



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Aplicaciones de la adquisición y
procesamiento de datos con la
técnica de Tomografía de
Resistividad Eléctrica**

TESINA

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Jacobo Gordo Flores

DIRECTOR DE TESINA

M.C. David Escobedo Zenil



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

INDICE

Resumen	4
Abstract	6
Capítulo 1 Introducción	7
1.1 Antecedentes	7
1.2 Objetivo	8
Capítulo 2 Aspecto Teórico que sustenta al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE 2)	8
2.1 Fundamentos Teóricos del Estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE 2D)	8
2.2 Conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo	10
2.3 Tipo de arreglos electródicos	12
2.3.1 Arreglo Dipolo-Dipolo	12
2.3.2 Arreglo Wenner.....	13
2.3.3 Arreglo Wenner-Schlumberger	13
2.3.4 Arreglo Polo Dipolo.....	14
2.4 Stacking o apilamiento	15
2.5 Numero de Datos	15
2.6 Roll Along	17
2.7 Función de sensibilidad	18
2.8 Teoría de inversión	19
Capítulo 3 Casos de aplicación	22
3.1 Caso 1 TRE 2D en el municipio de Coacalco	22
3.1.1 Marco de Geográfico Referencia	23
3.1.2 Marco Geológico	24
3.1.3 Localización	25
3.1.4 Trabajo de Campo	26
3.1.5 Procesamiento	29
3.1.6 Resultados	31
3.2 Caso 2 TRE 2D en el municipio de Tulum, Quintana Roo	35

3.2.1 Marco de geográfico de referencia.....	35
3.2.2 Marco Geológico	36
3.2.3 Localización	37
3.2.4 Trabajo de Campo	38
3.2.5 Procesamiento	40
3.2.6 Resultados	42
3.3 Caso 3 TRE 2D en el municipio de Concordia, Sinaloa.....	46
3.3.1 Marco Geográfico de Referencia	46
3.3.2 Marco Geológico	47
3.3.3 Localización	48
3.3.4 Trabajo de Campo	49
3.3.5 Procesamiento	51
3.3.6 Resultados	53
Capítulo 4 Conclusiones y Mejoras.....	56
4.1 Conclusiones	56
4.2 Mejoras	57
BIBLIOGRAFIA.....	58

Resumen

En el trabajo se presentan tres casos de estudio donde se aplicó la técnica y el procesamiento de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE 2D) para cumplir el requisito de titulación por experiencia profesional. Es por este motivo que los estudios presentados en el trabajo tienen un fin académico, por lo tanto, no se muestran los trabajos realizados en su totalidad; se exponen tres casos de estudio donde se eligió una línea de tomografía con las características más representativas de los proyectos. Cabe aclarar que los proyectos son confidenciales.

Los casos que se presentan se realizaron en distintas zonas de la República Mexicana, con diferentes características geológicas y diferentes objetivos, también se muestran dos diferentes equipos para la adquisición de tomografía eléctrica, uno de los más utilizados como el ARES de GF Instruments y el GD-10 de Geomative.

El primer caso se realizó en el Estado de México, con un objetivo de carácter geotécnico. A partir del proyecto de realización de una obra civil y de los lineamientos que solicitan la elaboración de estudios geofísicos, se propuso realizar estudios geofísicos que descarten la existencia de posibles estructuras geológicas que afecten o sean un riesgo para la población, en este caso se propuso la realización de una tomografía eléctrica.

El segundo caso se realizó en el estado de Quintana Roo con un objetivo geotécnico-hidrológico. En esta región se presentan condiciones geológicas en donde, la carsticidad ha sido uno de los problemas más fuertes en la zona para la construcción de infraestructura. Por esta situación, en este proyecto se buscó aprovechar la roca fracturada y los sistemas de microcanales para construir un canal principal que una las dos caletas que se encuentran en la zona de estudio, por lo que la tomografía de resistividad eléctrica contribuyó a definir con mayor resolución y contraste las condiciones del subsuelo.

El tercer caso se realizó en el estado de Sinaloa con un objetivo minero. En este caso se muestra una tomografía eléctrica, esto ayudó a caracterizar una falla geológica ya identificada con evidencias de mineralización, la cual, no se observaba claramente en superficie. Con ayuda del estudio geofísico se mapeo con mayor precisión y se auxilió en la ubicación de los pozos de perforación, evitando un mayor gasto en la exploración minera.

Se menciona la metodología que se debe de tener para determinar el diseño del arreglo, los parámetros y las condiciones que deben de existir para adquirir un buen levantamiento de datos y así disminuir los errores y fallas posibles en el trabajo del levantamiento de campo. De igual manera, para el filtrado de los datos y procesamiento se menciona una propuesta de metodología que cuenta con los mínimos requerimientos para obtener una buena inversión de los datos y una interpretación que refleje con mayor certeza la realidad.

Estos tres casos de estudio son una parte de la experiencia adquirida a lo largo de diez años que llevo realizando levantamiento de datos geofísicos con distintos métodos y equipos, en este trabajo comparto recomendaciones y observaciones sobre este método.

Abstract

The following three case studies demonstrate the application of the tomography of resistivity electric (TRE 2D) technique to fulfill the academic requirement of professional experience. For this reason, the studies presented in the work have an academic purpose and therefore do not present the full details of the work carried out. Instead, three case studies are presented, where a representative line of tomography was chosen from the projects. It should be noted that the projects themselves are confidential.

The cases presented were carried out in different areas of the Mexican Republic, with different geological characteristics and different objectives, also two different equipments for the acquisition of electrical tomography are shown, one of the most used as the ARES of GF Instruments and the GD-10 of Geomative.

The first case was carried out in the State of Mexico, with a geotechnical objective. Based on the project of a civil work and the guidelines that request the elaboration of geophysical studies, it was proposed to carry out geophysical studies to rule out the existence of possible geological structures that affect or are a risk for the population, in this case it was proposed to carry out an electrical tomography.

The second case was carried out in the state of Quintana Roo with a geotechnical-hydrological objective. In this region there are geological conditions where karsticity has been one of the strongest problems in the area for the construction of infrastructure. Because of this situation, this project sought to take advantage of the fractured rock and microchannel systems to build a main channel linking the two coves in the study area, so that electrical resistivity tomography contributed to define with greater resolution and contrast the subsurface conditions.

The third case was carried out in the state of Sinaloa with a mining objective. In this case an electrical tomography is shown, this helped to characterize a geological fault already identified with evidence of mineralization, which was not clearly observed at surface. Then, with the help of the geophysical survey it was mapped with greater precision and helped in the location of the drill holes, avoiding a greater expense in the mining exploration.

The methodology that must be used to determine the design of the array, the parameters and the conditions that must exist to acquire a good data survey and thus reduce the possible errors and failures in the field survey work is mentioned. Likewise, for data filtering and processing, a methodology proposal is mentioned that has the minimum requirements to obtain a good data inversion and an interpretation that reflects reality with greater certainty.

These three case studies are part of the experience acquired during the nine years that I have been carrying out geophysical data surveys with different methods and equipment. In this work, I share recommendations and observations about this method.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes

El método de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D es una técnica geofísica, que adquiere valores de resistividad eléctrica, mediante los cuales se determina la distribución de la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo, esto permite producir una imagen de contrastes de resistividad y caracterizar la zona de estudio mediante perfiles resistivos.

La resistividad eléctrica de los materiales es una medida que cuantifica la oposición de un material al flujo de corriente eléctrica, esta medida ayuda a identificar cambios de granulometría, saturación, mineralización y continuidad en los materiales del subsuelo.

Este tipo de información es muy útil en el área de las ingenierías, tales como la civil, ambiental, minera, hidrogeología y ambiental, por mencionar algunos ejemplos. Esto debido a que, con base en valores de resistividad eléctrica e información geológica, se pueden correlacionar los modelos geoelectrónicos con datos geológicos, geohidrológicos o geotécnicos, donde se pueden inferir estructuras geológicas, nivel de saturación en el subsuelo y zonas de mineralización, entre otras.

Esta técnica tiene su fundamento físico en la ley de Ohm, la cual asocia la corriente eléctrica con la variación de voltaje y la resistencia eléctrica. En campo el método consiste en inyectar corriente eléctrica al subsuelo mediante un par de electrodos, generando un campo eléctrico, permitiendo medir la diferencia de potencial en otro par de electrodos, la ventaja que presenta es que al tener varios electrodos conectados al mismo tiempo se hacen tantas mediciones como se desee de acuerdo con el arreglo de medición que se proponga.

Hay diferentes instrumentos para realizar la adquisición, ya sean manuales o automáticos, la calidad de adquisición dependerá del apilamiento (*stacking*), la fuente de poder, colocación de los electrodos, condiciones del terreno y criterio del operador.

Para la adquisición existen diferentes arreglos, los cuales se ocupan dependiendo el objetivo del estudio, ya que pueden variar en la resolución lateral o vertical, influenciando la ubicación espacial y geometría de la posible anomalía. La profundidad de investigación está determinada por la longitud del arreglo y el espaciamiento entre electrodos.

Después de obtenidos los datos, el procesamiento consiste en revisar los datos por nivel ya sea en Excel u otro software, recalculando algún dato, eliminándolo por un posible error en la adquisición o la aplicación del algún filtro. La inversión se puede realizar en software como el RES2DINV o Earthimager, por mencionar algunos.

1.2 Objetivo

1. Entender y reforzar el conocimiento de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D.
2. Exponer las experiencias obtenidas en el proceso de adquisición y procesamiento de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D
3. Plantear una metodología de adquisición y procesamiento.

Capítulo 2 Aspecto Teórico que sustenta al método de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE 2)

2.1 Fundamentos Teóricos del Estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE 2D)

La Tomografía de Resistividad Eléctrica, es una técnica geofísica de corriente continua y tiene como objetivo investigar la resistividad eléctrica del subsuelo, adquiriendo múltiples medidas realizadas desde la superficie. En la literatura hay bastante información con respecto a la teoría, en este trabajo se apoya en autores como Orellana (1982), Loke (1999) y Kearey (2002) para la redacción de este capítulo.

El método consiste en inyectar una determinada cantidad de corriente al subsuelo, mediante un par de electrodos (C1 y C2), conocidos como electrodos de corriente, generando un campo eléctrico, permitiendo medir la diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones de resistencia que resulta de los diversos materiales y estratos que componen el subsuelo, por medio de otro par de electrodos (P1 y P2) conocidos como electrodos de potencial. La figura 1 muestra el funcionamiento del método.

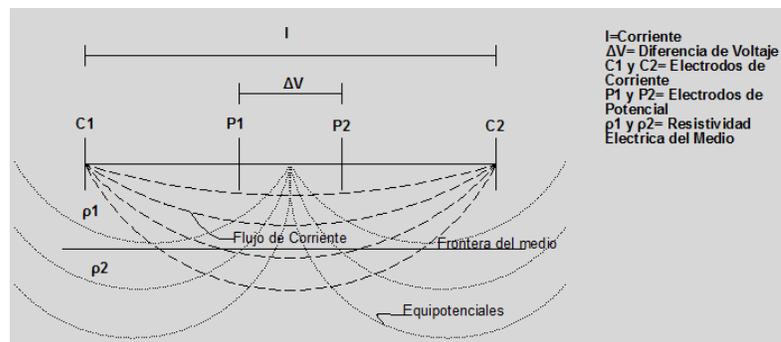


Figura 1 Diagrama que indica el funcionamiento del dispositivo electródico lineal, modificada de Knödel (2007)

Como bien se sabe la teoría de los métodos geofísicos se consideran en un medio homogéneo, isótropo y lineal, las ecuaciones de Maxwell son consideradas las bases teóricas del método y se expresan:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \dots (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \dots (2)$$

Se sabe que, por el Teorema de Helmholtz, el campo eléctrico se expresa $\vec{E} = -\nabla\varphi$, conociendo la ecuación de Ohm, se obtiene la densidad de corriente \vec{J} :

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) \dots (3)$$

Sustituyendo \vec{E} en (3):

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma(\vec{r})\nabla\varphi(\vec{r}) \dots (4)$$

Mediante la Integral de flujo entre la corriente I y la densidad de corriente \vec{J} , se conoce la divergencia de \vec{J} :

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = I\delta(\vec{r}) \dots (5)$$

Sustituyendo (4) en (5) se obtiene la ecuación diferencial del potencial eléctrico para una fuente puntual:

$$\nabla \cdot [\sigma(\vec{r})\nabla\varphi(\vec{r})] = -I\delta(\vec{r}) \dots (6)$$

La ecuación con que se representa la diferencia de potencial que se mide entre dos puntos:

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(\vec{r})dl \dots (7)$$

Sustituyendo (3) en (7), se obtiene una ecuación en términos de resistividad ρ y densidad de corriente $\vec{J}(\vec{r})$

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \rho(\vec{r})\vec{J}(\vec{r})dl \dots (8)$$

Considerando dos electrodos que miden la diferencia de potencial, de una fuente puntual en un medio homogéneo, utilizando la ecuación (5) en los electrodos de corriente, se tiene $\vec{J}(\vec{r}) = \frac{I\vec{r}}{2\pi r^3} \dots$ (9)

Sustituyendo (9) en (8) y dado que, por ser un método lineal, las mediciones se realizan en dirección de x , por lo que para el vector $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$, las componentes en y y z serán igual a 0, la diferencia de potencial para un medio homogéneo queda:

$$\Delta\varphi = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{x \cdot dx}{x^3} \dots (10)$$

Resolviendo la integral (10) y renombrando $\Delta\varphi$ a ΔV :

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots (11)$$

El factor geométrico k depende únicamente de la geometría del arreglo de los electrodos, este factor determina el comportamiento del dispositivo, representando la longitud del campo eléctrico a la fuente que lo genera y se expresa:

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)^{-1} \dots (12)$$

Sustituyendo (12) en (11) y despejando ρ :

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} k \dots (13)$$

Esta es la ecuación de la resistividad para un medio homogéneo, isótropo y lineal (13), sin embargo en el campo dichas condiciones, son prácticamente imposibles de encontrar, por lo que, al reconsiderar sustituyendo en (13) en (8):

$$\rho = \frac{k}{I} \int \rho(\vec{r}) \vec{j}(\vec{r}) dl \dots (14)$$

La resistividad que se obtiene de un medio heterogéneo es una resistividad aparente, debido a que el subsuelo está compuesto de diferentes materiales y no es la resistividad real del terreno, pero se toma como base para la interpretación de resultados.

$$\rho_a(\vec{r}) = \frac{\Delta V(\vec{r})}{I} k \dots (15)$$

La resistividad de los materiales varía dependiendo de su porosidad, permeabilidad, temperatura, saturación de fluidos, química de los fluidos, grado de fracturamiento y su composición mineral.

2.2 Conductividad eléctrica de los materiales del subsuelo

A la capacidad de permitir el flujo de corriente eléctrica a través de sí, se le conoce como conductividad eléctrica. Los materiales con mayor conductividad son el agua, metales y las sales.

En el caso del agua, su conductividad electrolítica dependerá del contenido de sales que contenga, se sabe que, en zonas termales, debido a la temperatura y contenido mineral, la densidad del agua disminuye por lo que hace que tenga mayor conductividad, así mismo el agua de mar debido a su alto contenido de sales es más conductora que el agua potable.

Debido a su composición química los metales son capaces de generar corrientes de energía cuando interactúan con un campo eléctrico, por eso son buenos conductores de energía, los metales con mayor conductividad electrónica son el oro, plata, cobre, hierro y aluminio.

Por lo tanto, la conductividad permite identificar qué tipo material yace en el subsuelo al inyectarle corriente eléctrica, determinando si es conductor o no.

Esta distinción ayuda en campo a poder delimitar espacialmente algunas zonas conductoras de otras menos conductoras, ya que la mayoría de las rocas no tienen una buena conductividad; esta varía dependiendo la porosidad, fracturamiento, contenido de agua y litología.

La propiedad inversa de la conductividad eléctrica es la resistividad eléctrica, es decir, la resistencia que presentan los materiales al flujo de corriente eléctrica a través de sí. Se usa más la resistividad que la conductividad debido a su representación en la ley de Ohm y sus unidades son Ωm (Ohm metro).

Para la aplicación en Ciencias de la Tierra ya existen tablas teóricas de los valores de resistividad, a continuación, se muestran algunos de valores de resistividad con la finalidad de ejemplificar.

Material	Rango de Valores (Ωm)
Granito	1000 - 10^6
Basalto	1000 - 10^6
Andesita	1000 - 10^7
Diorita	1200 - 1.5×10^4
Gabro	1000 - 10^6
Lavas	100 - 5×10^4
Pizarra	600 - 4×10^7
Mármol	100 - 2.5×10^8
Cuarcita	100 - 2×10^8
Arenisca	8 - 4000
Lutita	20 - 2000
Caliza	100 - 5000
Limolita	50 - 10^7
Dolomita	350 - 5000
Arenas	30 - 500
Arcilla	1 - 100
Limos	10 - 200
Aluvión	10 - 800
Gravas	50 - 1000
Conglomerado	1000 - 1×10^4
Agua Dulce	10 - 100
Agua Salada	.2 - 4

Tabla 1 Valores de Resistividad Eléctrica de algunos materiales el subsuelo. Loke (1997)

2.3 Tipo de arreglos electródicos

A la disposición geométrica de los electrodos, se le conoce como arreglo electródico, los cuales constan generalmente por dos electrodos de corriente A (C1) y B (C2), así como dos electrodos de potencial M (P1) y N (P2).

En campo la elección del tipo de arreglo dependerá del objetivo de estudio, el tiempo destinado a la adquisición y la profundidad de investigación deseada, los arreglos más utilizados son Dipolo-Dipolo, Wenner, Wenner-Schlumberger y Polo-Dipolo.

En general, la técnica de tomografía consiste en que los electrodos de corriente A, B y de potencial M, N tengan la misma distancia de separación, es decir, A y B mantendrán la misma distancia "a" entre ellos e igualmente M y N, a excepción del método Polo-Dipolo.

Conforme se toman los datos de la sección se van separando los pares de electrodos AB y MN, esta distancia entre pares de electrodos será denominada como "na" ya que el incremento de esta distancia es en múltiplos de "a", este múltiplo es conocido como el nivel del arreglo "n".

2.3.1 Arreglo Dipolo-Dipolo

En este arreglo se colocan los dos electrodos de corriente A y B con una distancia "a", así como los de potencial M y N, la cual será siempre igual para ambos pares. Al aumentar la distancia "na", aumenten los niveles y la profundidad de investigación. La figura 2 representa la configuración del arreglo.

