

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Ingeniería Física



INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

"POLARIZACIÓN INDUCIDA Y RESISTIVIDAD ELECTRICA APLICADOS EN
LA PROSPECCIÓN MINERA"

Presentado por:

Ray Joel Reyes Espinoza

Asesor:

Dr. Abel Gutarra Espinoza

LIMA – PERU

2011

RESUMEN

El presente informe muestra el uso de los métodos eléctricos como son la polarización inducida y la resistividad eléctrica y su aplicación en la prospección minera. Mediante estos métodos se determinan las propiedades geoelectricas del subsuelo: resistividad eléctrica y cargabilidad. Las mediciones fueron realizadas en la superficie terrestre utilizando la configuración polo – dipolo, esto para distintas profundidades de investigación.

A partir de los datos adquiridos y con la ayuda de algoritmos de inversión, implementados en los programas RES2DINV y RES3DINV se elaboraron modelos en 2 y 3 dimensiones respectivamente. El resultado del modelo es presentado en secciones que muestran la distribución de las propiedades eléctricas en el subsuelo.

Debido a la relación que existe entre las propiedades eléctricas, los tipos de rocas y minerales del subsuelo podemos definir objetivos de interés exploratorio, que a la vez son contrastados con estudios geológicos, geoquímicos y perforaciones.

El informe presenta 4 casos distintos que muestran la utilización de los métodos eléctricos en la prospección minera. Uno de los casos presentados es corroborado con estudios geoquímicos.

Palabras claves: polarización inducida, resistividad, cargabilidad.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos	2
2	FUNDAMENTO TEÓRICO	3
2.1	Método de Resistividad	3
2.1.1	Resistividad de las rocas	3
2.1.2	Fundamentos teóricos básicos	3
2.1.3	Electrodo de corriente dentro de un medio homogéneo	5
2.1.4	Electrodo de corriente sobre la superficie	6
2.1.5	Dos electrodos de corriente en la superficie	7
2.1.6	Resistividad aparente.....	9
2.1.7	Configuración de electrodos	10
2.2	Método de polarización inducida.....	11
2.2.1	Polarización inducida en las rocas.....	11
2.2.2	Fundamento teórico básico.....	13
3	PROCEDIMIENTO DE LAS MEDICIONES EN CAMPO	15
3.1	Malla geofísica	15
3.2	Instrumentación	16
3.2.1	Señal transmitida	16
3.2.2	Parámetros de registro.....	17
3.3	Configuración de electrodos.....	18
3.4	Preparación del terreno.....	19
3.5	Adquisición de datos	20
3.6	Control de calidad y procesamiento de los datos.....	21
4	RESULTADOS	23
4.1	Caso 1:.....	23
4.2	Caso 2:.....	25
4.3	Caso 3:.....	27
4.4	Caso 4:.....	29
5	DISCUSIÓN.....	31
5.1	Caso 1:.....	31
5.2	Caso 2:.....	33
5.3	Caso 3:.....	35
5.4	Caso 4:.....	37
6	CONCLUSIONES.....	43
7	REFERENCIAS.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Semiespacio homogéneo de resistividad ρ	4
Figura 2 Punto de corriente en un medio homogéneo.....	5
Figura 3 Punto de corriente sobre la superficie de un medio homogéneo	7
Figura 4 Dos electrodos de corriente y dos de potencial sobre la superficie de un medio homogéneo	8
Figura 5 Curvas equipotenciales para dos fuentes de corriente sobre la superficie de un medio homogéneo	9
Figura 6 Electrodos de corriente y potencial sobre la superficie de un medio heterogéneo.....	10
Figura 7 Configuración típica de 4 electrodos alineados.....	10
Figura 8 Configuración de electrodos más usados y su respectivo factor geométrico	11
Figura 9 Curva característica de decaimiento en polarización inducida.....	12
Figura 10 Fenómeno de polarización inducida: polarización de membrana y polarización electrodica	13
Figura 11 Valores de cargabilidad de algunas rocas y minerales	14
Figura 12 Malla geofísica conformada por líneas con orientación N60°E y separadas cada 100 metros.....	15
Figura 13 Diagrama esquemático de un transmisor y un transmisor Walcer Tx-9000	16
Figura 14 Onda bipolar cuadrada que sale del transmisor.....	16
Figura 15 Ventanas de integración, modo aritmético	17
Figura 16 Receptor EIRec Pro, Iris Instruments	18
Figura 17 Configuración Polo Dipolo, con dipolos de separación 50, 100, 150 m para $n=1$ a 3 a) primera serie medida b) serie por cada avance de electrodo de corriente	19
Figura 18 Equipo DGPS, Trimble 5700	20
Figura 19 Esquema de adquisición de datos.....	21
Figura 20 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 1).....	24
Figura 21 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 2).....	26
Figura 22 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 3).....	28
Figura 23 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 4).....	30
Figura 24 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 1).....	32
Figura 25 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 2)	34
Figura 26 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 3).....	36
Figura 27 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 4).....	38
Figura 28 Estudios geoquímicos realizados en el caso 4.....	39
Figura 29 Malla geofísica de la cual forma parte la línea de estudio del caso 4.	40
Figura 30 Bloque del modelo 3D, Cargabilidad y Resistividad (caso 4). Muestra la distribución espacial de de los modelos, se adicionan cortes para observar el interior del modelo.	41
Figura 31 Planos de nivel extraídos del modelo 3D, Cargabilidad y Resistividad (caso 4) a distinta profundidades 50, 100, 150 y 200 metros de profundidad. Se observa la continuidad de la zona mineralizada en profundidad.	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de registro.....	17
Tabla 2 Secuencia de adquisición de datos (caso 1).....	23
Tabla 3 Secuencia de adquisición de datos (caso 2).....	25
Tabla 4 Secuencia de adquisición de datos (caso 3).....	27
Tabla 5 Secuencia de adquisición de datos (caso 4).....	29

1 INTRODUCCIÓN

Las rocas son materiales compuestos por varios minerales producto de distintos procesos geológicos. Los minerales son de gran importancia como materia prima para la industria. En la corteza terrestre existe una gran cantidad de minerales, de los cuales sólo un pequeño grupo tienen interés económico, por ser necesarios para la industria mundial.

Los minerales se encuentran distribuidos en forma heterogénea sobre la tierra y su ubicación implica técnicas especiales conocidas como prospección minera. Con aplicación de la geología y mineralogía se pueden restringir zonas de prospección, pero aún, así estas zonas pueden ser demasiado extensas para que las labores de exploración como excavaciones y perforaciones sean prácticas y económicas. Además que tanto la geología como la mineralogía dependen de afloramiento de rocas, que no siempre se dan. Por otra parte los yacimientos pueden encontrarse ocultos a profundidades menores o mayores de la superficie, en donde la mineralogía y geología pierden importancia, es entonces donde la utilización de métodos geofísicos entra en escena.

La prospección geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas aplicadas a la exploración del subsuelo, por medio de mediciones realizadas en la superficie terrestre. Las rocas tienen una serie de propiedades físicas que pueden ser detectadas y nos permite determinar el tipo de roca o estructura geológica asociada.

Los principales métodos geofísicos empleados para la prospección o exploración minera, del petróleo o gas están divididos en: gravimétrico, magnético, sísmico, eléctrico, electromagnético y radiactivo.

Dentro del grupo de métodos eléctricos destacan los métodos de resistividad y polarización inducida, que son dos de los métodos más utilizados en la actualidad, por ejemplo para la detección de pórfidos de cobre [1].

En el Perú hay muchas empresas dedicadas a la exploración minera, como es el caso de VDG DEL PERÚ [2] que tiene más de 15 años utilizando estos métodos.

1.1 Objetivos

- Mostrar la utilización de los métodos geofísicos en la exploración minera.
- Identificar probables zonas mineralizada o de interés exploratorio en 4 casos distintos.
- Corroborar probables zonas mineralizadas mediante información de estudios geoquímicos.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El método eléctrico está dividido en dos grupos: los métodos de campo natural y los de campo artificial. La diferencia entre ambos radica en que la primera utiliza las corrientes naturales existentes en el subsuelo; mientras que los otros necesitan la inyección de corriente artificialmente.

Los métodos de resistividad y polarización inducida pertenecen al grupo de los de campo artificial, su fundamento será descrito a continuación.

2.1 Método de Resistividad

2.1.1 Resistividad de las rocas

La capacidad de conducir la corriente eléctrica de las rocas depende de factores intrínsecos de su estructura y composición química, así como también de factores externos tales como la temperatura, presión y el grado de saturación de las soluciones salinas.

La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas de dos formas: la conducción electrónica y la conducción electrolítica.

En la conducción electrónica, el flujo de corriente es a través de los electrones libres, tal es el caso de rocas que presentan minerales conductivos como los metales.

En la conducción electrolítica es a través del movimiento de los iones del agua subterránea. Éste es el mecanismo más común debido a que todas las rocas presentan cierto grado de porosidad, volumen que generalmente es ocupado por los electrolitos (agua subterránea).

2.1.2 Fundamentos teóricos básicos

Para el análisis de los fundamentos teóricos básicos del método de resistividad, vamos a partir teniendo dos semiespacios, como se muestra en la figura 1. El semiespacio por encima de la superficie representa la atmósfera con resistividad infinita y el otro semiespacio representa el subsuelo con resistividad (ρ).

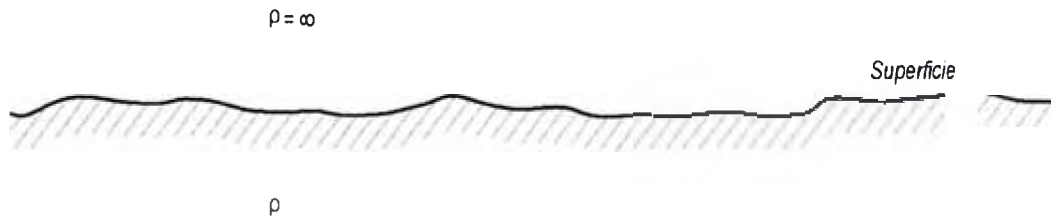


Figura 1 Semiespacio homogéneo de resistividad ρ

Consideremos el subsuelo como un medio isotrópico homogéneo por el cual fluye corriente continua, entonces la densidad de corriente (\vec{J}) y el campo eléctrico (\vec{E}) están relacionados a través de la ley de Ohm [3]:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.1)$$

donde σ es la conductividad del medio, que es el inverso de la resistividad.

A partir de la ecuación de Maxwell en condiciones estacionarias, se tiene:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) nos permite definir el potencial escalar (V) como:

$$E = -\nabla V \quad (2.3)$$

Notar que el signo negativo de la ecuación (2.3) es debido a la convención de que el campo eléctrico debe estar en la dirección donde decrece el potencial.

En todos los puntos del semiespacio homogéneo excitado por el flujo de corriente satisface la ecuación de continuidad,

$$-\frac{\partial \rho_q}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{J} \quad (2.4)$$

donde ρ_q es la densidad de carga.

Debido a que la carga se conserva dentro del semiespacio homogéneo, la ecuación (2.4) se reduce,

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (2.5)$$

Partiendo de las ecuaciones (2.1) y (2.5) se tiene,

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\nabla \cdot \nabla(\sigma V) = 0$$

por lo tanto,

$$\nabla\sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (2.6)$$

Para σ constante, el primer término de la ecuación (2.6) desaparece y tenemos la ecuación de Laplace, es decir el potencial es armónico.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.7)$$

Para resolver la ecuación de Laplace en un medio homogéneo, primero consideremos una carga puntual y desarrollamos la ecuación (2.7) en coordenadas esféricas, dada la simetría del problema:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (2.8)$$

donde, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$

2.1.3 Electrodo de corriente dentro de un medio homogéneo

Para este caso vamos a colocar un electrodo de corriente (C_1) dentro del subsuelo, en la práctica es a través de un pozo de perforación, como se muestra en figura 2. El circuito es completado con otro electrodo (C_2) usualmente en la superficie; pero a una distancia considerable de tal forma que su influencia sea despreciable.

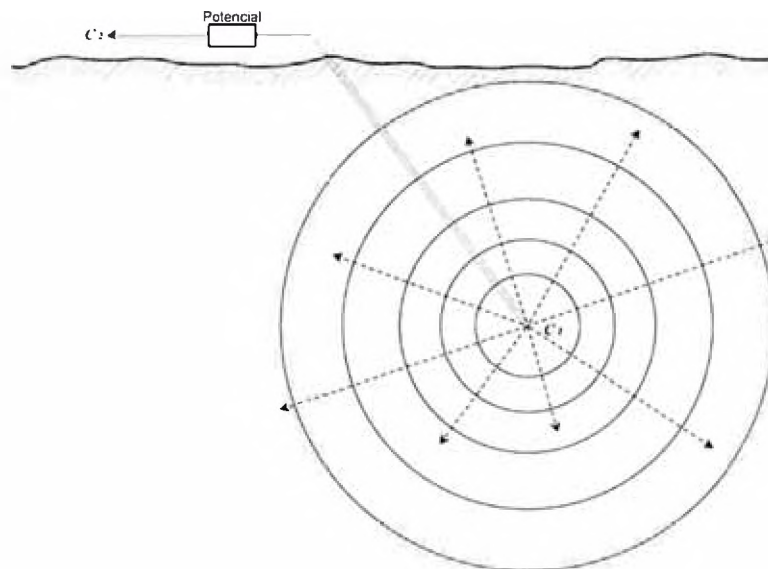


Figura 2 Punto de corriente en un medio homogéneo

Al tratarse de un medio homogéneo, no hay dependencia en θ y φ , luego la ecuación (2.8) queda reducida a:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0$$

La solución de esta ecuación es del tipo:

$$V(r) = -A/r + B \quad (2.9)$$

De la condición de contorno $V(r \rightarrow \infty) = 0$ se tiene $B = 0$,

entonces: $V(r) = -A/r$

Por otra parte la corriente eléctrica (I) se define como la integral de la densidad de corriente (\vec{j}) y en combinación con las ecuaciones (1) y (3) se tiene:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \sigma \int_S -\nabla V \cdot d\vec{S} = \sigma \int_S -\frac{A}{r^2} \cdot dS = A\sigma 4\pi$$

entonces

$$A = -\frac{I}{4\pi\sigma} = -\frac{I\rho}{4\pi}$$

Luego reemplazando en la ecuación (2.9), se tiene:

$$V(r) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (2.10)$$

Las superficies equipotenciales, las cuales son ortogonales a las líneas de flujo de corriente, son superficies esféricas con centro en el punto de corriente C_1 , como se muestra en la figura 2.

