



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Planeación, logística y ejecución de
estudios de polarización inducida en
dominio del tiempo en 3D, para
exploración minera**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Daniel Cortés Jasso

ASESORA DE INFORME

Dra. Iza Canales García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| <i>Objetivo general:</i> | 3 |
| <i>Objetivos específicos:</i> | 3 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 4 |
| <i>Contexto Geológico.....</i> | 4 |
| Geología Local..... | 4 |
| Problema geológico por resolver..... | 7 |
| <i>Método Geofísico</i> | 7 |
| Principio Físico | 7 |
| Arreglo Polo-Dipolo | 9 |
| Arreglo Dipolo-Dipolo | 10 |
| Polarización Inducida..... | 10 |
| 3. PARTICIPACIÓN PROFESIONAL | 12 |
| <i>Actividades generales y sistemáticas</i> | 12 |
| <i>Participación en proyectos específicos</i> | 18 |
| 4. METODOLOGÍA UTILIZADA | 21 |
| <i>Equipo de adquisición</i> | 21 |
| <i>Polarización Inducida en 2D y 3D</i> | 23 |
| <i>Adquisición</i> | 24 |
| <i>Procesado</i> | 29 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 37 |
| 6. REFERENCIAS | 38 |

1. Introducción

El trabajo profesional como forma de titulación representa una herramienta mediante la cual el egresado implementa lo aprendido durante todos sus estudios en la resolución parcial o total de un problema real de ingeniería.

La culminación de este proceso en el que se está bajo supervisión cercana es la redacción y presentación de un informe de actividades. En este sentido, se presenta el siguiente reporte que describe las actividades profesionales realizadas entre octubre de 2021 y mayo de 2022 en DIAS Geophysical, empresa dedicada a realizar estudios geofísicos terrestres de gran escala.

En el área de exploración minera, la prospección eléctrica se utiliza con frecuencia como una herramienta para el mapeo de estructuras en el subsuelo. Dado que las zonas de interés para exploración suelen ser de gran extensión y comúnmente de difícil acceso; incrementar el área de cobertura en superficie, la profundidad de exploración, la resolución de los resultados, la eficiencia y la capacidad para adquirir grandes volúmenes de datos en poco tiempo se han vuelto desafíos clave al ejecutar dichos estudios.

La tecnología que utiliza DIAS Geophysical permite solucionar esta serie de condiciones mediante un equipo que ayuda a incrementar considerablemente el área de estudio de los levantamientos de manera portátil, sin sacrificar la calidad o cantidad de datos que se adquieren.

Dentro del marco de la prospección eléctrica, se cubrieron las técnicas de estudios de resistividad y polarización inducida, utilizando los arreglos eléctricos Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo, para las modalidades de dos dimensiones y tres dimensiones (IP2D e IP3D).

En este sentido los objetivos de este informe son los siguientes:

Objetivo general:

Contribuir en la caracterización de las estructuras mineralizadas de zonas cercanas a Concepción del Oro y Mazapil, en el Estado de Zacatecas, aplicando métodos geofísicos, principalmente la técnica de adquisición de datos de polarización inducida para la obtención detallada de la geometría, volumen, ubicación y profundidad de los cuerpos asociados con dichas estructuras.

Objetivos específicos:

- a) Presentar brevemente el método eléctrico, sus fundamentos y alcances, específicamente la técnica de polarización inducida.
- b) Realizar una revisión detallada de las técnicas geofísicas aplicadas, incluyendo las particularidades del equipo utilizado.
- c) Exponer las actividades que se realizaron en el periodo reportado, incluyendo las relacionadas a la adquisición de datos en campo (instalación, mantenimiento y operación del equipo de adquisición; control de calidad de datos de polarización inducida en tiempo real mediante el uso de software especializado) y la relacionadas al tratamiento y procesado de los datos obtenidos.

Por temas de confidencialidad y propiedad de los datos adquiridos, las zonas de estudio no serán presentadas de forma puntual, los mapas y ejemplos de levantamientos GPS ejemplificados no mostrarán coordenadas ni etiquetas de ubicaciones cercanas. De igual manera, cualquier figura referente a la secuencia de preprocesado, control de calidad y procesado de datos presentada, se hará sin nombre de proyecto, fecha o ubicación exacta.

2. Antecedentes

Contexto Geológico

Geología Local

Las campañas de adquisición tuvieron lugar (en su mayoría) en los municipios de Concepción del Oro y Mazapil, en el estado de Zacatecas, a pesar de que no se presenta la ubicación exacta de cada una de las campañas realizadas, las actividades de exploración minera en dichos municipios se relacionan dentro del mismo marco geológico regional que corresponde con la subprovincia de Sierras Transversales de la Sierra Madre Oriental (SMO). El área de estudio se enfocó en un conjunto de 3 sierras que se encuentran prácticamente en el límite norte del estado de Zacatecas (Figura 2.1), estas sierras tienen una orientación E-W, casi perpendicular a la orientación general de la SMO. Compreendida por las sierras El Mascarón, Las Bocas y Santa Rita, la estratigrafía de este sistema está conformada principalmente por rocas sedimentarias marinas, que han sido cortadas por rocas ígneas intrusivas (INEGI, 2001; Servicio Geológico Mexicano, 2000).

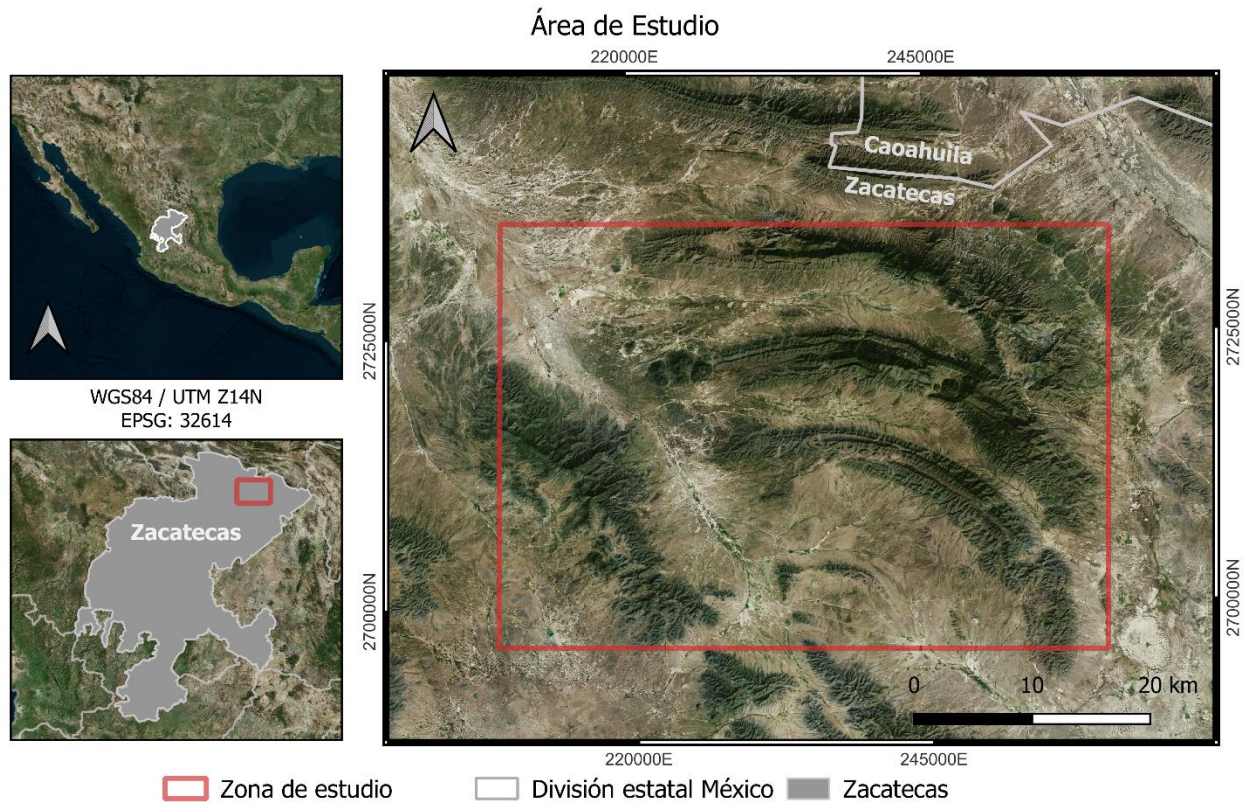


Fig. 2.1. Ubicación general de la zona de estudio.

El basamento de la zona no es muy conocido debido a la poca cantidad de afloramientos antiguos, y a la lejanía entre estos. Sin embargo, haciendo una correlación entre afloramientos de la SMO se puede decir que el Basamento está compuesto principalmente de rocas metamórficas, gneis de edad Precámbrico a Triásico Tardío (Alfaro, 2015).

De acuerdo con Diaz-Salgado (2004), en el Triásico Tardío se encuentran las rocas que se consideran la cubierta del Basamento, representadas por una secuencia siliciclástica metamorfoseada con bloques asociados a piso oceánico. Por otra parte, las rocas del Jurásico temprano a medio comprenden el último depósito previo a la invasión marina del Calloviano, y están representadas por una secuencia de arco volcánico continental, seguida de un conglomerado continental.

Tras la invasión marina del Calloviano, durante el Jurásico Superior, se encuentran rocas de la Formación la Caja (Imlay, 1943), secuencias de calizas de estratos delgados, margas y lutitas, que se vuelven más finas y calcáreas hacia la cima.

El periodo Cretácico está dominado por alternaciones de rocas marinas, comenzando en el Cretácico Inferior con calizas intercalas con lutitas en estratos delgados, calizas en estratos delgados con bandas y lentes de pedernal, y calizas en estratos medianos a gruesos con intercalaciones de limolitas. Un ejemplo de estas rocas (figura 2.2) se encuentra en la Formación Taraises, que abarca desde el Berriasiense al Barremiense (Tristán-González y TorresHernández, 1992).



Fig. 2.2. Afloramientos de la formación Taraises. A) Calizas en estratos medianos con limolitas, B) Calizas con bandas de pedernal. C) Calizas alteradas. Imagen tomada de Alfaro, 2015.

En el Cretácico Superior se depositan las últimas calizas de la columna, abriendo paso a alternaciones de lutitas y areniscas. Terminando con las rocas de origen marino (Servicio Geológico Mexicano, 2004).

Durante el Paleógeno el ambiente cambió, dando lugar a rocas clásticas. En su mayoría conglomerados polimícticos y areniscas, con poca presencia de lutitas y algunas calizas lacustres. Dentro de este periodo, la región se encuentra ampliamente afectada por intrusivos de composición ácida, principalmente granodioríticos, con edades que abarcan el Eoceno y el Oligoceno. A su vez, existe la presencia de rocas porfídicas hipoabisales de composición riolítica. Durante el Terciario Tardío continúa el depósito de conglomerados polimícticos de origen aluvial, constituidos de clastos de areniscas lutitas, pedernal y fragmento ígneos, poco consolidados, con una matriz de arenas cuarcíferas y calcáreas, y cementados por carbonatos y arcillas (Alfaro, 2015).

Finalmente, el Cuaternario está marcado únicamente por depósitos aluviales, coluviales y de travertino en las orillas de paleo lagunas, estas unidades se encuentran muy poco consolidadas y tienen un espesor muy pequeño en relación con las rocas y formaciones más antiguas (Servicio Geológico Mexicano, 2000; figura 2.3).

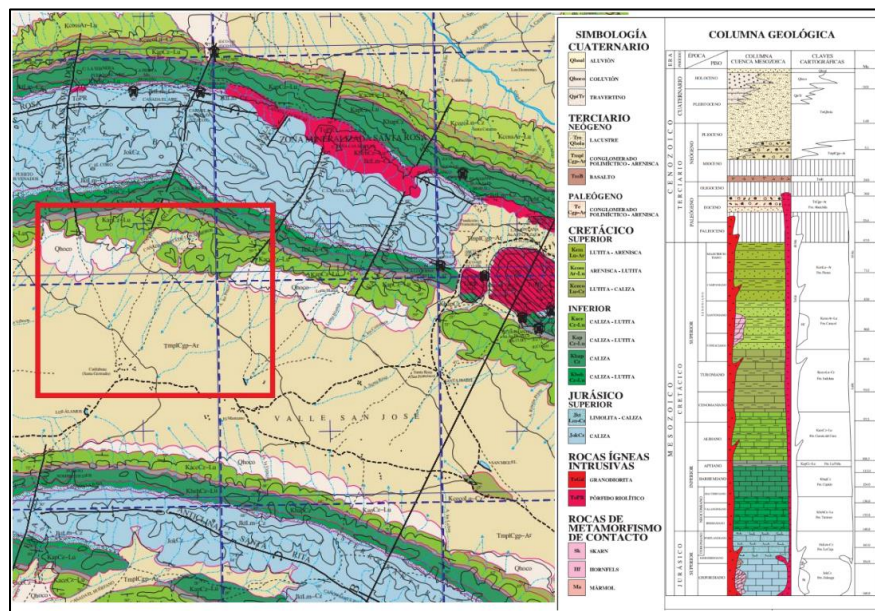


Fig. 2.3. Carta geológica de la zona de estudio y columna estratigráfica. Imagen modificada del Servicio Geológico Mexicano

Problema geológico por resolver

La actividad minera en los municipios de Mazapil y Concepción del Oro, Zacatecas, está relacionada a los cuerpos porfídicos del Oligoceno, los cuales se han asociado con frecuencia a la mineralización, como es el caso del intrusivo de Santa Rosa, que presenta mineralización Auro-Cupífera (Alfaro, 2015).