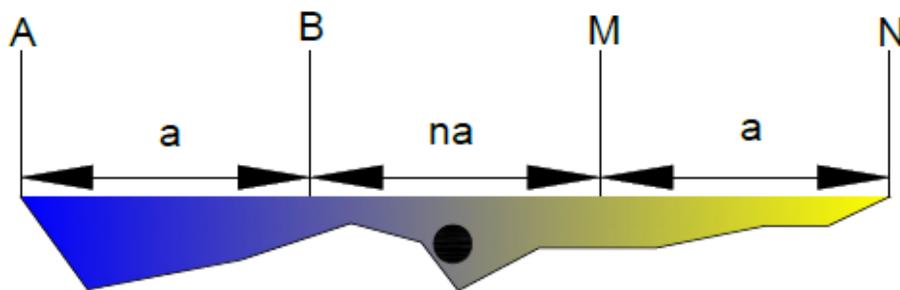


Figura 2 Diagrama Dipolo-Dipolo modificado de Loke (2010)

Su factor geométrico es: $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$

Este arreglo tiene buena sensibilidad a los cambios resistivos horizontal, pero poco sensible a los cambios verticales, por lo que se recomienda para identificar estructuras verticales, la profundidad de investigación varía de un 20% a 15% de la longitud total del arreglo de acuerdo con Loke (2010), esta variación se debe a las condiciones del sitio donde se lleve a cabo.

2.3.2 Arreglo Wenner

Este arreglo cuenta con tres variaciones Wenner Alpha, Wenner Beta y Wenner Gamma, la distancia entre electrodos siempre debe de ser equidistante, en la variación Alpha los electrodos de potencial MN van al centro y los electrodos de corriente AB van a los extremos. La figura 3 representa la configuración del arreglo.

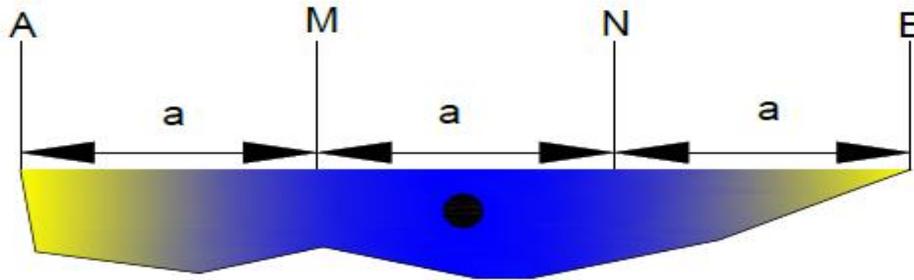


Figura 3 Diagrama Wenner Alpha modificado de Loke (2010)

Su factor geométrico es: $K = 2\pi a$

Para el Wenner Beta se colocan juntos los electrodos de corriente y también los de potencial con la distancia equidistante. En la variación Gamma los valores los electrodos van intercalados, primero uno de corriente seguido por uno de potencial y así sucesivamente con una distancia equidistante entre los electrodos.

Este arreglo es menos sensible a los cambios horizontales, se recomienda para identificar estructuras verticales, pero es poco eficaz para los cambios horizontales, la profundidad de investigación es aproximadamente 0.5 de la distancia "a" según Loke (2010).

2.3.3 Arreglo Wenner-Schlumberger

Este arreglo es considerado como una combinación entre el arreglo Schlumberger, utilizado para hacer SEV y el arreglo Wenner, en este arreglo la disposición de los electrodos es prácticamente la misma que en el arreglo Wenner, con la diferencia que la distancia "a" entre los electrodos de potencial MN siempre es la misma, mientras los electrodos de corriente AB se abren hacia los extremos, dependiendo de los niveles de adquisición. La figura 4 representa la configuración del arreglo.

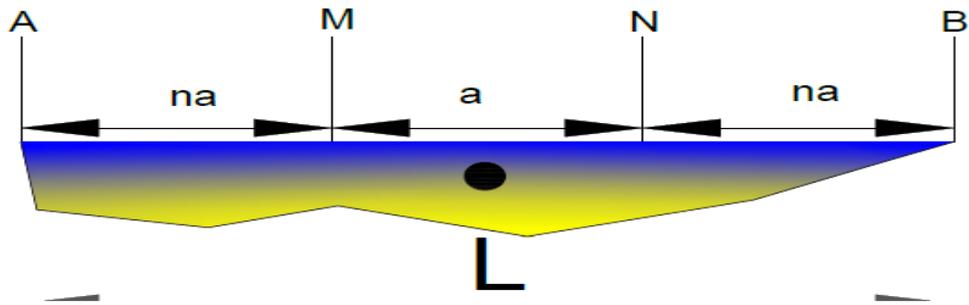


Figura 4 Diagrama Wenner-Schlumberger modificado de Loke (2010)

Su factor geométrico es: $K = \pi n(n + 1)a$

Se puede utilizar para identificar estructuras horizontales y verticales, ya que tiene muy buena sensibilidad en los cambios horizontales y verticales, la profundidad de investigación aproximada es de la quinta parte de la longitud total del tendido señalado por Loke (2010).

2.3.4 Arreglo Polo Dipolo

En este arreglo los electrodos de potencial MN con una separación "a" y uno de los electrodos de corriente B se coloca a una gran distancia de los potenciales, en teoría al infinito, el otro electrodo de corriente A se coloca a la distancia "na". La figura 5 representa la configuración del arreglo.

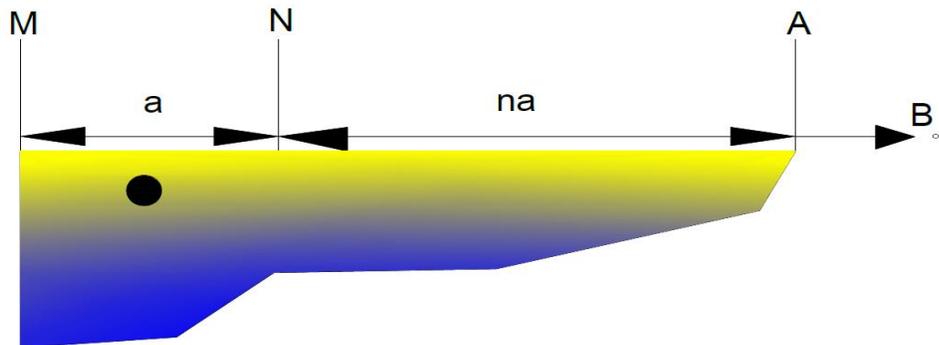


Figura 5 Diagrama Polo-Dipolo modificado de Loke (2010)

Su factor geométrico es: $K = 2\pi n(n + 1)a$

Este arreglo ayuda a identificar las estructuras verticales, ya que consta de buena cobertura horizontal, sin embargo, debido a su asimetría tiende a desplazar geoméricamente los datos, para corregir este error, es necesario tomar una nueva lectura en el orden inverso de los electrodos, la profundidad de investigación es de un tercio de la longitud total del tendido mencionado por Loke (2010).

2.4 *Stacking* o apilamiento

El *stacking* o apilamiento es el número determinado de medidas que se van a realizar para un par de electrodos, entre mayor cantidad de medidas se obtengan más limpia o uniforme será la señal y se reducirá el ruido que pueda estar presente en el sitio.

Los equipos de adquisición automática están programados con diferentes apilamientos, que varían de 2 a 2^7 mediciones, el tiempo de adquisición aumenta entre más grande sea el *stacking*, en algunos equipos se puede modificar el pulso, el cual es, el tiempo en que se está inyectando corriente al subsuelo medido en milisegundos.

2.5 Numero de Datos

Dependiendo de la estructura, profundidad y detalle que se requiera en el estudio, se escoge el arreglo más indicado a realizar, cada arreglo tiene diferente geometría, por lo que adquiere de distinta forma y en cantidad los datos que se miden en el lugar.

A continuación, se exponen cómo queda la geométricamente la adquisición de los datos para un arreglo de 48 electrodos, las figuras 6, 7 y 8 muestran la geometría para los arreglos Polo-Dipolo, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo por ser los más conocidos en la industria.

Se observa que el arreglo Dipolo-Dipolo obtiene más niveles de medición y cantidad de datos, lo cual ayuda en mucho a discretizar con más detalle las condiciones del medio que se está midiendo.

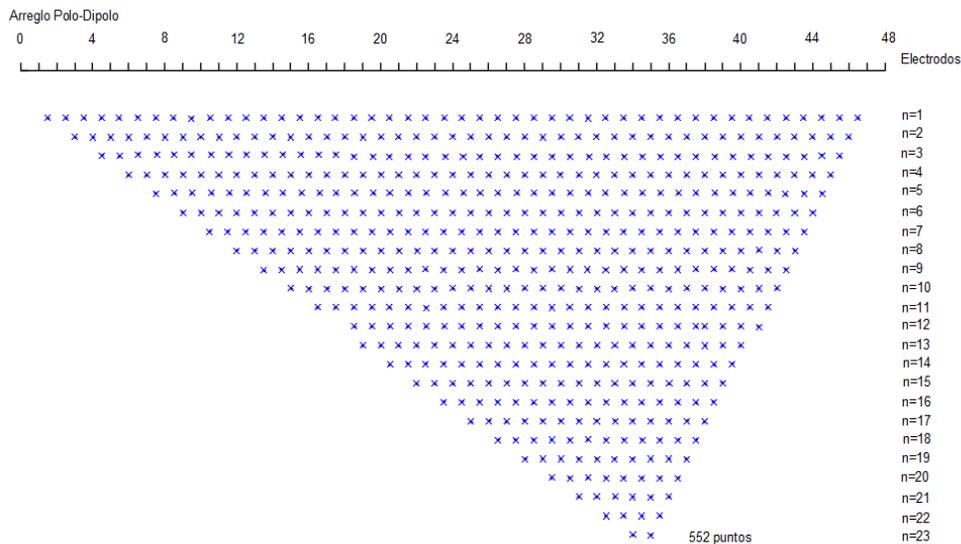


Figura 6 Distribución Geométrica de los puntos en el arreglo Polo- Dipolo modificado de Loke (1999)

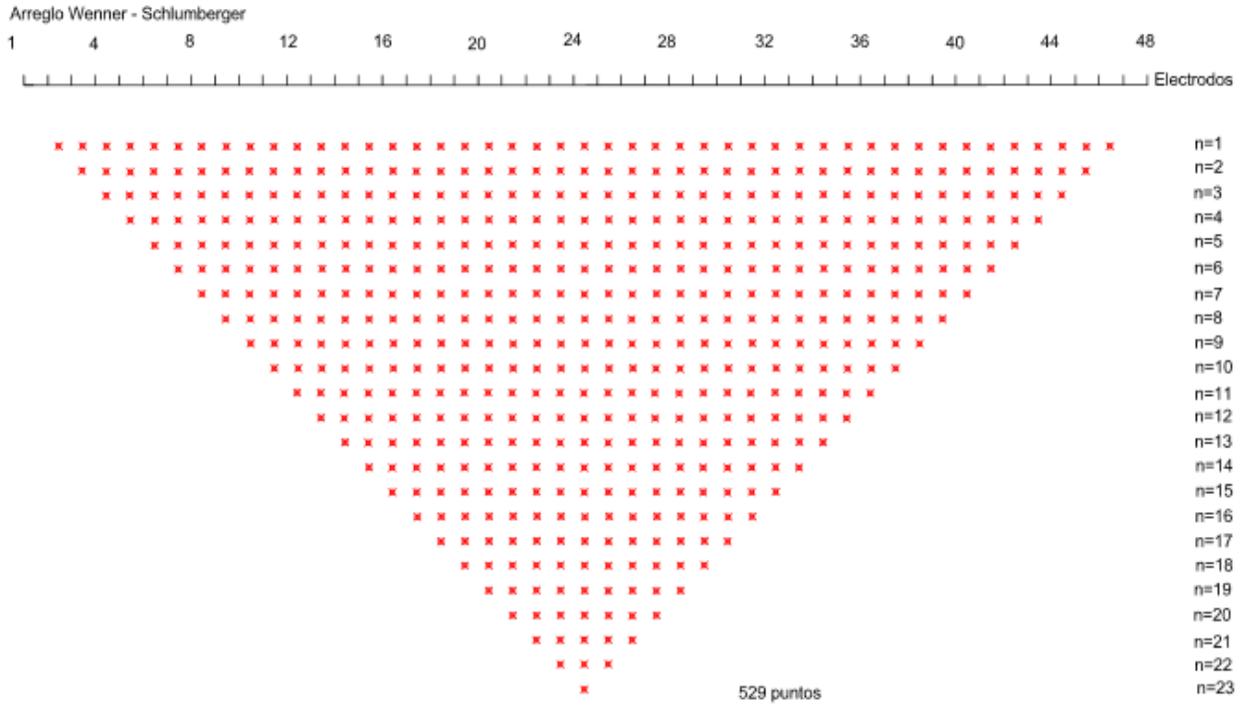


Figura 7 Distribución Geométrica de los puntos en el arreglo Wenner-Schlumberger modificado de Loke (1999)

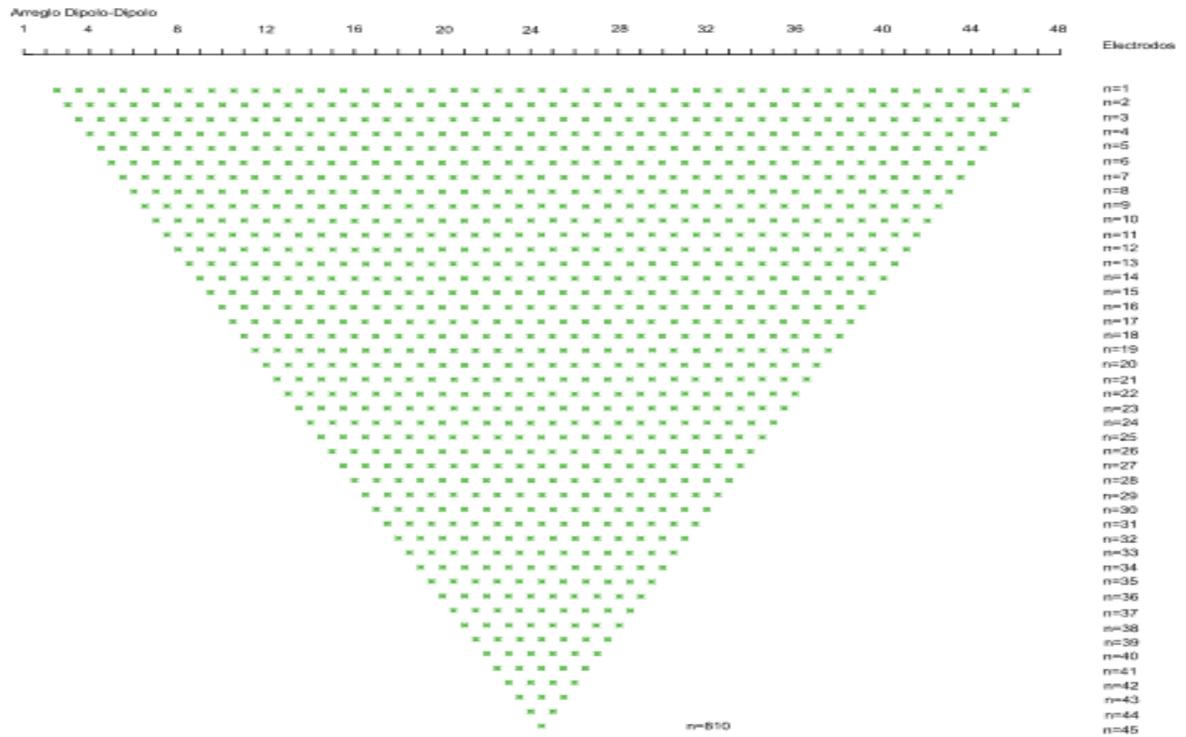


Figura 8 Distribución Geométrica de los puntos en el arreglo Dipolo-Dipolo modificado de Loke (1999)

2.6 Roll Along

La técnica de *Roll Along* se realiza cuando la longitud total de la lectura sobre pasa el total de los electrodos disponibles, es decir, si se tiene que realizar una tomografía eléctrica de 300 metros con separación de 3 metros entre cada electrodo, se necesitan 100 electrodos para poder tomar los datos de una sola vez. Sin embargo, en la práctica esto se vuelve complicado debido a que los equipos en general solo cuentan con 48 canales (electrodos) para conectar y faltarían 52 electrodos para con cubrir la longitud total, el *Roll Along* permite tomar los datos consecutivamente al ir cambiando los electrodos a las posiciones siguientes de modo que las combinaciones de electrodos se cumplan para el arreglo elegido, moviendo los electrodos iniciales al final, hasta completar la distancia deseada, la forma de programación depende del equipo que se utilice.

La profundidad de investigación será determinada por la longitud inicial del arreglo de electrodos conectados, para el ejemplo serían los 48 electrodos conectados con separación de 3 metros entre cada uno, dando una longitud de 144 metros, en el caso de realizar el arreglo dipolo-dipolo se tendría una profundidad de investigación aproximada a los 30 metros.

En la figura 9, se muestra un ejemplo de cómo quedan acomodados los datos en la adquisición del *Roll Along* con 48 electrodos disponibles y una longitud total de 96 electrodos con el equipo GD-10 de Geomatic.

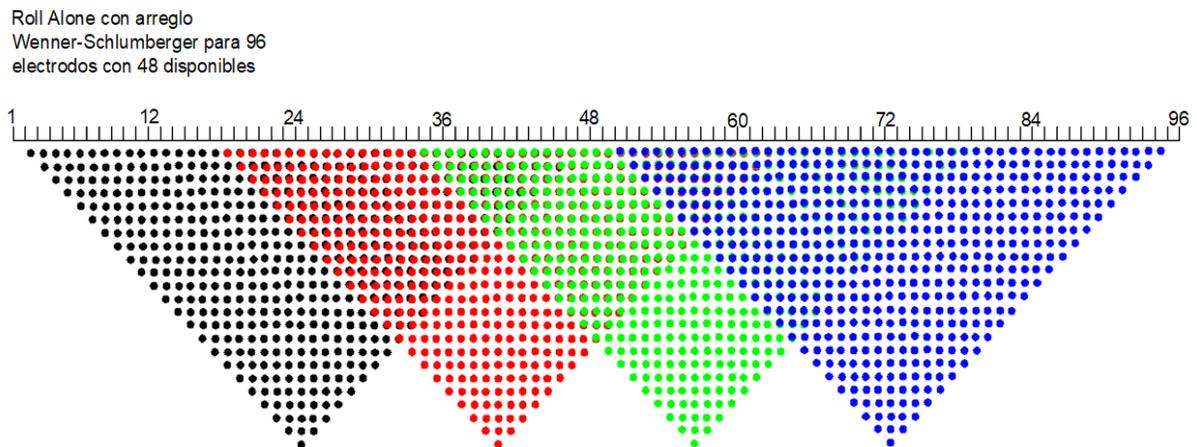


Figura 9 Observamos el traslape y el acomodo geométrico de los datos al realizar el Roll Along., modificado del manual de Geomatic. (2020)

2.7 Función de sensibilidad

La función de sensibilidad es un indicador de la afectación del potencial medido en el arreglo utilizado, es decir, si el semiespacio homogéneo sufre una variación de la resistividad en un pequeño volumen dentro del subsuelo (Furman, A. Terre, T. y P. Warrick, A. W., 2003). Esto ayuda a identificar la influencia de los cuerpos con diferente resistividad en el semiespacio muestreado. En teoría entre más alto sea el valor de la función de sensibilidad, mayor influencia tiene en las mediciones el cuerpo con resistividad diferente al resto del medio, según lo mencionado por autores como McGillivray y Oldenburg (1990) y Loke (2012).

