sentido muchos han sido los trabajos que se han servido de este método geofísico para determinar

la zona de intrusión salina. Un ejemplo es la investigación realizada por Santiago Perdomo y otros, denominada: Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Prov. Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos.

En la misma se realiza un estudio en la región de Santa Teresita para determinar la zona de intrusión salina que afecta a la red de abastecimiento de agua del lugar. El área de estudio se ubica en el Partido de la Costa, Provincia de Buenos Aires (ver Figura 26).



Figura 26. Área de estudio (Perdomo et al, 2013).

Se caracteriza por presenta dos ambientes geomorfológicos: cordón costero y llanura continental. El cordón costero se encuentra formado por sedimentos compuestos por arenas finas, mientras que la llanura continental presenta materiales limosos y arcillosos. El acuífero principal se encuentra compuesto por arenas y está limitado en dos interfaces: hacia el continente agua dulce-agua salobre y hacia el mar agua dulce- agua salada.

El acuífero se estudió empleando SEV y tomografía eléctrica. En el caso de la tomografía se utilizó un dispositivo dipolar axial de 5 metros de separación y hasta 6 niveles de medición de diferencia de potencial.

Los resultados del SEV mostraron que en la zona central del área existe intrusión de agua salada a partir de los 3 metros de profundidad, mientras que en las regiones más al sur y más al norte se evidencian mayores valores de resistividad, interpretados como una zona de agua de baja salinidad (ver Figura 27). Por estos motivos los autores decidieron realizaron un estudio de tomografía de mayor detalle, en las zonas meridionales y septentrionales del área, sin embargo, no fue posible investigar la zona norte, debido a que constituye un área urbanizada.



El estudio mostró la existencia en la zona superior de alta resistividad. Sin embargo, se evidencia una zona de baja resistividad de 6 metros de profundidad desde el origen del perfil hasta los 150 metros. Esto se atribuye a la presencia de agua salada en esta zona. A partir de los 150 metros hasta los 300 metros longitudinales, se observa un aumento de la resistividad, debido a una disminución de la salinidad del agua (ver Figura 28).

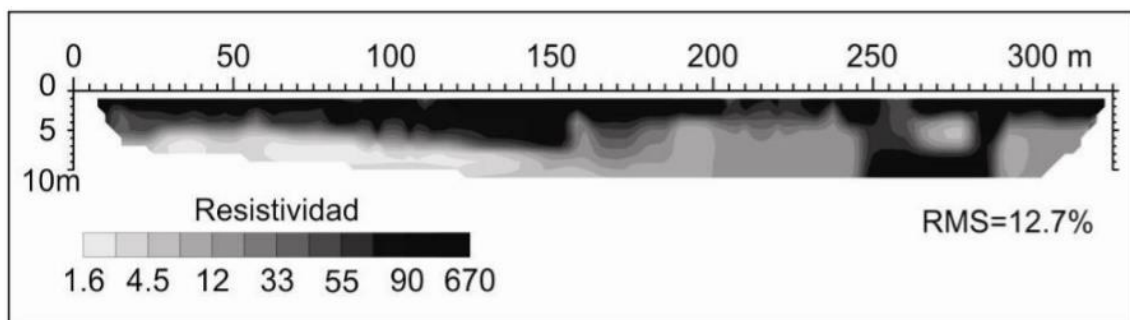




Figura 29. Zona afectada por el agua salada (Perdomo et al, 2013).

En este estudio fue posible observar como los métodos eléctricos pueden evidenciar la existencia de intrusión salina. En este caso, la tomografía eléctrica, corroboraron los resultados del SEV y ver en detalle el efecto de la salinización en el acuífero.

3.2 Investigación de Presas Mineras y Vertederos

Los relaves son los desechos de la minería. Se usan procesos mecánicos y químicos para triturar las rocas, transformándolas en arena fina para extraer el mineral o metal valioso de la roca. Todos los restos irrecuperables y sin valor económico que resultan de este proceso son desechos. Incluyen partículas de roca finamente molidas, productos químicos, minerales y agua. Dependiendo del tipo de minería, los relaves pueden ser líquidos, sólidos o lodo compuesto de partículas finas. Muchas sustancias que se encuentran en los relaves son tóxicas, e incluso radioactivas, y frecuentemente los relaves contienen grandes cantidades de cianuro, mercurio y arsénico (Colectivo de autores, 2019).

En la Figura 30, es posible observar el comportamiento geoeléctrico ante la presencia de una presa minera con agua o sin agua. Como se aprecia, la presencia de agua es fácilmente detectable por un aumento en la conductividad (zona derecha), mientras que en las zonas más secas se observa un aumento de la resistividad.

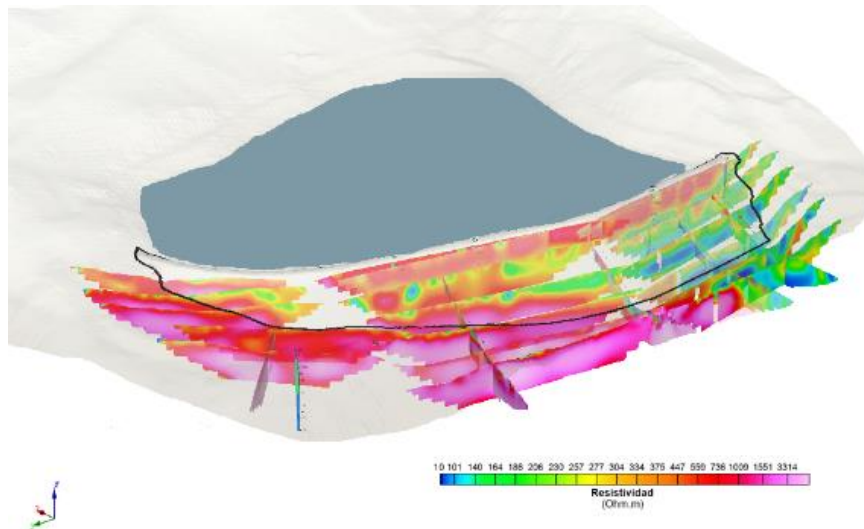


Figura 30. Comportamiento geoelectrico de una presa minera con agua y sin agua (Tejada et al,2021).

TDEM

El método TDEM también brinda resultados muy favorables en los estudios medioambientales dedicados a las presas mineras. Un ejemplo de la aplicación del mismo en este tipo de casos, es la investigación realizada por Yingsa Hu y otros, titulada: Aplicación del método del Transiente Electromagnético (TDEM) en la detección de regiones de saturación en presas de residuos. Esta investigación se desarrolló en China, en la provincia de Hunan, en la mina de plomo-zinc de Taolin.

Esta área la explotación está asociada a los yacimientos de tipo skarn ligadas al contacto entre rocas metamórficas del Proterozoico y una intrusión granítica. Presenta además facies clásticas del Paleozoico, carbonatos, clastos continentales del Cretácico y aluviones del Cuaternario. Es una estructura compleja con intrusiones magmáticas (Hu et al, 2016).

Desde 1950 se ha explotado la mina, rellenando casi 100 toneladas de residuos, los cuales han formado la presa Taolin. La acumulación de estos residuos puede colapsar fácilmente, sobre todo en la temporada de lluvias. Conocer la distribución de las aguas subterráneas es muy importante para la seguridad de la presa (Hu et al, 2016).