En el contexto de la exploración minera, delimitar y cuantificar las zonas de mineralización es uno de los principales objetivos, además, estas zonas ya exploradas y explotadas en el área de estudio, han presentado una buena respuesta a los estudios de resistividad y polarización inducida, por lo cual se eligió como método de acercamiento al problema.

A pesar de que los cuerpos porfídicos presentes en la zona habitualmente se emplazan en los ejes de los anticlinales, en la región se encuentra un intrusivo que se emplazó en el eje del sinclinal del valle de Mazapil, dando lugar al yacimiento minero Peñasquito, una de las zonas de mineralización más grandes del Estado, y una de las principales productoras de oro a nivel nacional (SGM, 2021). Por lo tanto, las campañas de exploración se han extendido a una mayor variedad de zonas con diferentes contextos geológicos y topográficos.

Método Geofísico

Principio Físico

La Prospección Eléctrica es una técnica que se ocupa del estudio de las estructuras ocultas en el interior de la Tierra y de la localización de cuerpos delimitados por medio de contrastes de resistividades y conductividades de los materiales (Steeple, 2001). A continuación, se desarrolla una justificación simple del método eléctrico y las propiedades que mide.

Partiendo de la expresión general de la Ley de Ohm, que describe la relación entre una corriente eléctrica (I) que pasa a través de un conductor con resistencia R y la diferencia de potencial entre sus extremos (dV):

$$dV = RI \dots (1)$$

Sabemos que la resistencia de un material se puede modelar en función de la resistividad de éste y de sus dimensiones, siendo directamente proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su área transversal.

$$R = \rho \frac{Long}{\acute{a}rea} \dots (2)$$

Asumiendo que se inyecta una corriente I al suelo a través de un electrodo en un punto A, la corriente se propagará al subsuelo de forma semiesférica, llamemos r al radio de dicha semiesfera

y dr a su espesor (figura 2.4). Usando la ecuación 2 es posible calcular la resistencia que opondrá el material al flujo de corriente en un radio dado.

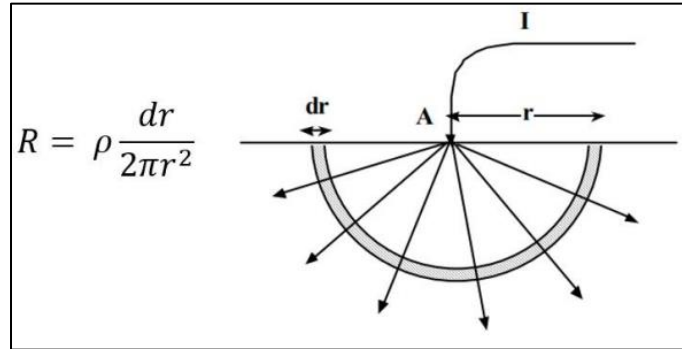


Fig. 2.4. Flujo de corriente en el subsuelo debido a un electrodo.

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 1 obtenemos:

$$dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} I$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \dots (3)$$

Podemos asumir la existencia de un punto B, necesario para cerrar el circuito eléctrico y que, a su vez sería otro punto de inyección de corriente eléctrica al subsuelo. Usando la expresión 3 es posible calcular el potencial en un punto N.

$$VN = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN}$$

En la figura 2.5 se puede observar que agregando al circuito AB dos puntos en superficie llamados M y N, se buscará conocer la diferencia de potencial que genera la inyección de corriente:

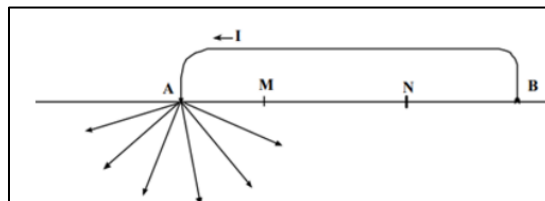


Fig. 2.5. Flujo de corriente en el subsuelo, y circuito con dos electrodos de corriente, y dos electrodos de potencial.

La diferencia de potencial entre M y N se puede expresar como:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

De esta ecuación se despeja la resistividad:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \dots (4)$$

En la ecuación 4 se observa que la resistividad del medio se puede calcular conociendo la diferencia de potencial en dos puntos, la corriente inyectada y un factor que llamaremos K. Este factor depende de las distancias entre electrodos, y se conoce como factor geométrico. Finalmente podemos reducir la expresión usando K.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \dots (5)$$

La ecuación 5, se utiliza en cada medición de campo para determinar la resistividad aparente del medio. El punto de atribución al que corresponde esta resistividad se encuentra en el punto medio de los electrodos de corriente y de potencial a una profundidad que depende de las distancias entre electrodos. Los estudios de resistividad consisten en variar tanto las distancias entre electrodos como las posiciones de estos sobre un área para variar los puntos de adquisición vertical y horizontalmente, esto genera información de la resistividad del subsuelo en tres dimensiones.

Arreglo Polo-Dipolo

El arreglo Polo Dipolo consiste en colocar uno de los electrodos de corriente (B) a una distancia tan grande del resto del circuito que su efecto sea despreciable. Este arreglo se utiliza principalmente porque su buena capacidad de profundizar sin sacrificar resolución lateral, Loke (2004).

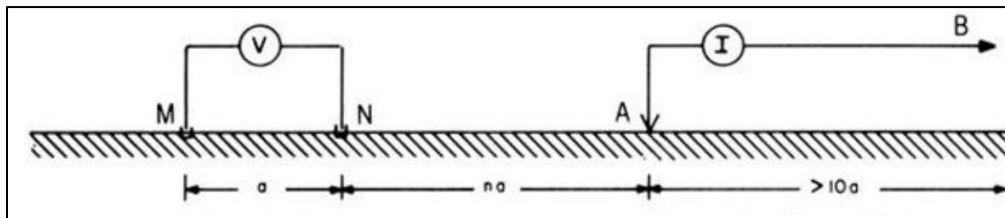


Fig. 2.6. Esquema de un arreglo eléctrico polo-dipolo.

En la figura 2.6 se observa que, como norma general, la distancia a la que se encuentra el electrodo remoto de corriente debe ser igual o mayor a 10 veces la separación entre electrodos de potencial. Para el arreglo Polo- Dipolo, y usando la notación del esquema, el factor geométrico K se expresa como:

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

Donde n está relacionado a la separación entre los electrodos de potencial y el electrodo de corriente presente, y a es la separación de electrodos de potencial.

Arreglo Dipolo-Dipolo

El arreglo Dipolo-Dipolo consiste en colocar un par de electrodos (dipolo) que se encargarán de enviar corriente al subsuelo y otro par de electrodos que servirá para la medición del potencial (Figura 2.7). Tanto la distancia de cada dipolo como la distancia entre ellos puede variar, aunque regularmente la separación entre dipolos y la apertura de estos guardan una relación. Este arreglo se utiliza debido a que brinda una mejor resolución horizontal, sin embargo, su capacidad de profundizar no es la mejor.

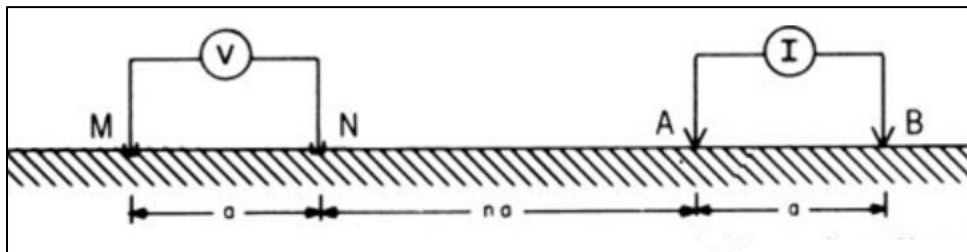


Fig. 2.7. Esquema de un arreglo electrodico dipolo-dipolo.

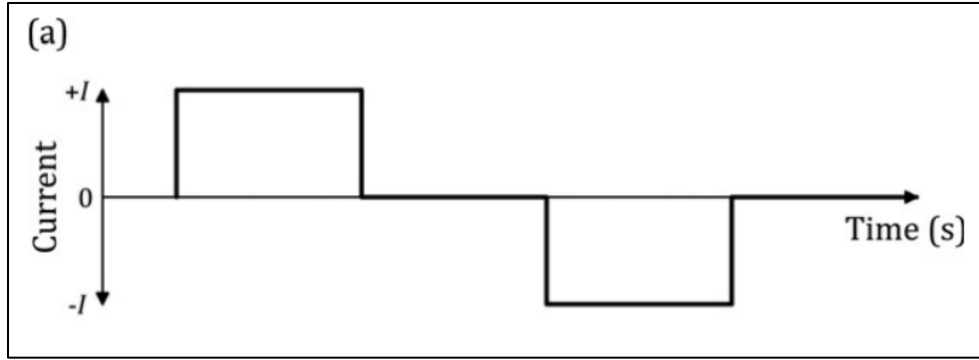
De acuerdo con la notación de la figura, el factor geométrico K para este arreglo es:

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

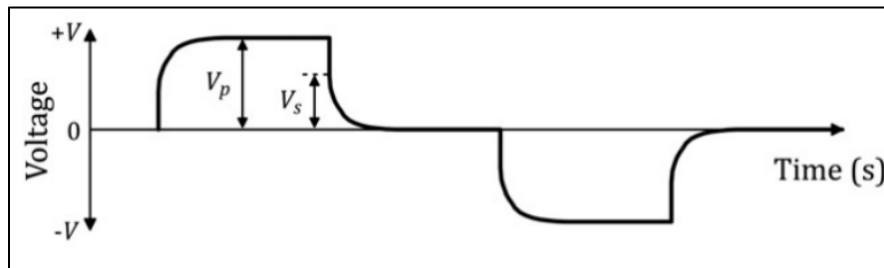
Donde n está relacionado a la separación de cada dipolo, y a es la relación que guarda la separación entre dipolos.

Polarización Inducida

Los estudios de polarización inducida consisten en además de realizar la estimación de la resistividad del subsuelo, determinar la capacidad de retener temporalmente la carga eléctrica (cargabilidad). Esta medición se realiza utilizando una corriente que se interrumpe y se inyecta de manera periódica, de acuerdo con el siguiente procedimiento. Partiendo de un circuito como el expuesto anteriormente (electrodos de potencial y electrodos de corriente), supongamos que la corriente utilizada para la medición se interrumpe de manera periódica alternando el signo de esta (Figura 2.8).



Sabiendo que todos los materiales al someterse a un campo eléctrico lo suficientemente intenso tienden a polarizarse, al encender e interrumpir la corriente eléctrica la respuesta en voltaje variará de forma gradual. Teniendo una forma similar a la de la Figura 2.8.



Esta respuesta en voltaje al encender la corriente aumentará hasta llegar a un punto de equilibrio, donde el voltaje se vuelve constante, representado en la figura como V_p . Al interrumpir la corriente el voltaje regresará a su estado de equilibrio original (cero en este caso), V_s se podrá establecer como cualquier punto de la curva de decaimiento del voltaje desde que se interrumpe la corriente hasta que este regresa a 0, esto dependerá de la estimación de cargabilidad que se utilice.