La distribución de sensibilidad espacial es única para cada arreglo, la magnitud de la función de respuesta cambia, así como la polaridad, pero la función de sensibilidad permanece sin cambios y es positiva. A continuación, se muestran los mapas de función de sensibilidad para los arreglos Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo en las figuras 10, 11 y 12.

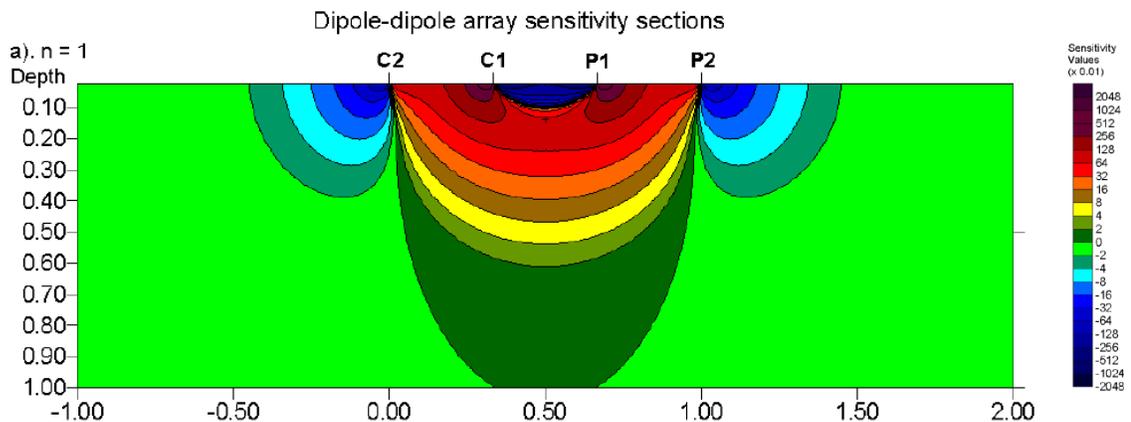


Figura 10 Mapa de Sensibilidad para el arreglo Dipolo-Dipolo (Loke, 2010)

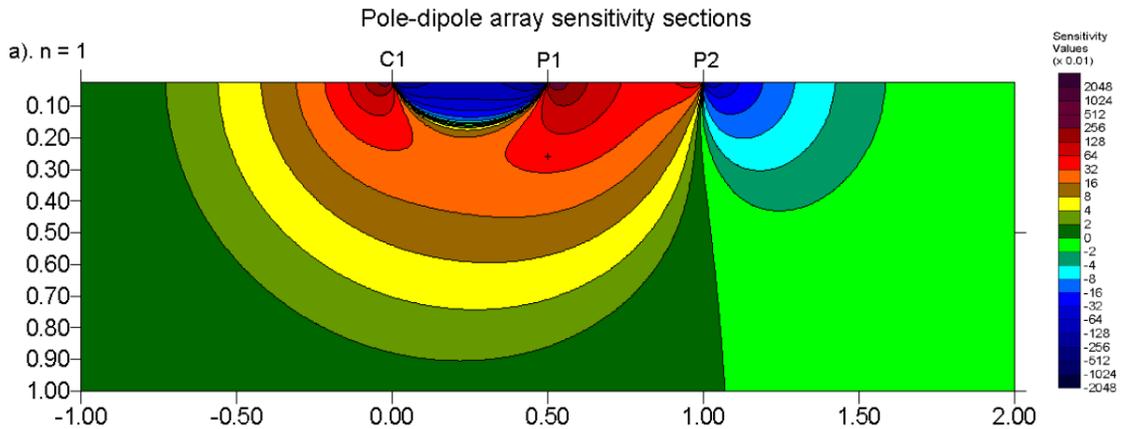


Figura 11 Mapa de Sensibilidad para el arreglo Polo-Dipolo (Loke, 2010)

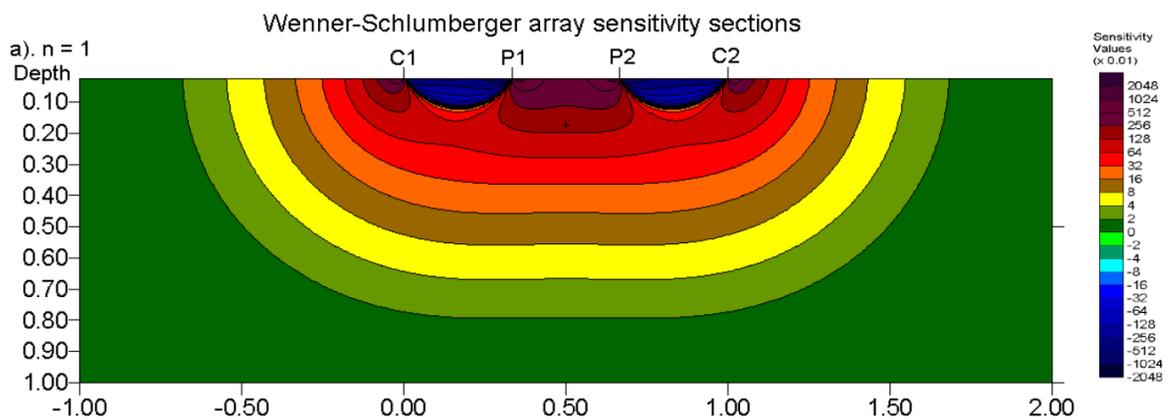


Figura 12 Mapa de Sensibilidad para el arreglo Wenner-Schlumberger (Loke, 2010)

2.8 Teoría de inversión

En la geofísica es muy común usar el término de modelo para señalar un medio con parámetros físicos. Las prospecciones geofísicas se aplican a la búsqueda de cuerpos o anomalías dentro de un modelo idealizado, mediante los datos adquiridos en campo.

La teoría de inversión es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten obtener información útil del mundo físico a partir de inferencias logradas a través de observaciones. (Menke, 1989). Con estos conceptos en mente se puede considerar a la Tierra como un sistema físico (Zuñiga L.R., 2015) y que se puede dividir en tres etapas:

- A. Parametrización del sistema: Adquirir un conjunto mínimo de parámetros que lo caractericen completamente y se puedan entender sus procesos.
- B. Modelo directo: Entender las leyes físicas del modelo, para establecer los valores de los parámetros del modelo y predecir resultados de las mediciones sobre algunos parámetros observados.
- C. Modelo indirecto: Emplear resultados reales de algunas mediciones de parámetros observables, para inferir los valores reales de los parámetros del modelo.

Aplicando la teoría de inversión, en la técnica de tomografía eléctrica se encuentra, con que los valores de resistividad aparente obtenida en campo, hay que convertirlos a resistividades reales, mediante un algoritmo de inversión de datos y así poder obtener una pseudosección de resistividades aparentes a un modelo de resistividades verdaderas.

El algoritmo de inversión propuesto por Loke y Baker en 1996, emplea el método de mínimos cuadrados para obtener una imagen en 2D. (Tejero, 2002) El modelo propone dividir el subsuelo en prismas rectangulares de resistividad e intenta calcular el valor de resistividad real de cada prisma, para ello aplica un método de optimización no lineal iterativo. (Montaño Mejía, F.H., Vega, P.A. 2009)

Considerando, la resistividad aparente expresada en términos de la expansión de primer orden de la serie de Taylor (Loke y Baker, 1996):

$$\rho_{\alpha} = F(\vec{p}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k \quad \dots(16)$$

El vector de parámetros de dimensión M, es \vec{p} . Entonces, la resistividad verdadera para el prisma k-ésimo es p_k y la función que determina la resistividad aparente es $F(\vec{p})$. Se realiza la diferencia entre la resistividad observada y la resistividad calculada o estimada de acuerdo con el modelo directo, y lo podemos expresar:

$$\delta \rho_{\alpha} = \rho_{\alpha}^{obs} - \rho_{\alpha}^{est} \quad \dots(17)$$

En que ρ_{α}^{obs} es la resistividad aparente y ρ_{α}^{est} es la resistividad calculada a partir del modelo. Esto permite calcular el error cuadrático medio (RMS), entre los datos de campo y el modelo teórico, para usarlo como criterio de convergencia, si se tiene un valor aceptable del RMS, se puede concluir que se tiene un buen modelo de inversión. Por lo tanto, se puede expresar el RMS como:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{\alpha j}^{obs} - \rho_{\alpha j}^{est})^2 \quad \dots(18)$$

En el cual, N es el número de mediciones de por nivel. Sustituyendo la resistividad aparente de la expresión (16) en el RMS (18), se tiene:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{\alpha j}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k)^2 \quad \dots(19)$$

Para obtener el RMS con respecto al vector de resistividades, se expresa como:

$$\frac{\partial E^2}{\partial p_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\rho_{\alpha j}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k) \left(- \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} \right) = 0 \quad \dots(20)$$

Donde $i=1, 2, 3, \dots, M$. La ecuación de ajuste normal, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sum_{k=1}^M \delta p_k \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j}{\partial p_k} \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_{\alpha j} \quad \dots(21)$$

Esta ecuación (21) comúnmente se expresa de forma matricial, la cual se modifica, para obtener un arreglo en términos de δp_a (Loke y Barker, 1996), se tiene:

$$\delta p_a = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J \delta p_a \quad \dots(22)$$

En el cual, C es un filtro de convergencia que minimiza las perturbaciones en el modelo, el exponente T simboliza la matriz transpuesta, λ es un factor de amortiguamiento que apoya en la convergencia y J es la matriz Jacobiana, los elementos de derivadas parciales pueden quedar expresados como:

$$J_{pk} = \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \quad \dots(23)$$

Loke y Barker (1995) presentaron su método de Deconvolución por mínimo cuadrados, resolviendo la ecuación (23), mostrando lo flexible del método y su función para cada arreglo.

Cabe mencionar que el resultado de la inversión presenta algunas incertidumbres, debido al problema de la no unicidad. Para ello se cuenta con información particular del modelo, como geología, hidrogeología, mecánica de suelos, solo por mencionar algunas herramientas, que ayudan a caracterizar el modelo y reducir la incertidumbre.

Capítulo 3 Casos de aplicación

En los proyectos que he participado, se van a presentar tres casos de estudio donde se utilizó la técnica de tomografía eléctrica, cada caso tiene su propia particularidad, así como sus propios alcances debido a la planeación de los estudios, sus objetivos, especificaciones a cumplir y la adquisición.

La metodología en campo es prácticamente la misma para los casos de estudios. Debido a que los datos le pertenecen a un particular y pese a dar su permiso para mostrar la información, algunos casos aún se encuentran con intereses comerciales y la información aquí mostrada es únicamente con finalidad académica, por lo tanto, no se mencionan directamente a las empresas implicadas y en algunos casos no se muestran todas las líneas de tomografía adquiridas, solo se describe una línea por proyecto, considerando la línea de más importancia en cada proyecto. A continuación, se muestran los trabajos realizados.

3.1 Caso 1 TRE 2D en el municipio de Coacalco

En el año de 2017 se requirió de un estudio de Dipolo-Dipolo en el Municipio de Coacalco, Estado de México, se tiene como antecedente que el área donde se realizó el estudio era un antiguo banco de material que dejó un socavón y después, con el paso del tiempo, fue rellenado y compactado.

Actualmente en la zona se encuentra una plaza comercial y se planteaba continuar edificando en el predio. Uno de los requisitos para obtener el dictamen de viabilidad o protección civil para bodegas, centros comerciales o desarrollos inmobiliarios es un análisis de vulnerabilidad, dentro del análisis se realiza un estudio geotécnico, donde regularmente realizan mecánica de suelos y se apoyan de estudios geofísicos, complementarios que indiquen las condiciones del subsuelo y cumplan con la profundidad de investigación requerida, lo más común es el estudio de dipolo-dipolo, tendidos sísmicos o líneas de georadar.

Con la finalidad de obtener el permiso por parte de protección civil, se decidió realizar un estudio de mecánica de suelos y un estudio de tomografía eléctrica, esto debido a que el método permite obtener las variaciones de resistividad eléctrica a profundidad y lateralmente para correlacionarlas con las condiciones geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas y contaminación del suelo.

En el capítulo anterior se mencionaron las características de los arreglos. Por solicitud de Protección Civil comúnmente, se lleva a cabo el arreglo Dipolo-Dipolo, aunque no está especificado en algún documento oficial. Esto se debe a que esta identidad de gobierno se encuentra más familiarizado con este arreglo, el cual tiene una buena resolución lateral y permite identificar anomalías laterales, las cuales se pueden asociar con cavidades, fallas, fracturas, asentamientos, fluido de agua o lixiviados y observar la estratigrafía del área de estudio, previniendo posibles afectaciones en la construcción.

3.1.1 Marco de Geográfico Referencia

El área de estudio se encuentra en el municipio de Coacalco, en el Estado de México, las coordenadas geográficas del municipio son de norte $19^{\circ} 37' 45''$ y oeste $99^{\circ} 06' 16''$, con una altitud promedio de 2291 m.s.n.m.

3.1.1.1 Vías de comunicación

La principal vía de acceso a la zona de estudio es por la avenida José López Portillo, para mejor ubicación se encuentra la parada del Mexibus "Bosques del valle" y frente a ésta se observan dos supermercados. Para el acceso al área en cuestión, se entra por la avenida Aztlán, la figura 13 muestra zona de estudio.



Figura .13 La poligonal roja encierra la zona de estudio, imagen modificada de Google Earth.

3.1.1.2 Hidrología

El área de estudio pertenece a la Región Hidrológica 26 "Pánuco", dentro de la cuenca del río Moctezuma, así mismo a la subcuenca del Lago de Texcoco y Zumpango, la figura 14 muestra la zona de estudio en el mapa de cuencas de Inegi.

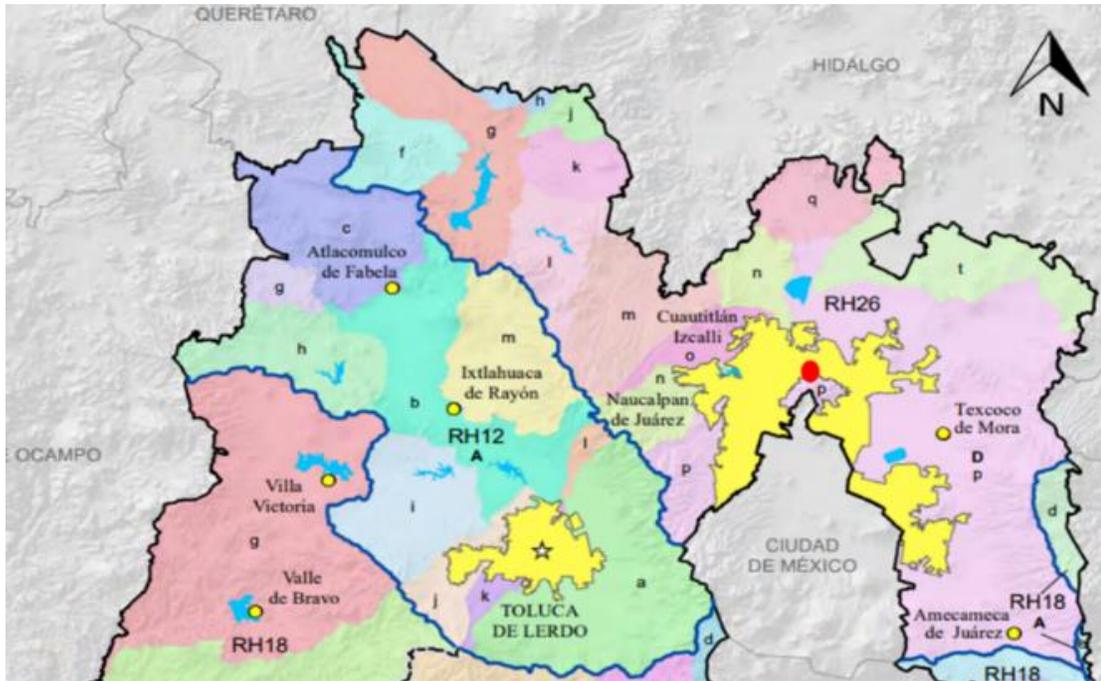


Figura. 14 La marca roja muestra la ubicación de la zona de estudio, dentro de las cuencas. (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico del Estado de México 2016)

3.1.2 Marco Geológico

A continuación, se describirá brevemente la geología local de la zona de estudio.

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), la carta geológico-minera 1:250000 Ciudad de México E14-2, en la zona de estudio se encuentran rocas de tipo andesita-dacita (TmA-Da) del Terciario Neógeno pertenecientes a la formación Xochitepec.

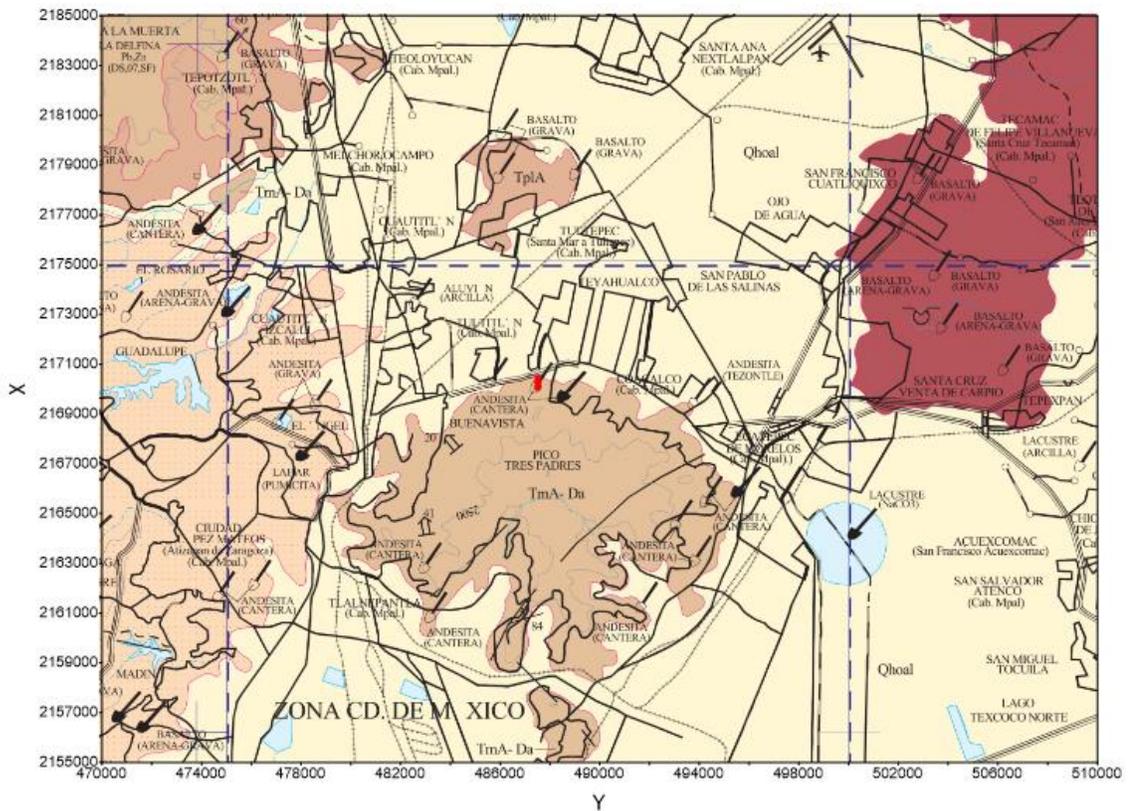


Figura. 15 Carta Geológica Ciudad de México E14-2 del SGM, la marca roja indica la ubicación del estudio

Como se mencionó antes, el terreno era un banco de extracción de materiales pétreos y no se rellenó completamente hasta sus niveles originales, debido a esto se encuentra topográficamente debajo del nivel natural del suelo. La mayoría de la superficie consiste en toba volcánica compacta color café y que al desmenuarse produce arcillas y limos de baja compresibilidad.