2.1.4 Electrodo de corriente sobre la superficie

Para este caso vamos a colocar un electrodo de corriente (C_1) sobre la superficie, como se muestra en figura 3.

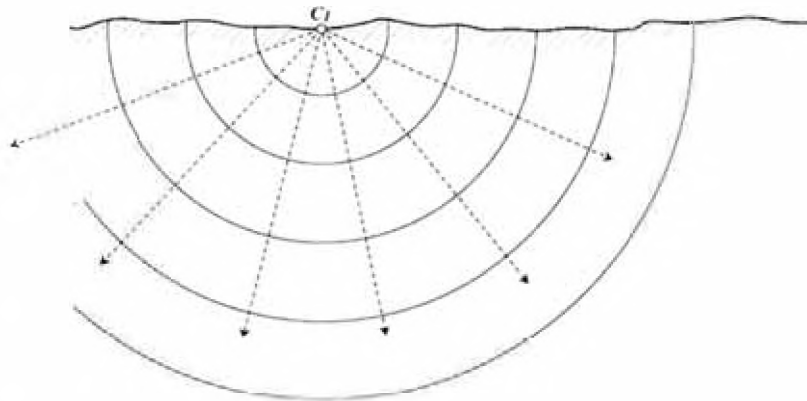


Figura 3 Punto de corriente sobre la superficie de un medio homogéneo

Similar al caso anterior tenemos la condición de contorno $V(r \rightarrow \infty) = 0$ que nos lleva a $B = 0$. Ahora hay que añadir la condición de que el campo eléctrico vertical sobre la superficie es nulo, debido a que $\sigma_{aire} = 0$. En consecuencia para determinar el flujo de corriente a través de un volumen teniendo en cuenta la superficie terrestre se puede considerar en semiesfera cortada en la superficie. Entonces la integral de densidad de corriente (\vec{j}) sería sobre una semiesfera, por tanto:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \sigma \int_S -\nabla V \cdot d\vec{S} = \sigma \int_S -\frac{A}{r^2} \cdot dS = A\sigma 2\pi$$

Entonces,

$$A = -\frac{I}{2\pi\sigma} = -\frac{I\rho}{2\pi}$$

Luego reemplazando en la ecuación (9), se tiene:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.11)$$

2.1.5 Dos electrodos de corriente en la superficie

Cuando la distancia entre dos electrodos de corriente es finita, el potencial en cualquier punto de la superficie será afectado por ambos electrodos de corriente. Consideremos dos electrodos de corriente (C_1 y C_2) y dos electrodos de potencial (P_1 y P_2) colocados en la superficie, como se muestra en la figura 4.

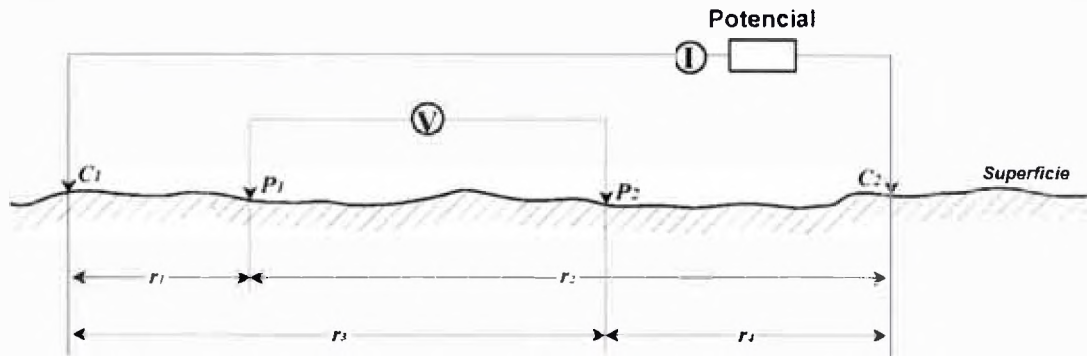


Figura 4 Dos electrodos de corriente y dos de potencial sobre la superficie de un medio homogéneo

El potencial en el punto P_1 debido al punto de corriente C_1 es:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi r_1}$$

En forma similar el potencial en P_1 debido a punto de corriente C_2 :

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi r_2}$$

Asumiendo que el subsuelo es un medio lineal, la corriente eléctrica satisface el principio de superposición, por lo tanto, el potencial en el punto P_1 será la suma de las contribuciones debido a los puntos de corriente C_1 y C_2 .

$$V(P_1) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Notemos que V_1 y V_2 tienen de direcciones opuestas.

Finalmente, introducimos un segundo electrodo de potencial P_2 . Entonces la diferencia de potencial entre P_1 y P_2 será:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\} \quad (2.11)$$

Las líneas equipotenciales, mostradas en la figura 5, se obtienen graficando las relaciones:

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \text{constante}, \quad R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \theta = 4L^2$$

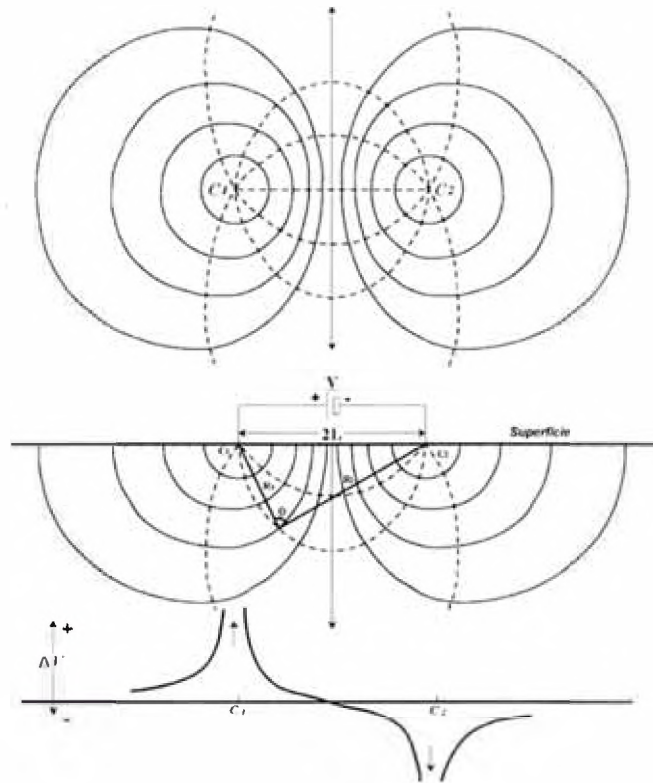


Figura 5 Curvas equipotenciales para dos fuentes de corriente sobre la superficie de un medio homogéneo

2.1.6 Resistividad aparente

Hasta ahora hemos hablado de un semiespacio homogéneo de resistividad ρ . Esta condición rara vez se da en la naturaleza puesto que el subsuelo nunca consta de capas homogéneas, por tanto, en prospección geofísica se está obligado a trabajar bajo el concepto de resistividad aparente ρ_a , el cual se explica a continuación.

De la ecuación (2.11) para un medio homogéneo podemos resolver el problema inverso, es decir encontrar la resistividad, entonces despejamos el valor de ρ :

$$\rho = \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} \frac{\Delta V}{I} \quad (2.12)$$

Esta fórmula puede utilizarse para calcular la resistividad en un medio homogéneo, si se miden las magnitudes del segundo miembro. Ahora consideremos un subsuelo como se muestra en la figura 6 y recurrimos a la ecuación (2.12), entonces ya no estaríamos midiendo la resistividad ρ sino más bien la resistividad aparente ρ_a que dependerá de las tres resistividades (ρ_1, ρ_2, ρ_3), de las distancias entre electrodos.

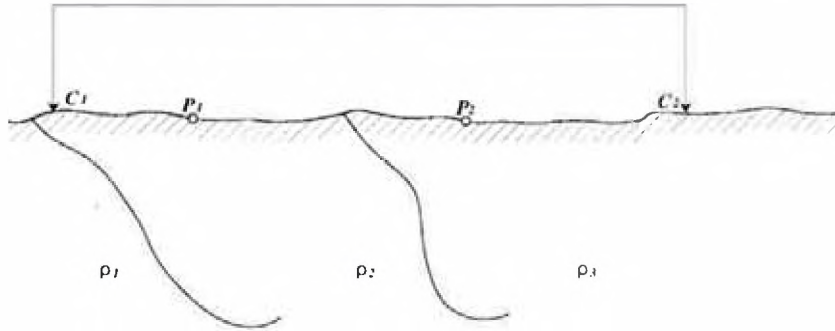


Figura 6 Electrodo de corriente y potencial sobre la superficie de un medio heterogéneo

Como vemos esta resistividad aparente ρ_a se obtiene aplicando a medios heterogéneos las fórmulas matemáticas que explican el fenómeno en medios homogéneos, pero es que de otra forma no se podría hacer el proceso de inversión ya que las ecuaciones para medios heterogéneos son extremadamente complicadas.

Esta variable experimental es la que se toma como base para la interpretación, tomando en cuenta que parte de una suposición que no siempre se cumple.

2.1.7 Configuración de electrodos

Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo dependen de la disposición de los electrodos de corriente y de los potenciales. En la práctica casi siempre los electrodos están alineados, ya que de otra forma la interpretación de los resultados y el trabajo en campo es complicada. La figura 7 muestra una configuración típica de cuatro electrodos, dos de ellos (C_1 y C_2) corresponden a los electrodos de corriente, y los otros dos (P_1 y P_2), entre los cuales se mide la diferencia de potencial, corresponden a los electrodos de potencial.



Figura 7 Configuración típica de 4 electrodos alineados

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}, \text{ donde } k = \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}} \quad (2.13)$$

En la ecuación (2.13) el factor geométrico (k) depende de las distancias relativas entre electrodos. A continuación, en la figura 8 mostramos las configuraciones más utilizadas con su respectivo factor geométrico:

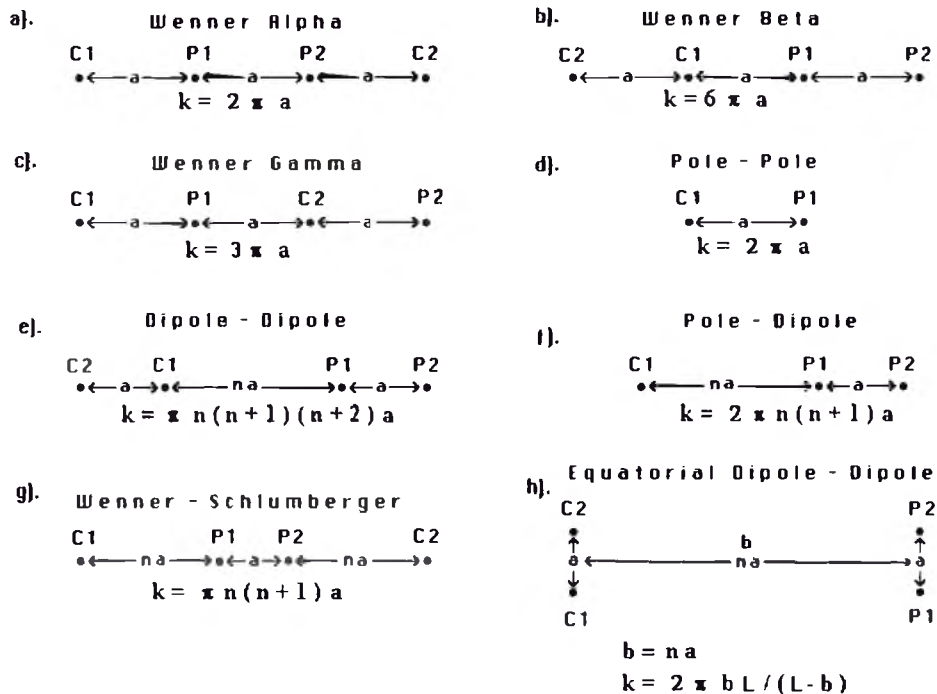


Figura 8 Configuración de electrodos más usados y su respectivo factor geométrico

Notar que para las configuraciones dipolo dipolo, polo dipolo y wenner-schlumberger se tienen dos parámetros, longitud de dipolo (a) y factor de separación (n)

2.2 Método de polarización inducida

2.2.1 Polarización inducida en las rocas

El método de polarización inducida se basa en la propiedad que tienen algunas rocas de almacenar carga eléctrica, es decir polarizarse. Para estudiar la capacidad de polarización (o polarizabilidad) del subsuelo se inyecta corriente a éste a través de un par de electrodos. Si la corriente inyectada se interrumpe abruptamente, la diferencia de potencial entre otro par de electrodos no cae a cero de manera instantánea, sino que posee un decaimiento abrupto seguido de uno lento. La curva característica de decaimiento se muestra en la figura 9.