El cálculo de la cargabilidad fue propuesto por primera vez por Schlumberger (1939) como una relación entre V_p durante la inyección de corriente y V_s durante el periodo de descarga. Esta cargabilidad aparente no tiene unidades y expresa que tan fuerte es la polarización del medio.

$$M_a = \frac{V_s}{V_p},$$

Actualmente el cálculo de la cargabilidad se realiza con un rango de valores de V_s (ventanas) a lo largo del tiempo de decaimiento, estas ventanas pueden variar dependiendo del estudio, el equipo y los objetivos. Y se puede expresar de manera integral como se muestra en la Figura 2.10

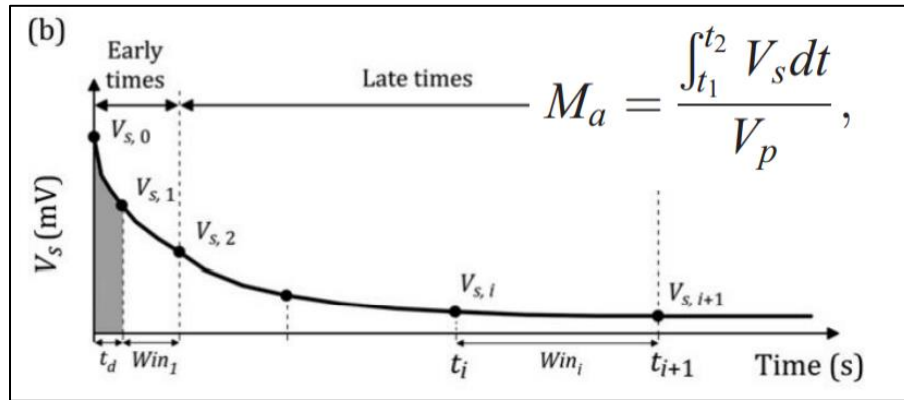


Fig. 2.10. Ejemplo de ventanas para V_s . Imagen tomada de Binley, 2020

Un ejemplo frecuentemente utilizado es el estándar de Newmont, que consiste en tomar una señal de corriente con periodo de inactividad de 2 segundos, y utilizar una ventana entre 0.45 y 1.1 segundos después de la interrupción de la corriente. Este estándar se ha probado de forma experimental obteniendo una buena respuesta de polarización en objetivos de minería.

3. Participación profesional

Actividades generales y sistemáticas

La participación reportada con la empresa tuvo lugar entre octubre de 2021 y mayo de 2022, y se enfocó principalmente en la ejecución de estudios de polarización inducida en dominio del tiempo en 3D, con una colaboración menor en estudios 2D. Durante el tiempo de trabajo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- I. Instalación de líneas de adquisición: Consiste en navegación GPS (figura 3.1), localización de líneas y estaciones, instalación de cableado, instalación de equipos de adquisición (receptores) y electrodos (corriente y potencial).

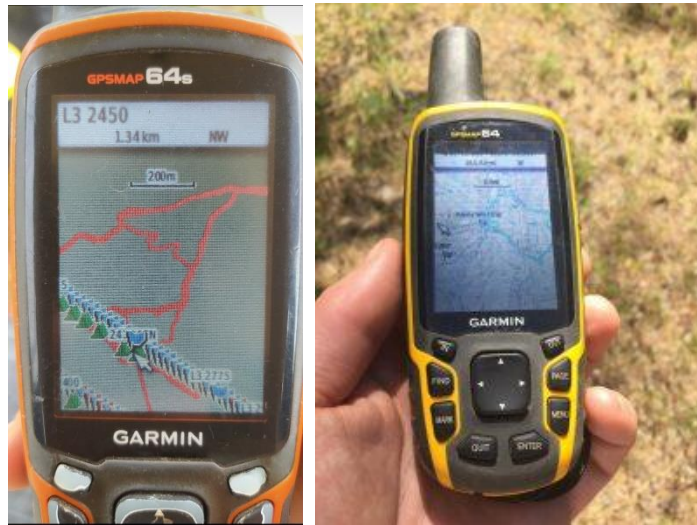


Fig. 3.1. Ejemplo de navegación GPS

- II. Mantenimiento de líneas de adquisición: Consiste en la inspección del cableado y los equipos de adquisición previamente instalados (figura 3.2), reconexión de equipos, reparación del cableado, solución de problemas de comunicación inalámbrica entre equipos, reemplazo de equipos defectuosos, revisión y reparación de equipos en campo, etc.



Fig. 3.2. Cableado y receptor en una línea

- III. Supervisión de inyecciones de corriente: Consiste en ubicar mediante GPS las estaciones planeadas para inyecciones, instalar los electrodos en las estaciones junto con los equipos que registran la corriente (figura 3.3), y supervisar la estación mientras se realizan las lecturas.



Fig. 3.3. Instalación de electrodos y equipos de registro de corriente

- IV. Supervisión de levantamiento de GPS: Consiste en registrar todas las estaciones reales adquiridas en campo, compararlas con las estaciones propuestas, verificar que las distancias entre estaciones no excedan el error permitido y que todos los puntos adquiridos se encuentren organizados y correctamente nombrados (figura 3.4).

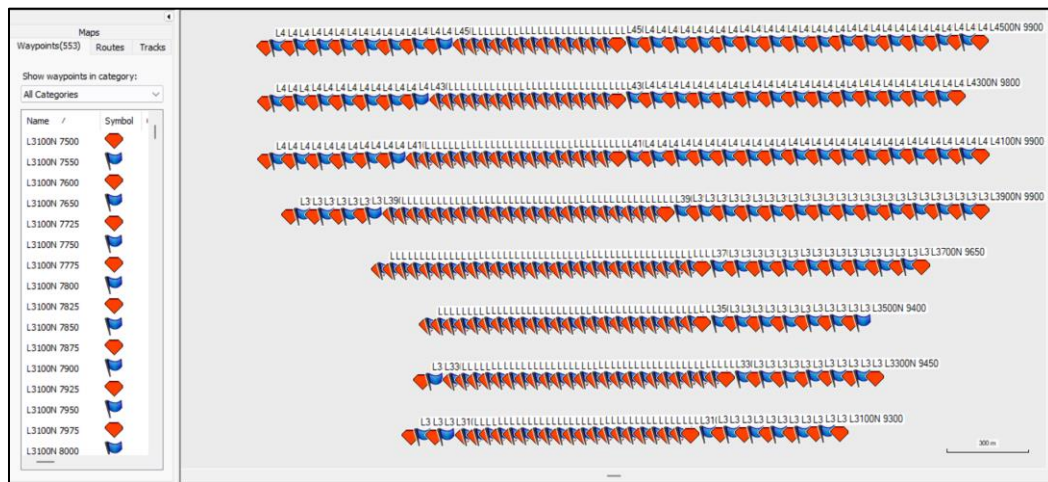


Fig. 3.4. Ejemplo de levantamiento GPS, 500 estaciones aproximadamente.

- V. Elaboración y entrega de mapas: Para cada levantamiento GPS se realizan mapas periódicamente para documentar el progreso de la adquisición, se registran las ubicaciones esperadas y las reales de las estaciones (figura 3.5).

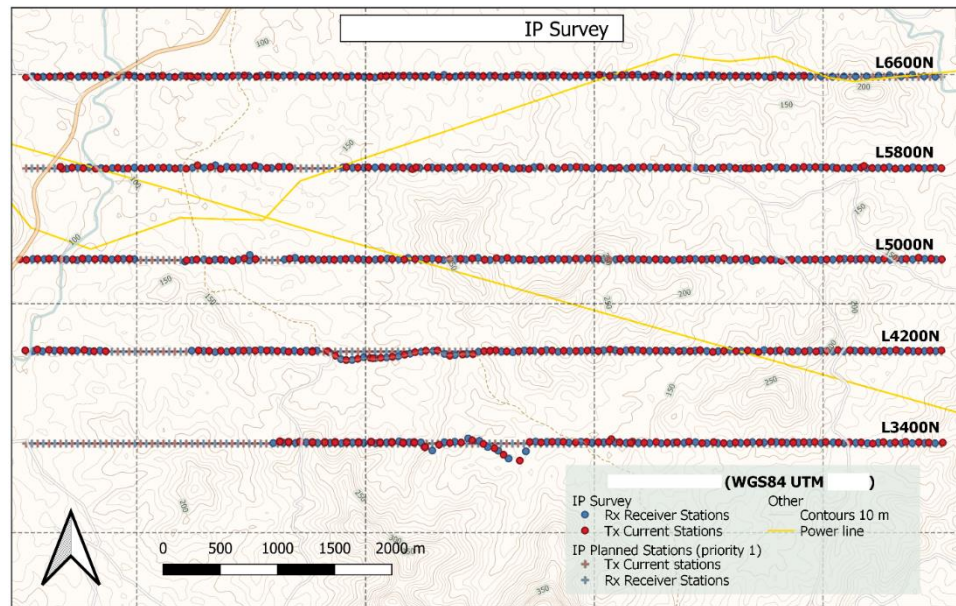


Fig. 3.5. Ejemplo de mapa de progreso de levantamiento.

- VI. Operación del equipo desde ubicación remota: Se instala en algún punto accesible de la zona de estudio los generadores, el transmisor, y un área de trabajo para controlar el equipo desde software especializado con ayuda de transeptores (figura 3.5), se realizan tareas como comprobar el estado de los equipos instalados previamente, verificar su funcionamiento, batería y correcta conexión. Supervisar los equipos de inyección de corriente desde la fuente (transmisor, generadores, etc.), así como realizar el control de calidad de los datos durante cada una de las estaciones de corriente.



Fig. 3.5. Área del transmisor y generadores.

- VII. Supervisión de QA/QC de datos: Durante la adquisición en campo, se asegura que cada lectura adquirida cumpla con los requisitos de calidad para su procesamiento, entre ellos se encuentra que la señal de corriente enviada sea perfectamente cuadrada y consistente, que no exista diferencia entre la corriente que el transmisor emite y la corriente recibida en campo, que para cada receptor activo durante la lectura se pueda identificar a grandes rasgos V_p y V_s , que la forma de la respuesta en voltaje sea consistente y de magnitud razonable con respecto a la ubicación de los polos, se inspecciona la respuesta de los receptores en busca de ruido de magnitud considerable y se asegura que todos los equipos de adquisición funcionen correctamente y registren la información (figura 3.6).

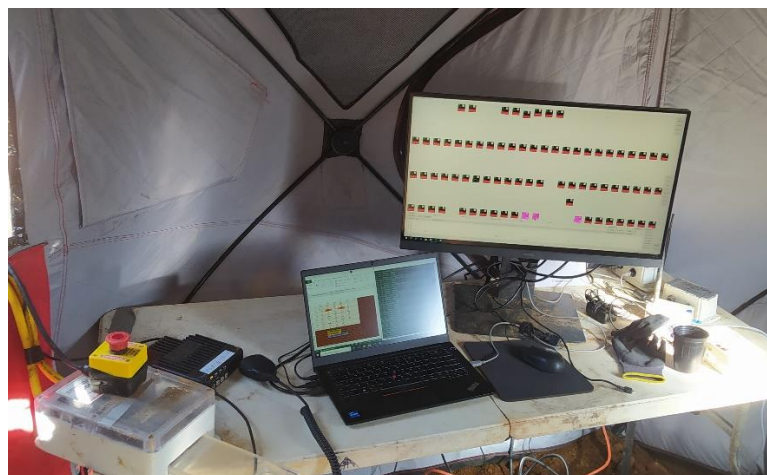


Fig. 3.6. Área de operación del equipo de adquisición y control de calidad en campo.

- VIII. Envío de datos: De manera periódica se deben entregar los datos que se adquieren en campo al departamento de procesado, se extraen de cada uno de los receptores los archivos correspondientes a los días de adquisición y se envían para su verificación, de ser necesario hay que revisar nuevamente la base de datos para asegurar que no haya archivos perdidos.
- IX. Coordinación y supervisión de salud, seguridad y ambiente (HSE): Consiste en llevar a cabo las inspecciones de seguridad de los vehículos y equipos de adquisición, así como a la ubicación del transmisor y sus componentes, se estudian los protocolos y medidas de seguridad obligatorias de la empresa, y se distribuyen para el personal de trabajo, se realiza la revisión periódica del equipo de seguridad tanto personal como colectivo y se entregan reportes diarios de seguridad.
- X. Mantenimiento de equipo de adquisición: Consiste en la inspección, prueba y reparación de equipo especializado de adquisición, se realizan reparaciones básicas como cambio de componentes electrónicos defectuosos, soldadura de cables/tarjetas y ensamble de equipos de adquisición.
- XI. Capacitación en preparación de bases de datos de IP: Una vez que se completa un levantamiento se recopilan todos los archivos adquiridos, mediante el uso de software especializado y códigos de Python se separan los datos ruidosos, receptores desconectados, lecturas descartadas, se asigna la ubicación GPS de los receptores, se verifican inicialmente los voltajes, se selecciona el tipo de arreglo y se genera una base de datos parcialmente depurada para su procesamiento.
- XII. Capacitación en tratamiento y procesado de datos de IP: A partir de una base de datos generada para un levantamiento, se utiliza software especializado para realizar un análisis más detallado de los datos adquiridos, se inspecciona detalladamente cada lectura, cada receptor activo dentro de dicha lectura, se verifican la claridad y consistencia de los datos de voltaje primario y secundario, se inspeccionan las curvas de decaimiento y se limpia completamente la base de datos. Finalmente, se realiza el cálculo de las secciones o volúmenes de resistividad y cargabilidad aparente.
- XIII. Encargado de proyecto: Consiste en llevar a cabo la supervisión completa de una campaña de adquisición, algunas de las actividades son:
- a. Planear la ejecución diaria del levantamiento y distribuir las actividades entre los miembros del equipo.
 - b. Supervisión general de los levantamientos.
 - c. Reportar diariamente a gerencia (producción, ejecución, seguridad).