De acuerdo con los Pozos de Cielo Abierto PCA con profundidad máxima de 3 metros y a los pozos de penetración SPT con profundidad máxima de 15 metros, en la zona se encuentran presentes varios rellenos de arcillas y limos, empacando arenas, gravas, fragmentos de roca de diversos tamaños, así como algunas zonas de basura y cascajo.

3.1.3 Localización

Para la distribución de la línea de tomografía se tomaron en cuenta varios factores, zonas de interés, cubrir la mayor cantidad de terreno transversal y longitudinalmente, cumpliendo los alcances económicos del cliente.

Se realizó una línea con separación de 5 metros entre electrodos, ya que es la máxima separación para los cables que se utilizaron en la adquisición, la línea tiene una longitud de 415 metros. La figura 16 muestra el mapa de ubicación de la línea.

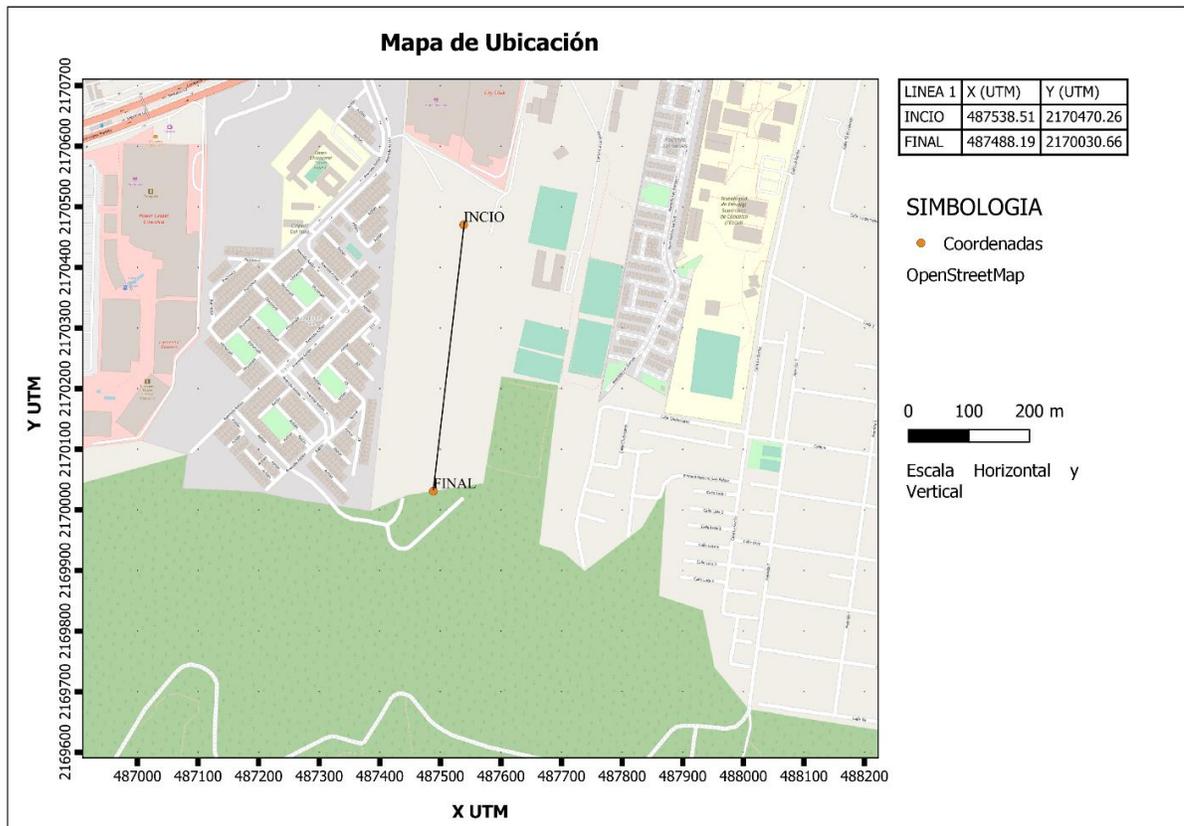


Figura. 16 Mapa de Ubicación de la línea de TRE y sus coordenadas.

3.1.4 Trabajo de Campo

Ya con la línea propuesta desde gabinete, se procede a verificar si en campo se puede realizar físicamente, ya que en algunas zonas se pueden encontrar obstáculos como maquinaria, excavaciones profundas, vegetación, muros, cercas o construcciones, que podrían hacer salir de la recta trazada originalmente para la tomografía y tener errores en la geometría de las anomalías.

Para evitar este tipo de error, se suele utilizar puntos de topografía o adquirir las coordenadas y elevación del electrodo con GPS diferencial para tener una mayor precisión y poder ingresar las elevaciones al perfil y obtener una sección más acercada a la realidad. La Figura 17 ejemplifica el uso de GPS diferencial, también se puede adquirir con GPS Garmin de mano, aunque presentará mayor error.



Figura. 17 GPS Diferencial Magellan utilizado en este proyecto.

Con el primer electrodo ya en posición, se extiende una cinta métrica en dirección al electrodo final y se colocan los electrodos sucesivamente a cada cinco metros, hasta cubrir la longitud total de la línea.

Los electrodos utilizados de preferencia deben ser de acero inoxidable e impolarizable, para evitar que se polarice el medio y afecte la medición, se debe tomar en cuenta que los electrodos deben de ser clavados de forma vertical y teniendo en consideración que, si se tiene mayor superficie de contacto entre el electrodo y el medio, mejor resistencia de contacto se obtendrá y adquirirá una mejor calidad en los datos. En algunos casos se humedece la superficie de contacto con alguna solución con sulfato de cobre para mejorar la transmisión de la corriente eléctrica.

Se procede a colocar los electrodos a los cables, en este paso también hay que verificar que se haga el contacto correcto entre el electrodo y la placa de los cables de conexión, que no se encuentre sucia y tenga buen contacto, ya que esto puede resultar en un mal dato de adquisición. El equipo realiza automáticamente las combinaciones del arreglo utilizado, mediante una medición prefijada.

Para la adquisición de esta línea se llevó a cabo en un tiempo de 4 horas, debido a los parámetros seleccionados en el equipo y verificación de la resistencia de contacto de los electrodos antes de iniciar la medición.

3.1.4.1 Equipo de Adquisición y Arreglo utilizado

El equipo que se ocupó para este proyecto fue el ARES I de GF Instruments, se usaron cables multielectrodicos para 8 electrodos y con máximo espaciamiento de 5 metros entre cada electrodo, y un total de 48 electrodos, la fuente en este caso fue una planta de energía con salida de 120 Volts. La figura 18 muestra el equipo ARES I en campo.



Figura. 18 Equipo ARES I utilizado para el proyecto.

De acuerdo a las especificaciones del cliente y el objetivo del estudio se utilizó el arreglo Dipolo – Dipolo, el cual tiene buena resolución a los cambios horizontales y esto ayudaría a identificar posibles cavidades o zonas de debilidad en el terreno, una limitación del método es que a profundidad, pierde potencial y a mayor distancia el dipolo es afectado por el ruido, por lo que hay que monitorear la pérdida de potencial, teniéndolo en cuenta cuando se realice el procesado y la interpretación.

Para el *Stacking* o Apilamiento, que es el número de mediciones que se realizan para una misma combinación o dato, en esta línea se utilizó 6, ya que se ha observado que mejora bastante la señal con respecto al apilamiento de 4 y no tarda demasiado tiempo en adquirir los datos, entre mayor sea el apilamiento, más tiempo ocupara la medición.

En esta línea se ocupó la técnica de Roll Along, en este caso para el equipo ARES I, se desplazan por secciones, al terminar la lectura inicial de los primeros 48 electrodos, se desplaza el primer cable, al final del tendido y se procede a la siguiente lectura, así se va cambiando sucesivamente el cable hasta llegar a la longitud deseada.

Como se mencionó anteriormente la profundidad de investigación, depende de la longitud del tendido inicial, la separación de electrodos, los materiales del subsuelo y el tipo de arreglo utilizado, para esta línea se espera una profundidad de investigación aproximada de los 40 metros.

3.1.5 Procesamiento

La descarga de datos del equipo ARES I es sencilla se conecta a un puerto USB en la computadora y con el software de Ares se descarga el archivo *.2dm, con este mismo software se exporta el archivo para el Software Res2DInv, esto entrega un archivo .DAT que ya viene con el formato necesario para ingresarlo al Res2DInv.

Desde este punto se puede iniciar a delimitar los datos, ya que para exportar los datos el Ares pregunta que datos se quieren exportar, a partir de que corriente, potencial, rango de resistividad y desviación estándar. La figura 19 ejemplifica el proceso.

Figura. 19 Ventana donde se ingresan los valores para exportar los datos del Software del Ares.

El siguiente paso es abrir el archivo .DAT en Excel o algún programa poder revisar los valores de resistividad, por niveles y así identifica que valores se encuentran fuera de la curva de tendencia, estos pueden ser sustituidos por un promedio ponderado entre los valores del mismo nivel, la media del nivel u otro tipo de filtros, solo por mencionar algunos. La figura 20 ejemplifica una curva de los datos de resistividad en uno de los niveles.

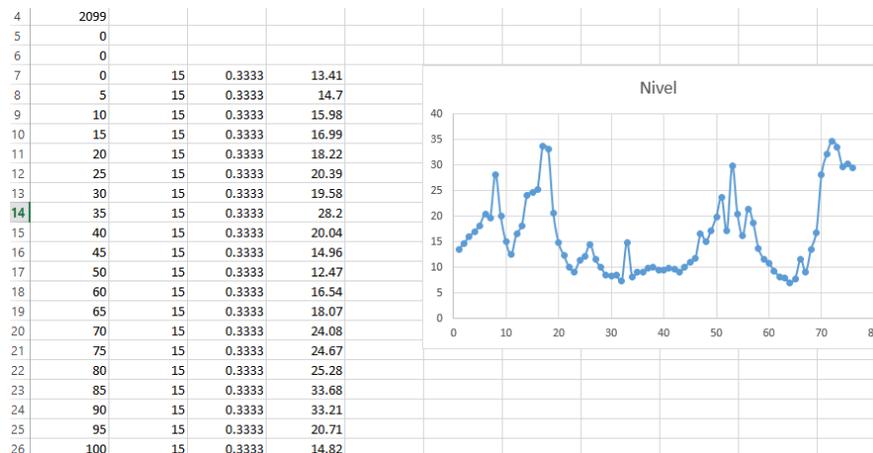


Figura. 20 Se observa una curva de resistividad por nivel, en Excel.

Ya con los datos filtrados, se ingresa la topografía al archivo .DAT dependiendo del programa, para realizar la inversión de los datos.

3.1.5.1 Inversión de Datos

La inversión de datos se hace con el programa Res2DInv, ya que es uno de los tantos programas, que presenta confiabilidad y resultados aprobados, en la comunidad geofísica, este programa realiza su inversión de acuerdo con el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin y Constable, 1990), también cuenta con la opción del método de Cuasi-Newton (Loke y Barker, 1996)

El programa también permite manipular el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento horizontal y vertical, con la finalidad de obtener la imagen que mejor se ajuste a las estructuras buscadas.

El primer paso es observar los datos crudos y después los datos filtrados, con la finalidad de ver el comportamiento general, asociar con las observaciones de campo y diferenciar si los posibles errores de adquisición se deban a una mala conexión de los electrodos o ruido de fuente externas por la infraestructura presente en la zona. La figura 21 muestra la diferencia entre los datos crudos y los filtrados.

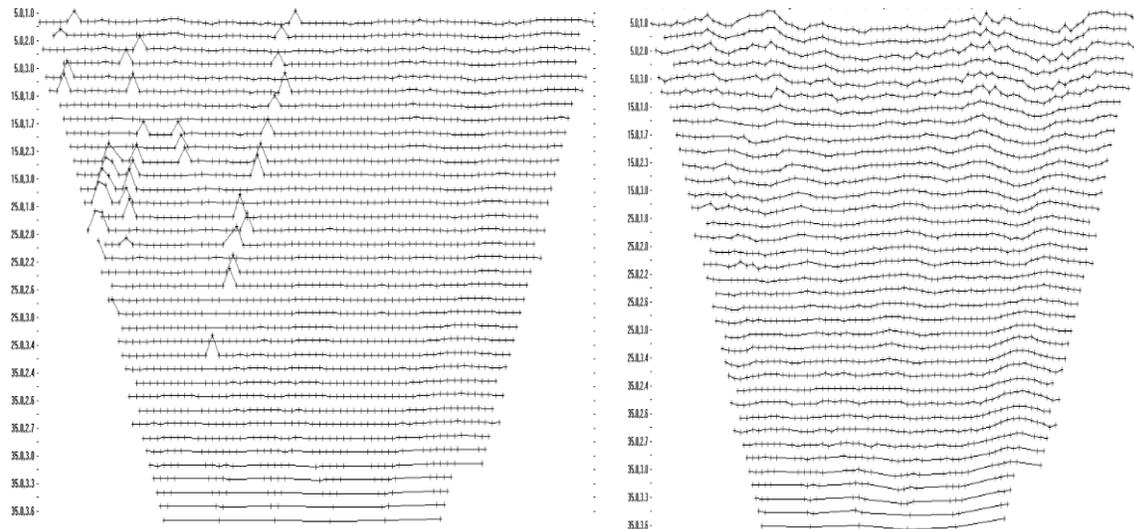


Figura. 21 A la izquierda se muestran los datos crudos y a la derecha los datos filtrados.

El filtro aplicado a los datos fue el de media móvil ponderada, con la finalidad de obtener la media, dando mayor peso a la tendencia de los datos de nivel, también se limpiaron datos, eliminando datos que quedaron totalmente fuera de la tendencia de la curva de resistividad.

Al realizar la inversión se realizaron pruebas con varios parámetros para ver cómo se modificaba la pseudosección, para así llegar a un modelo que se ajustara más a la geología y poder correlacionarlo

con lo visto en campo, siempre teniendo en cuenta el valor del RMS en las iteraciones, para no caer en un error y forzar el modelo a algo irreal.

En la figura 22 se presentan las imágenes que arroja el programa después de realizar la inversión, la primera de ellas es la pseudosección de resistividad aparente medida, la segunda pseudosección es de resistividad aparente calculada y la tercera sección es de resistividad después de la inversión de los datos.

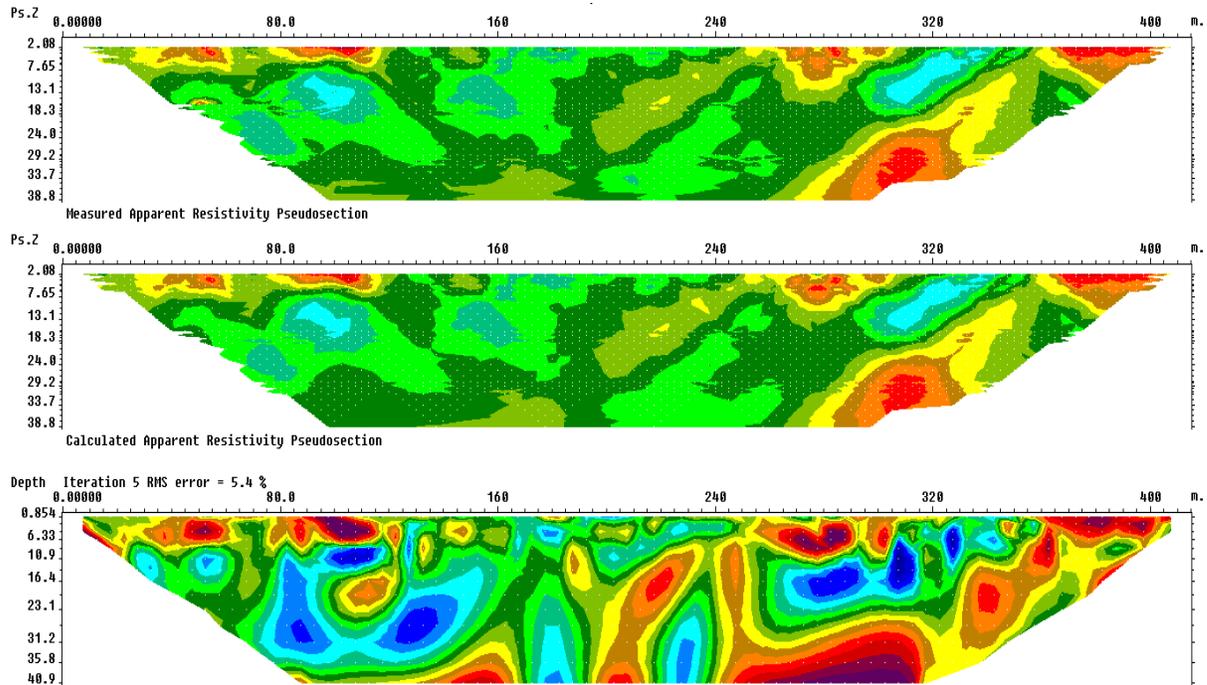


Figura 22 Se muestran las pseudosecciones obtenidas del Res2DInv, se puede apreciar un RMS de 5.4% en la quinta iteración.

Con la finalidad de manipular la imagen y darle un mejor formato a la entrega de resultados, se exporta a Surfer, se modifica paletas de colores e intervalos de resistividades.