Para realizar los trabajos se empleó el dispositivo CASTEM-R1, desarrollado por la academia de ciencias de China. El mismo, según los autores, constituye uno de los sistemas más avanzados para la exploración geológica. En este estudio en concreto se empleó un tamaño de bobinas de transmisión y recepción de 30x30 metros.

Se midieron varios perfiles en la presa objeto de estudio. En las mismas fue posible definir varias capas con características distintas de resistividad. Estas capas son irregulares con variaciones en el espesor. En las imágenes de los

perfiles multicanales es posible observar una anomalía de altas resistividades hasta los 30 metros de profundidad. Debajo de esta, hasta los 100 metros de profundidad es posible advertir una anomalía con valores mínimos de resistividad, los cuales se van haciendo más someros hacia el oeste. Desde los 100 metros hasta los 200 metros de, se observan valores más altos de la resistividad. En la Figura 31, se muestra un perfil multicanal característico de esta zona.

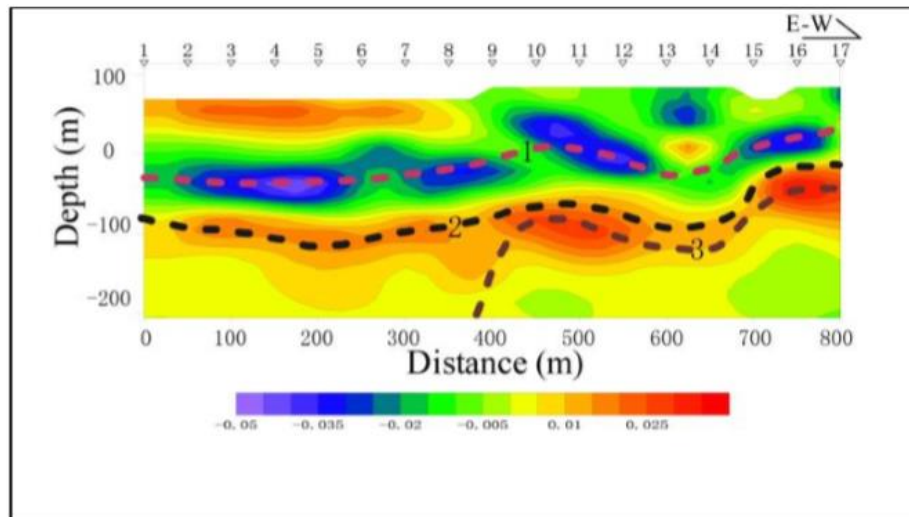


Figura 31. Perfil electromagnético multicanal (Hu et al, 2016).

A partir de la interpretación de este perfil, se observa que la línea de saturación se localiza en una profundidad cercana a 0, haciéndose más superficial hacia el oeste de la región, sin embargo, esto coincide con una zona de mayor elevación del terreno. Por lo que se puede decir que la región de saturación se encuentra por debajo del plano horizontal, en un nivel seguro para la presa de residuos.

Para lograr una mejor diferenciación entre las capas, los autores realizaron la primera derivada vertical. En la Figura 32, se muestra el mapa de anomalías de la primera derivada vertical, observándose un gradiente negativo mínimo a los 20 metros de profundidad, interpretado como el tope de la zona de saturación, donde disminuye la resistividad por la presencia del agua de saturación. El segundo límite, con un gradiente positivo, se marca a los 100 metros de profundidad, constituyendo la base de la zona de saturación. Por último, el tercer límite se ubica en la zona oeste del perfil y se caracteriza por un gradiente positivo máximo, el cual indica, según los autores la variación de la estratificación gradual.

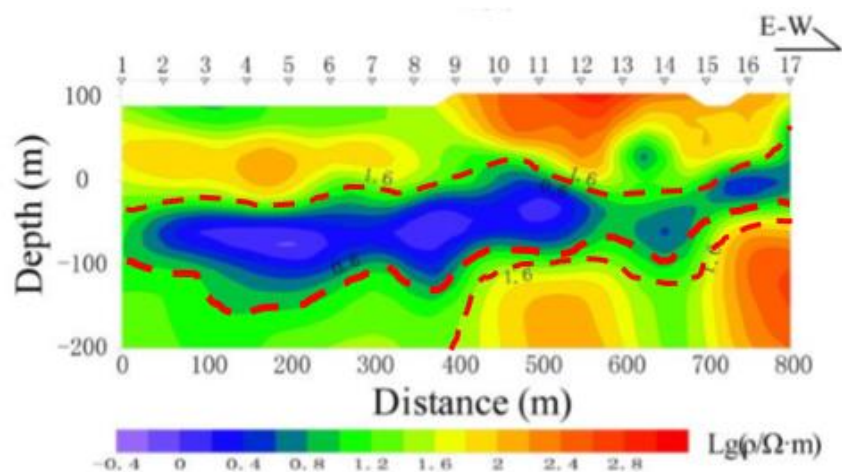


Figura 32. Mapa de anomalías de la primera derivada vertical (Hu et al, 2016).

Finalmente, a partir de los datos interpretados, los autores elaboran el modelo geológico de la zona, indicando 4 capas verticales. La primera capa la marcan hasta los 20 metros de profundidad, caracterizada por una zona de altas resistividades, representado por la acumulación de arena residual. Debajo de esta, se encuentra la acumulación de estratos cuaternarios. Luego aparece una región a 100 metros de profundidad donde se ubican las rocas del Cretácico - Terciario. Finalmente, al oeste, se encuentran las rocas metamórficas del Proterozoico (ver Figura 33).

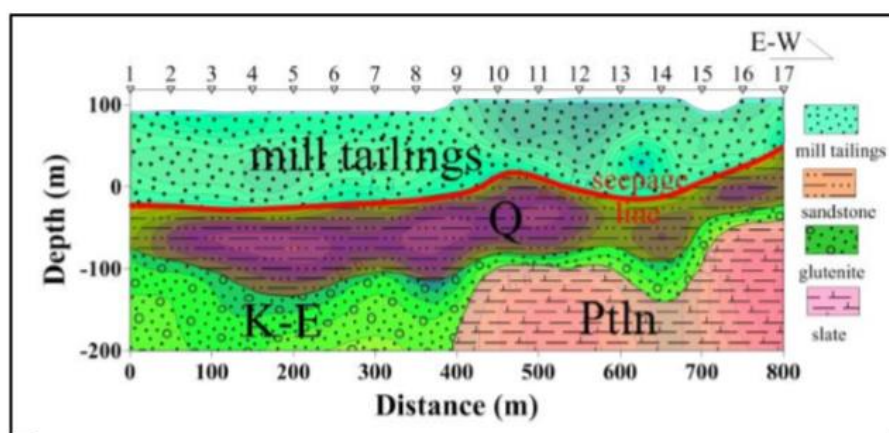


Figura 33. Modelo geológico interpretado (Hu et al, 2016).