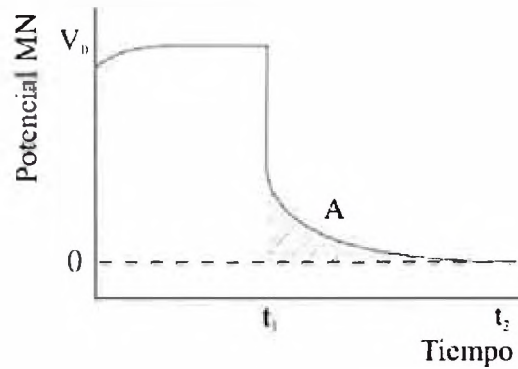


Figura 9 Curva característica de decaimiento en polarización inducida

Durante el tiempo en el que la corriente se encuentra circulando, debido a la acumulación de carga, parte de la energía se almacena en las rocas en forma mecánica, eléctrica o química. Estudios en laboratorio de polarización inducida en varios tipos de rocas demuestran que el almacenamiento químico es de lejos el más importante [3].

El fenómeno de polarización inducida se manifiesta en las rocas de dos formas: polarización de membrana y polarización electródica.

En ambos casos el fenómeno puede esquematizarse en el flujo de iones en dirección opuesta al electrodo que presenta carga del mismo signo. Una vez establecido el flujo de iones la tortuosidad del medio acuoso como producto del estrechamiento del canal poroso, obstrucción por un grano metálico, obstrucción por acumulación de iones entorno a un núcleo de la roca cargado eléctricamente, etc. induce la generación de barreras polarizadas con cargas de signo opuesto. Caracteriza entonces el fenómeno de polarización inducida el transporte de carga en un tiempo finito y la acumulación de estas (o polarización) entorno a una barrera física. **La polarización de membrana** representa el caso de una barrera conformada por la acumulación de iones en el entorno de una carga de signo opuesto en las paredes de la zona porosa. Es el caso por ejemplo de la presencia de arcillas que por lo general están cargados negativamente, y en consecuencia atraen cationes que impiden el flujo de carga. Por su parte la **polarización electródica** está representada por la presencia de granos metálicos en los conductos porosos. Ante la aplicación de una diferencia de potencial estos granos metálicos se polarizan electrónicamente y actúan como barrera para la movilidad de los iones.

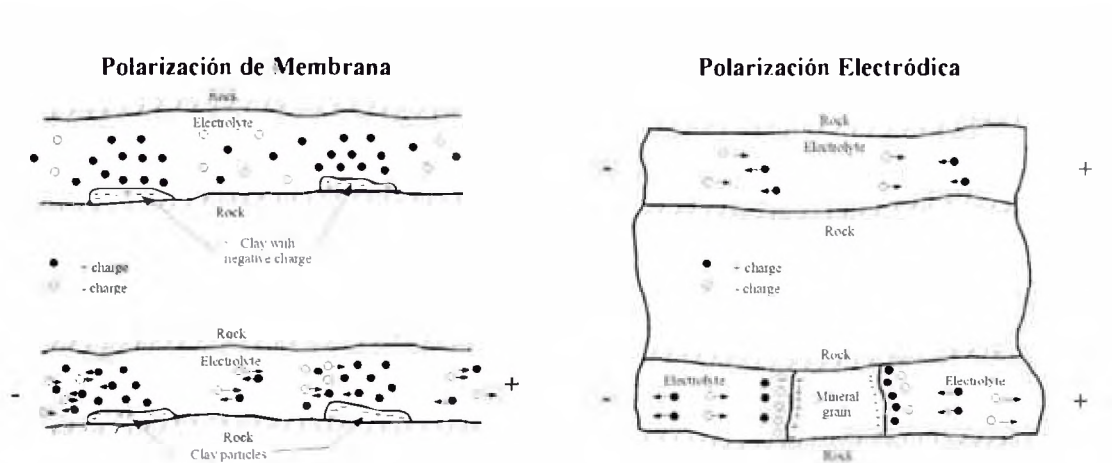


Figura 10 Fenómeno de polarización inducida: polarización de membrana y polarización electrónica

Ambos efectos de polarización coexisten en ambientes donde la conducción electrolítica es de primer orden, sin embargo no es posible distinguir uno de otro a partir de las observaciones.

2.2.2 Fundamento teórico básico

Las mediciones de polarización inducida pueden ser realizadas en el dominio de tiempo o en el dominio de frecuencia.

En el dominio de tiempo, el efecto de polarización inducida es medido por el voltaje de caída después de cortar la corriente y es expresada por la cargabilidad.

En el dominio de frecuencia se mide el cambio del valor de la resistividad aparente de baja a altas frecuencias (típicamente 1 a 10 Hz), y su unidad es en porcentaje.

- **Polarización Inducida en el dominio del tiempo**

Las mediciones en el dominio del tiempo es la forma más simple pues sólo requiere observar la curva de decaimiento. La cargabilidad, cuya unidad es milivoltios*segundo por voltios (mV.s/V), está definida por [3]:

$$M = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

donde V_0 : voltaje primario, medido justo antes del corte de corriente

$V(t)$: voltaje secundario, medido después del corte de corriente

La cargabilidad es independiente de la corriente inyectada en el subsuelo, debido a que V_0 es proporcional a la corriente (Ley de Ohm). Una normalización por el tiempo de integración ($t_2 - t_1$) es esencial para que los valores de cargabilidad puedan ser comparados de un instrumento a otro. La figura 11 muestra valores de cargabilidad de las rocas mineralizadas [4].

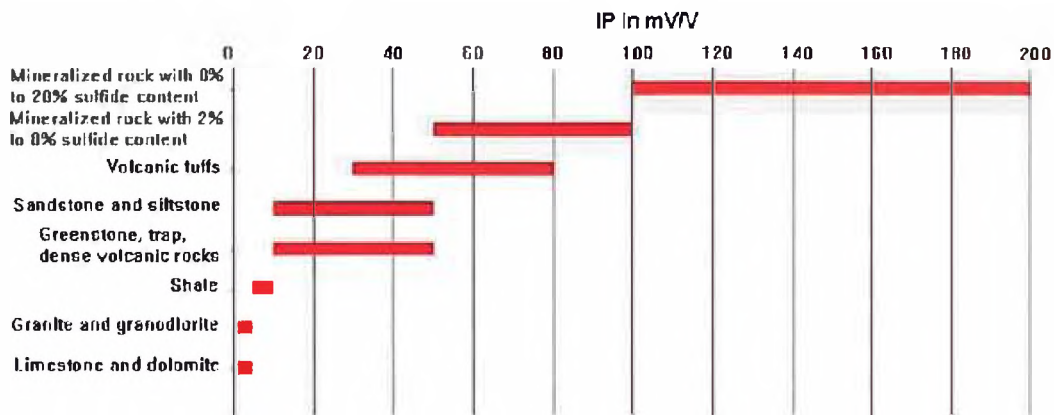


Figura 11 Valores de cargabilidad de algunas rocas y minerales

Las configuraciones de los electrodos son similares a los usados para el método de resistividad. Los equipos en la actualidad utilizados para registrar las curvas de decaimiento también calculan los valores de resistividad aparente.

3 PROCEDIMIENTO DE LAS MEDICIONES EN CAMPO

3.1 Malla geofísica

Los proyectos geofísicos parten con la elaboración de la malla geofísica. La malla geofísica es un conjunto de líneas sistemáticas que cubre el área de estudio. Su diseño se fundamenta en la geología y en evidencias de mineralización, que puedan existir en la zona. Las líneas pueden tener orientación norte-sur, este-oeste o líneas con cierto ángulo, como se muestra en la figura 12.

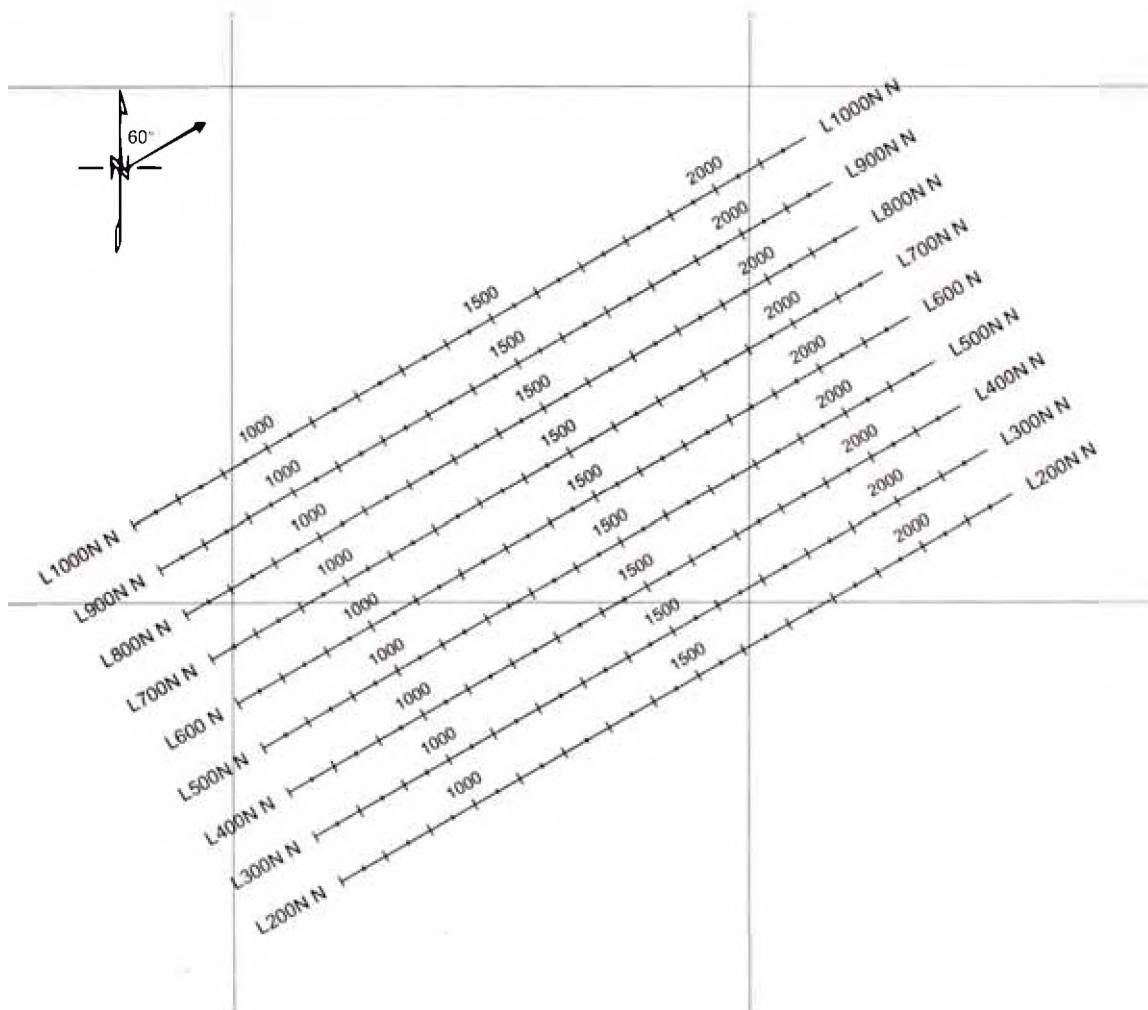


Figura 12 Malla geofísica conformada por líneas con orientación N60°E y separadas cada 100 metros.

3.2 Instrumentación

3.2.1 Señal transmitida

La inducción de corriente se hace a través de un transmisor de corriente continua. A continuación se muestra el diagrama esquemático de un transmisor:

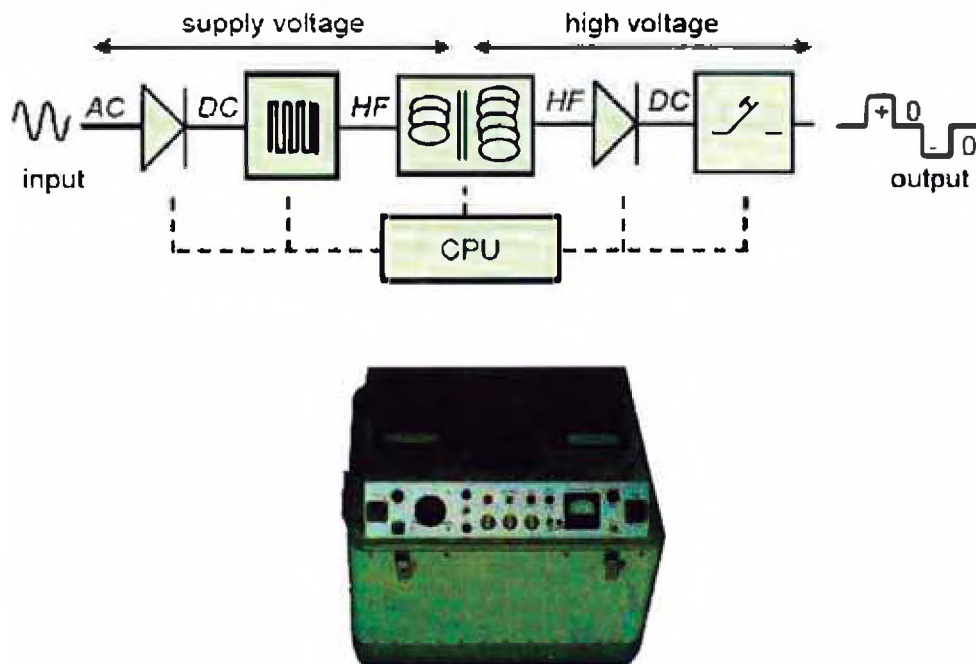


Figura 13 Diagrama esquemático de un transmisor y un transmisor Walcer Tx-9000

El transmisor es programado para transmitir una onda bipolar cuadrada a una repetición estándar de 2 seg ON⁺ - 2 seg OFF - 2 seg ON⁻ - 2 seg OFF, como se muestra en la figura 12. El ciclo de operación es 2.0 segundos, para un total de 8 segundos (0.125 Hz). La corriente DC (I) es utilizada para calcular la resistividad aparente (ρ_a).