3.1.6 Resultados

Al obtener la sección de resistividad, inicia la caracterización de las diferentes capas resistivas o unidades geoelectricas, por lo tanto, se debe correlacionar, con los diferentes estudios previos con los cuales se cuente, pueden ser mecánica de suelos, nivel freático, estructuras geológicas y otros métodos geofísicos que ayuden a definir con mayor precisión lo observado en la sección, no perdiendo de vista el objetivo del estudio.

3.1.6.1 Clasificación de resistividad eléctrica

Para fines de interpretación, la clasificación de resistividades agrupa un conjunto de valores de resistividad y se les designa una capa geoelectrica. A estas capas georresistivas se les asocian condiciones geológicas que están presentes en subsuelo.

Los valores de resistividad eléctrica en área de estudio oscilan de los 3 Ωm hasta los 60 Ωm , estos valores se encuentran dentro de lo esperado, debido a que la zona se encuentra sobre materiales de relleno y que la roca expuesta se encuentra intemperizada.

De acuerdo con los pozos de cielo abierto realizados en la zona, se tiene una gran variedad de material granular, como arcillas, limos, gravas, zonas de cascajo y fragmentos de roca, por lo que se dividieron en 4 unidades geoelectricas:

Unidad Geoelectrica	Valores de Resistividad	Materiales Asociados:
<i>U1</i>	<i>Mayor a > 24 Ωm</i>	<i>Terreno natural</i>
<i>U2a</i>	<i>Mayor a > 20 Ωm</i>	<i>Material de Relleno Somero</i>
<i>U2b</i>	<i>Menor a < 20 Ωm</i>	<i>Material fino compacto, limos y arcillas</i>
<i>U2c</i>	<i>20 a 50 Ωm</i>	<i>Fragmentos grandes de roca y cascajo</i>

Tabla 3 Clasificación Geoelectrica.

La unidad 1, asociada al terreno natural, representa materiales preexistentes, con valores mayores de 24 Ωm , se interpreta de esta manera ya que en esta zona no se muestran evidencias de alguna obra.

Los materiales de relleno en la parte somera del perfil, se asociaron la unidad 2a, con los antecedentes, se sabe que esta fue la última etapa de los depósitos, en algunas partes se conoce que los depósitos de relleno van 1 a 10 en la última etapa y sus valores se encuentran por arriba de los 20 Ωm .

Con valores menores de 20 Ωm , se asoció a la unidad 2b, la cual, representa los materiales finos, como limos y arcillas compactos, en particular la mayoría de estos valores van de 5 a 6 Ωm , siendo estos la capa con los valores más bajos de resistividad.

En cambio, la unidad 2c, es la capa con los valores de resistividad más altos, con valores de 20 a 50 Ωm , representa materiales como cascajo, trozos de concreto, pavimento y roca fracturada, por lo apreciado en campo.

3.1.6.2 Perfil 2D e Interpretación

A continuación, se muestra el perfil (figura 23) ya terminado, con topografía incluida, unidades geoelectricas marcadas y una paleta de colores que va de los 0.1 Ωm a 40 Ωm .

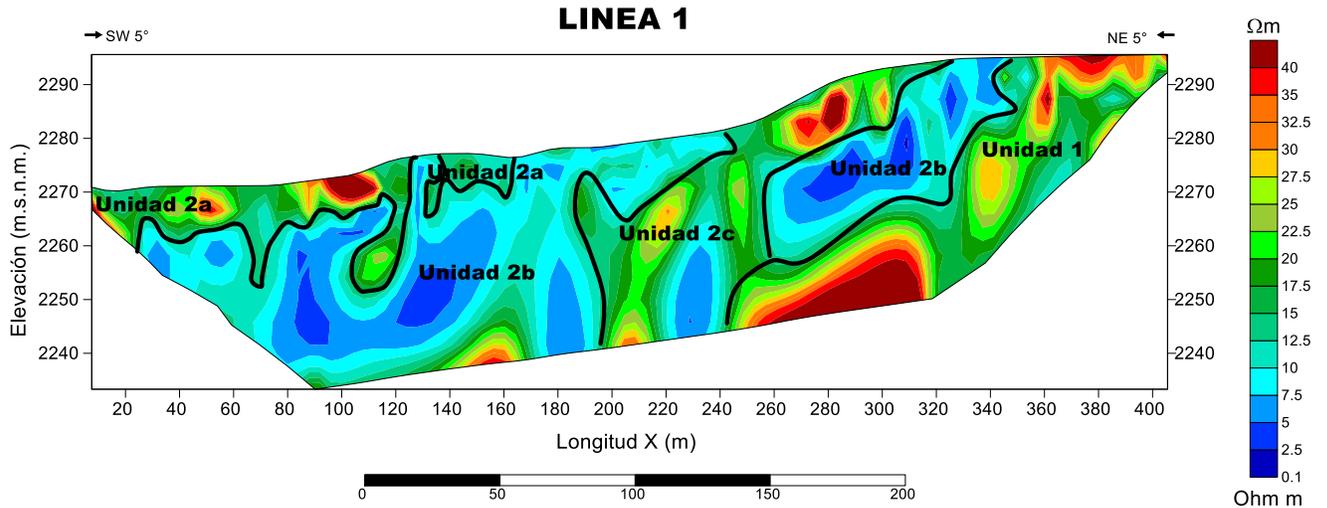


Figura 23. Perfil de la Línea de Tomografía adquirida mediante Dipolo-Dipolo

El perfil tiene 415 metros de largo, con separación de 5 metros entre cada electrodo, se obtuvo una profundidad de investigación aproximada a los 40 metros y se observan 5 unidades diferentes.

En la parte somera se asocia la unidad U2a, se tiene conocimiento que esta zona contiene material de relleno, que va del inicio del perfil a los 240 metros en el eje de las X, con un espesor aproximado de los 10 metros. Se muestra una zona de transición de los 240 a los 320 metros en el eje X, se asocia a la unidad U2c que representa cascajo y fragmentos grandes de roca. Se observa que de los 320 a los 415 metros del perfil se aprecia la unidad U1, identificada como suelo natural.

Debajo de los 10 metros de profundidad, se tiene un espesor bastante amplio de material granular, el cual, se asocia a la unidad U2b, con alrededor de los 30 metros de espesor y termina a los 200 metros en el eje X.

Entre los 200 y 240 metros en el eje X se tiene la Unidad 2c, esta zona contiene fragmentos de roca grandes, concreto, cascajo y de material con el que se suele rellenar. Después de esta zona de transición o contacto, entre el suelo natural y la zona de relleno, se tiene la unidad U1, asociada al terreno natural, suelo y roca de acuerdo con la geología de la zona.

3.1.6.3 Conclusiones y Recomendaciones

Como se puede observar el estudio cumple con el objetivo que se pretendía, el perfil que se obtuvo permite identificar perfectamente los contrastes de resistividad eléctrica, con los cuales, se pudo definir la geometría aproximada de las distintas capas de material granular, clasificar los valores de resistividad, asociarlos a materiales presentes en el subsuelo y definir los contactos entre ellos, el perfil también proporciona información acerca de las zonas de riesgo por infiltración de agua o una mala compactación.

La profundidad de investigación para Protección Civil es de 30 metros, el perfil cumple esta condición sin ningún problema ya que se obtuvo una profundidad de investigación de 40 metros. La información adquirida con este método permite tener una idea de la forma en que se rellenó la zona de estudio y concuerda con la información que arrojaron las pruebas de mecánica de suelos.

De acuerdo con el perfil obtenido se concluye que las unidades geoelectricas interpretadas representan las diferentes etapas de relleno, no se observa alguna geometría asociable a cavernas, fallas o fracturas, debido a que los valores obtenidos de resistividad oscilan entre los 3 y 60 Ωm , valores comúnmente asociados a material de relleno, este dato refuerza la hipótesis de que no hay cavernas presentes, ya que sus valores de resistividad suelen ser más altos en este tipo de ambientes.

Se descartan posibles afectaciones por lo homogéneo y continuo de los valores de resistividad. Este estudio, sumado a la mecánica de suelo, afirma que el terreno está en condiciones estables para llevar a cabo construcciones.

3.2 Caso 2 TRE 2D en el municipio de Tulum, Quintana Roo

En 2019 fue requerido un estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica, en el municipio de Tulum en el estado de Quintana Roo, la zona estudio se encuentra a 150 metros de la línea de costa y dentro de una zona privada.

Los ingenieros encargados del proyecto tienen pensado unir dos caletas que existen en la zona, mediante la construcción de un canal, aprovechando las condiciones de carsticidad de la caliza en la península de Yucatán, ya que en campo se observan varios canales interconectados entre sí, de diferentes tamaños, desde cenotes hasta pequeñas fisuras por las cuales circula el agua.

En este caso la técnica de tomografía apoya al identificar las distintas capas litológicas, estructuras geológicas, carsticidad y zonas de saturación, mediante el contraste de la resistividad eléctrica, con el fin de detectar posibles cavidades, a lo largo del trazo propuesto para el canal.

La adquisición de esta línea se realizó con el equipo Geomative GD-10, con espaciamiento entre cada electrodo de 3 metros para tener una mejor resolución, el arreglo que se utilizó es el Wenner-Schlumberger, ya que tiene buena sensibilidad a los cambios horizontales y verticales, al tener menos combinaciones que el Dipolo-Dipolo, permite hacer la lectura con mayor rapidez.

3.2.1 Marco geográfico de referencia

El área de estudio se encuentra en el municipio de Tulum, en el Estado de Quintana Roo, las coordenadas geográficas del municipio son de norte $19^{\circ} 47' 45''$ y oeste $87^{\circ} 18' 16''$, con una altitud promedio de 8 m.s.n.m.

3.2.1.1 Vías de Comunicación

La principal vía de acceso a la zona de estudio es por la carretera federal Cancún-Tulum, en dirección a Cancún. Se debe solicitar permiso para acceder a la zona, ya que es zona privada. La figura 24 señala la localización de la zona de estudio.

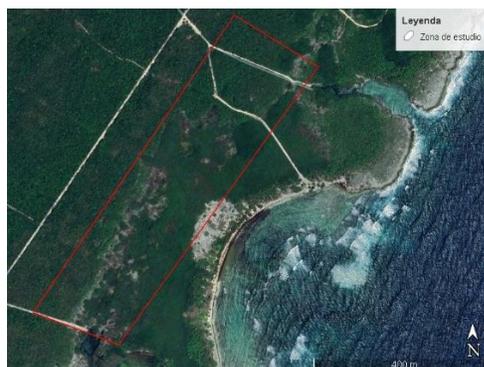


Figura 24 La poligonal roja muestra el área donde se realizó la tomografía, imagen modificada de Google Earth. (2020)

3.2.1.2 Hidrología

El área de estudio se encuentra en la región hidrogeológica de la península de Yucatán, en la zona fractura de Hol Box-Xel Ha. La figura 25 es un mapa de áreas fisiográficas de la hidrogeología de la región.

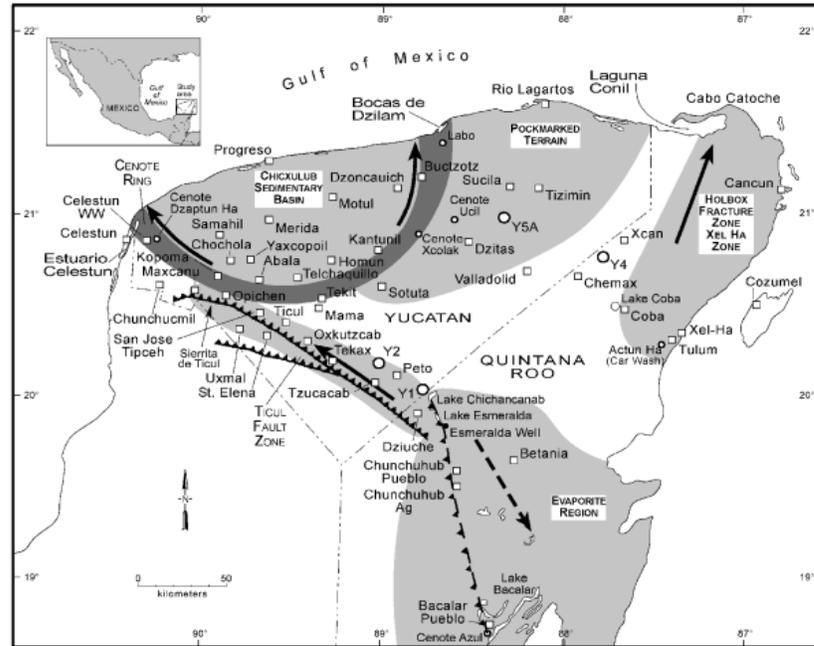


Figura 25 Áreas fisiográficas de la Península de Yucatán con las principales direcciones de flujo, tomado de Perry, Velazquez-Oliman y Marín (2002)

3.2.2 Marco Geológico

Dentro de la formación Carrillo Puerto, se encuentra a Plataforma de la Península de Yucatán (SGM, 2006). En general está constituida por margas blancas y grises, en algunas zonas se muestran intercalaciones de arcillas, así como calizas compactadas de color gris y crema (López-Ramos, 1975). La figura 26 señala la localización del estudio en la carta geológica F16-11 del SGM.

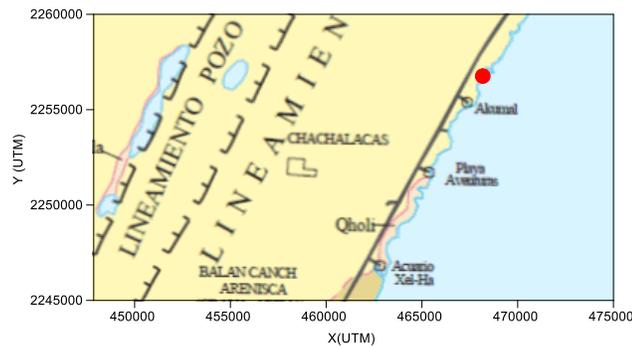


Figura 26 la marca roja indica la zona de estudio, imagen modificado de Carta Geológica del SGM F16-11

En la zona costera los carbonatos se dividen en Pleistoceno Superior, Medio e Inferior, los cuales están compuestos por secuencias marinas y no marinas acumuladas en el margen de la plataforma. La caliza es de color crema y blanco cremoso, con una alta porosidad y en algunas partes se encuentran grandes cavidades debido a la disolución de la roca (López-Ramos, 1975).

En las secuencias marinas se observan estratos costeros, lagunares y calizas de arrecifes de coral; el resto del material geológico está conformado por eolianitas, carbonatos lacustres de agua dulce y carbonatos recristalizados, conocido como caliche.

3.2.3 Localización

Se presenta la línea más grande que se realizó en el proyecto, con 648 metros de longitud total, se dispuso de esta manera debido a que el eje central del canal que se propone construir lleva esta trayectoria. La figura 27 es un mapa de localización de la línea de tomografía.

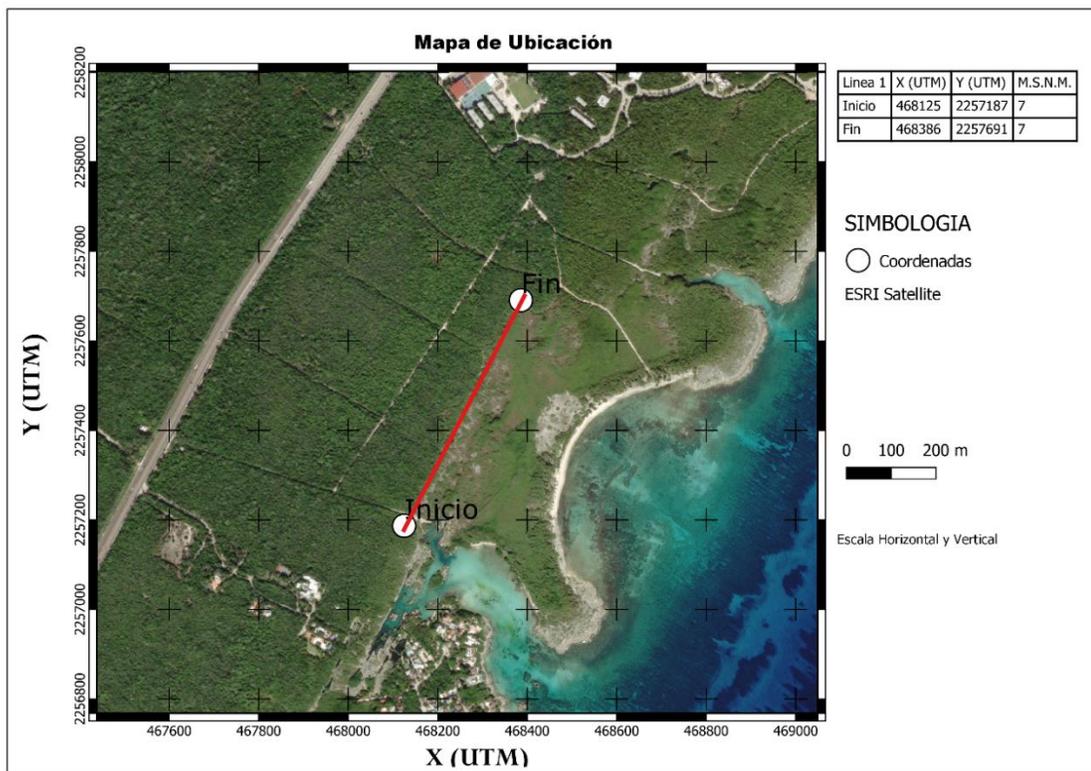


Figura 27 Mapa de localización de la línea de TRE y sus coordenadas.

3.2.4 Trabajo de Campo

En el sitio de interés, se procedió a ubicar los sitios designados para la realización de la tomografía, con los inicios ya ubicados se procedió a realizar la vereda por donde pasa la línea, en algunos casos se tuvo que desviar el trazo, debido a la presencia de manglar o cuerpos de agua que interrumpían el paso. La figura 38 muestra las condiciones del terreno.



Figura 28 Colocación de electrodos largos para aumentar la superficie de contacto y mejor la calidad de la señal.

En este proyecto el espaciamiento entre electrodos fue de 3 metros, con la finalidad de tener una resolución más cercana entre los puntos de atribución y poder observar zonas de fracturamiento no tan grandes como los cenotes o cavernas.

Igualmente se colocaron los electrodos subsecuentemente a cada 3 metros. Esta línea consta de 648 metros de longitud total, debido a que solo se contaban con 48 electrodos, se realizó la técnica de *Roll Along* con cuatro tramos de 144 metros y uno de 72 metros para completar la longitud total.

Se clavaron los electrodos de modo que se garantizó el contacto electrodo suelo, perforando la roca caliza, agregando arcilla y solución salina para mejorar la resistencia de contacto. La figura 28 muestra un poco del trabajo en campo.