- d. Planear la capacitación del personal nuevo.
- e. Asegurar la correcta adquisición de datos de alta calidad.
- f. Asegurar el seguimiento de protocolos de seguridad durante el levantamiento.
- g. Inventario y reparación de equipo en campo.
- h. Vigilar la producción diaria y ajustar actividades.
- i. Exploración de la zona de trabajo y planeación de transporte.
- j. Manejo de gastos y compras.
- k. Planeación de itinerarios y turnos de personal

Participación en proyectos específicos

A lo largo de los ocho meses de trabajo reportados, se participó en 6 proyectos de levantamientos de resistividad y cargabilidad, acumulando un total aproximado de 300 km de líneas de polarización inducida, realizando los levantamientos de IP y de GPS de alrededor de 3500 estaciones. Los proyectos de colaboración y sus detalles se enlistan en la Tabla 3.1, y en la Figura 3.7 se muestran un par de ejemplos de propuestas de levantamientos de IP en 2D y 3D similar a los que se realizaron.

| Fechas | Proyecto | Detalles | Ubicación |
|------------|---|---|---------------------------------------|
| Sep-21 | DIAS México LC 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad en 3D | Malla compuesta por 17 líneas de 2.2 a 3.0 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 4km ² . Levantamiento GPS de ~400 estaciones. | Mazapil, Zacatecas |
| Oct-21 | DIAS México LM 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Malla 3D | Malla compuesta por 19 líneas de 1.4 a 3.3 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 5km ² . Levantamiento GPS de ~450 estaciones. | Mazapil, Zacatecas |
| Nov-21 | DIAS México ER 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Malla 3D | Malla compuesta por 16 líneas de 2.0 a 3.0 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 4km ² . Levantamiento GPS de ~400 estaciones. | Mazapil, Zacatecas |
| Dec-21 | DIAS México EC 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Malla 3D | Malla compuesta por 12 líneas de 2.4 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 3km ² . Levantamiento GPS de ~300 estaciones. | Concepción del Oro, Zacatecas |
| Feb-22 | DIAS México CN 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Malla 3D | Malla compuesta por 17 líneas de 3.0 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 4.5km ² . Levantamiento GPS de ~400 estaciones. | Concepción del Oro, Zacatecas |
| Mar-abr-22 | DIAS Internacional ADR 2DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Líneas 2D | Set de líneas de 1.5 a 2.5 km, espaciamiento de 250 [m] entre líneas y de 25 [m] entre estaciones. Arreglo dipolo-dipolo, Cobertura de 13 km lineales. Levantamiento GPS de ~500 estaciones | Sánchez Ramírez, República Dominicana |
| May-22 | DIAS México LC 3DIP - Estudio de resistividad y cargabilidad, Malla 3D | Malla compuesta por 47 líneas de 2 a 5 km, espaciamiento de 100 [m] entre líneas y de 100 [m] entre estaciones. Arreglo polo-dipolo. Cobertura aproximada de 16km ² . Levantamiento GPS de ~1500 estaciones. | Mazapil, Zacatecas |

Tabla 3.1. Listado de proyectos.

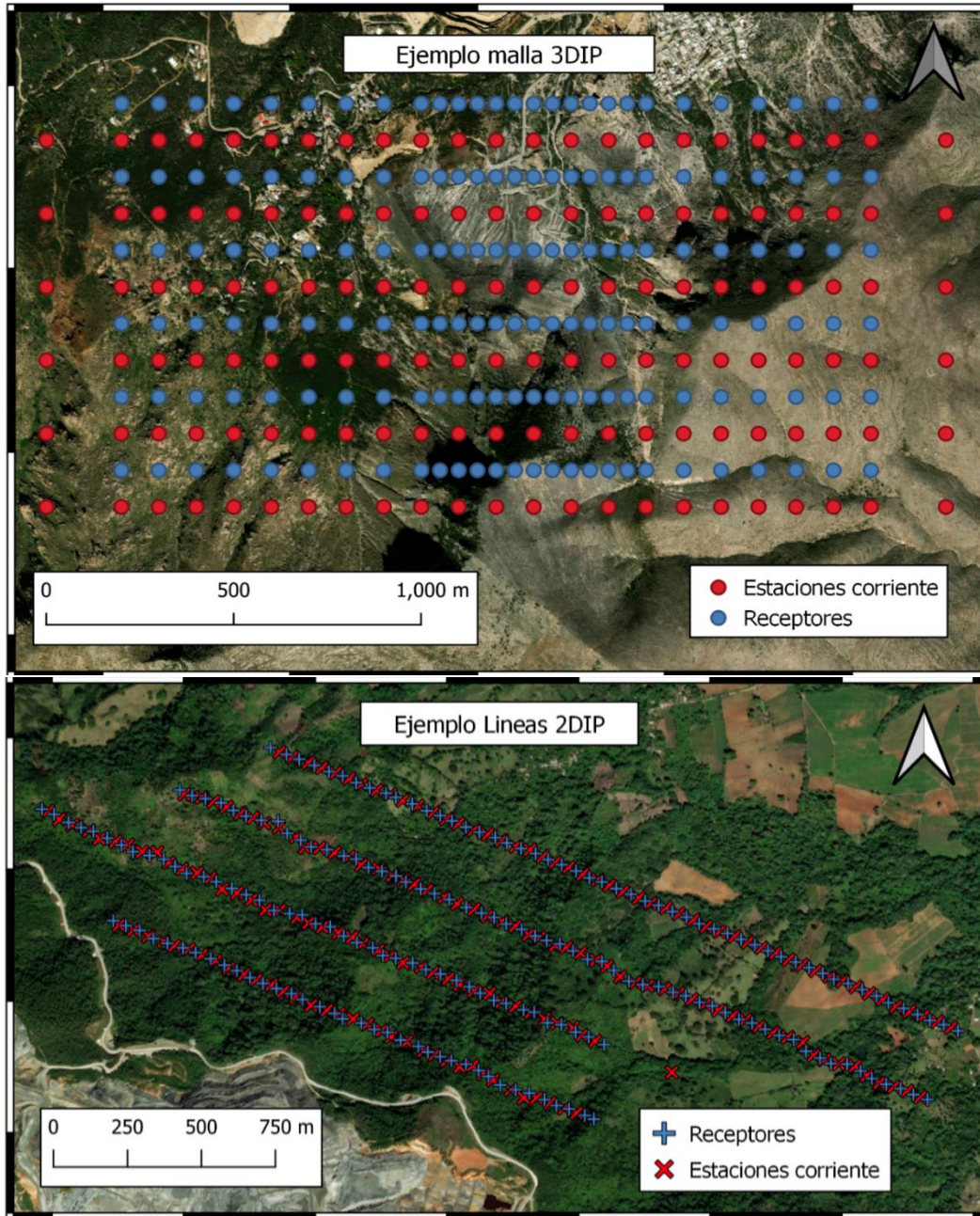


Fig. 3.7. Ejemplos de estudios realizados, malla 3DIP (imagen superior) y líneas 2DIP (imagen inferior).

4. Metodología utilizada

Equipo de adquisición

Todas las campañas de levantamientos en las que se participó fueron adquiridas utilizando el equipo DIAS 32, el cual consta de un transmisor y una serie de receptores que funcionan de manera independiente, ambas partes del equipo son fabricadas por la empresa DIAS Geophysical.

Receptores

Los receptores (Nodos DIAS 32, figura 4.1) son dispositivos portátiles capaces de registrar, almacenar y enviar datos de voltaje en campo. Cada uno de estos receptores cuenta con una batería interna, y tienen la capacidad de enviar y recibir comandos de manera inalámbrica, por lo tanto, no se requieren cables en campo para encargarse de la alimentación o la comunicación con/entre receptores. La capacidad de comunicación inalámbrica permite al operador del equipo realizar un control de calidad en tiempo real durante el levantamiento; y facilita la transferencia inalámbrica de datos después de la adquisición.



Fig. 4.1. Receptor: Nodo DIAS 32.

Las principales ventajas de este equipo son la cobertura para estudios de gran escala y el volumen de datos que se puede obtener, al no requerir cables de alimentación ni para controlar cada receptor, se pueden colocar decenas o cientos de receptores con relativa facilidad, y organizar en cualquier disposición o arreglo geométrico deseado dependiendo las necesidades de cada estudio, el único requisito siendo conectar todos los receptores a un mismo cable. Cada uno de estos receptores se conecta a tierra mediante un electrodo, y se conectan a un cable de referencia que une a los nodos entre sí, para dicho cable se utiliza cable de cobre común, la Figura 4.2 ejemplifica la conexión de los receptores. El cable que conecta los nodos puede colocarse en

cualquier trayectoria, siempre y cuando todos los equipos estén conectados entre sí, y el software de adquisición puede soportar cientos de nodos al mismo tiempo.

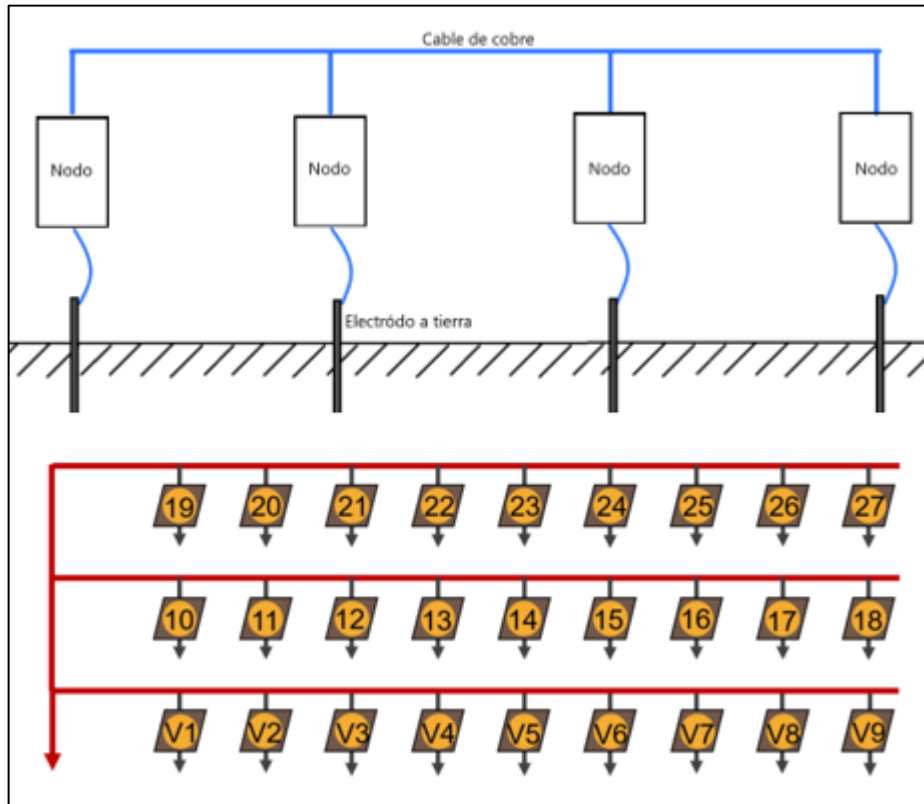


Fig. 4.2. Ejemplo de conexión de receptores

Transmisor

Para los levantamientos se utilizó el transmisor DIAS GS5000 (figura 4.3), una unidad relativamente portátil (pesando 32Kg aproximadamente) que permite enviar una señal de corriente cuadrada controlada y configurable al subsuelo. Al igual que los receptores, el transmisor puede ser controlado de manera inalámbrica desde una computadora, tiene la capacidad de enviar y recibir comandos, cuenta con una unidad GPS que permite sincronizar los tiempos de lectura, carga y descarga con los receptores para facilitar el procesado, y la forma de onda que se emite puede ser configurada a diferentes frecuencias dependiendo las necesidades del estudio. El transmisor tiene una potencia máxima de 25kW, con voltaje y corriente de salida máximos de 5000 V y 20 A respectivamente, esto permite realizar estudios de gran tamaño con una buena relación señal/ruido.