En este estudio fue posible observar como el método electromagnético en el dominio del tiempo ofrece resultados muy favorables en las investigaciones de presas mineras. Así mismo, es capaz de definir diferentes tipos de rocas, de acuerdo a la expresión de resistividad que ofrecen cada una. Es un ejemplo más, de que la correcta utilización de este método puede ofrecer resultados realmente prometedores.

ERT

La tomografía eléctrica también es un método que ofrece buenos resultados para los estudios de presas mineras. Un ejemplo es la investigación realizada por Gómez Ortiz y otros, titulada: Caracterización geoambiental de balsas de

lodos mineros mediante tomografía eléctrica. En este caso los objetivos principales son determinar la distribución vertical y horizontal de los diferentes materiales presentes en las balsas de lodo de del distrito de Riotinto en la provincia de Huelva, así como identificar la presencia de aguas sub-superficial y posibles filtraciones en el vaso de las balsas (Gómez et al, 2007).

El área de estudio se encuentra localizada, como se mencionó anteriormente, en el distrito de Riotinto, provincia de Huelva. Pertenecen a las explotaciones mineras de dos balsas del área mencionada. Dos balsas en el paraje de Monte Romero y una en la zona de Nava (Figura 34).

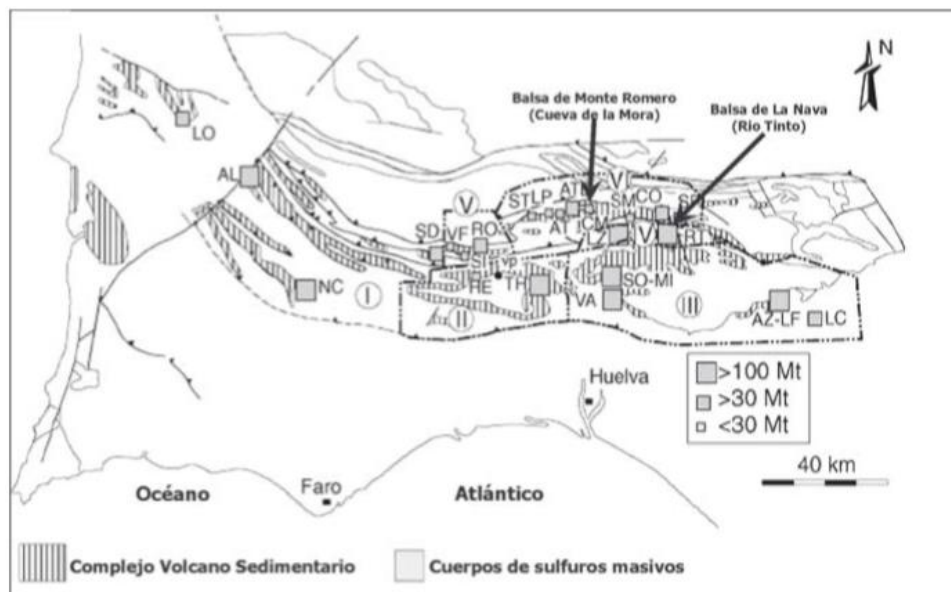


Figura 34. Ubicación geográfica del área de estudio (Gómez et al, 2007).

En el caso de las balsas de Monte Romero, las mismas se encuentran situadas sobre un sustrato de pizarras carboníferas. Los lodos presentan composición silíceo con contenido variable de pirita. En el caso de la balsa de Nava, está compuesta por lavas y tobas básicas carboníferas, aflorando una sucesión de pizarras, grauvacas y cuarcitas devónicas al norte de la misma.

El equipo empleado para esta investigación es el Syscal Junior Switch 48. Se empleó la configuración Wenner- Schlumberger. La longitud de los perfiles varió desde 70,5 metros hasta 235 metros, con un espaciado entre electrodos de 1,5 a 5 metros, logrando una profundidad de penetración máxima de 25 metros.

En el área de Monte Romero se realizaron 4 perfiles paralelos al dique de la balsa grande. En el perfil de la Figura 35, se evidencia la presencia de dos zonas con diferentes resistividades. La primera zona, denominada por los autores como zona A, se extiende desde los 12 metros hasta los 135 metros a lo largo del perfil, y alcanza una profundidad media de 4,5 metros. La misma se caracteriza por presentar una geometría muy homogénea en forma de cubeta. La unidad A, presenta valores de resistividades mucho menores que los

encontrados en la unidad B (unidad A= 1-100 ohm.m, unidad B=100-2066 ohm.m).

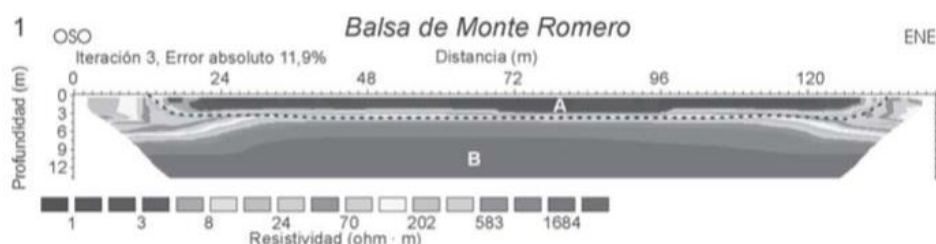


Figura 35. Perfil tomográfico de la balsa Monte Romero (Gómez et al, 2007).

En el caso de la balsa de La Nava se realizaron 2 perfiles perpendiculares al dique de la balsa grande. En este caso también se evidencia la existencia de dos amplias zonas (zona A y zona B). La unidad A presenta resistividades entre 1 y 50 ohm.m, mientras que la B entre 50 hasta 650 ohm.m. En el caso de la unidad A, se presentan subdivisiones en base a la resistividad de las mismas. La subunidad A1, presenta resistividades medias entre 10 y 50 ohm.m, y se extiende hasta 185 metros longitudinales y 10 metros en profundidad. En el caso de la subunidad A2, la misma se encuentra por debajo de la A1, hasta los 20 metros de profundidad, caracterizada por valores de resistividad entre 20 y 5 ohm.m (Figura 36).

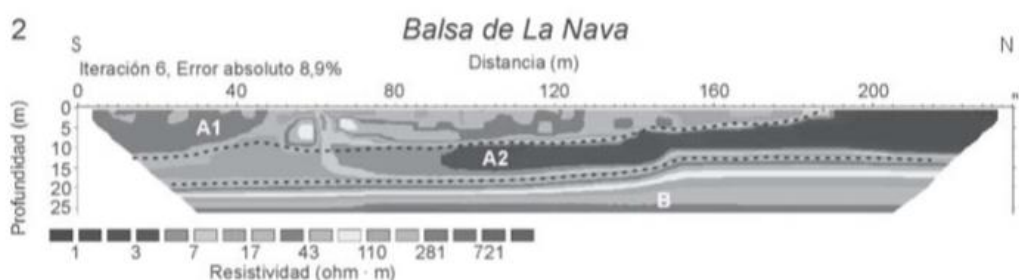


Figura 36. Perfil tomográfico de la balsa La Nava (Gómez et al, 2007).

En este caso la unidad A se interpreta como una zona de relleno, diferenciada por dos regiones de diferentes resistividades, la primera más resistiva y la segunda menos. La unidad B se caracteriza por presentar pizarras con mayores resistividades que la unidad A y correspondiente con los materiales de la base de la balsa.