Las coordenadas de cada electrodo fueron tomadas con GPS diferencial, para tener mayor precisión en la localización de las posibles anomalías y zonas de interés.

3.2.4.1 Equipo de Adquisición

El equipo geofísico utilizado en este proyecto fue el Geomative GD-10, de marca Geomative de procedencia China, este equipo cuenta con 2 cables para 24 electrodos cada uno, sumando entre ambos cables los 48 electrodos, los cuales se conectan entre sí para dar continuidad en la lectura, la fuente de poder fue una batería BP-145 del equipo, la cual maneja un máximo de 144 volts.



Figura 29 Equipo Geomative GD-10 utilizado en el proyecto.

La figura 29 muestra el equipo GD-10 en campo. Se utilizó para este estudio el arreglo Wenner-Schlumberger, este arreglo realiza menos mediciones que el arreglo Dipolo-Dipolo y por lo tanto su adquisición es más rápida, también cuenta con una buena sensibilidad a los cambios horizontales y verticales de resistividad, debido a que su adquisición es más rápida y los tiempos del proyecto así los requerían, se eligió este arreglo. La figura 30 muestra la configuración del arreglo en el equipo GD-10.

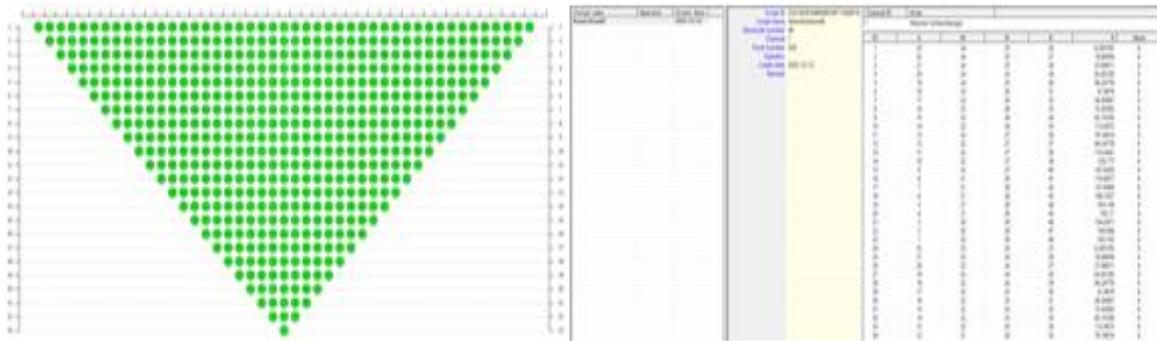


Figura 30 Arreglo Wenner-Schlumberger editado en el Software de Geomatic.

El equipo se puede programar desde gabinete o campo, dependiendo si se edita un arreglo con especificaciones propias o tomar los que el equipo tiene integrados, se elige el tipo de arreglo en este caso el Wenner-Schlumberger, se indica que se utilizarán 48 electrodos. En este equipo hay que incluir la opción para *Roll Along* para un cable o dos, el apilamiento utilizado para esta tomografía fue de 6, la profundidad de investigación alcanzada fue de 30 metros.

Durante la adquisición se observa el comportamiento de los valores de resistividad, en caso de observar un valor anómalo, es decir, fuera de rango del comportamiento general de la zona, se puede volver a tomar la medición, para evitar algún posible error en la adquisición y obtener la mejor calidad de datos posibles.

3.2.5 Procesamiento

La descarga de datos se realiza mediante cable USB, con el software de Geomatic, el equipo arroja un archivo TXT o EXCEL, la metodología para procesar los datos inicia con una revisión en Excel de los datos por nivel, donde se observa la curva de tendencia y se aplica un filtro, en esta ocasión de media ponderada a los valores que se encuentre fuera de la curva de tendencia. La figura 31 muestra la curva de valores de resistividad en el primer nivel.

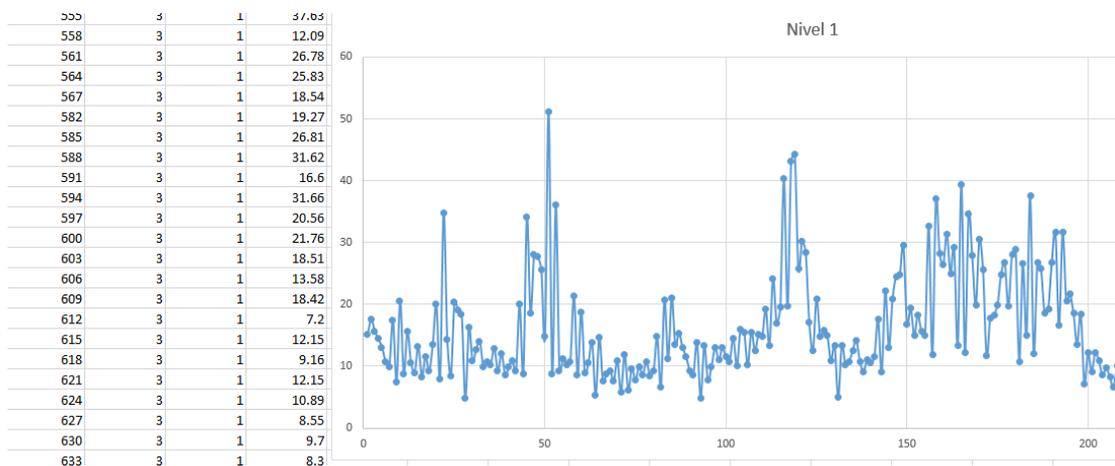


Figura 31 Datos crudos del primer nivel de la línea, visto en Excel.

Ya con los datos filtrados se ingresan los datos de topografía al archivo DAT según corresponda el Script del programa que se ocupe en este caso, para esta ocasión se usó el RES2DINV para realizar la inversión de los datos.

3.2.5.1 Inversión de los datos

La inversión se realizó en el programa RES2DINV, primero se observan los datos crudos y los datos filtrados, asociando los objetos observados en campo para concluir si el dato corresponde a lo visto en superficie o es un error en la adquisición.

El filtro que se ocupó fue el de media móvil ponderado, con el cual, con esto obtener una mejor tendencia de los valores por nivel y se eliminaron datos que se encontraban muy alejados del comportamiento general del sitio.

El programa tiene una opción, en la cual se puede realizar la inversión combinando los métodos de inversión de Marquand y el de Occam, es decir, combina el método de mínimos cuadrados amortiguado con el método de suavidad limitada, esta combinación ayuda en los resultados a obtener una mejor resolución de estructuras compactas, como cavernas, donde los espesores son inferiores a la profundidad. La figura 32 muestra los datos crudos y los datos filtrados.

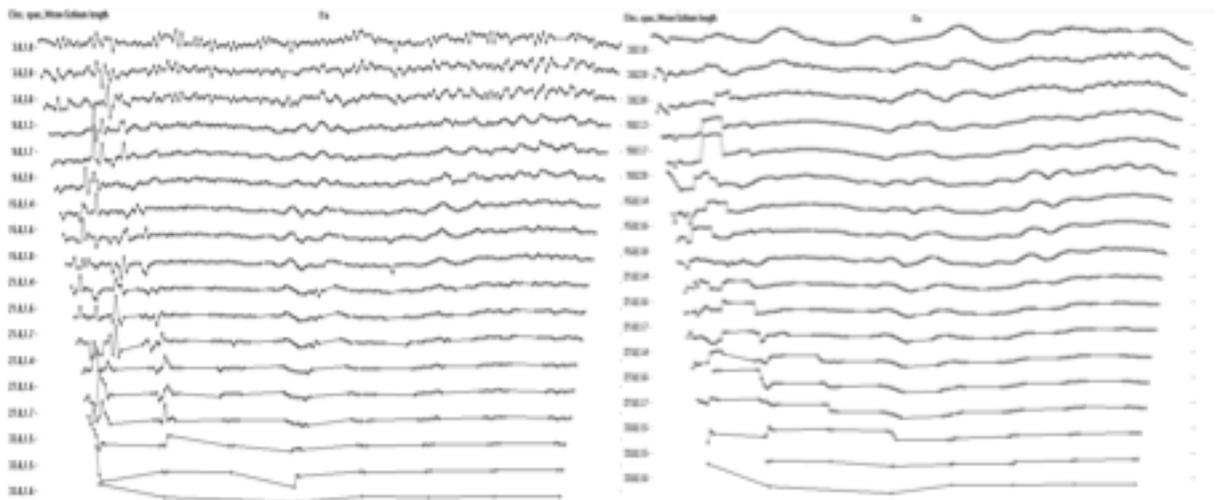


Figura 32 A la izquierda se observan los datos obtenidos directo de campo y a la derecha se observan los datos filtrados.

Al realizar la inversión se jugaron con varios parámetros para ver cómo se modificaba la pseudosección, para así llegar a un modelo que se ajustara más a la geología y correlacionarlo con lo visto en campo, siempre teniendo en cuenta el valor del RMS en las iteraciones, para no caer en un error y forzar el modelo a algo irreal.

La figura 33 muestra las imágenes que genera el programa después de realizar la inversión, la primera de ellas es la pseudosección de resistividad aparente medida, la segunda pseudosección es de resistividad aparente calculada y la tercera sección es de resistividad después de la inversión de los datos.

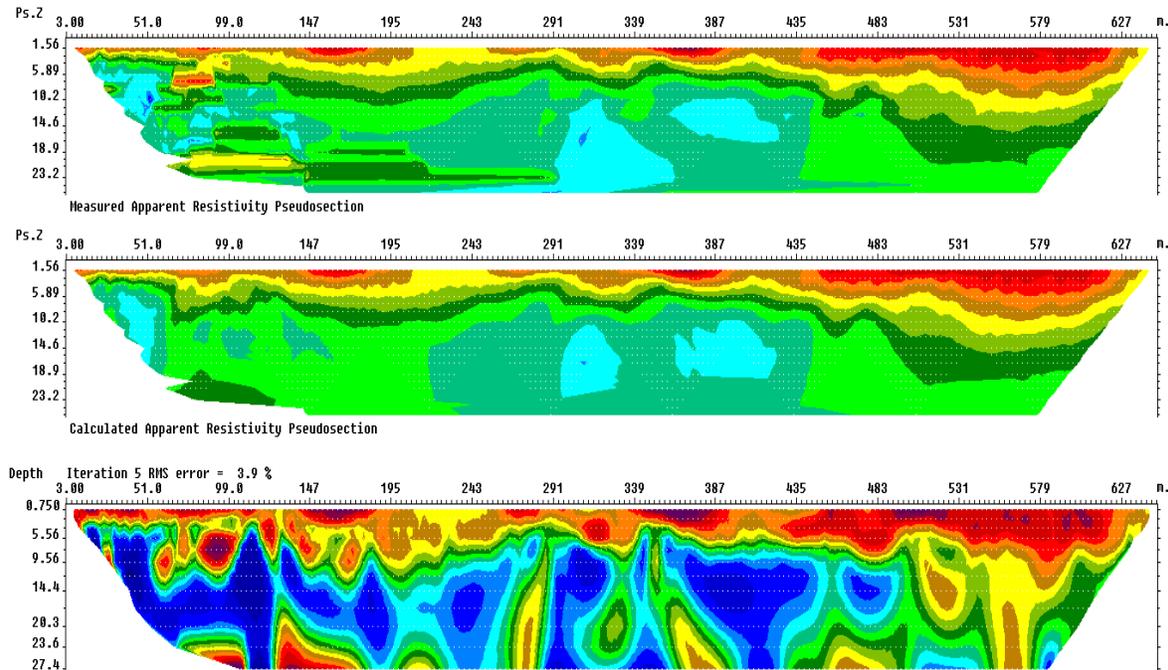


Figura 33 Se muestran las pseudosecciones obtenidas del RES2DINV con un RMS de 3.9% con 5 Iteraciones.

Con la finalidad de poder manipular la imagen y darle un mejor formato a la entrega de resultados, se exporta a Surfer, se modifica paletas de colores e intervalos de resistividades.

3.2.6 Resultados

La tomografía eléctrica en 2D muestra cambios de resistividad eléctrica que se pueden asociar con estructuras, en algunos casos ya identificadas previamente por exploraciones geológicas, pruebas de mecánica de suelo y otros métodos geofísicos.

3.2.6.1 Clasificación de Resistividad Eléctrica

Para fines de interpretación, la clasificación de resistividades agrupa un conjunto de valores de resistividad y se les designa una capa geoelectrica. A estas capas georresistivas se les asocian condiciones geológicas que están presentes en subsuelo.

Los valores de resistividad eléctrica de este estudio oscilan de los .01 Ω m hasta los 45 Ω m, estos valores son provocados por varios cuerpos de agua como cenotes, interconexiones muy pequeñas de agua y la intrusión salina. Los valores altos de resistividad son derivados del material seco y compacto, como pueden ser fragmentos de roca caliza alterada y zonas cavernosas secas.

Los materiales presentes de acuerdo con las observaciones de campo y la geología de la zona, en general es una ligera capa de materia orgánica muy somera, seguida por la roca caliza en diferentes estados de alteración.

Unidad Geoelectrica	Valores de Resistividad	Materiales Asociados:
<i>U1</i>	<i>>50 Ωm</i>	<i>Roca caliza fracturada y alterada</i>
<i>U2</i>	<i>10 a 20 Ωm</i>	<i>Roca caliza alterada con saturación</i>
<i>U3</i>	<i>0.1 a 5 Ωm</i>	<i>Zona de intrusión salina</i>
<i>U4</i>	<i>> 15 Ωm</i>	<i>Roca caliza alterada</i>

Tabla 5 Clasificación Geoelectricas

En superficie tenemos presencia de fragmentos grandes de roca caliza, caliche, cuerpos de agua como cenotes, pequeños canales interconectados de agua y zonas con flora características de manglar, los cuales provocan que disminuya los valores de resistividad, esto se asocia en a la unidad U1.

La unidad U2 en este caso se asocia, a una combinación entre caliche y una zona de saturación de agua, como los valores son mayores de los 10 Ωm aún no se considera la intrusión salina en esta zona.

Debido a que la línea de tomografía se realizó en una zona muy cercana a la línea de costa, los valores menores de 5 Ωm , se asocian con agua salada y se designaron a la unidad U3, esta zona indica la intrusión salina.

En el caso de la unidad U4 con valores de mayores a 15 Ωm , se asociaron a roca caliza alterada, esta unidad se podría indicar como una frontera entre la intrusión salina y la roca menos alterada.

3.2.6.2 Perfil 2D e Interpretación

A continuación, se muestra el perfil ya terminado, con topografía incluida, unidades geoelectricas marcadas y una paleta de colores que va de los $0.2 \Omega m$ a $120 \Omega m$.

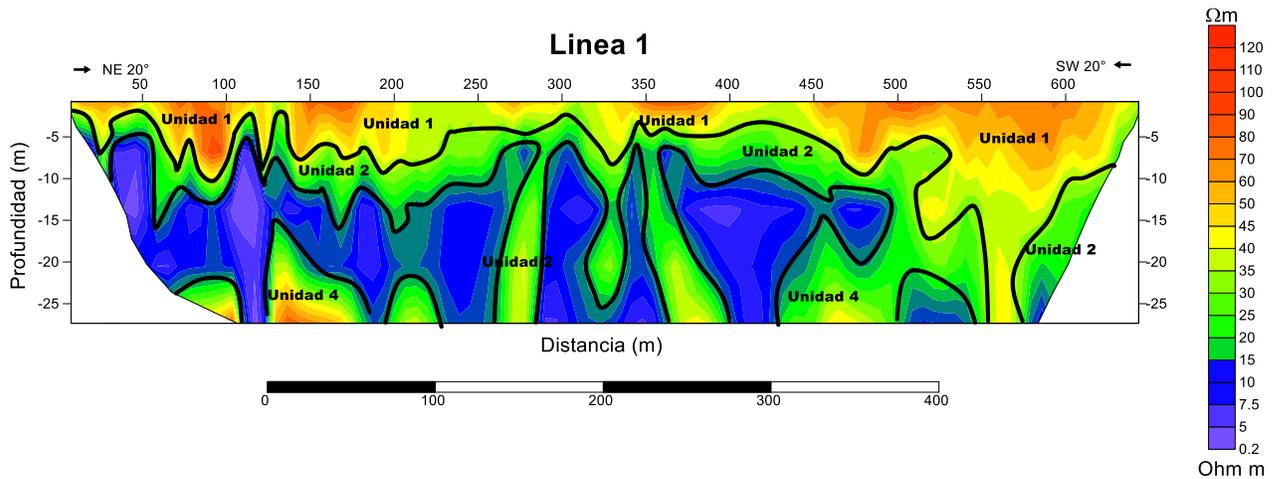


Figura 34 Perfil de la Línea de Tomografía adquirida mediante arreglo Wenner-Schlumberger.

El perfil tiene una longitud total de 648 metros, con una separación de 3 metros entre cada electrodo, alcanzando una profundidad de investigación de 30 metros y se observan 4 unidades distintas.

En la parte somera del perfil se observa la unidad U1, con valores mayores a los $50 \Omega m$, esta unidad concuerda con aspectos observados en superficie, que corresponden con roca caliza fracturada, zonas inundadas por agua, zonas de manglar con profundidad de hasta 60 centímetros en algunas partes, así como caliche, no se observa que sea continua a lo largo del perfil, se interrumpe varias veces y muestra cuerpos con los valores más altos de resistividad que concuerdan con cenotes y cavidades secas en superficie, el espesor de esta unidad varia a lo largo del perfil y va de los 2 metros a los 10 metros.

Las partes más resistivas se localizan en los primeros 10 metros de profundidad de la tomografía, entre los 70 a 100 metros, de 150 a los 180 metros, en superficie se puede apreciar roca caliza con pequeñas cavidades inundadas con 5 a 20 centímetros de profundidad.

De los 250 metros a los 300 metros se encuentra una zona de caliche y manglar, en los 350 metros se observó una caliza con pequeñas cavidades igualmente inundadas de los 5 a 25 centímetros, en la zona de los 450 a los 600 metros, se observa un cenote bastante amplio, donde incluso se alberga fauna.

La segunda unidad identificada en este perfil, se asocia a roca caliza alterada, carbonatos de calcio, comúnmente conocido como caliche, en esta unidad 2 se tienen valores de 10 a los $30 \Omega m$, que se

pueden asociar a la presencia de agua, esta unidad si se muestra continuo a lo largo del perfil, esta unidad muestra como importancia el posible nivel estático, que de acuerdo a la literatura y tomas de campo se encuentra a las 5 metros de profundidad, esta unidad también es una frontera entre la roca saturada y el la intrusión salina.

Aproximadamente a los 6 metros ya se observa la unidad U3 con valores muy bajos de resistividad, asociados al agua salada, esta unidad toma importancia ya que determina la profundidad y el posible espesor de la intrusión salina, no se muestra continua a lo largo del perfil, lo que sugiere la existencia de un cuerpo rocoso en la zona.