Fig. 4.3. Transmisor DIAS GS5000.

Polarización Inducida en 2D y 3D

A diferencia de los sistemas de receptores convencionales, el sistema DIAS 32 utiliza el CVR (Voltaje Común de Referencia), esto permite elegir un receptor que se usará como punto de referencia para calcular el voltaje de los demás, al estar todos conectados a un mismo cable, el voltaje de referencia permite calcular dipolos entre dos receptores cualesquiera dentro del arreglo, esto quiere decir que para cada lectura, se pueden obtener tantos dipolos como combinaciones de receptores se puedan hacer, lo que resulta en una gran cantidad de dipolos de diferentes tamaños, estos dipolos están sujetos a ser usados o no dependiendo de la cantidad y calidad de la señal que se registre a diferentes distancias del punto de inyección de corriente.

Durante los estudios 3D que se realizaron, para cada lectura, se tuvieron 4 líneas de receptores activas en todo momento, esto, en conjunto con el uso del CVR permite que los puntos de atribución para los dipolos obtenidos se encuentren distribuidos espacialmente a lo largo de las líneas, a diferentes profundidades y entre líneas a diferentes distancias. Esto logra que la adquisición sea verdaderamente en 3 dimensiones y aumenta la resolución lateral (figura 4.4). En el caso de los estudios 2D, simplemente se mantienen activos todos los receptores de la línea para cada lectura, en este caso la ventaja se encuentra en la capacidad de generar dipolos de diferentes tamaños a lo largo de una gran distancia sin modificar el arreglo en cada lectura.

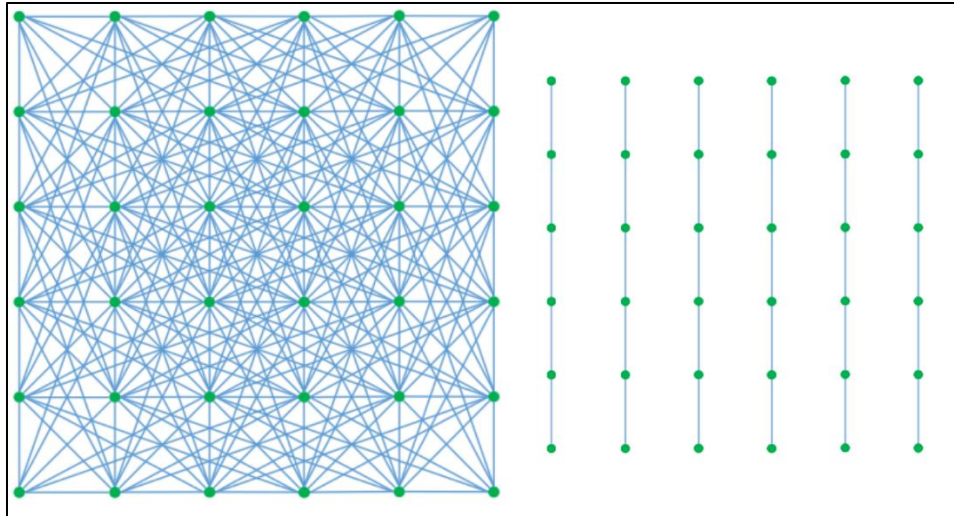


Fig. 4.4. Comparación de densidad de datos, dipolos posibles usando el CVR (izquierda), dipolos posibles usando líneas independientes (derecha).

Adquisición

El proceso de adquisición es relativamente simple con respecto al tamaño de los levantamientos realizados, dado que el equipo permite realizar el estudio utilizando un solo cable eléctrico para los receptores y un cable para la emisión de corriente, gran parte de la logística y el tiempo de preparación recae en la correcta y cuidadosa instalación del cableado a lo largo de las líneas deseadas. Para ejemplificar este proceso, se muestra una malla 3DIP con 18 líneas de entre 500 y 3100 m de longitud cuyo arreglo corresponde a 4 líneas de receptores activas en todo momento (figura 4.5).

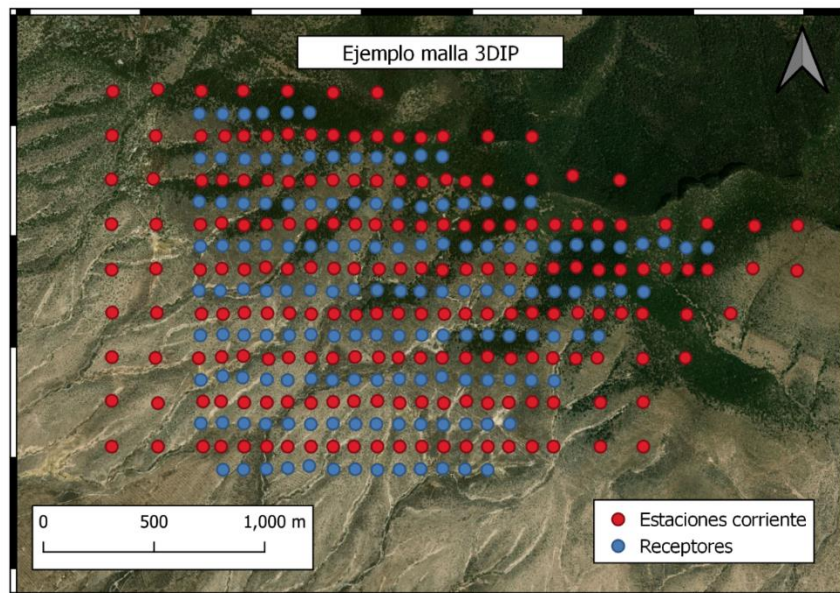


Fig. 4.5. Malla

Las campañas comienzan con un reconocimiento previo del área de trabajo, se deben identificar las rutas de acceso a la zona y sus condiciones, ya sean carreteras federales, autopistas, calles pavimentadas o caminos de terracería. Se deben de identificar las características topográficas, etnográficas, de clima, presencia de cuerpos de agua, zonas de cultivo, posibles líneas de alta tensión, o cualquier factor que pueda alterar el desarrollo del levantamiento con anticipación. Previo a la movilización del equipo se elaboran mapas de la propuesta donde se identifiquen las características encontradas en el reconocimiento previo. En la figura 4.6 se muestra un ejemplo de mapeo previo, donde se requirió delimitar los caminos principales, de terracería, y los terrenos de propietarios particulares que no otorgaron permiso para realizar el levantamiento dentro de su propiedad.

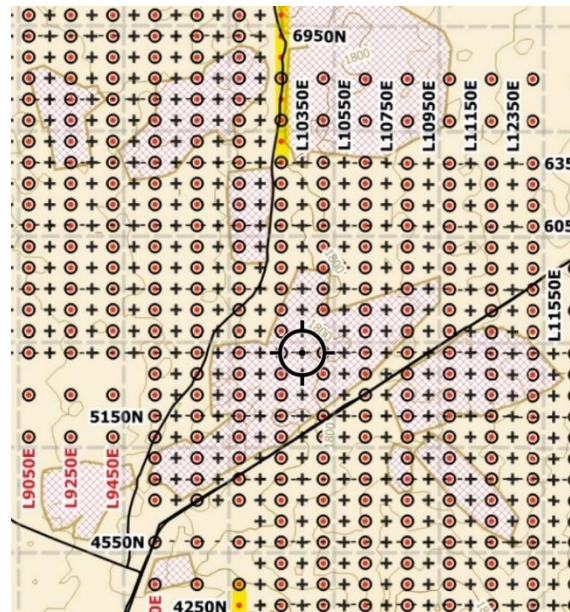


Fig. 4.6. Ejemplo de fragmento de mapa de reconocimiento previo que incluye: Caminos principales (líneas rectas), caminos de terracería (líneas curvas) y propiedades sin permiso (áreas rojas).

Una vez en campo se realiza un reconocimiento presencial de la zona de estudio, se elige el lugar donde se colocará el transmisor o base, esta ubicación requiere acceso en camioneta e idealmente se debe encontrar dentro de la malla a levantar, sin embargo, para ubicaciones remotas sin caminos cercanos, se puede instalar fuera de la malla. Debido a que el equipo depende de comunicación inalámbrica con la base, es preferible contar con un punto abierto y con línea de visión a gran parte del área. Una vez elegida la zona, se delimita y se instalatodo lo necesario para la operación del equipo, a grandes rasgos esto consiste en: generadores, transmisor, refugio o tienda de campaña (figura 4.7), computadoras y transeptores.



Fig. 4.7. Área del transmisor o base

Para estudios con arreglo polo-dipolo, es necesario instalar el electrodo remoto que servirá como el polo teóricamente a una distancia infinita. Este debe de estar conectado físicamente al transmisor durante todo el levantamiento, por lo tanto, usualmente el cableado del electrodo remoto es de los primeros en instalarse, para este electrodo se utiliza cable de cobre y se colocan múltiples varillas de acero de al menos 1 m de longitud en una pequeña poza con agua y sal (figura 4.8), dependiendo la duración del estudio este electrodo puede rehidratarse periódicamente, por lo que es conveniente elegir una ubicación accesible para él. En la figura 4.10, la línea roja al sur del transmisor alejándose de la malla representa el cableado en dirección al electrodo remoto.



Fig. 4.8. Instalación e hidratación del electrodo remoto.

Para realizar adquisición en 3D con el equipo utilizado (figura 4.9), es necesario tener al menos 3 líneas de receptores activas en todo momento, en el caso de las campañas descritas, se utilizaron arreglos con 4 líneas, por lo tanto, se instalaron las primeras 4 líneas del levantamiento, para el

caso del ejemplo, las líneas utilizadas fueron las del extremo sur por motivos de accesibilidad, pero es posible iniciar en el extremo que sea más conveniente.



Figura 4.9. Equipo de adquisición DIAS32. A) Receptores (nodos) B) Transmisor 25 kW C) Registrador de corriente D) Transceptor E) Cable de cobre, electrodos de acero inoxidable y marro.

El cableado y sus receptores se ejemplifican con las líneas y los puntos azules remarcados en la figura 4.10.

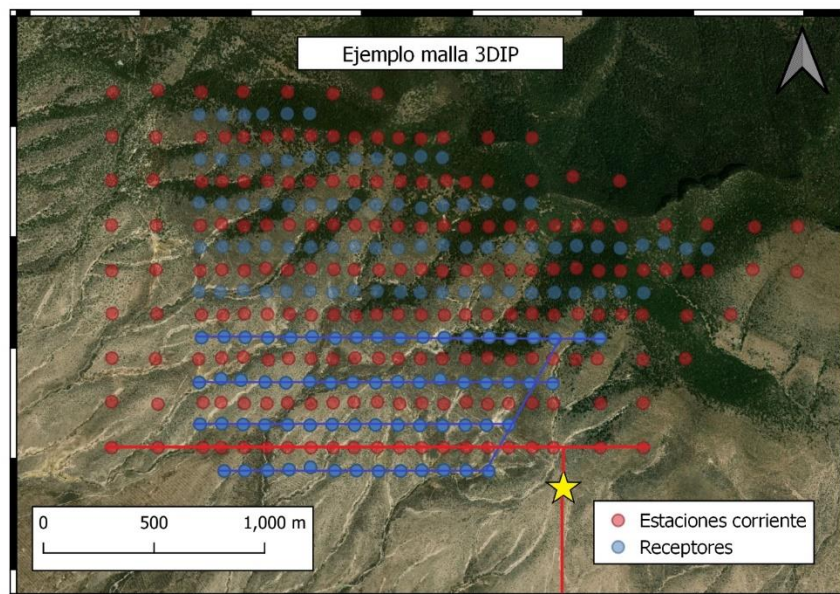


Fig. 4.10. Malla ejemplo, inicio de adquisición, ubicación del área del transmisor (estrella), cableado requerido para el electrodo remoto y estaciones de corriente (líneas rojas) y cableado requerido para líneas de receptores (líneas azules).