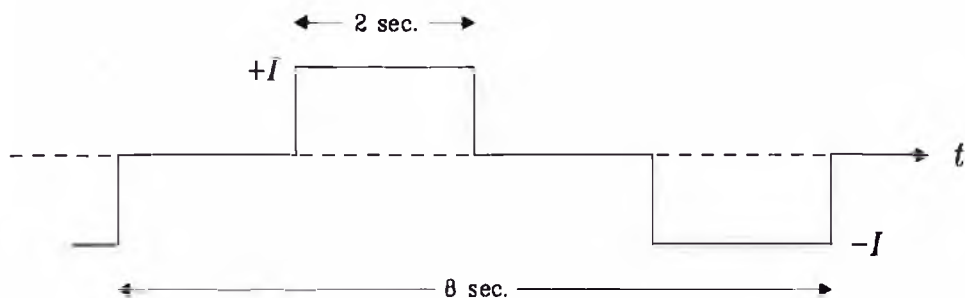


Figura 14 Onda bipolar cuadrada que sale del transmisor

3.2.2 Parámetros de registro

El voltaje primario (V_p) y la cargabilidad (M) son medidos entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 . El voltaje primario es medido durante el ciclo de inyección de corriente. La cargabilidad es medida cuando la transmisión de señal ha sido apagada. Dado que la cargabilidad se refiere al voltaje de tránsito, las mediciones son tomadas con periodos de tiempo. La configuración de tiempos corresponde al modo aritmético, que consiste en un tiempo muerto (M_D) de 240 mseg con 10 ventanas de 160 mseg cada una, como se muestra en la figura 15. La desviación estándar de la curva de caída también es calculada, guardada en el registro de datos, y visualizada en el monitor del receptor. Durante las operaciones de campo, el operador puede eliminar los datos sin consistencia y repetir las mediciones.

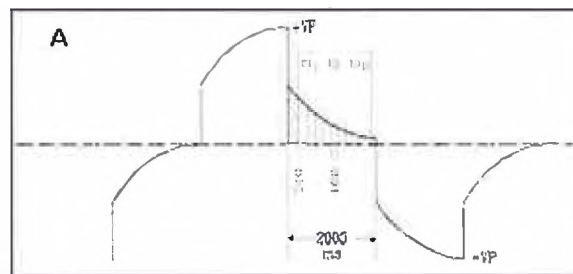


Figura 15 Ventanas de integración, modo aritmético

Tabla 1 Parámetros de registro

Duración de pulsos: 2000 mseg – Modo Aritmético											
Ventana	M_D	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Tiempo (mseg)	240	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160

El receptor IP/Res que mayormente se utiliza es el EIREC Pro de Iris Instrument, que es un receptor del dominio del tiempo para la polarización inducida, además puede medir hasta 10 dipolos al mismo tiempo.



Figura 16 Receptor ELREC Pro, Iris Instruments

3.3 Configuración de electrodos

Como vimos en el apartado 2.1.4 tenemos distintas configuraciones, pero en el presente informe vamos a tratar la configuración Polo Dipolo multielectrodo en forma lineal. Este tipo de configuración tiene la capacidad de optimizar la señal, alcanzar mayor profundidad de investigación, mayor densidad de información y eficiencia en las operaciones de campo.

De acuerdo al objetivo de estudio (alcance en profundidad como detalle en superficie) se determina diferentes y sucesivos espaciamiento de electrodos, idealmente $a=50$, 100, 150, 200, 250 hasta 300 metros y cuatro niveles leídos desde $n=1$ a $n=4$. Las mediciones de voltaje primario (V_p) y cargabilidad (M) se registran de manera constante con el intervalo predeterminado a lo largo de las líneas de estudio. Asimismo, el avance de electrodos de corriente es variable dependiendo del objetivo.

A continuación mostramos un ejemplo donde se tiene una configuración de 11 puntos, con separación de dipolos de 50, 100 y 150 metros; y con niveles desde $n=1$ hasta $n=3$. El avance de electrodos de corriente es de 50 metros y permite alcanzar una profundidad aproximada de 198 metros. La figura 17 a) muestra la primera serie de medición, y la figura 17 b) las series medidas por cada avance de corriente y electrodos.

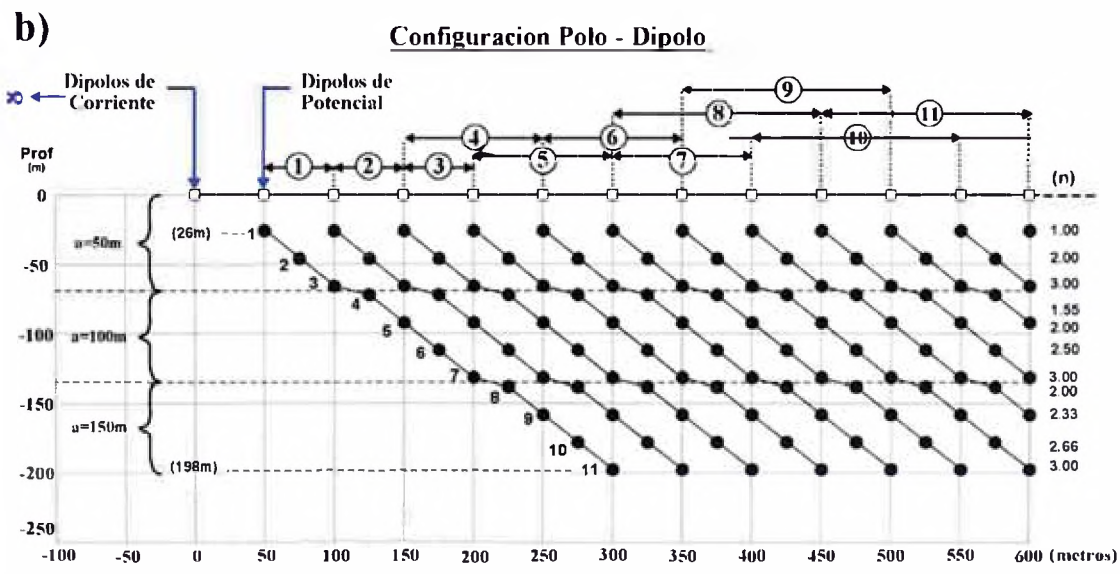
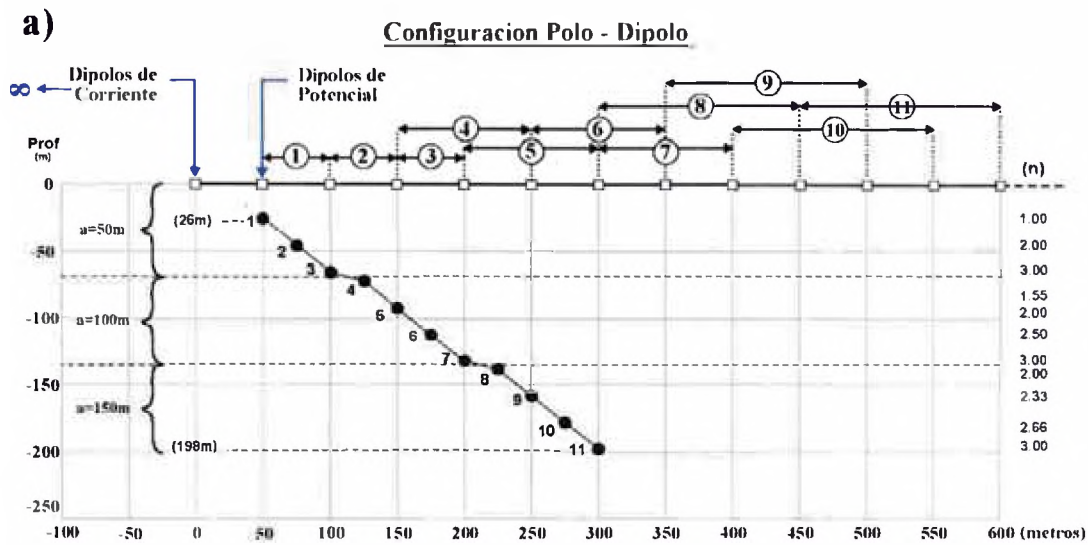


Figura 17 Configuración Polo Dipolo, con dipolos de separación 50, 100, 150 m para n=1 a 3
 a) primera serie medida b) serie por cada avance de electrodo de corriente

3.4 Preparación del terreno

El estacado de la malla o señalización de cada punto donde se colocará un electrodo ya sea de corriente o potencial, es realizado por un equipo DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial) debido a su precisión sub métrica que ofrece en comparación al GPS.



Figura 18 Equipo DGPS, Trimble 5700

En la configuración polo dipolo se tiene un electrodo de corriente lo suficientemente alejado de tal manera que se le considera punto infinito. El punto infinito se instala a no menos de 3 km y en forma perpendicular a las líneas geofísica, sobre una zona de baja resistividad. Es importante estacar este punto ya que se podría utilizar para una futura campaña geofísica.

En cada punto estacado se colocarán electrodos en caso de tener superficies rocosas o láminas de zinc en caso de terreno de consistencia arenosa. La instalación de estas superficies de contacto con el terreno es de suma importancia ya que de ella depende parte de la calidad de datos a obtener, el acople de estas al terreno es importante para obtener señales sin ruido por falso contacto o alta resistencia de contacto por la falta de humedad del terreno. En algunos casos será necesario contar con la ayuda de soluciones ricas en sales para mejorar la conductividad de los contactos con el terreno.

3.5 Adquisición de datos

Los datos de potencial y cargabilidad son adquiridos usando electrodos dispuestos a lo largo de la línea de estudio. La figura 19 muestra un equipo con 6 canales, el permite leer 6 dipolo contiguos (P_{12} , P_{23} , P_{34} , P_{45} , P_{56} , P_{67}).

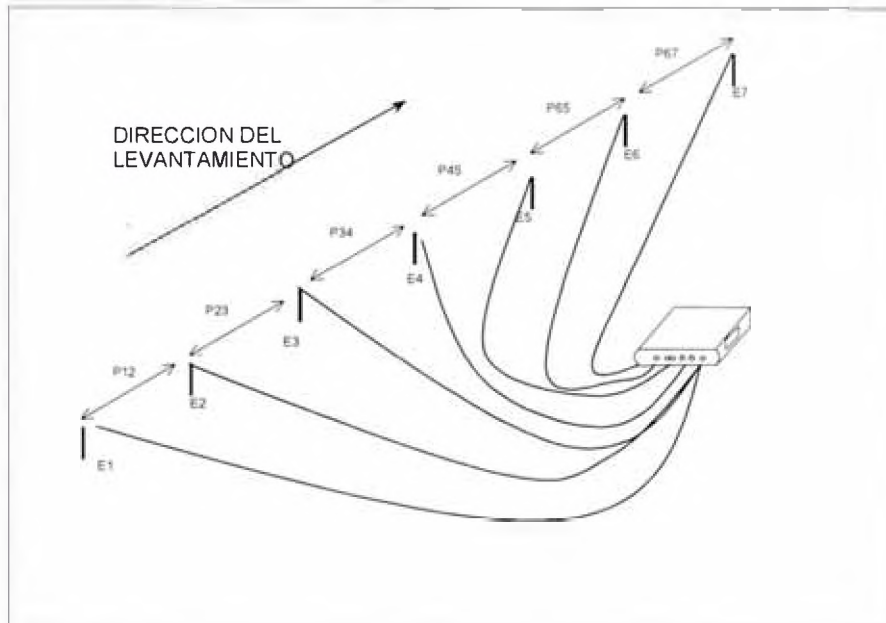


Figura 19 Esquema de adquisición de datos

Los dipolos son conectados cada 50m, o dependiendo del espaciamiento predefinido, a su respectivo electrodo de potencial por medio de un multicable. Estos dipolos receptores se controlan mediante una caja principal, manejada por el operador del receptor. El operador selecciona manualmente las series de dipolos a ser conectados al receptor.

Una vez completadas las mediciones, el operador de receptor ordena apagar el transmisor y los cables de corriente se desplazan a la siguiente estación. La siguiente serie de dipolos se seleccionan en la caja principal, conectados al receptor y el procedimiento se repite hasta completar la línea de estudio.

3.6 Control de calidad y procesamiento de los datos

El control de calidad de los datos se inicia desde la preparación del terreno, con la debida preparación de los puntos de corrientes y los electrodos de potencial, que permitan una buena señal al receptor. Durante la adquisición se monitorea constantemente posibles problemas como: mal funcionamiento de los equipos (transmisor, receptor, motogenerador, etc.), ruidos culturales y/o naturales (cruce de cables, corrientes telúricas, cables de alta tensión, cortes del cableado, etc.) y fenómenos naturales (lluvia, granizo, tormentas eléctricas, etc.). Hay que mencionar que las tormentas eléctricas es el factor más crítico en la adquisición de los datos, debido a la sensibilidad de los equipos (receptor y transmisor) que puede llegar a dañarlos.

Para el procesamiento de los datos se usó el software "Oasis Montaj" [5] que cuenta con un módulo especial para procesar este tipo de datos. El procesamiento consiste básicamente en:

1. Convertir al formato del software Oasis Montaj los datos adquiridos.
2. Remover los datos que no cumplan los parámetros de repetibilidad, buenas curvas de caída, voltajes primarios negativos, etc.
3. Presentación de los datos en pseudo secciones de resistividad y cargabilidad aparente.
4. Modelamiento o proceso de inversión de los datos (2 dimensiones) por cada línea de estudio.
5. Presentación del modelo 2D en secciones de resistividad y cargabilidad.
6. Modelamiento en 3 dimensiones de todos los datos de la malla geofísica.
7. Presentación del modelo 3D en secciones de resistividad y cargabilidad.
8. Presentación del modelo 3D en un bloque.
9. Presentación del modelo 3D en planos de nivel a distintas profundidades.