De acuerdo con el perfil de resistividad, después de los 25 metros de profundidad, se puede apreciar la unidad U4, donde se estima que ya sea roca más compacta y donde termina la intrusión salina, no se muestra continua a lo largo del perfil.

3.2.6.3 Conclusiones y Recomendaciones

El estudio muestra las condiciones del subsuelo, las cuales concuerdan con elementos ya existentes en superficie como, cavidades secas, cenotes y zonas inundadas, igualmente muestra similitudes con el nivel de agua estático de la zona y permite identificar los contrastes de resistividad eléctrica, permitiendo definir la estratigrafía, cuerpos rocosos e intrusión salina.

De acuerdo con los objetivos del estudio, se observan en la unidad U1 la zona de cuerpo rocosos que obstruirían el paso para la construcción del canal y en qué zonas podrían ser las que más adecuadas para pilotes o posible cimentación.

Al definir el nivel de la intrusión salina con la unidad U3, puede ayudar en la toma de decisiones para los ingenieros, sobre como atacar una posible contaminación de los pozos al romper la roca y hasta donde realizar las posibles perforaciones con la finalidad de no afectar.

Mediante la unidad U2 se puede identificar en que zonas no será necesario fracturar más la roca y hasta que profundidad es lo recomendable, donde al parecer se aprecia entre los 7 a 8 metros, antes de tocar la unidad U3 correspondiente a la intrusión salina.

Se puede concluir que el estudio cumplió con el objetivo de definir la estratigrafía, identificar las zonas anómalas asociadas a cavernas y cuerpo rocosos, así mismo, muestra las zonas donde la intrusión salina puede empezar a afectar en las obras más adelante.

Si bien, por el tipo de medio geológico, calizas, se esperaría que los valores de resistividad fueran muy altos. En el caso de este estudio, la caliza compacta está alterada en su mayoría convirtiéndose en sascab que es una especie de arena blanca que se forma de la disolución de la caliza, en específico en las partes con topografía baja. Además, al presentarse los niveles de agua salobre en el subsuelo, también se favorece que la corriente se transmita por esa zona ocasionando una baja en el valor de la resistividad. Para interpretar con detalle los datos, fue necesario entender el medio geológico para interpretar los bajos valores de resistividad obtenidos.

3.3 Caso 3 TRE 2D en el municipio de Concordia, Sinaloa

Este proyecto se llevó a cabo en el año de 2016, en el municipio de Concordia, en el estado de Sinaloa, donde una de las mayores actividades económicas del municipio es la minería. Con la finalidad de asignar adecuadamente los recursos, se realizan campañas de exploración, en las cuales se llevan a cabo estudios geofísicos, como la Tomografía de Resistividad Eléctrica, para caracterizar el medio.

Dentro de la campaña de exploración se realizaron varias tomografías. En este trabajo se muestra una de ellas donde se identifica una falla y se tiene como antecedentes que cruza la veta mineralizada.

La adquisición de esta línea se realizó con el equipo ARES I de GF Instruments, con espaciamiento entre cada electrodo de 3 metros para tener una mejor resolución, el arreglo que se utilizó fue el Dipolo-Dipolo, ya que tiene buena sensibilidad a los cambios horizontales, ideal para la búsqueda de estructuras verticales.

3.3.1 Marco Geográfico de Referencia

El área de estudio se encuentra en el municipio de Concordia, en el Estado de Sinaloa, las coordenadas geográficas del municipio son norte $23^{\circ} 20'$ y oeste $105^{\circ} 59'$ y con una topografía de los 100 metros a los 2300 metros sobre nivel del mar.

3.3.1.1 Vías de Comunicación

La única forma de acceso a la zona de estudio es por la carretera federal Mazatlán - Durango, debido a que es zona privada, se debe solicitar permiso para acceder a la zona. La figura 35 señala la zona de estudio.



Figura 35 Se muestra la poligonal roja que indica la zona donde se realizó la tomografía.

3.3.1.2 Hidrología

El área de estudio se encuentra en la Sierra Madre Occidental, dentro de la zona de Mesetas y Cañadas y distintas topoformas con sierra alta con cañadas, en su mayoría se encuentra roca ígnea y con presencia de minerales de Oro y Plata, pertenece a la región hidrológica Presidio-San Pedro, en la cuenca del mismo nombre y en la subcuenca del Rio Baluarte. La figura 36 muestra la ubicación del estudio en el estado de Sinaloa

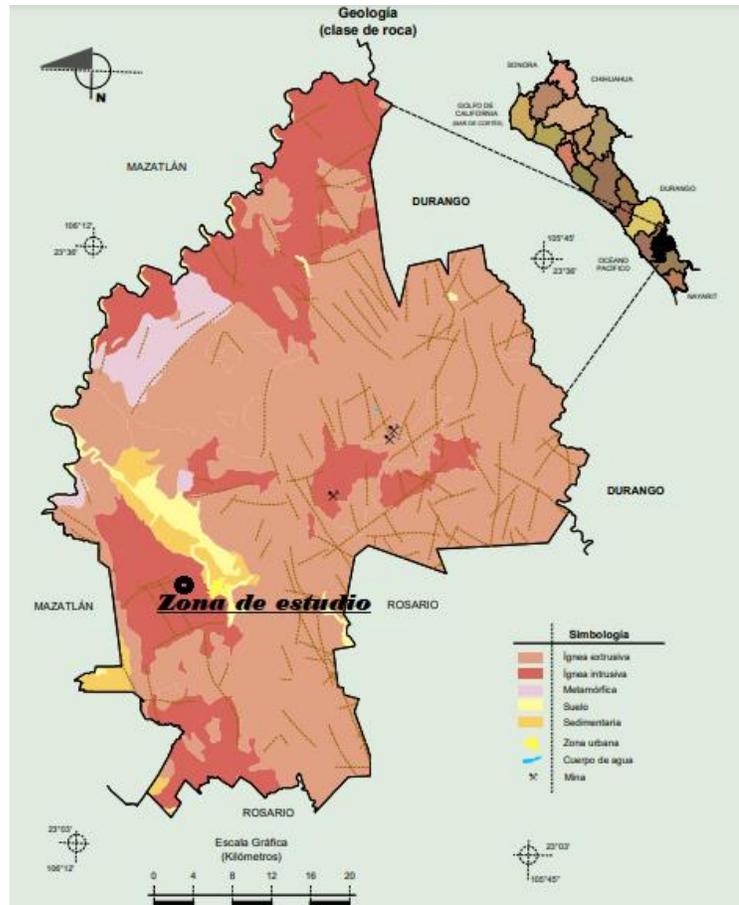


Figura 36 Imagen Modificada del Compendio de Información Geográfica de INEGI 2010

3.3.2 Marco Geológico

La zona de estudio se encuentra en la secuencia volcánica e intrusiva Terciaria perteneciente a la Sierra Madre Occidental, en toda la zona se observan alteraciones y mineralización de tipo Epitermal que se emplea en forma de vetas, brechas y vetilleos con valores Au-Ag-(Pb-Zn-Cu).

Estructuralmente la zona muestra intensa ruptura y desplazamientos en bloques, los alforamientos y minas presentes indican el alineamiento de estructurales con orientación Norte-Sur. La figura 37 muestra la ubicación del sondeo en la carta F13-A27 del SGM.

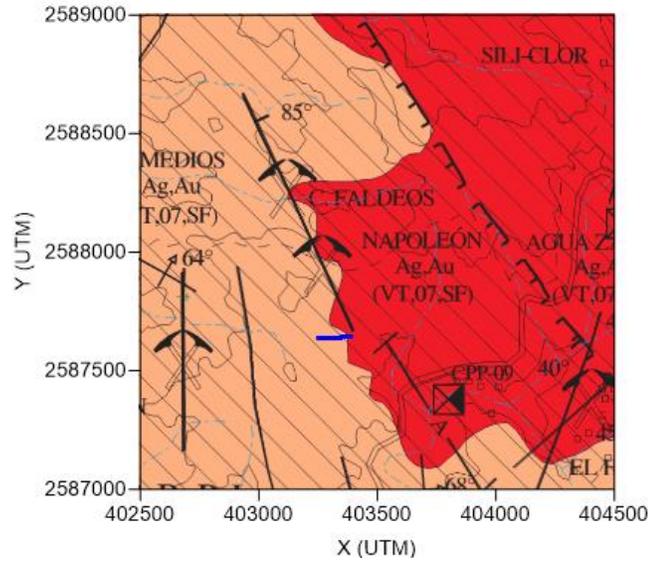


Figura 37 Imagen modificada de la Carta Geológica F13-A37 del Servicio Geológico Mexicano, la marca azul señala la zona de estudio.

3.3.3 Localización

Se muestra la localización de la línea, con una longitud de 144 metros y un espaciamento entre electrodos de 3 metros, esta separación se eligió para obtener una mejor resolución, esto permite observar cuerpos más que pequeños, así como anomalías que se puedan asociar a las vetas y brechas. La figura 38 muestra el mapa de localización de la línea de tomografía.

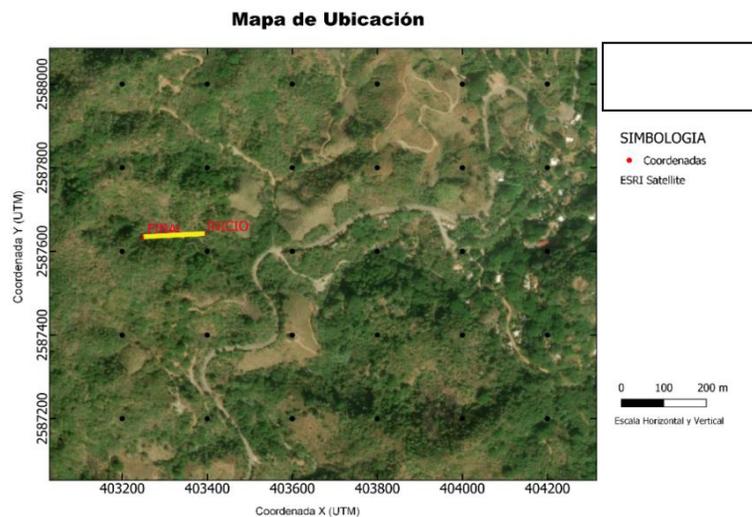


Figura 38 Mapa de localización de la línea de TRF

3.3.4 Trabajo de Campo

En esta ocasión primero se localizó el centro de la veta mapeada por los geólogos, con la finalidad de que se identificara de manera más exacta en la tomografía, ya con el centro de la veta detectado se abrió el tendido hacia los lados, de modo que el equipo y el centro de la tomografía empatara con el centro de la veta.



Figura 39 Se observa el equipo Ares 1 y la colocación de los electrodos en campo.

Esta tomografía se realizó con una separación de 3 metros entre cada electrodo y una longitud total de 144 metros con 48 electrodos, para esto se realizó desmonte en para realizar el tendido de cable y la colocación de los electros, los puntos de topografía fueron adquiridos por el equipo de topografía. La figura 39 muestra los trabajos en campo.

Antes de iniciar la lectura se realizó la prueba de la resistencia de contacto, para corregir las malas conexiones de los electrodos, en algunas zonas se tuvo que utilizar sustancias electrolíticas para bajarla resistencia de contacto debido a la roca y obtener una óptima adquisición de los datos.

3.3.4.1 Equipo de Adquisición

El equipo que se ocupó para este proyecto fue el ARES I de GF Instruments, se usaron cables multielectrodicos para 8 electrodos y con máximo espaciamento de 3 metros entre cada electrodo, y un total de 48 electrodos, la fuente en este caso fue una planta de energía con salida de 120 Volts. La figura 40 muestra el equipo en campo.



Figura 40 Equipo ARES durante la adquisición de la línea de tomografía.

De acuerdo a las especificaciones del cliente y el objetivo del estudio se utilizó el arreglo Dipolo – Dipolo, el cual tiene buena resolución a los cambios horizontales y esto ayudaría a identificar en este caso cuerpos verticales como vetas, fallas u otro tipo de estructura asociada a contenido mineral, una limitación del método es que a profundidad, pierde potencial y a mayor distancia el dipolo es afectado por el ruido, por lo que hay que monitorear la pérdida de potencial, teniéndolo en cuenta cuando se realice el procesado y la interpretación.

Para el apilamiento se eligió 6 sobre el de 4 para tener una buena señal de adquisición y no aumentar el tiempo de adquisición.

3.3.5 Procesamiento

Al descargar los datos del equipo, se procedió a revisarlos en Excel, se revisaron por nivel, se observó la tendencia de los valores resistividad aparente y voltaje, verificando que los valores que se encuentren dentro del comportamiento general en la zona de estudio y fueran corregidos mediante un filtro, para este caso se utilizó el de media móvil ponderado. La figura 41 muestra los datos crudos del primer nivel.

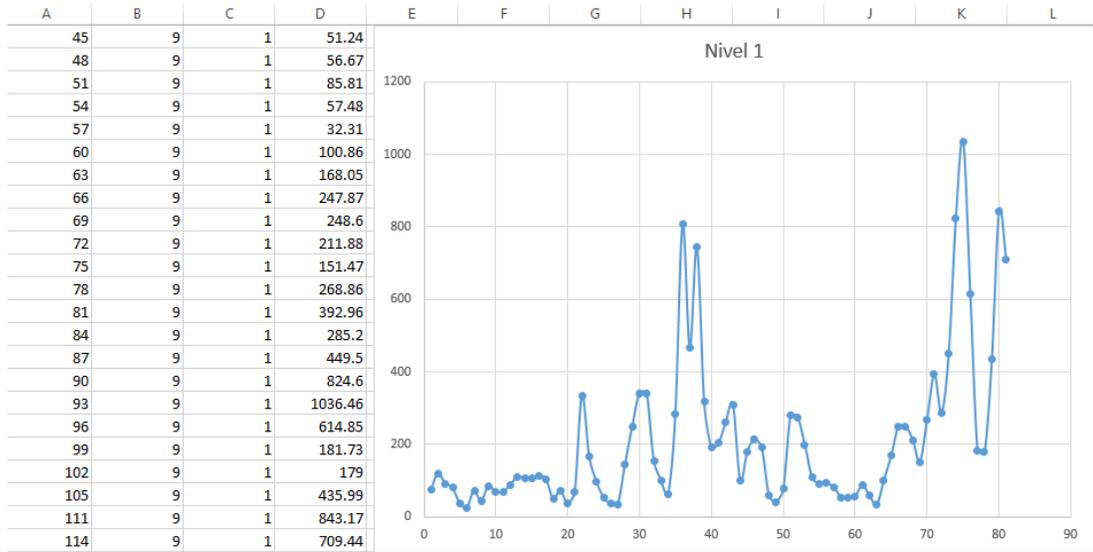


Figura 41 Se observan los Datos crudos del primer nivel.

También se le dio formato al archivo .DAT para ingresar los puntos de topografía dependiendo del programa que se ocuparía para su inversión y obtener el perfil con topografía, en este caso los datos se ingresaron al programa de RES2DINV, en donde los datos de topografía se agregaron al final del archivo.

3.3.5.1 Inversión de los Datos

Con los datos filtrados, se realizó la inversión de los datos con el programa RES2DINV. Primero se observaron los datos crudos y los datos filtrados, asociando los objetos observados en campo para concluir si el dato corresponde a lo visto en superficie o es un error en la adquisición.

El filtro que se ocupó fue el de media móvil ponderado, con el cual, con esto obtener una mejor tendencia de los valores por nivel y se eliminaron datos que se encontraban muy alejados del comportamiento general del sitio. La figura 42 muestra la diferencia entre los datos crudos y los datos filtrados.

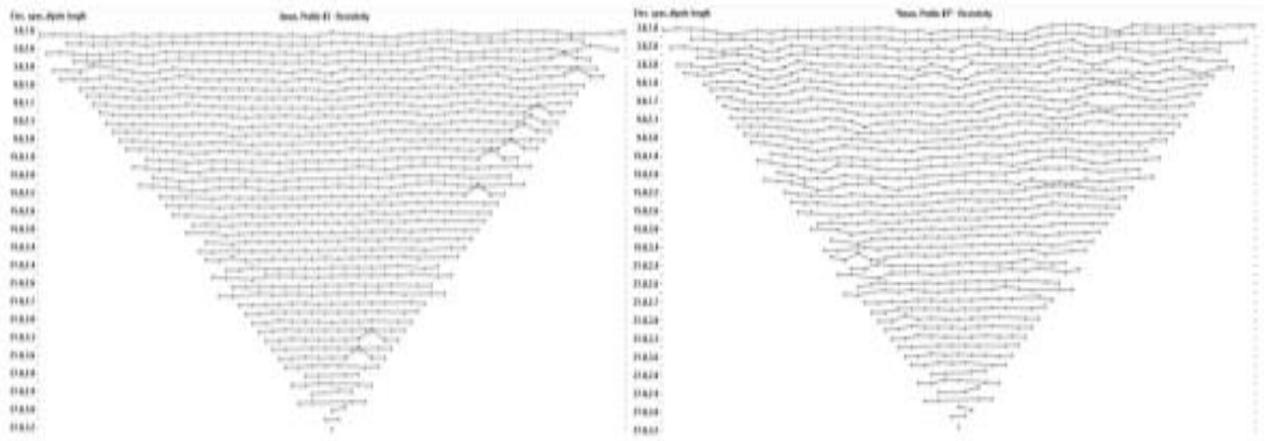


Figura 42 A la izquierda se observan los datos obtenidos directo de campo y a la derecha se observan los datos filtrados.

Al realizar la inversión se jugaron con varios parámetros para ver cómo se modificaba la pseudosección, para así llegar a un modelo que se ajustara más a la geología y correlacionarlo con lo visto en campo, siempre teniendo en cuenta el valor del RMS en las iteraciones, para no caer en un error y forzar el modelo a algo irreal.

Se muestran tres imágenes después de realizar la inversión, la primera de ellas es la pseudosección de resistividad aparente medida, la segunda pseudosección es de resistividad aparente calculada y la tercera sección es de resistividad después de la inversión de los datos. La figura 43 muestra las imágenes que arroja el programa después de la inversión.