Una vez que las primeras 4 líneas de receptores y el electrodo remoto se han instalado, se considera que el arreglo se encuentra listo para iniciar lecturas (inyecciones de corriente), para esto se conecta físicamente la primera línea de estaciones de corriente al transmisor, que se muestra como la línea roja al norte del transmisor y a lo largo de todos los puntos rojos en dirección Este-Oeste (figura 4.10), con este cable se realizan las inyecciones de corriente correspondientes a la primera línea. En cada una de las estaciones de corriente (una a la vez) se colocan al menos 3 electrodos de acero inoxidable y agua con sal para aumentar el contacto entre los electrodos y el terreno, la estación en turno fungirá como el polo del arreglo polo-dipolo. En cada estación de corriente se realiza una medición de duración variable, las lecturas pueden ser de entre 2 y 8 minutos con el fin de mejorar la relación señal ruido, esta duración se determina tras realizar un primer control de calidad de los datos. Se utiliza una señal periódica de corriente de 8 segundos (2 de carga y 2 de descarga para cada polaridad) repetida durante todo el tiempo de lectura. Durante estas mediciones cada nodo registra la respuesta de voltaje en su posición.

Toda la información recabada se almacena en los receptores y es monitoreada en tiempo real, de manera inalámbrica mediante un transceptor conectado a una computadora portátil por el operador del equipo, quien tiene la capacidad de monitorear la respuesta individual de cada receptor, evaluar la cantidad y calidad de la señal, realizar una primera evaluación de las curvas de decaimiento, monitorear y/o ajustar los valores de corriente y voltaje que se inyectan al subsuelo, monitorear la integridad de la señal cuadrada de corriente que se envía, evaluar la integridad del arreglo y los cables en él, etc.

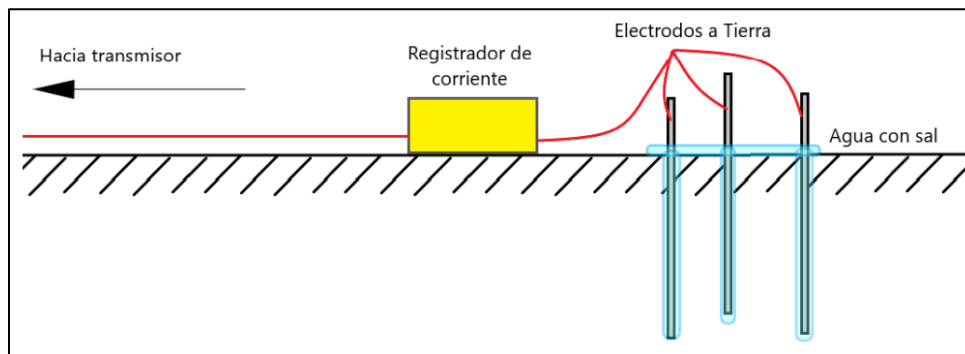


Fig. 4.11. Diagrama de conexión de una estación de corriente.

Una vez completadas las lecturas en la primera línea, se “recorre” el arreglo, el cable para las estaciones de corriente se lleva a la segunda línea, mientras que la primera línea de receptores se retira y se desconecta del resto, a su vez, la quinta se instala y se conecta al arreglo, con el fin de mantener siempre 4 líneas de receptores activos, el nuevo arreglo “recorrido” se muestra en la figura 4.12. Posterior a completar esa línea, se continúa agregando y retirando líneas de receptores del arreglo conforme se avanza en la malla, de tal manera que se mantengan cuatro

activas para cada una de corriente. Cada que se retira una línea del arreglo, los receptores de dicha línea son recargados y se retira de ellos los datos de voltaje adquiridos, estos datos se entregan al departamento de procesado para una revisión más detallada de control de calidad, dependiendo el resultado de estas revisiones se pueden modificar parámetros del levantamiento como duración de las lecturas, reubicación de estaciones, reubicación del electrodo remoto, modificación del arreglo utilizado, adición de estaciones e incluso readquisición de datos con una cantidad de ruido muy alta. La duración de los levantamientos varía de acuerdo con las dimensiones de la malla, el espaciamiento entre estaciones, las condiciones climáticas, topográficas y de vegetación de la zona, este proceso puede tomar semanas o incluso meses para las campañas más extensas.

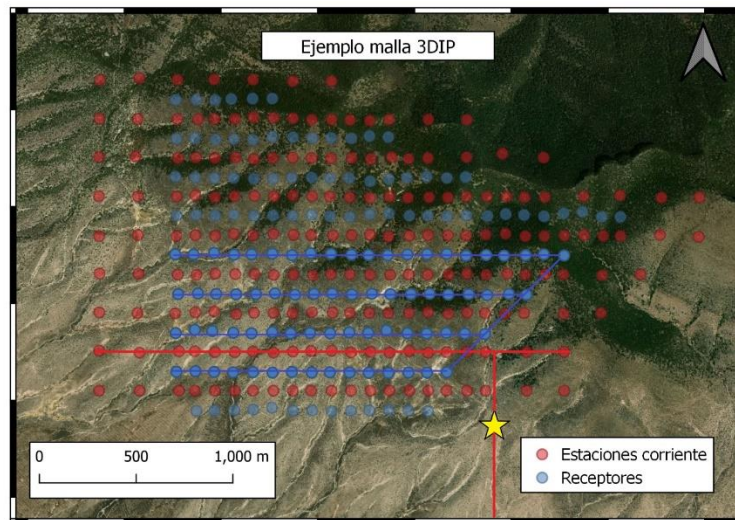


Fig. 4.12. Malla ejemplo, reubicación del arreglo, ubicación del área del transmisor (estrella), cableado requerido para el electrodo remoto y estaciones de corriente (líneas rojas) y cableado requerido para líneas de receptores (líneas azules).

Procesado

La capacitación y actividades relacionadas con el procesamiento de datos se realizó utilizando software y códigos propios de la empresa DIAS Geophysical, por motivos de privacidad y propiedad del software no es posible presentar figuras que incluyan la ejecución o el contenido de los códigos, ni el funcionamiento del software de procesamiento. Las figuras utilizadas corresponden a las señales a procesar y a pseudosecciones obtenidas.

La primera parte del procesado que consiste en la ejecución de 4 programas de Python donde se realiza la primera limpieza a los datos obtenidos:

- I. Los receptores se encuentran sincronizados temporalmente mediante GPS en todo momento del levantamiento, y almacenan un archivo de texto por cada lectura donde se registra tiempo UTC, posición y voltaje. El primer código utilizado se encarga de identificar

para cada receptor los archivos que corresponden a la fecha y hora en que se realizó cada lectura, después recorta exactamente la ventana de tiempo que corresponde al inicio de la lectura y fin de la lectura, identifica qué archivos contienen una forma de onda que no corresponde a la respuesta de una señal cuadrada e indica cuáles son estos archivos para su revisión o eliminación.

- II. Una vez obtenidos los archivos considerados aceptables y las ventanas de tiempo recortadas para cada receptor, el segundo código se encarga de obtener la ubicación de cada receptor en cada lectura, al tener tiempos de medición variables y usualmente de varios minutos, el GPS interno de cada receptor tendrá una “nube” de puntos en los que se realizó la lectura, el código se encarga de calcular el centro de esta nube y asignar dicha ubicación para cada receptor y cada lectura, estas coordenadas se utilizan para el cálculo inicial del factor geométrico y pueden ser reemplazadas posteriormente con las coordenadas adquiridas durante el levantamiento GPS del proyecto.
- III. El tercer código utilizado se encarga de realizar una segunda revisión a la respuesta registrada por los receptores, éste muestra en un plano la ubicación de los receptores en cada lectura junto con su respuesta promedio en voltaje graficada como curvas de nivel en distintos colores, la ubicación y amplitud de la señal en el receptor que se eligió como CVR (short) y la ubicación de la inyección de corriente en dicha estación, esto ayuda a verificar que el potencial medido efectivamente tenga el valor máximo cerca al polo, y disminuya conforme se aleja de dicho punto. También se compara la amplitud de la señal de corriente que se envió desde la ubicación del transmisor, con la que se recibió en la estación en turno, para verificar que no existan “fugas”.

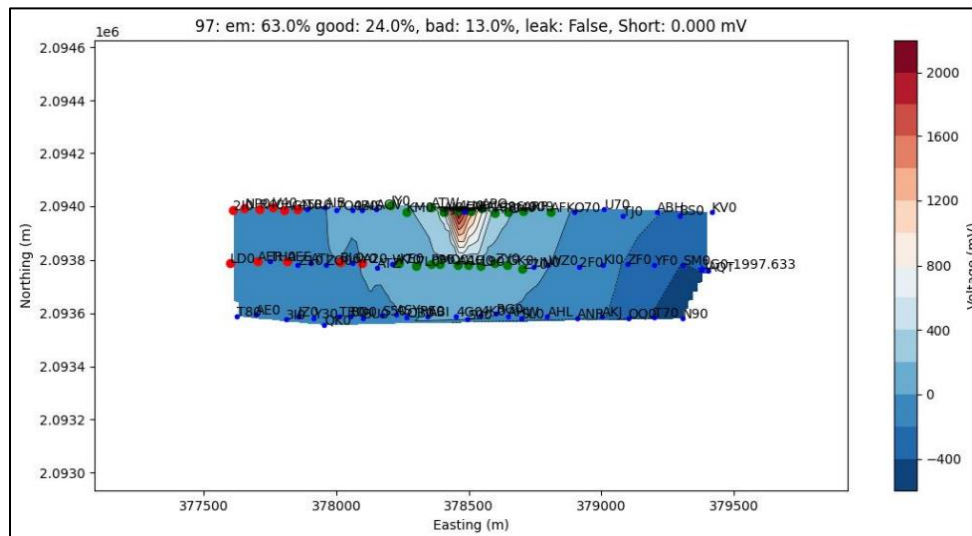


Figura 4.13. Visualización de datos de voltaje con polo ubicado al centro de la línea norte. Cada punto representa un receptor en campo.

Cada estación de corriente en una campaña de adquisición equivale a una lectura, por lo que en este paso se genera una gráfica como la de la figura 4.13 para cada lectura adquirida, dada la cantidad de lecturas que se pueden realizar en cada levantamiento (cientos), este proceso se realiza de manera progresiva conforme se entregan los datos provenientes de campo.

- IV. El cuarto código utilizado se encarga de crear la base de datos para el levantamiento, ésta toma todas las lecturas que fueron aceptadas en los pasos anteriores y relaciona toda la información en un archivo XML, donde se especifica para cada inyección el número de lectura, la cantidad de receptores activos, el nombre del archivo que corresponde a cada receptor para esa lectura, el nombre del archivo de señal de corriente y el nombre del archivo que corresponde al CVR. En este paso se selecciona el tamaño mínimo y el tamaño máximo de dipolo que se utilizará en la base de datos, bajo estos parámetros, la base de datos contendrá tantos dipolos como sean posibles generar en ese intervalo de distancias, incrementar el intervalo generará una mayor cantidad de dipolos, lo que se verá reflejado en una mayor resolución y profundidad, sin embargo, también aumentará el tamaño de la base de datos de manera significativa.

Una vez creada la base de datos para el levantamiento, se utiliza el software de control de calidad de la empresa, donde para cada lectura, se pueden verificar individualmente los dipolos generados, se muestra que receptores corresponden a esos dipolos, se inspecciona más a detalle cada señal y su curva de decaimiento, se visualiza la señal completa y la señal apilada, espectros de frecuencia, etc. Es posible reevaluar los datos ruidosos y filtrarlos de ser necesario, o retirar datos problemáticos que no se hayan identificado en los pasos anteriores. En este paso es donde se invierte la mayor cantidad de tiempo, debido a que se le da una revisión mucho más detallada a cada señal adquirida. A pesar de que los datos pasaron por los primeros pasos de limpieza previos a la creación de la base de datos, es común tener que verificar nuevamente las lecturas, es posible que se deban retirar lecturas completas que fueron accidentalmente marcadas como aceptables, verificar la ubicación y sincronización GPS de los receptores, se compara la información GPS del receptor con la adquirida mediante GPS en campo, etc. A continuación, se muestran ejemplos de problemas comunes durante el control de calidad y limpieza final de los datos, y una breve comparación entre datos aceptables, parcialmente aceptables, y ruidosos.

En la figura 4.14 se muestra la visualización de un dipolo con una señal limpia, tanto la señal de corriente como la respuesta de voltaje parecen uniformes a lo largo de todo el tiempo de medición, la respuesta de voltaje apilada muestra valores de V_p y V_s uniformes y la curva de decaimiento apilada es consistente.