Finalmente, los autores han interpretado que la unidad A, tanto en la balsa de Romero, como en La Nava, pertenecen al relleno. En el caso de Monte Romero, está compuesto por materiales limo arcillosos con elevado contenido de agua y pirita, justificando de esta manera los valores bajos de resistividad. Por otro lado, en el caso de La Nava, este relleno es más complejo, apareciendo dos subunidades, las bajas resistividades de la subunidad A2, fue interpretada como un flujo de agua subterráneo.

Para el caso de la unidad B, en ambas balsas, se interpreta como la presencia de pizarras. La homogeneidad presente en esta unidad en cuanto a las

resistividades, es interpretada por los autores como la no existencia de ningún tipo de filtración de las aguas en la base de las balsas.

En este artículo se muestra de forma muy clara la gran utilidad de este método para determinar no solo la litología y composición de las presas mineras, sino también la geometría de las mismas, convirtiéndolo así en un método muy eficaz para estos estudios.

3.3 Investigación de otros Problemas Ambientales

Los métodos geoelectrónico son muy útiles en las investigaciones medioambientales. Pueden ser utilizados en la detección de acuíferos, como se ha visto anteriormente. También son muy empleados en la detección de contaminación por hidrocarburos, así como para investigar contaminación por metales pesados, presentes en el subsuelo. También ha sido muy empleado en las presas y zonas mineras, como se verá más adelante. Son métodos en muchos casos definitivos y en otros concluyentes, para investigaciones medioambientales.

TDEM

Un ejemplo de aplicación del TDEM en las investigaciones ambientales es el trabajo realizado por Chuantao Yu y otros, titulado: Aplicación del método electromagnético transitorio para investigar la zona minera enriquecida con agua. El objetivo del mismo es investigar la estructura geológica y las características eléctricas de una zona para cartografiar las áreas de la mina enriquecidas con agua, debido a que la estabilidad de la enorme presa es de gran importancia para la protección de la vida y la propiedad de la población local (Yu et al, 2018).

El área se encuentra ubicada en la zona central de Lingshi en la provincia de Shanxi en China, en una zona montañosa. Se encuentra compuesta por sedimentos aluviales del Cuaternario, mudstone y sandstone del Triásico, del Pérmico y del Carbonífero, así como carbón del Pérmico y del Carbonífero y calizas del Carbonífero y el Ordoviciano.

Para este estudio se realizaron 23 perfiles, con un intervalo entre líneas de 40 metros, cubriendo un área de 153 km². Se empleó el sistema GDP-32, la frecuencia fundamental utilizada fue 16 Hz, con un voltaje de 12 V y una corriente de transmisión de 15 A.

Se obtuvieron varios perfiles, donde se evidenciaba en toda una primera zona de bajas resistividades (70 ohm.m), correspondiente a los sedimentos cuaternarios. Por debajo de esta capa se encuentra una zona de altas resistividades correspondiente a la capa de carbón, sin embargo, es posible observar en cada uno de estos perfiles que, dentro de estas zonas, existen regiones con resistividades bajas (<120 ohm.m), que pudiesen corresponder a la presencia de agua en la zona de mineralización (ver Figura 37).

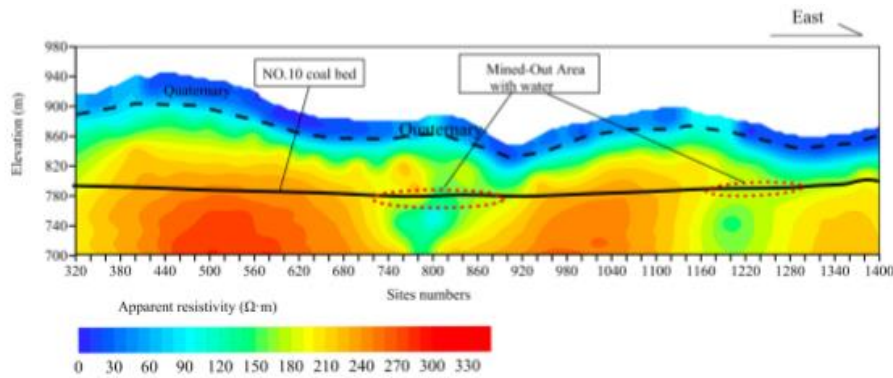


Figura 37. Perfil de TDEM (Yu et al, 2018).

Para lograr una mayor comprensión los autores realizaron un mapa de corte horizontal, mostrando que existen 3 zonas principales enriquecidas con agua, con resistividades menores de 40 ohm.m, en la parte norte del área. Por otro lado, existen también 3 zonas débilmente enriquecidas con agua, con resistividades entre 50 y 90 ohm.m, que se encuentran al oeste y suroeste del área (ver Figura 38).

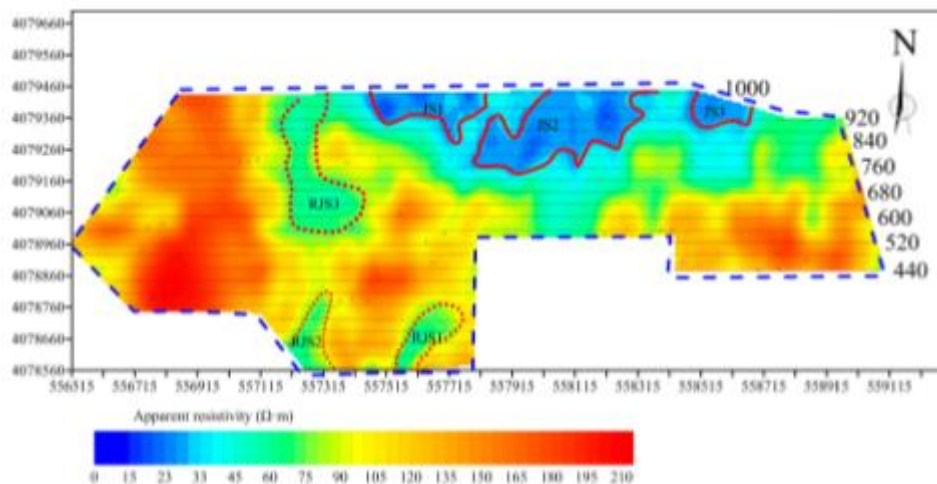


Figura 38. Corte horizontal de resistividad aparente (Yu et al, 2018).

En esta investigación fue posible determinar de forma muy eficiente, a través del método de TDEM las zonas más o menos saturadas en aguas. Estas zonas fueron verificadas posteriormente con sondeos. Esto evidencia la gran versatilidad de este método, no intrusivo ni destructivo, ante este tipo de investigaciones.

ERT

El método de tomografía eléctrica ha sido muy empleado en los estudios medioambientales, ya que unido a los datos estratigráficos, ha demostrado brindar resultados muy prometedores. En el trabajo realizado por Pérez Cutilla y otros en el año 2015, titulado: “La tomografía eléctrica como técnica de apoyo para la identificación y reconocimiento de meandros abandonados: caso de estudio de La Vega Media del Segura (Murcia)”, se muestra un ejemplo claro

del empleo de este método y la respuesta que puede brindar ante una situación geológica dada (Pérez et al, 2015).