Para el proceso de inversión o modelado tanto en 2 y 3 dimensiones se usó el software Res2DInv y Res3DInv [4] respectivamente, desarrollados por Geotomo Software. El software realiza el proceso de la inversión de los datos de cargabilidad de manera conjunta con los datos de resistividad, tomando en cuenta el efecto topográfico.

4 RESULTADOS

Se presentan 4 casos de estudio de resistividad y polarización inducida, con la configuración polo dipolo y para distintas profundidades. Los resultados son mostrados en forma de pseudo secciones.

4.1 Caso 1:

- Secuencia de adquisición:

Tabla 2 Secuencia de adquisición de datos (caso 1)

N° Pto.	Posición del electrodo (m)				Dipolo a (m)	n	Profundidad (m)
	C ₂	C ₁	P ₁	P ₂			
1	∞	0	100	200	100	1	-52.01
2	∞	0	200	300	100	2	-92.28
3	∞	0	300	400	100	3	-131.81
4	∞	0	300	500	200	1.5	-144.5
5	∞	0	400	600	200	2	-184.57
6	∞	0	500	700	200	2.5	-224.25
7	∞	0	600	800	200	3	-263.62
8	∞	0	600	900	300	2	-276.85
9	∞	0	700	1000	300	2.333	-316.60
10	∞	0	800	1100	300	2.667	-356.11
11	∞	0	900	1200	300	3	-395.42
12	∞	0	900	1300	400	2.25	-408.91
13	∞	0	1000	1400	400	2.5	-448.51
14	∞	0	1100	1500	400	2.75	-487.95
15	∞	0	1200	1600	400	3	-527.23

- Pseudo sección:

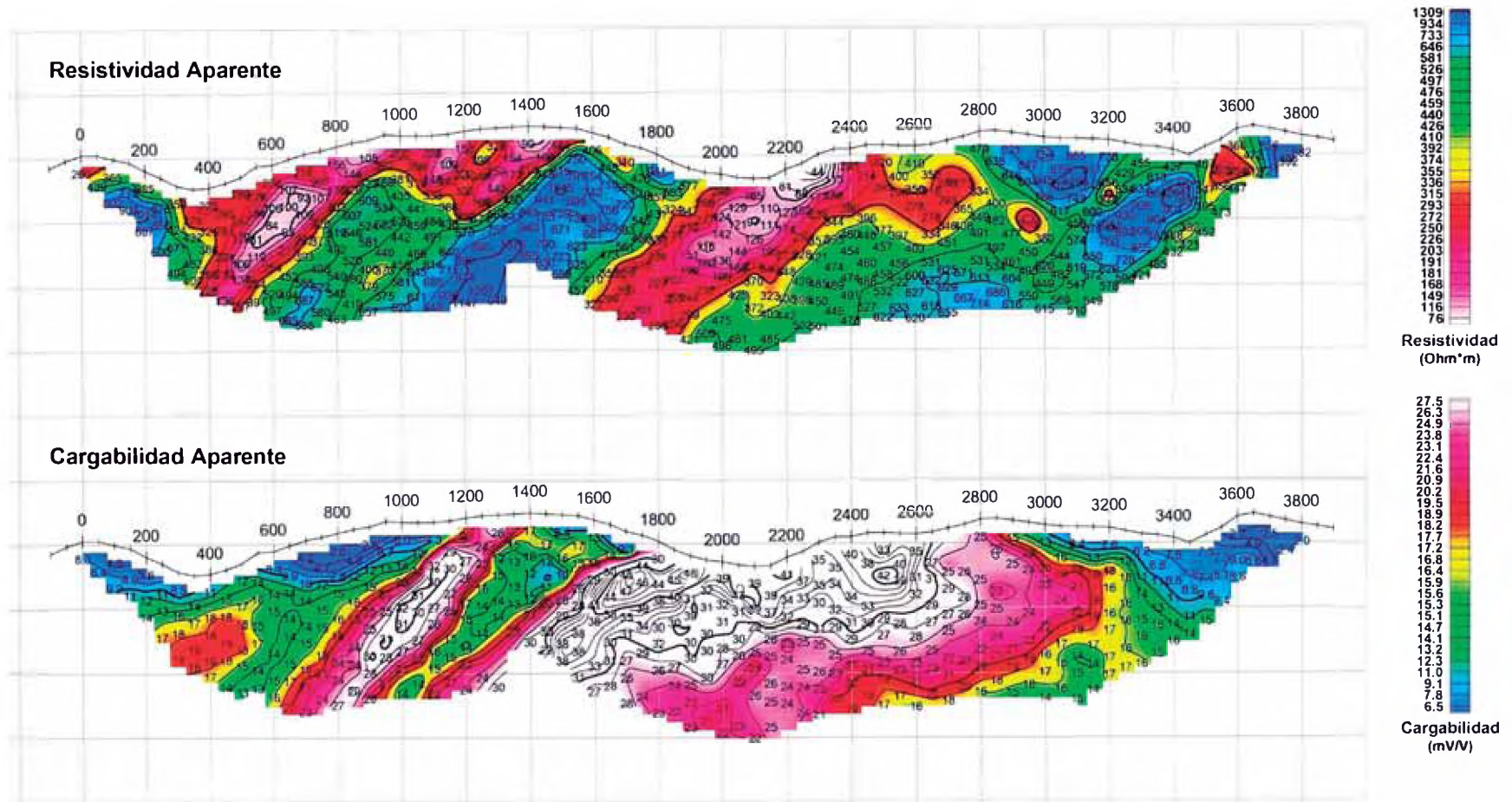


Figura 20 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 1)

4.2 Caso 2:

- Secuencia de adquisición:

Tabla 3 Secuencia de adquisición de datos (caso 2)

N° Pto.	Posición del electrodo (m)				Dipolo a (m)	n	Profundidad (m)
	C ₂	C ₁	P ₁	P ₂			
1	∞	0	100	200	100	1	-52.01
2	∞	0	200	300	100	2	-92.28
3	∞	0	300	400	100	3	-131.81
4	∞	0	300	500	200	1.5	-144.5
5	∞	0	400	600	200	2	-184.57
6	∞	0	500	700	200	2.5	-224.25
7	∞	0	600	800	200	3	-263.62
8	∞	0	600	900	300	2	-276.85
9	∞	0	700	1000	300	2.333	-316.60
10	∞	0	800	1100	300	2.667	-356.11
11	∞	0	900	1200	300	3	-395.42
12	∞	0	900	1300	400	2.25	-408.91
13	∞	0	1000	1400	400	2.5	-448.51
14	∞	0	1100	1500	400	2.75	-487.95
15	∞	0	1200	1600	400	3	-527.23

- Pseudo sección:

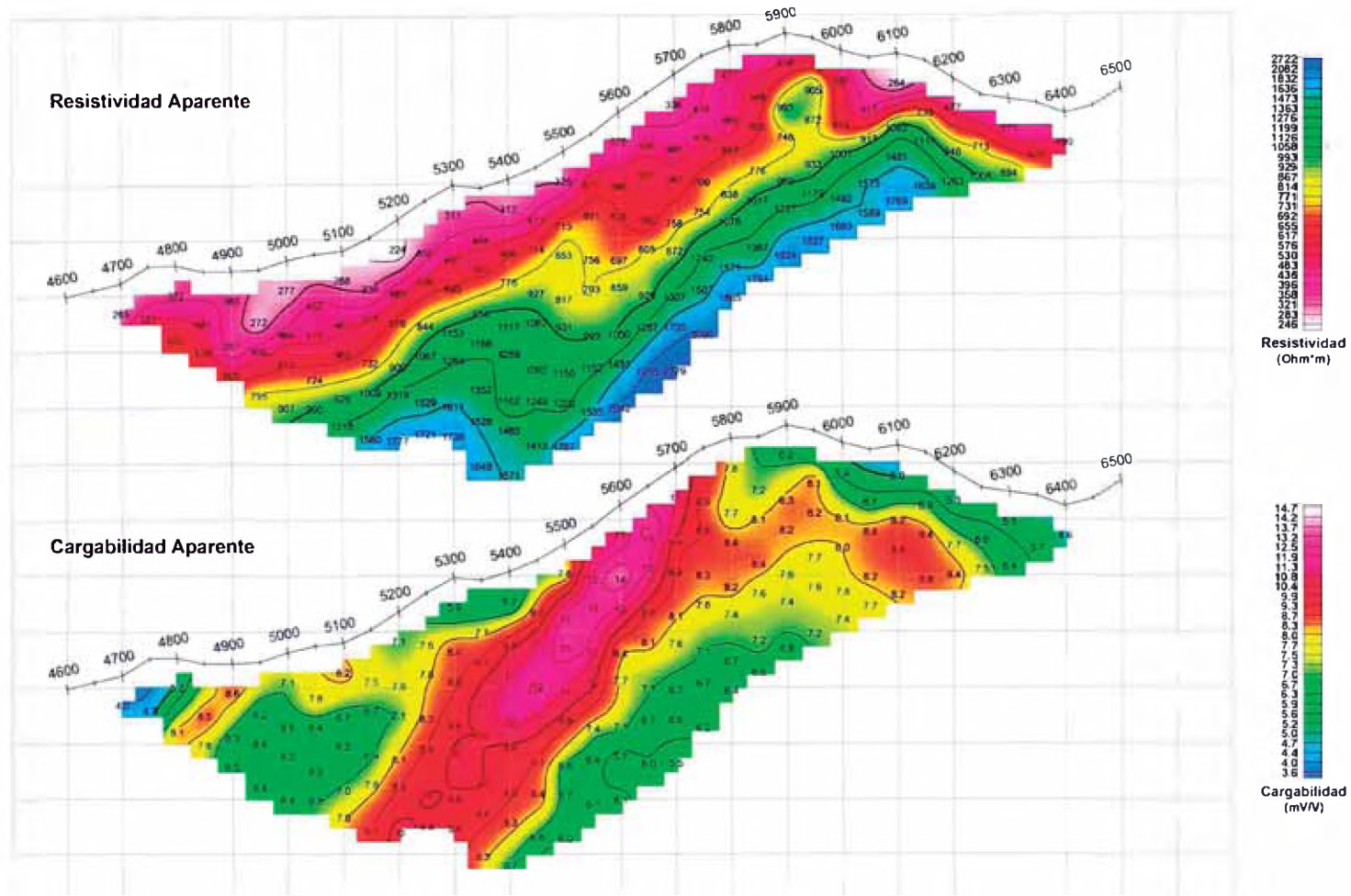


Figura 21 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 2)

4.3 Caso 3:

- Secuencia de adquisición:

Tabla 4 Secuencia de adquisición de datos (caso 3)

N° Pto.	Posición del electrodo (m)				Dipolo a (m)	n	Profundidad (m)
	C ₂	C ₁	P ₁	P ₂			
1	∞	0	100	200	100	1	-52.01
2	∞	0	200	300	100	2	-92.28
3	∞	0	300	400	100	3	-131.81
4	∞	0	400	500	200	1.5	-144.5
5	∞	0	400	600	200	2	-184.57
6	∞	0	500	700	200	2.5	-224.25
7	∞	0	600	800	200	3	-263.62
8	∞	0	600	900	300	2	-276.85
9	∞	0	700	1000	300	2.333	-316.60
10	∞	0	800	1100	300	2.667	-356.11
11	∞	0	900	1200	300	3	-395.42

- Pseudo sección:

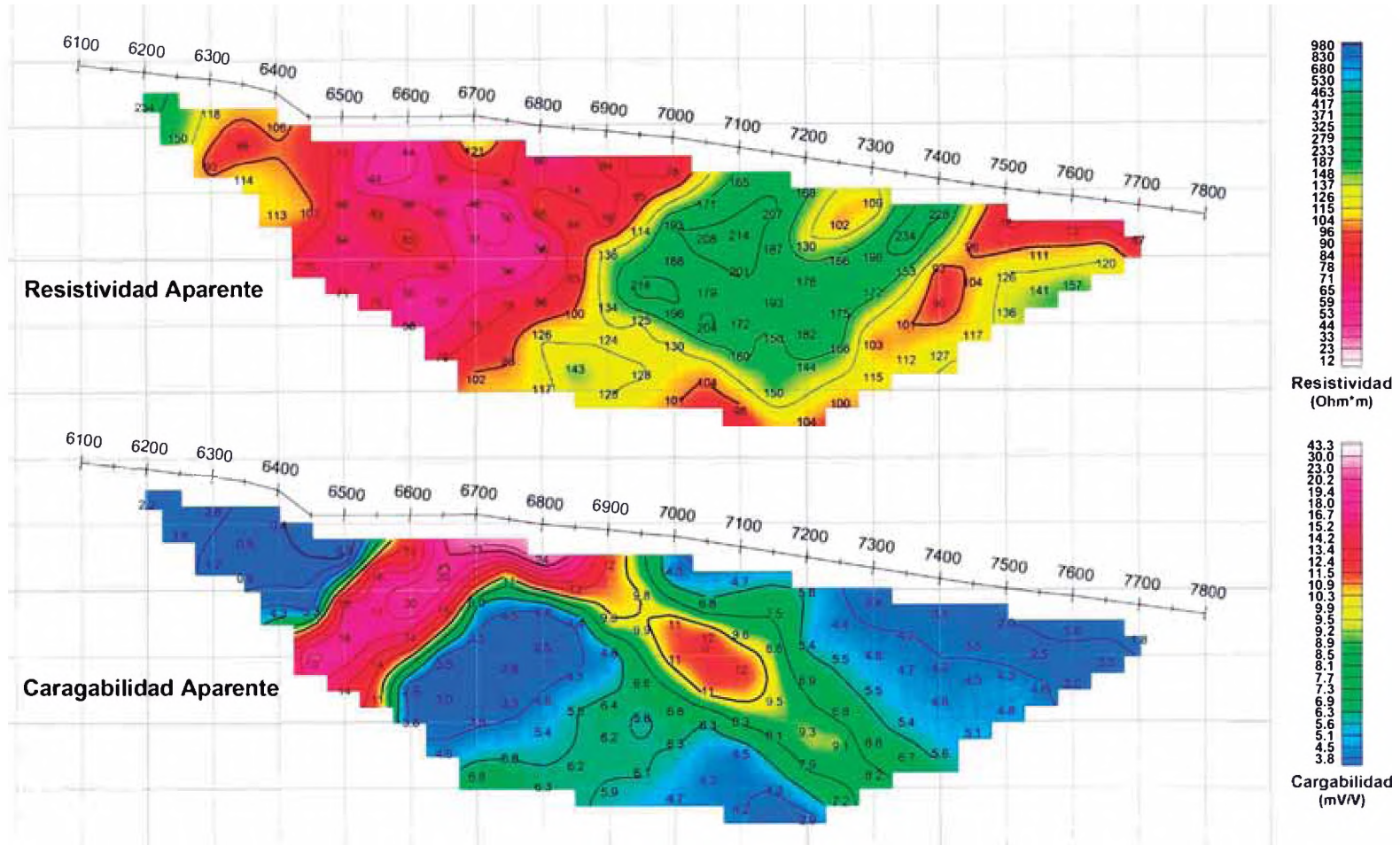


Figura 22 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 3)