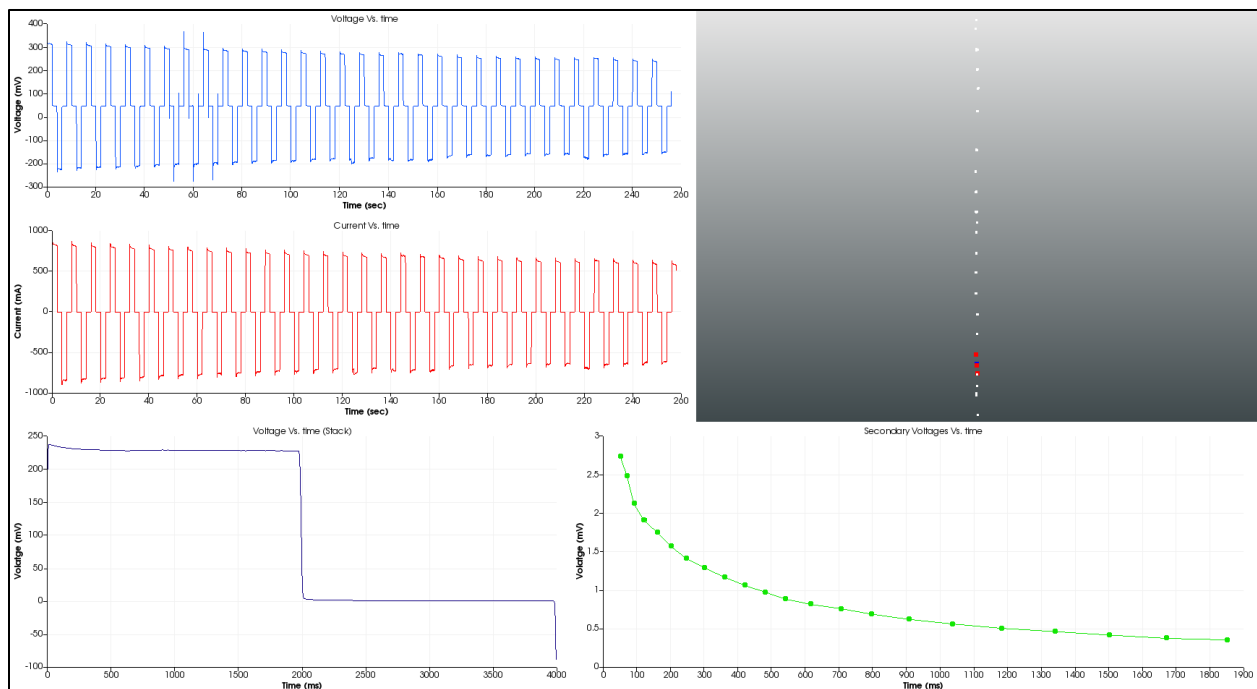


Figura 4.14. Ejemplo de señal limpia para una lectura de 4 min. Señal de corriente y respuesta de voltaje completas (superior izquierda), respuesta de voltaje apilada (inferior izquierda) y curva de decaimiento apilada (inferior derecha).

En las figuras 4.15 y 4.16 se muestran dipolos obtenidos con señales que fueron aceptadas en el proceso inicial de limpieza, sin embargo, no son señales completamente limpias o utilizables, para el caso de la respuesta de voltaje y curva de decaimiento apiladas en 4.15, el voltaje primario parece consistente, pero, la curva de decaimiento no es consistente, este dipolo podría ser utilizado para el cálculo de resistividad, pero no de cargabilidad. En el caso de 4.16, la señal completa no es consistente y presenta ruido entre 120 y 180 ms, del mismo modo, las señales apiladas no son consistentes.

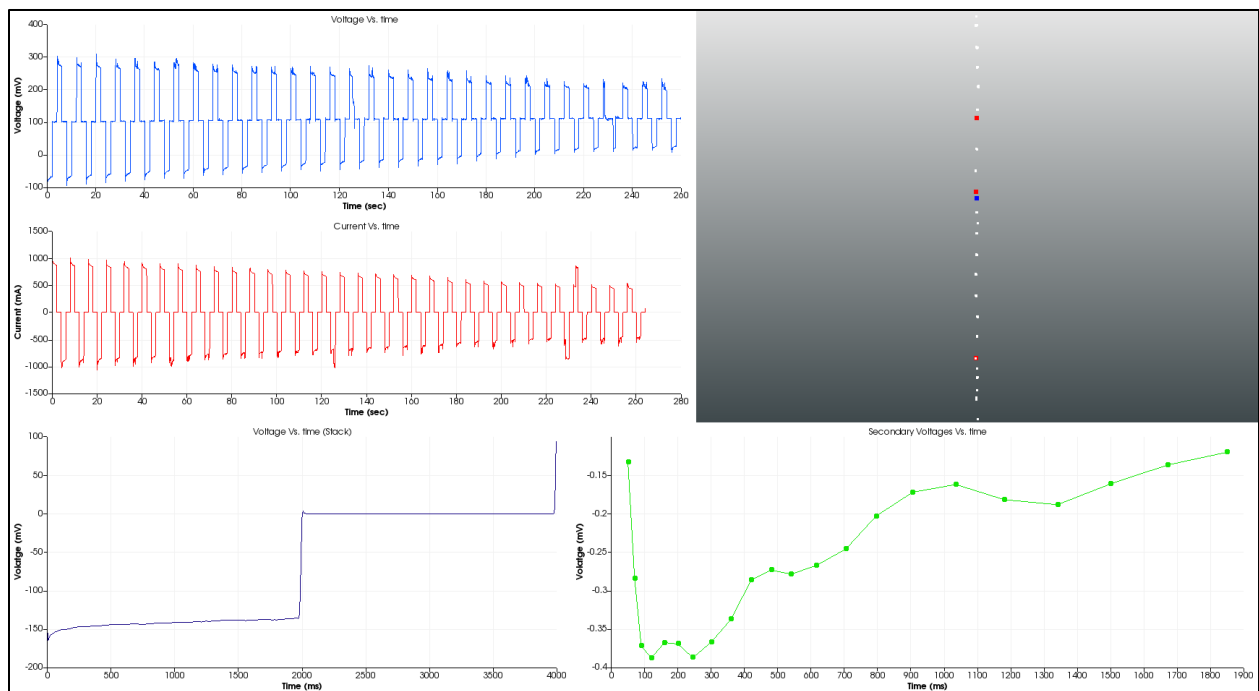


Figura 4.15. Ejemplo de señal para una lectura de 4 min. Señal de corriente y respuesta de voltaje completas (superior izquierda), respuesta de voltaje apilada (inferior izquierda) y curva de decaimiento apilada (inferior derecha).

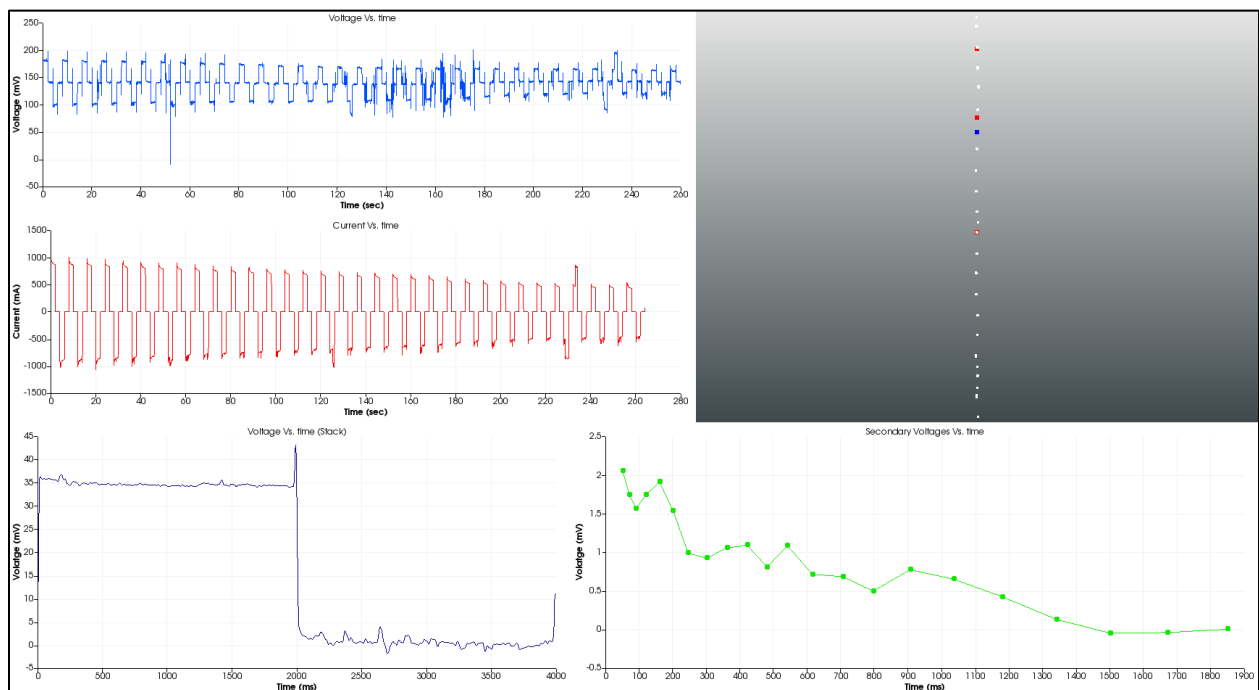


Figura 4.16. Ejemplo de señal con ruido para una lectura de 4 min. Señal de corriente y respuesta de voltaje completas (superior izquierda), respuesta de voltaje apilada (inferior izquierda) y curva de decaimiento apilada (inferior derecha).

En la figura 4.17 se presenta una comparación de distintas curvas de decaimiento de señales ya apiladas y recortadas, el primer ejemplo muestra un dipolo utilizable y uno descartable, y la segunda muestra los múltiples dipolos para una misma lectura, de igual forma, los dipolos de la izquierda son uniformes y no parece haber curvas anómalas, el segundo caso muestra una lectura donde las curvas son inconsistentes, ruidosas y/o con valores que parecen anómalos.

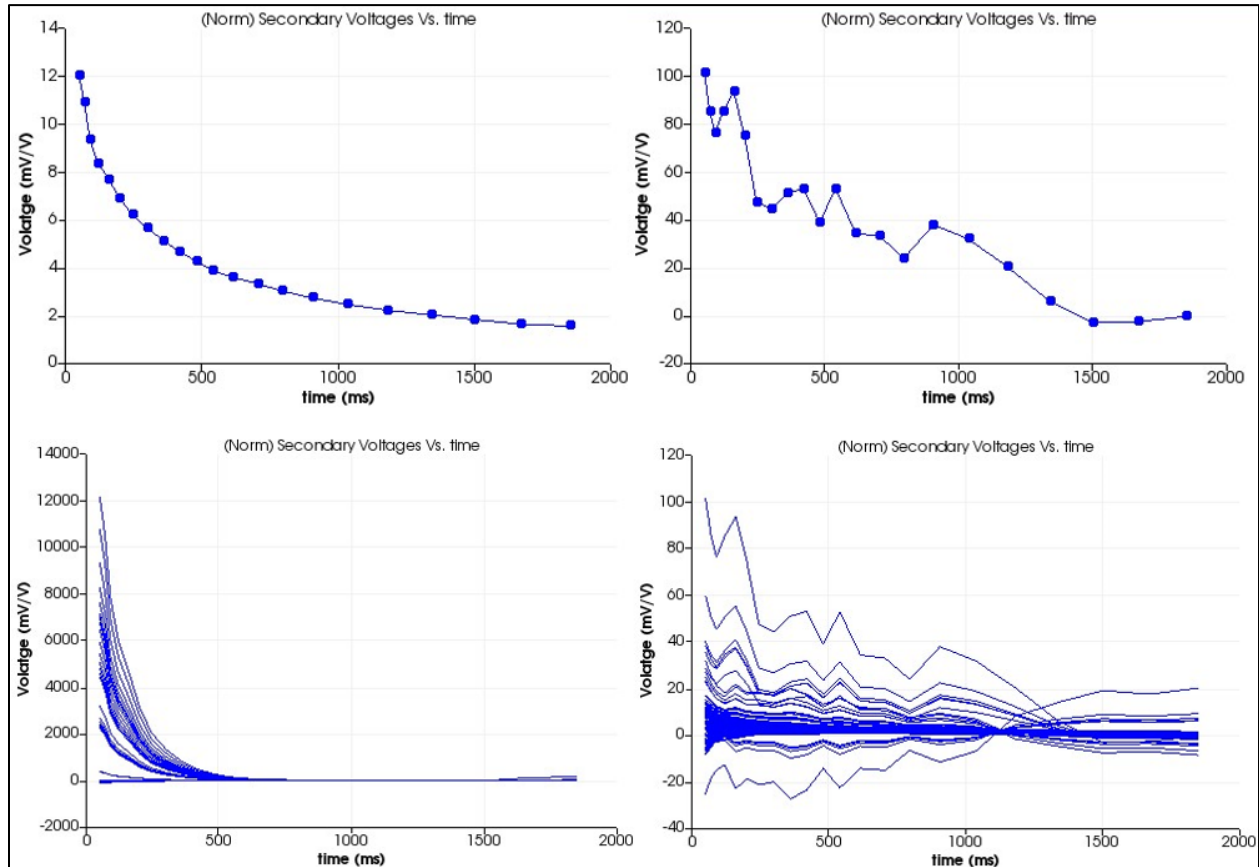


Figura 4.17. Ejemplos de curvas de decaimiento apiladas y recortadas, dipolo limpio y dipolo ruidoso (arriba), dipolos acumulados para una lectura aceptable y una lectura descartable (abajo).