El estudio se desarrolla en La Vega Media del Segura (VMS), que ocupa la parte occidental del Bajo Valle del Segura, dentro del sector oriental del Sistema Bético. En la zona norte del área de estudio predominan rocas del Permotrias, el Neógeno y depósitos de ladera pleistocenos, mientras que al sur se encuentran rocas sedimentarias (margas, areniscas y conglomerados) que pertenecen al Mioceno superior-Pleistoceno (ver Figura 39).

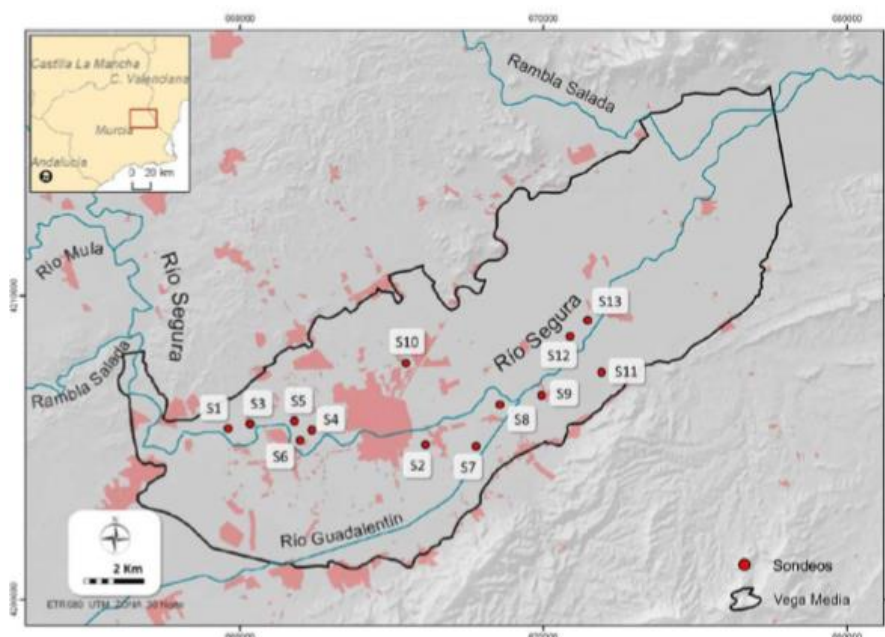


Figura 39. Área de estudio (Pérez et al, 2015).

El objetivo principal de esta investigación fue identificar y reconocer las secciones de posibles meandros abandonados en épocas recientes, así como elegir los puntos de sondeo mecánico preferentes a la hora de extraer muestras de sedimentos y de materia orgánica. Para ello se realizaron perfiles tomográficos perpendiculares a la estructura que indicaba la presencia de posibles meandros abandonados. Se empleó el equipo Syscal R1 Switch 72 y la configuración seleccionada, luego de realizar varias pruebas fue la Wenner-Schlumberger. Se seleccionó como profundidad de investigación 15-25 metros, por lo que se realizaron perfiles de longitud entre 70 y 200 metros con una separación entre electrodos de 2 a 4 metros.

Como resultado se obtuvieron perfiles de tomografías con la configuración Dipolo-Dipolo y con la Wenner-Schlumberger. Este estudio arrojó que la segunda brindaba mejores resultados que la primera. En los perfiles se evidenciaron la presencia de dos zonas de resistividades diferentes. La primera, con altas resistividades, presenta una anchura de 40 metros y profundidad de 20 metros, la misma está compuesta por arenas y gravas. En el caso de la segunda, presenta valores más bajos de resistividad y corresponde a la presencia de sedimentos finos como limos y arcillas. Entre ellos existe una

zona con anomalías positivas, interpretados por los autores como un dique natural (ver Figura 40).

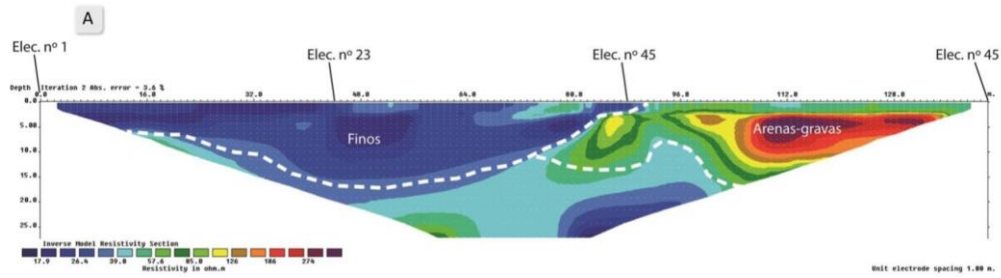


Figura 40. Perfil de tomografía de resistividad eléctrica. Configuración Wenner-Schlumberger (Pérez et al, 2015).

Es posible observar en los perfiles de tomografía una diferenciación entre los sedimentos más resistivos y los más conductores. Las altas resistividades, fueron asociadas a la presencia de gravas, las resistividades medias a depósitos arenosos y las bajas a limos y arcillas.

Todos los resultados permitieron evidenciar una delgada unidad superior de relleno antropogénico, una unidad inferior más extensa, que conforma prácticamente la totalidad del relleno de sedimentos finos y una base a menudo cóncava que marca el límite de dicho relleno y denota la presencia de material de fondo (arenas y gravas) (Pérez et al, 2015) (ver Figura 41).