4.4 Caso 4:

- Secuencia de adquisición:

Tabla 5 Secuencia de adquisición de datos (caso 4)

N° Pto.	Posición del electrodo (m)				Dipolo a (m)	n	Profundidad (m)
	C ₂	C ₁	P ₁	P ₂			
1	∞	0	100	200	100	1	-52.01
2	∞	0	200	300	100	2	-92.28
3	∞	0	300	400	100	3	-131.81
4	∞	0	400	500	200	1.5	-144.5
5	∞	0	400	600	200	2	-184.57
6	∞	0	500	700	200	2.5	-224.25
7	∞	0	600	800	200	3	-263.62
8	∞	0	600	900	300	2	-276.85
9	∞	0	700	1000	300	2.333	-316.60
10	∞	0	800	1100	300	2.667	-356.11
11	∞	0	900	1200	300	3	-395.42

- Pseudo sección:

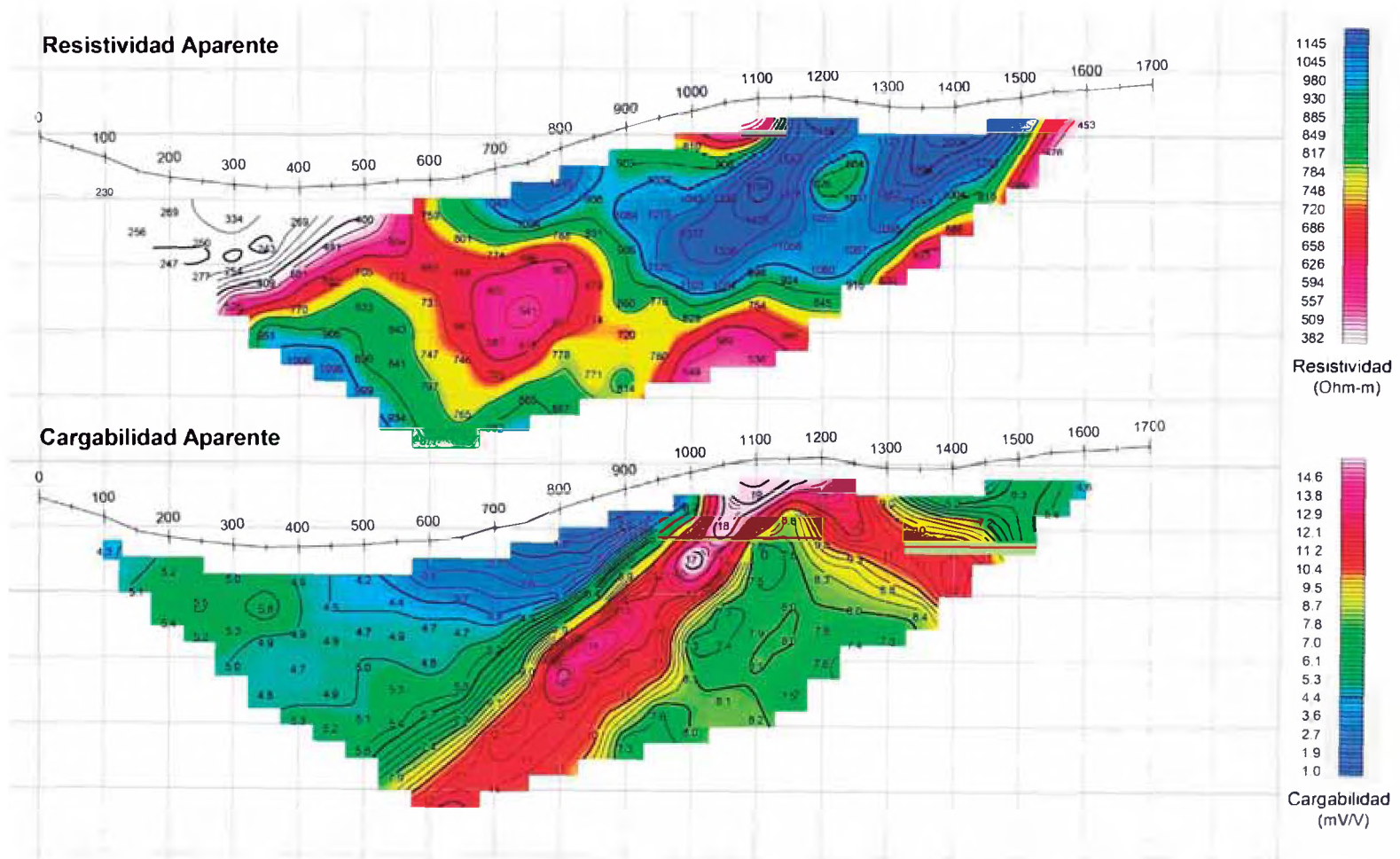


Figura 23 Pseudo sección de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 4)

5 DISCUSIÓN

5.1 Caso 1:

Las secciones de inversión o modelo 2D de los datos de resistividad aparente y cargabilidad aparente son presentados en la figura 24. La sección de resistividad muestra 2 zonas de baja resistividad ($<350 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) y 2 zonas de alta resistividad ($>800 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). En la sección de cargabilidad se muestra una zona polarizable con valores mayores a 15 mV/m , resaltando 2 zonas de cargabilidad alta ($>28 \text{ mV/V}$) con probable presencia de sulfuros y aflorando en superficie.

SECCION DE INVERSION 2D

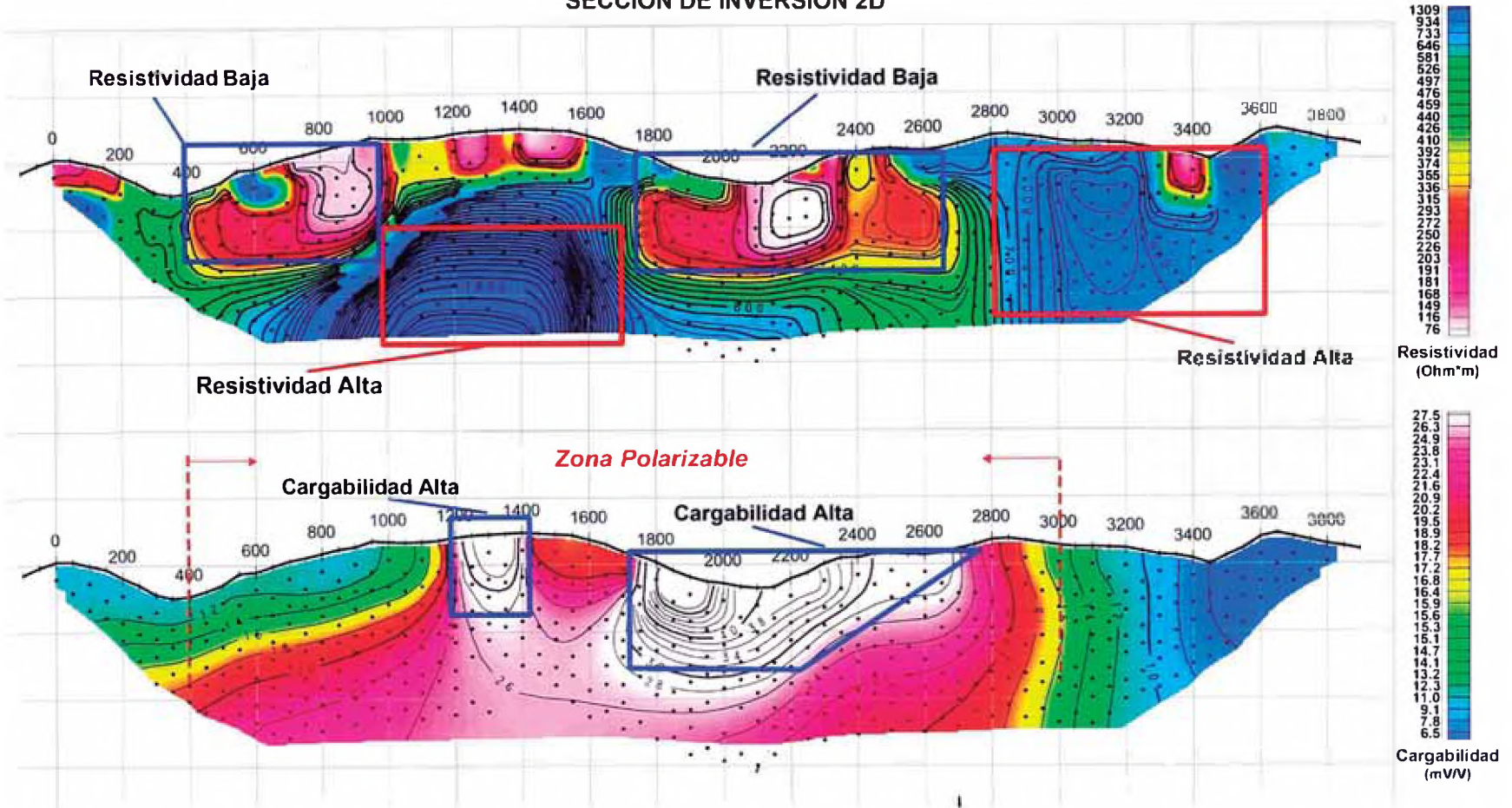


Figura 24 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 1)

5.2 Caso 2:

Las secciones de inversión o modelo 2D de los datos de resistividad aparente y cargabilidad aparente son presentados en la figura 25. La sección de resistividad muestra 2 capas, una de resistividad baja-moderada ($<600 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) desde la superficie hasta 100 y 200 metros de profundidad a lo largo de la línea de estudio, y la otra de alta resistividad ($>1500 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) hasta 527 metros de profundidad. La sección de cargabilidad presenta 2 zonas: una de cargabilidad débil (9 – 11 mV/V) y una de cargabilidad moderada – alta ($>14 \text{ mV/V}$), con probable presencia de sulfuros.

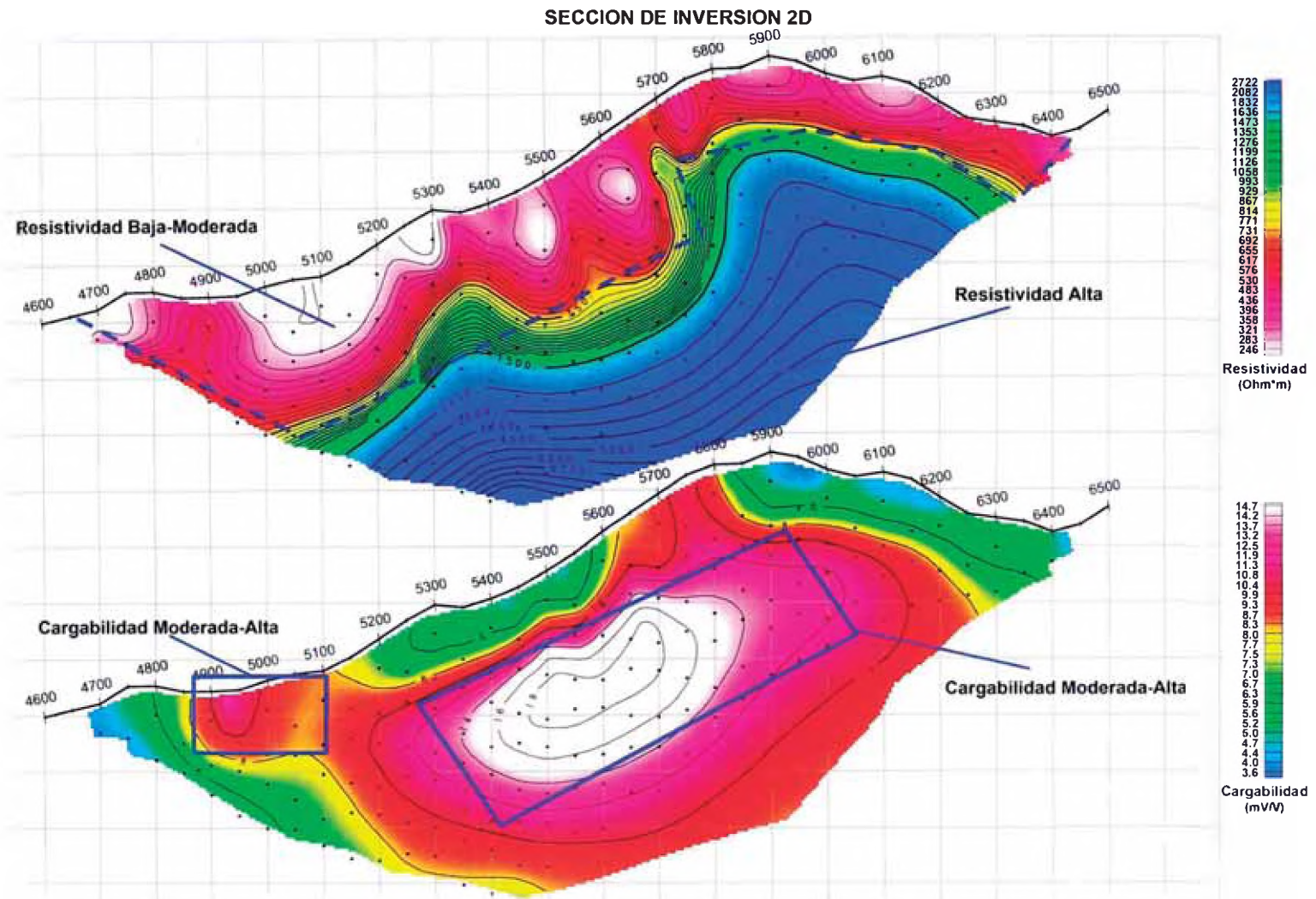


Figura 25 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 2)

5.3 Caso 3:

Las secciones de inversión o modelo 2D de los datos de resistividad aparente y cargabilidad aparente son presentados en la figura 25. La sección de resistividad muestra 3 zonas de baja resistividad ($<100 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) y una zona de resistividad moderada ($100 - 400 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$). La sección de cargabilidad presenta una zona de cargabilidad alta ($>20 \text{ mV/V}$), con probable presencia de sulfuro y aflorando en superficie.