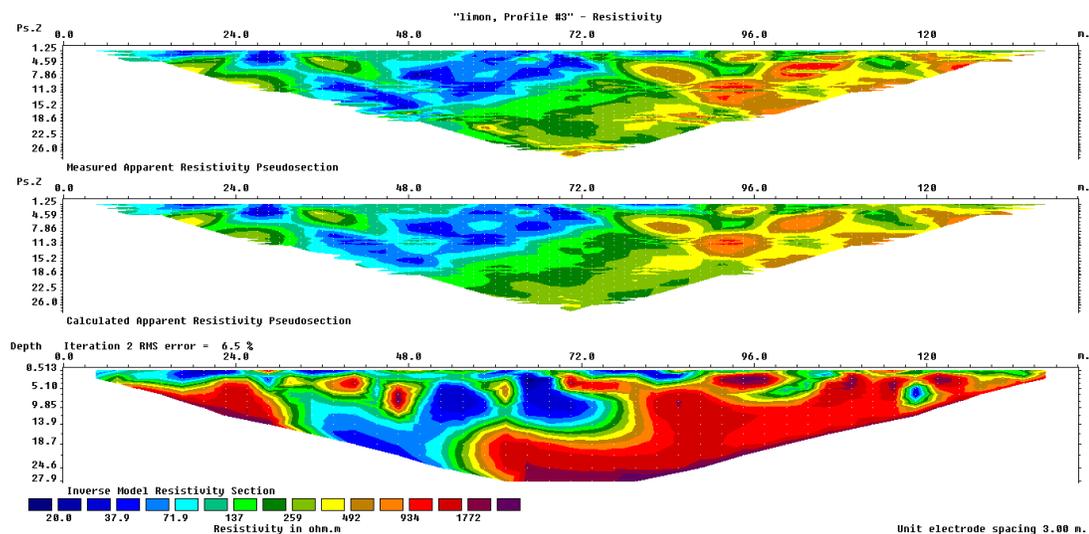


Figura 43 Se muestran las pseudosecciones obtenidas del RES2DINV con un RMS de 6.5% con 5 Iteraciones.

Con la finalidad de manipular la imagen y darle un mejor formato a la entrega de resultados, se exporta a Surfer, se modifica paletas de colores e intervalos de resistividades.

3.3.6 Resultados

Al obtener la imagen final después de realizar el procesado y la inversión, se llevó a cabo la caracterización del perfil de resistividad eléctrica, asociando las anomalías, con estructuras geológicas presentes en la zona, apoyados de levantamientos geológicos, barrenos de exploración, otras técnicas como magnetometría y sondeos transitorios electromagnéticos.

3.3.6.1 Clasificación de Resistividad Eléctrica

Para fines de interpretación, la clasificación de resistividades agrupa un conjunto de valores de resistividad y se les designa una capa geoelectrica. A estas capas georresistivas se les asocian condiciones geológicas que están presentes en subsuelo.

Los valores de resistividad eléctrica de este estudio oscilan de los 14 Ωm hasta los 3000 Ωm , los valores mayores de 150 Ωm se asocian roca volcánica compacta y poco fracturada como brecha y granodiorita, los valores intermedios entre los 50 a 150 Ωm se consideran que pertenece a la roca con alteración y que funciona como frontera entre la roca sin alteraciones y la zona mineralizada, la valores de resistividad baja de 10 a 50 Ωm se muestran en la zona donde se encuentra la falla, roca fracturada y alterada con mineralización.

De acuerdo con las observaciones de campo y la geología, en general se observa una zona de falla, roca fracturada compuesta por granodiorita, granito y brecha riolítica con alteración y mineralización.

Unidad Geoelectrica	Valores de Resistividad	Materiales Asociados:
<i>U1</i>	<i>150 a 3000 Ωm</i>	<i>Roca volcánica, brecha y granodiorita</i>
<i>U2</i>	<i>50 a 150 Ωm</i>	<i>Roca volcánica fracturada y alterada</i>
<i>U3</i>	<i>10 a 50 Ωm</i>	<i>Zona de falla y mineralizada</i>

Tabla 6 Clasificación Geoelectrica

En la zona de estudio aflora la roca volcánica como brecha y granodiorita poco fracturada o sana, la cual se asoció a la unidad U1, esta roca genera los valores mayores de 150 Ωm y es la que predominada lo largo del perfil.

La unidad U2 se asigna a una capa de frontera entre la roca sana y la zona de falla con mineralización, esta roca ya presenta alteración debido a los procesos epitermales y fracturación por los esfuerzos estructurales debido a la falla geológica.

Los valores de más baja resistividad eléctrica que se presentan en el perfil de tomografía se asocian a la unidad U3 que van de los 10 a 50 Ωm estos valores se presentan en la zona de la falla y mineralización.

3.3.6.2 Perfil 2D e Interpretación

A continuación, se muestra el perfil ya terminado, con topografía incluida, unidades geoelectricas marcadas y una paleta de colores que va de los 10 Ωm a 3000 Ωm .

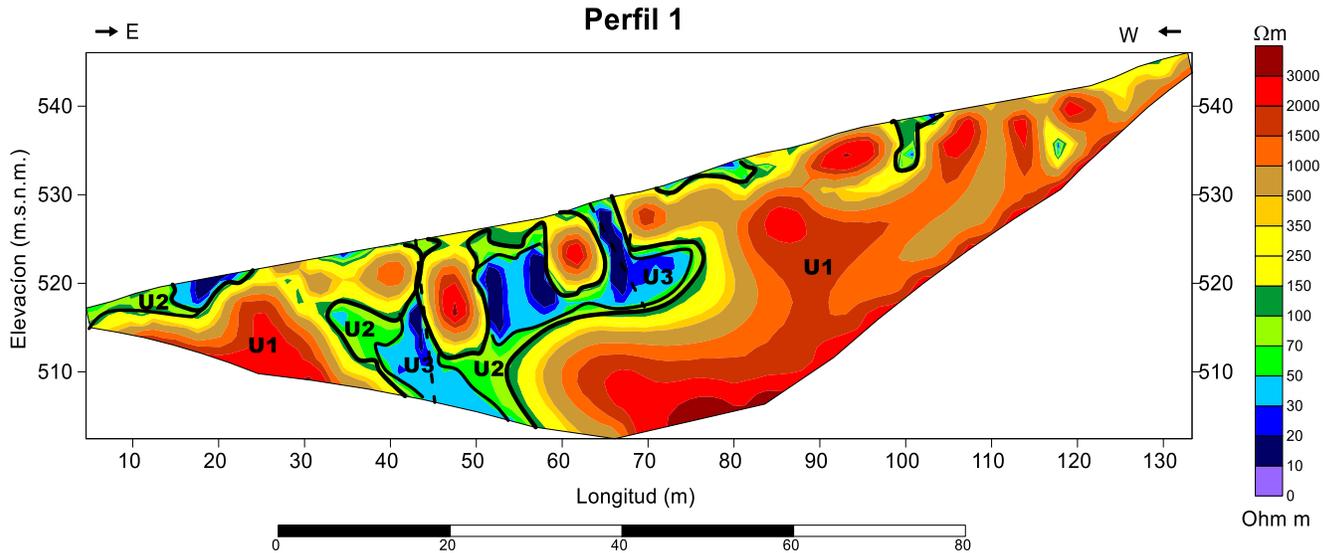


Figura 44 Perfil de la Línea de Tomografía adquirida mediante Dipolo-Dipolo

Este perfil consta de 144 metros de longitud y una separación entre electrodos de 3 metros, tiene una diferencia de topografía de 30 metros, alcanzó una profundidad de investigación 25 metros y se identificaron tres unidades geoelectricas para su interpretación.

En la parte superficial del perfil, se muestra claramente las zonas donde se encuentra la roca sana, también se observan algunas zonas con fracturamiento y mineralización, también destaca el contraste de resistividad en la zona donde se presenta la falla en superficie.

Los cambios de resistividad importantes los tenemos en el centro del perfil, la unidad U1 predomina a lo largo del perfil, en la parte central del perfil se observa una discontinuidad, la cual es asociada una falla presente.

La unidad U2 aparece actuando como frontera entre la unidad U1 y la unidad U3, variando su espesor de acuerdo con cómo se han ido depositando, este material presenta alteración y delimita donde inicia la mineralización, también presenta fracturación.

La unidad U3 resalta por tener los valores más bajos de resistividad, exactamente se encuentra en la parte donde se ubica la falla y la zona de mineralización, en el metro 70, con un espesor aproximado de los 4 metros y se pierde después los 25 metros de profundidad, donde varia de espesor de acuerdo con cómo se fue depositando.

3.3.6.3 Conclusiones y Recomendaciones

El objetivo principal del estudio era ubicar e identificar la falla, el cual se cumplió mediante la tomografía ya que en el perfil se puede observar claramente su dirección N-S, esto concuerda con el rumbo de las demás estructuras conocidas en la zona.

La imagen también permite conocer otros datos como el posible espesor de la falla, su rumbo, echado y si presenta mineralización como es el caso, ayuda a identificar una posible veta y mejorar en la ubicación de los barrenos de exploración.

Sin embargo, la profundidad de exploración es corta ya que, como se muestra en el perfil, la falla continúa descendiendo, esto indica que se puede aumentar la longitud del tendido y la abertura entre electrodos para seguir ubicando la estructura o bien utilizar otro método para conseguir una mayor profundidad de investigación. Sin embargo, hay que mencionar que, por contar sólo con 48 electrodos de medición, aunque se hayan obtenido más mediciones, la profundidad de exploración no varía. Para penetrar más es necesario incrementar el número de electrodos en la medición sin considerar el *Roll Along*.

Debido a que la roca se encontraba fracturada, también presentó el dilema de diferenciar la zona mineralizada con la presencia de agua, para esto se recomendó realizar polarización inducida, la cual, se realizó, pero no se muestra en este trabajo, este método de I.P. y los barrenos de exploración confirmaron que se trataba de mineral y no de un cuerpo de agua, aunque si había presencia de humedad en algunas zonas.

Se recomendó ampliar la campaña de exploración geofísica, con tomografías más largas y realizar otros métodos como los electromagnéticos para poder tener una mayor profundidad de investigación y mapear la falla con más exactitud.

Capítulo 4 Conclusiones y Mejoras

4.1 Conclusiones

La aplicación del método de TRE 2D, funciona en distintas litologías y para diferentes objetivos, en los tres casos de estudio se cumplió el objetivo propuesto, se definieron zonas de contactos litológicos, se identificaron estructuras geológicas presentes y se pudo inferir las condiciones del subsuelo.

1. En el primer caso de estudio se buscaba descartar cualquier tipo de anomalía que comprometiera la construcción de infraestructura y presentara un peligro, lo cual fue descartado mediante un estudio geotécnico, en el cual, el estudio geofísico es un complemento y requisito para que protección civil de su permiso.
2. Para el segundo caso, el objetivo era encontrar una zona de roca fracturada y poder conectar dos caletas mediante un canal, este objetivo se cumplió y complemento ayudando a identificar estructuras como cenotes, un sistema de minicanales interconectados que permiten el paso del agua y fauna marina, también ayudó en el campo de la hidrogeología para identificar el nivel freático de la zona y la intrusión salina.
3. El tercer caso tenía por objetivo localizar e identificar una falla con mineralización presente y poder inferir sus condiciones mediante un estudio de exploración. Este objetivo se logró y la geofísica aportó información que ayudó a reducir la incertidumbre y designar zonas con mejores condiciones para los barrenos de exploración.

El método de tomografía de resistividad eléctrica es una buena alternativa para conocer las condiciones del subsuelo mediante la inyección de corriente eléctrica, sin embargo, una de sus limitantes es la profundidad de investigación ya que depende de la longitud del tendido y la separación entre electrodos.

También el medio en el que se lleva a cabo puede afectar la adquisición, ya que en un medio muy conductivo se puede disipar la energía fallando la adquisición en los niveles más bajos, es decir, no profundizar en la lectura, igualmente en terrenos muy resistivos se puede tener pérdida de señal entre electrodos debido al nulo paso de la corriente, por lo cual, se debe de tener un control de los datos durante la adquisición.

En el procesamiento se deben considerar las condiciones en la que se realizó el estudio, para no borrar datos que posiblemente sean reales y no solo descartarlos porque están fuera de la tendencia, al realizar la inversión debemos de considerar que no por realizar un número alto de iteraciones tendremos un resultado real, debido a que al ser aproximaciones numéricas podemos forzar el modelo aun resultado que no sea el correcto.

Para la interpretación es fundamental tener en mente la conceptualización y contexto de la zona a evaluar.

4.2 Mejoras

Se debe tener presente que los estudios geofísicos adquieren información que ayuda en la toma de decisiones, esta información debe de ser correlacionada con otros estudios, como los geotécnicos, geohidrológico, geológicos, barrenos entre otros, que permitan caracterizar las condiciones reales del subsuelo, con la finalidad de reducir la incertidumbre y obtener un resultado más preciso, ya que la geofísica no es concluyente por si sola.

En mi experiencia, primero se debe saber cuál es el objetivo del estudio para elegir el arreglo que dé el mejor resultado, también se deben tomar en cuenta las condiciones geológicas y tener la mayor información documentada de la zona, con la finalidad de tener una buena perspectiva y poder definir los mejores parámetros para la adquisición.

En campo, se pueden presentar diversas eventualidades que pueden afectar la adquisición debido a esto se debe prestar atención al equipo y los datos que se están adquiriendo, se debe de garantizar el contacto electrodo suelo y realizar perforaciones en donde se requiera, entre mayor sea la superficie de contacto se podrá tener una mejor transmisión de la corriente. Esta situación es muy importante por lo que los electrodos deben estar húmedos durante el tiempo de la medición. Se sugiere que se humedezcan con una solución de sulfato de cobre.

Al revisar la resistencia de contacto en el equipo se debe evitar que sean altas ya que esto indica una mala transmisión entre el suelo y el electrodo, se debe revisar la conexión entre el electrodo y el cable, podemos añadir agua con sulfato de cobre o lodo de arcilla entre el electrodo y el suelo para bajar la resistencia de contacto.

Los parámetros dependerán del tiempo que se tenga para realizar la adquisición de las líneas y las condiciones del sitio, cada equipo maneja distintos parámetros, en mi experiencia un parámetro importante es el apilamiento, a mayor valor mejor calidad de los datos, pero mayor tiempo en la adquisición.

Si se obtiene una buena calidad de datos, el procesamiento será más sencillo ya que no será necesario filtrar una gran cantidad de datos; sin embargo, en caso de realizar un procesamiento intenso se debe tener en consideración las condiciones en que se realizó el estudio como drenajes, concreto armado, subestaciones eléctricas y en que electro se ubican para no solo borrarlos, ya que eso generaría un modelo diferente.

Al realizar la inversión debemos de cuidar que la imagen se ajuste al modelo geológico que se desea interpretar, ya que en ocasiones con la finalidad de reducir el error cuadrático medio se utilizan más iteraciones y se pueden perder rasgos de interés, esto puede ocasionar un error y dar una mala interpretación, debido a esto es fundamental contar con información de apoyo y corroborar que la tomografía tiene sentido con lo observado en campo.

Se recomienda realizar más métodos geofísicos que complementen los estudios para así obtener un resultado más exacto, apoyados con información documentada que se recopile, reduciendo la incertidumbre y realizar un modelo particular del estudio.

BIBLIOGRAFIA

Aguirre D, J.P., Esteves R, S., 2014, Análisis y eliminación de ruido en Tomografía Eléctrica Resistiva, UNAM, Tesis profesional.

Alvarez B, E., 2015, Tomografía Eléctrica Resistiva 3D en la caracterización del subsuelo bajo estructuras civiles, UNAM, Tesis profesional.

Anuario Estadístico y Geográfico del Estado de México, 2006, INEGI.

Auge, M., 2008, Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Barker, R., 1989, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays, *Geophysics*, Vol. 54.

Bernard, J., 2003, Parameters controlling the depth of investigation; Depth of investigation of vertical electrical sounding; Depth of investigation of multi-electrode resistivity imaging; Depth of investigation of multi-electrode resistivity imaging with roll along extensions. www.HeritageGeophysics.com; support@HeritageGeophysics.com

Compendio de Información geográfica municipal 2010, Concordia, Sinaloa, INEGI.

Carta Geológica – Minera, Copala F-13-A37, SGM.

Carta Geológica-Minera, Yucatán F16-11, SGM.

Carta Geológica-Minera, Ciudad de México, E14-2, SGM

Edwards, L. S., 1977, A modified pseudosection for resistivity and IP: *Geophysics*, 42, 1020- 1036

Furman, A., Ferre, TyP.A., Warrick, A.W., 2003; A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling, *Vadose Zone Journal* 2(3):416- 423 · August 2003.

Grant, F. S. and West, G. F. 1965. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill, New York.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, A.; 1991, *An Introduction to Geophysical Exploration*, Third edition, Blackwell Science.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*, Blackwell, Secuence, Third Edition.

Knödel K., Lange G., Voigt H.-J., Environmental Geology: handbook of field methods and case studies. Springer, U.S.A.

Koefoed, O., 1979, Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurement. Elsevier Science Publishing Company.

Loke, M. H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Inédito.

Loke, M.H., Baker, R.D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, Society of Exploration Geophysicist; Geophysics, 60(6), 1682-1690.

Loke, M. H. (1999). A Practical Guide to 2D and 3D Surveys. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, 8-10.

Maxwell A., M. 2001, Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges, Surveys in Geophysics 23: 133–205, 2002. © 2002 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

Manual Ares – Automatic Resistivity System, GF Instruments.

Manual GD-10, Geomatics.

Manual Res2dinv, Geotomo.

Montiel A, A. M., 2015, Tomografía de Resistividad Eléctrica en el campus Ixtaczoquitlan de la Universidad Veracruzana, UNAM, Tesis profesional.

Orellana, E. 1982. Prospección geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid.

Proyectos, Estudio y Construcción. (PEC). Estudio en la modalidad de resistividad eléctrica y métodos electromagnéticos, con las técnicas dipolo-dipolo, sondeo eléctrico vertical y georadar, con la finalidad de definir la estratigrafía y posibles tuberías en un predio del colegio superior de ciencias y humanidades S. C.,, municipio de Atizapán de Zaragoza, Estado de México.

Ravelo M., D.J., 2007, Inversión e interpretación de datos de resistividad aparente en 2D adquiridos en relieve topográfico, Universidad Simón Bolívar, Tesis profesional.

Sequera J, F. J., 2015, Estudio de Tomografía eléctrica resistiva 2D para localizar la muralla limítrofe de la Gran Tenochtitlan; Centro Histórico, Cd. De México. UNAM, Tesis profesional.

Tarantola A., 1987, Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier Scientific B.V., Amsterdam.

Tejero, A., Chávez, R.E., Urbieto, J., Flores-Márquez, E.L., 2002, Cavity detection in the southwestern hilly portion of Mexico City by resistivity imaging, Journal of Engineering and Environmental Geophysics, 130-139.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press.

Torleif D., Bing Z. 2004, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379–398.

Urbieta J., 2011, *La Tomografía Eléctrica en los Métodos de Corriente Continua*, UNAM, Tesis profesional.

Vázquez R, B. A., 2014, *Análisis de Imágenes Resistivas para determinar la conductividad hidráulica*, UNAM, Tesis profesional.

Zamora L, J. C., 2019, *Determinación de las características geo-estructurales que definen una subcuenca hidrogeológica en la zona de Akumal*, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., Tesis de Maestría.