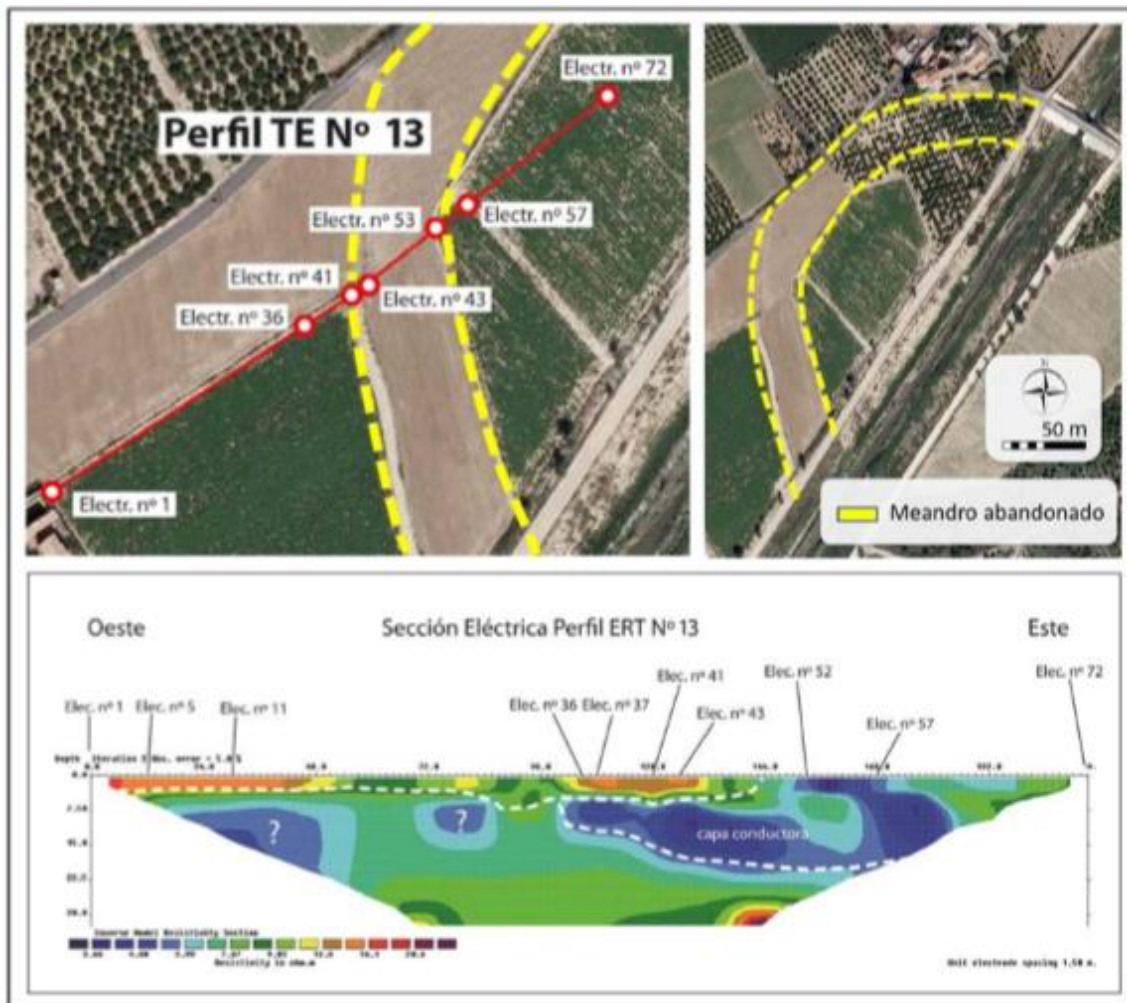


Figura 41. Parte superior: trazas del parcelario que sugieren la existencia de un meandro abandonado en el paraje de Santa Cruz (VMS) y localización del perfil de tomografía eléctrica. Parte inferior: Sección de resistividades aparentes 2D del perfil N° 13 (Pérez et al, 2015).

Los perfiles de tomografías por si solos, en esta investigación, no aportaron una información correcta de la estratigrafía de los rellenos sedimentarios en los cauces de los meandros abandonados, pero con la ayuda de la columna estratigráfica, fue posible determinar la profundidad aproximada de los cauces y su geometría.

Por tanto, la técnica ERT se muestra especialmente eficiente para seleccionar las posibles ubicaciones de instrumentos convencionales de registro sedimentario e hidrogeológico, dado que marca con mayor exactitud el lugar y profundidad a la que se encuentra la anomalía. Como ocurre en todos los métodos de resistividad eléctrica, la presencia de materiales muy resistivos en superficie y a profundidad imposibilita un buen funcionamiento del método, siendo necesaria la utilización de otras técnicas, en este caso las electromagnéticas, en los que no se precisa un contacto físico con el suelo (Pérez et al, 2015).

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. Resultados y discusiones

Los métodos geofísicos por las características que presentan, aportan una visión general. Las propiedades de cada método y las condiciones del entorno determinan su utilidad. Este TFM radica en la implementación de técnicas eléctricas y electromagnéticas a temas hidrogeológicos y medioambientales. En función de las características particulares del objetivo de estudio a resolver se tiene las siguientes discusiones y resultados.

4.1 Análisis de las técnicas TDEM y ERT en la investigación de Acuíferos

La Tomografía Eléctrica (ERT) en investigaciones hidrogeológicas se presenta como una herramienta de estudio eficaz para resolver cuestiones de carácter geológico e hidrogeológico, tanto como único método de investigación o en combinación con otros métodos geofísicos.

La información que brinda a cerca del comportamiento eléctrico de los materiales del subsuelo permite localizar estructuras y capas acuíferas, así como diferenciar materiales permeables e impermeables y definir la geometría del mismo; determinar espesores de capas, siempre que estos presenten suficiente contraste de resistividad con la formación subyacente. Identificar la posición de diversas unidades litológicas y parámetros dinámicos de los acuíferos tales como la dirección de flujo, el gradiente hidráulico, la permeabilidad.

Con ello queda demostrado la capacidad que tiene dicha técnica para solucionar problemas de esta índole y proporcionar resultados satisfactorios.

En cuanto al TDEM (método electromagnético en el Dominio del Tiempo), para investigaciones del tipo hidrogeológico, ésta técnica presenta una característica importante y es su capacidad de ampliar su rango de profundidad para caracterizar el acuífero, variando de manera simultánea los parámetros de medición; pudiendo alcanzar una profundidad de investigación de hasta varios kilómetros. Aunque tiene ciertas limitaciones para la geofísica somera, donde no se tiene información disponible hasta los 10 primeros metros aproximadamente, entorpeciendo entonces a la determinación del techo de acuíferos superficiales.

Es un método que se basa en la medida del valor de la resistividad aparente del subsuelo, por lo que permite la caracterización estratigráfica del acuífero por ciertos tipos de rocas que pueden poseer conductividades diferentes.

Por lo que entre las ventajas que ofrecen este tipo de sondeos electromagnéticos sobre los métodos convencionales de corriente continua, en este caso la ERT; es la rapidez en la toma de adquisición de datos y la sensibilidad a pequeñas variaciones de resistividad. La variedad de sondeos

electromagnéticos en el dominio temporal es menos influenciada por los efectos laterales, es decir que presenta una alta resolución lateral en situaciones complejas del subsuelo; lo contrario a la tomografía eléctrica que no ha resultado tan efectiva cuando existen heterogeneidades laterales.

Es menos sensible a la topografía y tiene la capacidad de penetración en capas conductoras; sin embargo, no exhibe un buen funcionamiento en materiales resistivos muy elevados y más aún si son capas muy delgadas.

Ambas, son técnicas no destructivas, económicas y extensivas, ya que permiten el estudio de áreas extensas de terreno, pero a nivel metodológico se puede concluir que los perfiles electromagnéticos son los ideales para abordar esta clase de problemática, resultando la técnica geofísica de mayor prestación entre ambas.

4.2 Análisis de las técnicas TDEM y ERT en la investigación de Problemas Ambientales

Las aplicaciones de la Tomografía Eléctrica (ERT) en temas ambientales son muy diversas e incluye fases de localización, caracterización y monitorización del contaminante; la identificación del suelo y la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, además del estudio de la impermeabilidad de vasos de vertederos, las recargas artificiales de acuíferos o la detección de lixiviados procedentes de sumideros.

Esta técnica brinda secciones en 3D, cuando se requiere una gran resolución en la definición del problema, aunque las dimensiones suelen ser de definiciones de metros.

Asimismo, ofrece resultados satisfactorios para caracterizar la geometría del contacto entre aguas con fuertes contrastes de salinidad, aunque si estos no están muy pronunciados se dificulta la posibilidad de distinguir entre las distintas litologías; aunque cabe destacar que permite conseguir una visión de la extensión y monitoreo de la cuña salina.