SECCION DE INVERSION 2D

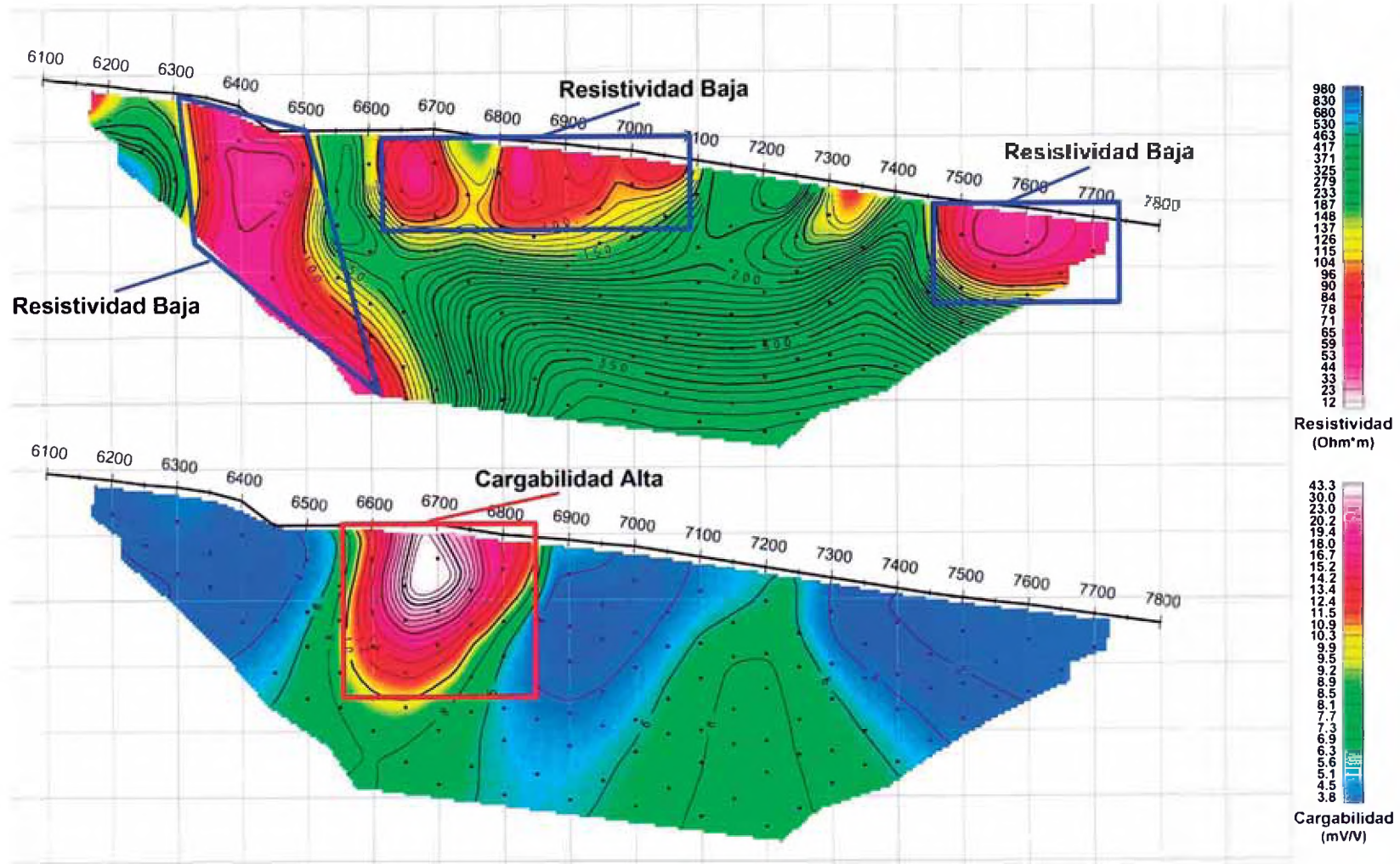


Figura 26 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 3)

5.4 Caso 4:

Las secciones de inversión o modelo 2D de los datos de resistividad aparente y cargabilidad aparente son presentados en la figura 27. La sección de resistividad muestra 2 zona de resistividad baja-moderada ($<400 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$) en los extremos de la línea de estudio. La sección de cargabilidad muestra una zona de cargabilidad alta ($>16\text{mV/V}$) con presencia de mineralización y aflorando en superficie. En esta sección se tiene información de estudios geoquímicos, presentados en la figura 28, lo cual corroboraría la presencia de mineralización.

La línea de estudio presentada en el caso 4 forma parte de una malla geofísica, como se muestra en la figura 29. El bloque del modelo 3D tanto de cargabilidad como resistividad y los planos de nivel a distintas profundidades, presentados en las figuras 30 y 31 respectivamente, muestran que la zona mineralizada se prolonga hasta 2 líneas siguientes tanto hacia arriba como por debajo de la línea de estudio. La zona mineralizada también se extiende en profundidad como se muestra en los planos de nivel de la figura 31

SECCION DE INVERSION 2D

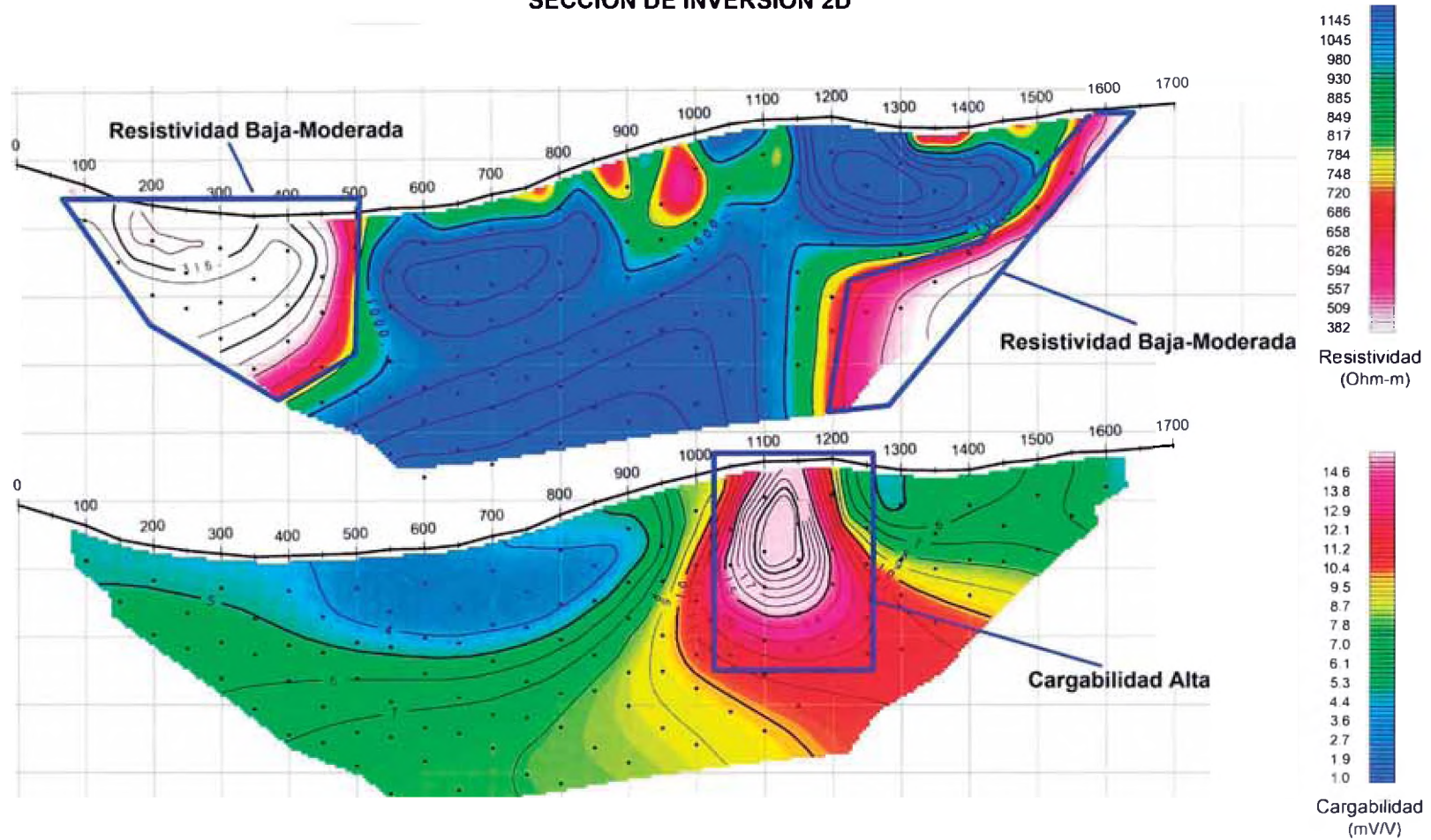


Figura 27 Inversión 2D de los datos de resistividad y cargabilidad (caso 4)

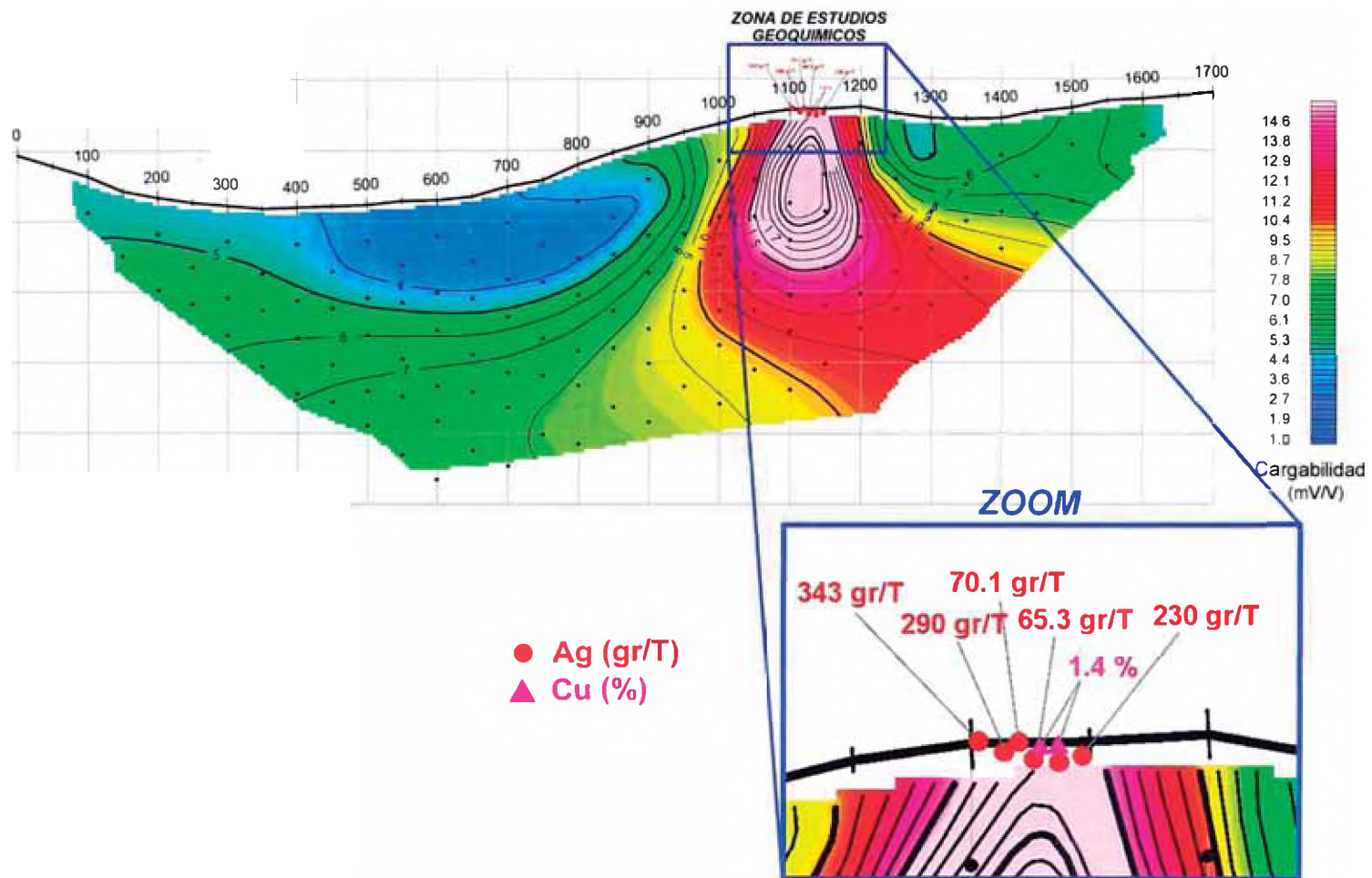


Figura 28 Estudios geoquimicos realizados en el caso 4.