Finalmente, una vez que la base de datos fue revisada completamente, se filtraron o descartaron las señales no deseadas y se verificó que la información para cada lectura está completa y organizada, se procede al cálculo de las pseudosecciones o pseudovolumenes de resistividad y cargabilidad, en las figuras 4.18 y 4.19 se muestran las pseudosecciones de resistividad obtenidas, antes y después de realizar la limpieza y control de calidad respectivamente. Cada punto en las pseudosecciones representa un dipolo generado en alguna de las lecturas de la base de datos, en la figura 4.19 se aprecian menos cambios abruptos en la resistividad aparente, y una menor cantidad de puntos anómalos.

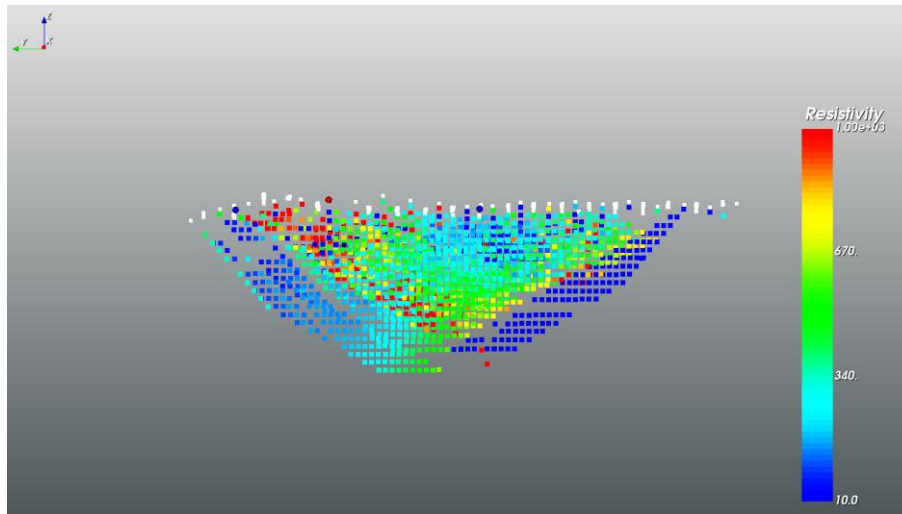


Figura 4.18. Pseudosección de resistividad previo al control de calidad de los datos.

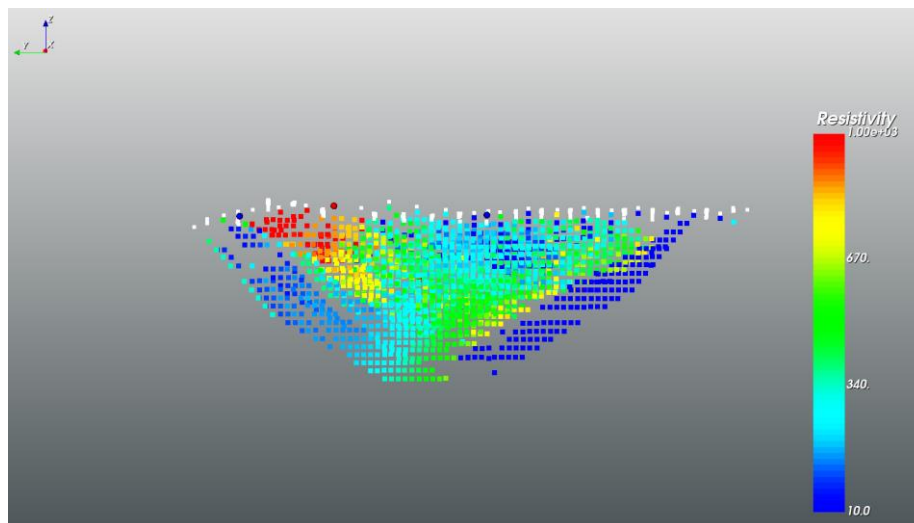


Figura 4.19. Pseudosección de resistividad después del control de calidad de los datos.

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestra el mismo proceso, pero, para las pseudosecciones de cargabilidad. Cabe destacar que estas secciones no corresponden al modelo final del levantamiento, para esto deben pasar por el proceso de inversión.

Desafortunadamente, debido al volumen de datos que se llega a utilizar en este tipo de levantamientos, con este equipo, y a la cantidad de recursos computacionales que requiere, dentro del periodo de colaboración no fue posible participar en una inversión completa de un modelo de resistividad o cargabilidad en tres dimensiones.

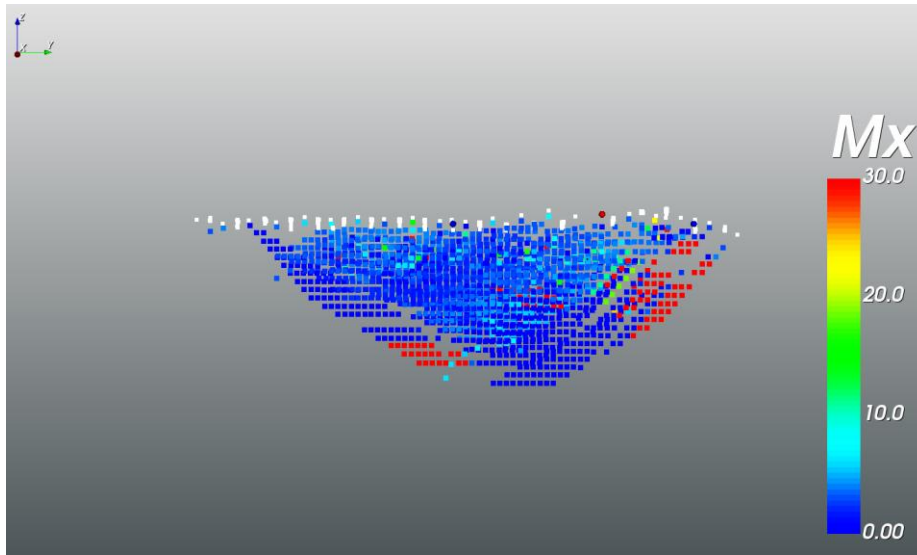


Figura 4.20. Pseudosección de cargabilidad previo al control de calidad de los datos.

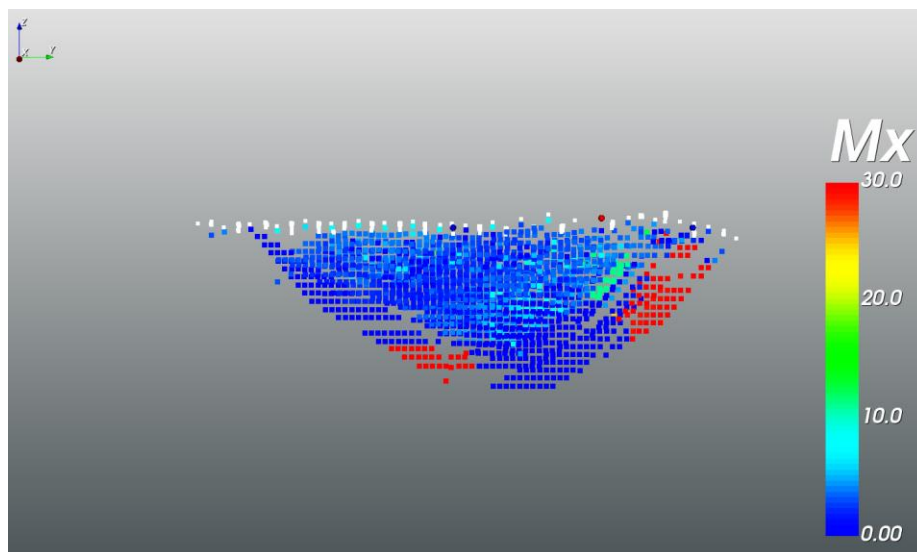


Figura 4.21 Pseudosección de cargabilidad después del control de calidad de los datos.

5. Conclusiones

Si bien la estructura del plan de estudios de la carrera de ingeniería geofísica permite que los egresados conozcan diversas técnicas de exploración de recursos, la experiencia en técnicas utilizadas por compañías especializadas en los métodos brinda la posibilidad de aplicar los conocimientos en zonas reales y permite el ejercicio de la teoría en casos específicos.

Se participó en la logística y adquisición de datos de campo, para estudios geofísicos en diversas áreas mineras en el Estado de Zacatecas, poniendo en práctica todos los procedimientos y conocimientos relacionados con la planeación y ejecución de un proyecto de exploración geofísica. Asimismo, se contribuyó a la identificación de estructuras geológicas en la región mediante el mapeo de propiedades eléctricas en el subsuelo.

Se logró la resolución de problemas asociados a la adquisición de datos, desde cuestiones de planeación; organización de personal; seguimiento de procesos de seguridad industrial y cuidado ambiental; manejo de equipos y software especializado y finalmente, entrega de datos.

Se reconoció la exploración minera como un proceso completo que conlleva emplear y correlacionar múltiples disciplinas y técnicas geológicas y geofísicas, por lo cual, los estudios geofísicos representan una parte fundamental del proceso, sin embargo, individualmente no brindan un resultado completo o final. La participación en las campañas reportadas brindó un acercamiento a la minería en general. La visión de la geofísica de exploración adquirida presentó un panorama completamente distinto al estudiado durante la carrera, principalmente en cuanto a temas de logística, equipo y escala de los estudios.

El método de polarización inducida es ampliamente utilizado para la identificación de depósitos minerales, especialmente en mineralización de metales diseminados, sin embargo, no todos los depósitos metálicos responden de manera satisfactoria a estudios de resistividad, cargabilidad, o ambos. Por lo que es fundamental aprender a reconocer el alcance del método y la importancia de la conjunción de técnicas para la correcta determinación de un depósito, con el fin de continuar con la formación profesional.

6. Referencias

- Alfaro Torres, M. (2015). Geología Estructural del área de Mazapil y Concepción del Oro, en el estado de Zacatecas. [Tesis para obtener el título de Ingeniera Geóloga]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Días Geophysical (2022). Días Brochures: DIAS DELIVERS LEADING GEOPHYSICAL SOLUTIONS THROUGH INNOVATIVE TECHNOLOGIES. Disponible en: <https://diasgeo.com/wp-content/uploads/2022/06/Dias-Brochures-2022.pdf>
- Díaz-Salgado, C., 2004, Caracterización tectónica y procedencia de la Formación Taray, región de Pico de Teyra, Estado de Zacatecas. México D.F.. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría en Ciencias.
- Imlay, R. W., 1943, Evidence for Upper Jurassic landmass in Eastern Mexico: American Association of Petroleum Geologists, Bull., v. 28, p. 1407-1533
- INEGI, 2001, Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Subprovincias fisiográficas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>
- Loke, M. H., 2021, Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, geotomosoft.com, Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/264739285_Tutorial_2-D_and_3-D_Electrical_Imaging_Surveys
- Servicio Geológico Mexicano, 2000, Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10 Zac., N.L., Coah. Y S.L.P. Pachuca, Hidalgo. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/73_G14-10_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, 2004, Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-C62 Zac. y Coah. Pachuca, Hidalgo. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1352_G14-C62_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, 2021, Panorama Minero del estado de Zacatecas, Dirección de Investigación y Desarrollo. Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/pdfs/ZACATECAS.pdf>
- Steeples, D. (2001). Engineering and environmental geophysics at the millennium. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/273336956_Engineering_and_environmental_geophysics_at_the_millennium/citations
- TRISTÁN-GONZÁLEZ, M., TORRES-HERNÁNDEZ, J.R., 1992, Cartografía Geológica de la Hoja Charcas, estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico no. 115, 94p