Los sistemas TDEM, ofrecen estudios y monitorizaciones en temas de acuíferos costeros (fase salina), sus propiedades, nivel freático y hasta datos de permeabilidad.

En cuanto a investigaciones mineras, es aplicado a la detección de depósitos de sulfuros masivos con contenido de elementos metálicos por su alta conductividad. En la detección de la profundidad del basamento y en el mapeo estratigráfico de capas o contactos mediante contraste de resistividades con posible mineralización económica.

También ofrece resultados satisfactorios en la detección y delimitación de fluidos contaminantes en el terreno (plumas de contaminación), pero en menor porción a los estudios de contaminación somera del suelo.

En este caso de aplicación (investigaciones medioambientales) esta técnica radica en su capacidad de mapear características muy profundas, con una recopilación rápida de datos y un abarcamiento de grandes áreas en cortos períodos de tiempos.

Aunque para obtener una interpretación más fidedigna que ayude a comprender el contexto geológico estudiado la puesta en marcha de más de un método sería lo ideal; los sondeos electromagnéticos por sí solos brindan beneficios y resultados coherentes para una reducción inmediata de costes, una detección temprana de riesgos, una localización de contaminantes, una caracterización del yacimiento, balsas de lodos o una monitorización de filtraciones entre otras, lo que refuerza la fiabilidad de dicha técnica.

Los beneficios derivados de ambas técnicas en conjunto demuestran el poder resolutivo y útil de los métodos geofísicos; pero cada uno por separado ofrece también la resolución de objetivos. Tanto el método eléctrico como el electromagnético permiten investigar el subsuelo en áreas de elevada importancia ambiental, económica, patrimonial. Sin embargo, finalmente el TDEM engloba a raíz de lo argumentado anteriormente un rango de mayor facultad para temas de éste índole; en teoría y en práctica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se mostró el funcionamiento de los métodos electromagnéticos y eléctricos en diferentes casos de estudios. Se explicó cómo funcionaban cada uno y se ilustró sus ventajas y desventajas ante distintas situaciones. A partir de este análisis se puede concluir que:

- El método electromagnético en el dominio del tiempo ofrece resultados muy certeros en las diferentes investigaciones medioambientales. De este modo se puede decir que es uno de los métodos geofísicos más eficientes para realizar estudios de intrusión salina, estudios de presas mineras y estudios ambientales en general
- Una de las ventajas más significativas del método electromagnético es su capacidad de brindar gran información, siendo un método no invasivo y no destructivo, lo que lo hace especialmente atractivo para las prospecciones geofísicas.
- También, en el caso del método electromagnético, permite una mayor profundidad de investigación que el método de tomografía eléctrica; no solo por la versatilidad y robustez en la interpretación, sino por las profundidades de penetración que alcanzan sin tener que disponer kilómetros de cables y fuentes de energía gigantescas.
- La tomografía eléctrica es un método que por lo general ofrece buenos resultados en las investigaciones medioambientales. Sin embargo, a diferencia de los métodos electromagnéticos, presenta la dificultad de la alta superficie de contacto entre el electrodo y el terreno, lo que provoca que no sea adecuado en ciertas condiciones geológicas
- La tomografía eléctrica, a pesar de ser un método muy efectivo, en ocasiones no brinda los resultados esperados y es necesario el empleo de otros métodos para validar los resultados. En este sentido, el método electromagnético presenta mayor autonomía, aunque es válido señalar que la aplicación de un conjunto de métodos geofísicos, siempre dará resultados más seguros.
- No obstante, el método es muy resolutivo en estudios que no requieran alcanzar grandes profundidades, obteniéndose perfiles del terreno de gran detalle para los ámbitos de estudio que se plantean en este TFM.

BIBLIOGRAFÍA

ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Incorporated, Mississauga, Canada, 278 pp. 2003.

ARACIL, E., J. A. PORRES, A.B. ESPINOSA, U. MARURI, J. VALLÉS, L. GARCÍA Y S. IBÁÑEZ. Aplicación de la Tomografía Eléctrica para la caracterización de un deslizamiento de ladera en un vertedero. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia. 2005.

ARANGO, E.E. Estudio hidrogeológico en el valle de San Juan Bautista Londó, B.C.S., a partir del análisis de datos electromagnéticos. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. 2018.

ARIAS, M.E., A. VARGAS. Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de Costa Rica. Tecnología de la Intrusión de agua de mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos ©IGME. Madrid. ISBN.84-7840-470-8. 2008.

ARIAS, M.E. La primera experiencia en la aplicación de los Métodos Electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: El caso de Tamarindo, Guanacaste. Boletín Geológico y Minero. 118 (1): 51-62. 2007.

AUGE, M., Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. 2008

CARRAZ, O.R. Láminas del curso de Métodos Electromagnéticos. Departamento de Geociencias. ISPJAE, 2014.

CARVALHO, A., I. MULLER, A. MARQUES y J.P. MONTERO. Importancia do uso de Métodos Geofísicos Electromagnéticos Very Low Frequency Electromagnetics (VLF-EM) e Radio Magnetotelluric – Resistivity (RMT-R) no estudo de aquíferos cársicos do Alentejo e do Algarve. 2007. Disponible en: https://www.academia.edu/5699077/IMPORT%C3%82NCIA_DO_USO_DE_M%C3%89TODO_S_GEOF%C3%8DSICOS_ELECTROMAGN%C3%89TICOS_VERY_LOW_FREQUENCY_ELECTROMAGNETICS_VLF_EM_E_RADIO_MAGNETOTELLURIC_RESISTIVITY_RMT_R_NO_ESTUDO_DE_AQU%C3%8DFEROS_C%C3%81RSICOS_DO_ALENTEJO_E_DO_ALGARVE

CASAS, A. Prospección Geofísica aplicada a la Hidrogeología: Metodologías y técnicas emergentes. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Facultat de Geologia-Universitat de Barcelona. 1998. Disponible en:

https://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/3a_ponencia.pdf

CIMADEVILLA, D. Valoración de la técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT), para la caracterización de zonas pocos profundas. Trabajo fin de Máster. Universidad de Oviedo. 2017.
Colectivo de autores. Lo que se debe saber sobre las represas de relave. 2019.
Disponible en:

https://mailattachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=459854275c&attid=0.1&permmsgid=msgf:1702475948059676346&th=17a068dacabe4eba&view=att&disp=inline&realattid=f_kpvhyzip1&ser=1&saddbat=ANGjdJ-iCKpFJLIWBTMTXuidXP37WhzZvqzioN9MHgVX1wx-YdKNj_htYVBksUIWuDlf2MtzaW7zM8u7Q5In2h0sRP_sghQkNS4IssolnvoBwinclLgF35I4MHjvCrA3KrbnY9H_0WZtCEmytYFSr5TMVFBdLIKnxX_q3GDubS4cvEa5BmQWTjdVUjhPvRV7pEwBIEyKdWGY8LIhArrYQXUiz7_kTeWOzj9yyXXSUnDn9OYVXCh1fPQql6yAvyyzMHPzOZMKsKfzZp6F1pEhvnHjtgth8MPulQttZOPQhSTPTTKTBuedY5ueIV37UNto7fS24BWmfut8r19_btYt6pjSxDZb55u_KQy5iQ9WsUtmRvB6PVnkBu67POQWhRCBaFqXiRb7Z3OfjSLrxq14PI4hgBljwEuS5LWDWfhhbCOJB_g6ELiwzrj3i1fnijpPZN0FHVHB1hxE3XRyUtU40_c0O5CbuEfz26bjvlnWk8swswBYnS8bkL8x3uH66xpY7cWWMM8t7EgRQ5ILdaHesQ3Fn9ROdbuhDXQV0wxpQImbXS6gD131KWPIs9fAn9xxAusbudMNzPXtCRzZVn7lwVTqwFyqe10IDlfBZHMFaTaOCEzuvHWsIXUPrO0jgJaamuHHomHoi8eO4MdNHdNqEOehtZufGv515tF4W_v1i9jG62Rt1Bq3dgTmA

CONTE, J.C. y O. BANTON. Apport de la tomographie électrique à la modélisation des intrusions salines dans les aquifères côtiers. Exemple des aquifères gréseux des îles-de-la-Madeleine (Québec, Canada). 2003.