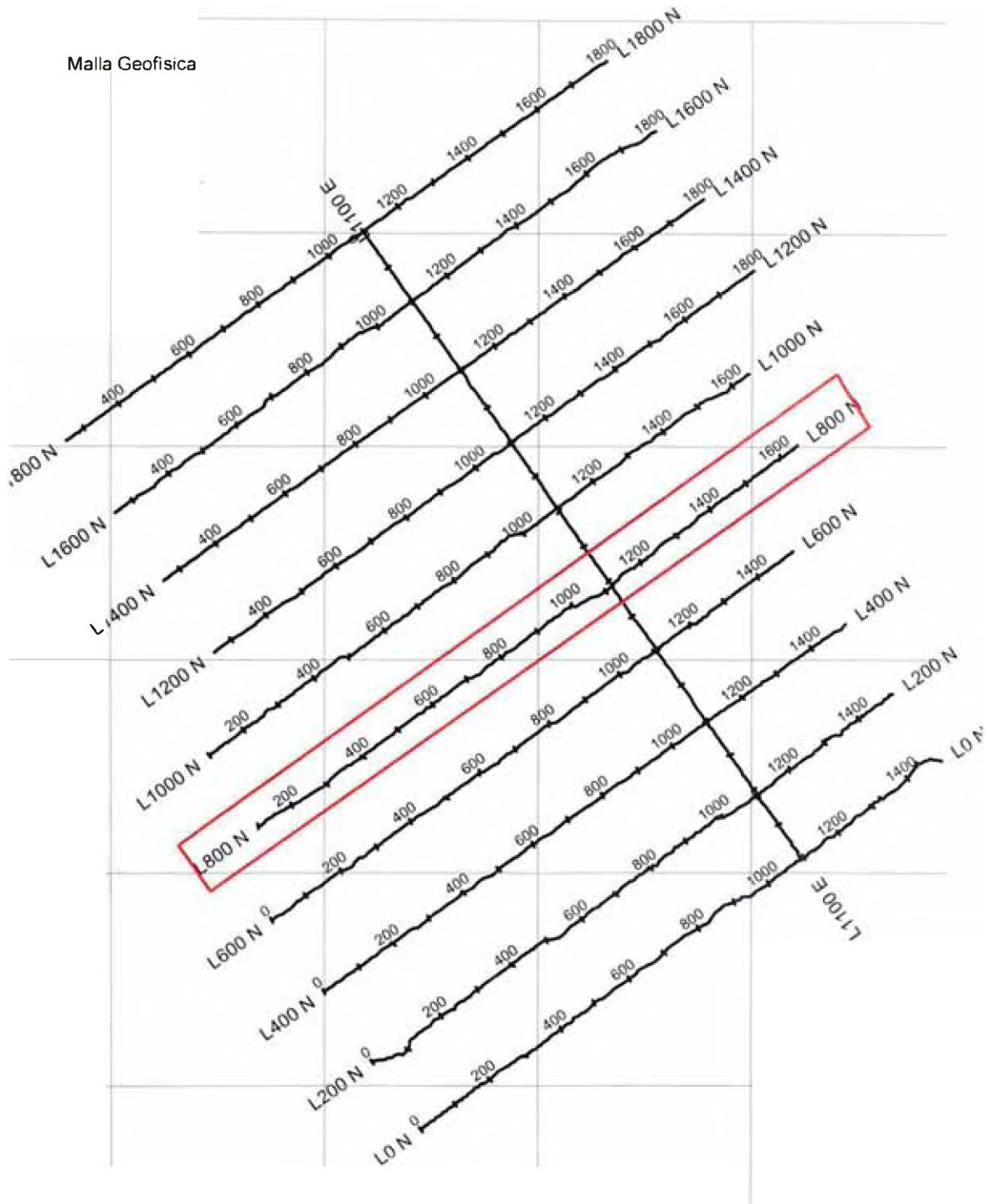


Figura 29 Malla geofísica de la cual forma parte la línea de estudio del caso 4.

BLOQUE DEL MODELO 3D

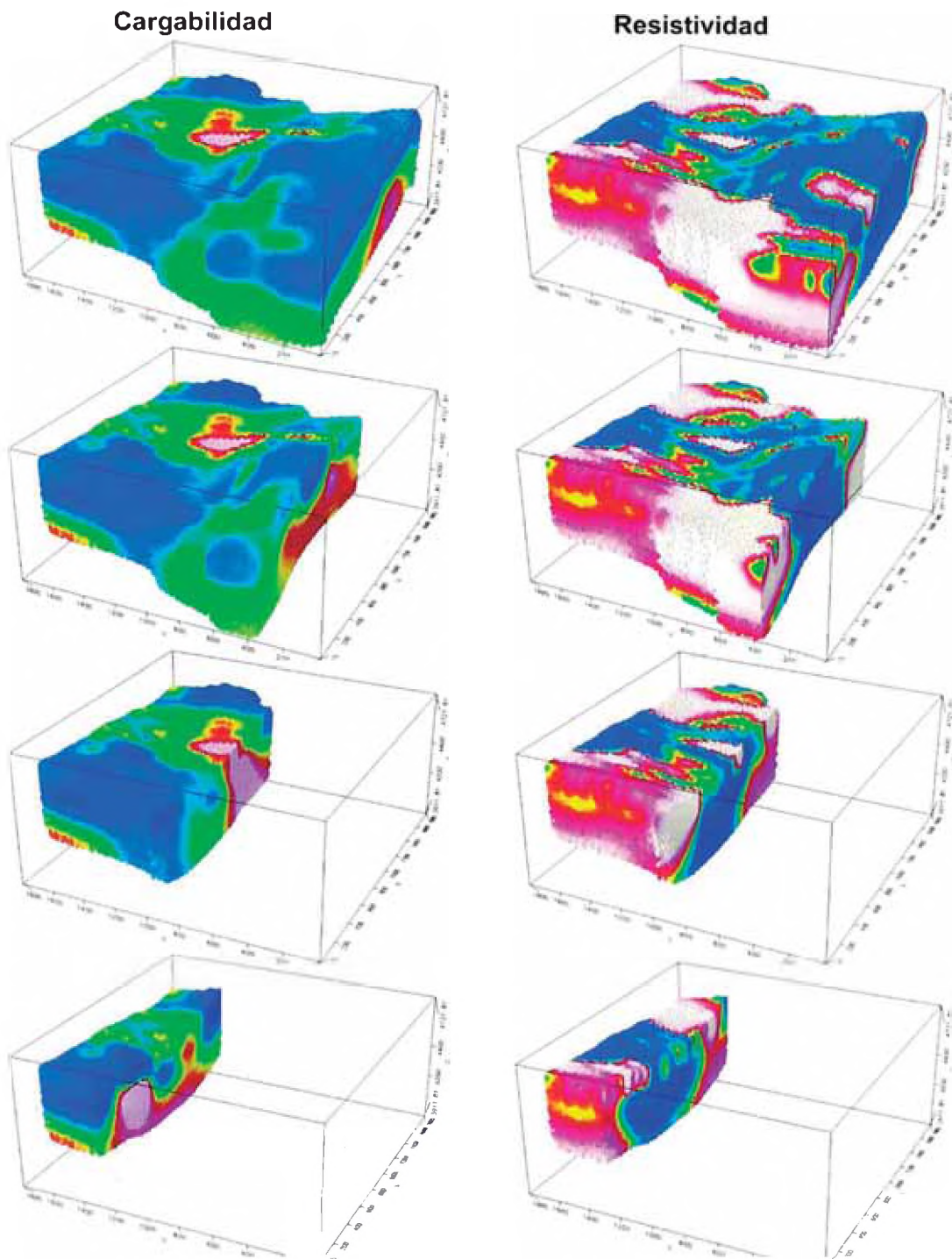


Figura 30 Bloque del modelo 3D, Cargabilidad y Resistividad (caso 4). Muestra la distribución espacial de de los modelos, se adicionan cortes para observar el interior del modelo.

MODELO 3D - CARGABILIDAD PLANOS DE NIVEL

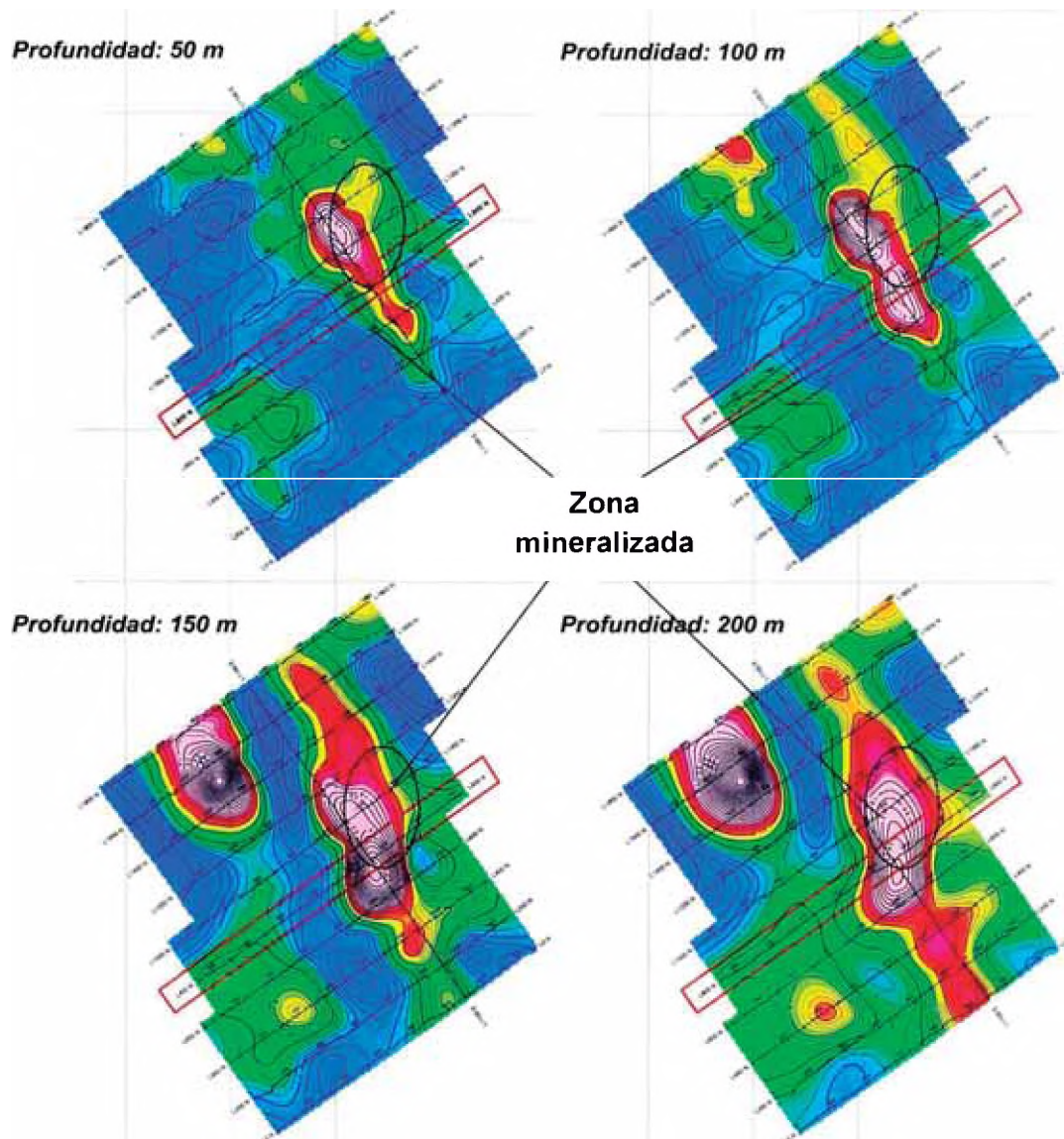


Figura 31 Planos de nivel extraídos del modelo 3D, Cargabilidad y Resistividad (caso 4) a distinta profundidades 50, 100, 150 y 200 metros de profundidad. Se observa la continuidad de la zona mineralizada en profundidad.

6 CONCLUSIONES

- Se identificaron probables zonas mineralizadas con presencia de sulfuros, en los 4 casos.
- En el caso 4 se corroboró la zona mineralizada con estudios de geoquímicos, en este caso la presencia de plata y cobre, lo que indica que es una zona de interés exploratorio.
- El modelo 3D y los planos de nivel, para el caso 4, nos permite definir con mayor detalle la zona de interés exploratorio.
- Los métodos geofísicos (resistividad y polarización inducida) ayudan a definir zonas de interés exploratorio, lo que verifica que su utilización es importante en la exploración minera.

7 REFERENCIAS

1. <http://www.quantecgeoscience.com/Tech/KemessNorth.php> consultado el 20/10/2011
2. <http://www.vdgdelperu.com>, consultado el 20/10/2011
3. W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff. Applied Geophysics. 2ª Edición. Cambridge University Press. Pág. 283-292, 522-609, (1990)
4. M. H. Loke. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Survey, (1996-2010)
5. <http://www.geosoft.com/>, consultado el 20/10/2011