DÍAZ, J.A. Láminas del curso de Métodos Eléctricos. Departamento de Geociencias. ISPJAE, 2014.

EL-KALIOUBY, H. y O. ABDALLA. Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. Journal of Applied Geophysics 115, pp. 59-64, 2015.

GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. 1999.
Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93628/05capitulo2.PDF?sequence=5&isAllowed=y>

GEOLOGIAWEB. Método electromagnético (EM). Geología, Ciencias de la tierra, sus ramas y aplicaciones. 2020. Disponible en: <https://geologiaweb.com/geofisica/metodo-electromagnetico/>

GÓMEZ, D., T. MARTÍN, S. MARTÍN, F. LILLO y C. IGNACIO. Caracterización geoambiental de balsas de lodos mineros mediante tomografía eléctrica. Geogaceta, 42, 47-50. 2007.

GONZÁLEZ, R. "Introducción a la Ingeniería Geofísica". Departamento de Geociencias. Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". 2011.

GRANDA, A., J.C. CAMBERO. Reflexiones sobre la experiencia de más de diez años de utilización del método de los sondeos electromagnéticos de dominio de tiempos (SEDT) en España. Disponible en: http://aguas.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/10a_comunicacion.pdf

GUEVARA, M.O., H.R. VENTURA y L.E. ANDRADE. Uso de sondeos electromagnéticos en la caracterización hidrológica del acuífero del altiplano de Tula, Tamaulipas. Investigación y Ciencia, vol. 25, núm. 70, pp. 23-30. Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. 2017.

HERNÁNDEZ, E.A. Estudio Geofísico de resistividad electromagnética para definir las características Geohidrológicas del acuífero Apan en un predio delimitado. Tesis en opción al grado de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016.

HU, Y., Z. ZENG, X. CHEN y X. ZHAO. Application of Transient Electromagnetic Method in saturation region detection in tailings dam. 2016. Introducción a AMT – zonge. Introducción a AMT El método audiomagnetotélurico (AMT) es una técnica. 2015. Disponible en: <https://pdfslide.tips/documents/introduccion-a-amt-zonge-introduccion-a-amt-el-metodo-audiomagnetotelurico.html>

LÓPEZ, A.A., M. HENG, G.O. FONTON y E. CARA. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D y 3D). Instituto Geofísico Sismológico, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. School of Physics, University of Science of Malaysia. 2002.

MANILLA, A.A. Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. 2003. Publicación Técnica No. 229.

MARÍN, E.D., F.D. AVENDAÑO. Prospección geofísica ambiental aplicada a la detección de plumas contaminantes debidas a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoeléctricas profundas y modelos 3D. Universidad Distrital Francisco José de Calda. 2017.

MARTÍNEZ, P. "Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la región de Murcia". Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad Politécnica de Cartagena. 2006.

MARTÍNEZ-MORENO, F.J., F.A. MONTEIRO-SANTOS, J. MADEIRA, I. BERNARDO, A. SOARES, M. ESTEVES y F. ADAO. Water prospection in volcanic islands by Time Domain Electromagnetic (TDEM) surveying: The case study of the islands of Fogo and Santo Antão in Cape Verde. *Journal of Applied Geophysics* 134, pp. 226-234, 2016.

MATTEW, K., y BEDROSIAN P.A. Time-Domain Electromagnetic Surveys at Fort Irwin, San Bernardino County, California, 2010–12. 2014.

NABIGHIAN, N.M. Electromagnetic method in Applied Geophysics. Tulsa, Okla. Society of Exploration Geophysics. 1988.

OILFIELD GLOSSARY. Schlumberger. **método electromagnético. 2020. Disponible en:**
https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/e/electromagnetic_method

ORELLANA, E. “Prospección Geoeléctrica en corriente continua”. 1978.

ORELLANA, E. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Editorial Reverté, Madrid, 1982.

PELLICER, E. Caracterización mediante Tomografía Eléctrica del desplazamiento de Toleo (Oviedo). Trabajo Fin de Máster. Universidad de Oviedo, Facultad de Geología. 2015.

PERDOMO, S., S. CARRETERO, E. KRUSE y J. AINCHIL. Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Prov. Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos. *Temas actuales de la hidrología subterránea* 2013.

PÉREZ, P., P. MARTÍNEZ, T. RODRÍGUEZ, C. CONESA, F. NAVARRO. La tomografía eléctrica como técnica de apoyo para la identificación y reconocimiento de meandros abandonados: caso de estudio de La Vega Media del Segura (Murcia). 2015.

RODRÍGUEZ, M.A. Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoeléctrico y Sísmica de Refracción. Casos Prácticos. Geoconsult Ingenieros Consultores, S.A. 2004.

Rowland, B., Ph.D. French, y R.G. Northwest. Time-Domain Electromagnetic Exploration. Geophysical Associates, Inc. 2002.

SANCHEZ, J., Agua subterránea en regiones costeras. Dpto. Geología, Universidad de Salamanca (España). 2009.

SERRANO, J. TEMA 3: Tomografía eléctrica. 2003. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8>
SPIES, B. R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, 54(7), 872–888. 1989. Disponible en: <https://doi.org/10.1190/1.1442716>

SUMANOVAC, F. Mapping of thin sandy aquifers by using high resolution reflection seismic and 2D electrical tomography. Faculty of Mining, Geology and Petr. Eng. University of Zagreb, Croatia. 2005.

TEJADA, K., S. GUIspe y D. PARRA. Aplicaciones del ensayo de tomografía eléctrica a problemas de la ingeniería geotécnica en la minería. 2021. https://docs.google.com/document/d/155AKigTwwW_ipDUMaUloUM22I2ncqDhAOxpoGz8Z4zE/edit

TELFORD, W.M., Geldart L.P., Sheriff, R.E. Applied Geophysics, Cambridge University Press, 770 p. 1990.

YÁÑEZ, R.A. Análisis interpretativo del recurso hídrico subterráneo utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile. Departamento de Geofísica. Universidad de Concepción. 2017.

YU, C., X. LIU, J. LIU, E. LI, P. YUE y S. YAN. Application of Transient Electromagnetic Method for Investigating the Water-Enriched Mined-Out Area. *Applied sciences* 8,1800. 2018.