

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento imprescindible para la subsistencia humana, un recurso tan preciado que gradualmente se reduce o tiende a contaminarse por el crecimiento de la mancha urbana, cambio de uso de suelos o simplemente por la actividad económica.

La aplicación de métodos indirectos de exploración son herramientas versátiles que nos reducen el margen de error para la toma de decisiones, entre ellos las Tomografías Electro Resistivas (ERT) son métodos de exploración geofísica ampliamente usadas en la exploración de aguas subterráneas.

El método eléctrico es el más empleado, pero solamente en la medición de la resistividad (RES) del subsuelo, algunos fabricantes han incluido la medición de cargabilidad o polarización inducida (PI) que no es explotado aún en hidrogeología.

El método de polarización inducida con frecuencia es empleado en minería para la detección de sulfuros mineralizados que están directamente asociados a un mineral, esta aplicación es muy conocida en este rubro, no tanto en la aplicación de hidrogeología, más concretamente en la identificación de acuíferos.

Muchos materiales suelen tener un mismo rango de resistividad, lo cual no es posible diferenciar usando sólo datos de resistividad, esto hace que la medición de cargabilidad tenga mucho valor dado que se puede medir de forma simultánea a la resistividad en campo; por tanto, teniendo dos parámetros se reduce la ambigüedad en la interpretación.

Bolivia adoptó estas técnicas de exploración en 1D llamados SEV hace mucho tiempo atrás, las técnicas 2D hace aproximadamente 10 años midiendo sólo una propiedad física, la resistividad. Actualmente el Ministerio de Desarrollo Rural – Unidad de Pozos, SERGEOMIN, COFADENA y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua emplea las técnicas de medición en modo resistividad y posiblemente en un 5% RES + PI. La Universidad San Simón de Cochabamba tiene una tesis de pregrado y doctorado de medición de ambas propiedades físicas del subsuelo aplicado a aguas subterráneas, datos que fueron empleados en el gráfico de cargabilidad normalizada.

Este trabajo de tesis pretende realizar estudios de geofísica del método eléctrico RES + PI en dos zonas donde ya exista un pozo en plena explotación, registrar los datos, realizar el proceso de inversión, comparar con los resultados de Registro Eléctrico vertical o muestras obtenidas durante la perforación del pozo con las imágenes de RES + PI.

El aporte de esta investigación es de mucho beneficio para los profesionales dedicados a la exploración de aguas subterráneas, porque aclarará técnicamente las ventajas o desventajas de la medición adicional de Polarización Inducida a la Resistividad (RES + PI) y aplicando procedimientos técnicos que se describirán determinaremos el sitio con mayor probabilidad de encontrar agua en cantidad suficientes para la perforación de un pozo.

1.2 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad de ampliar nuestros conocimientos en métodos indirectos de exploración de aguas subterráneas, combinando imágenes de resistividad y cargabilidad (polarización inducida) y reduciendo la ambigüedad de la interpretación en el marco de los estándares técnicos.

El crecimiento poblacional en la ciudad es inminente y por ende mayor demanda de agua potable, el recurso en el subsuelo es importante para cubrir las futuras demandas, contar con métodos ya conocidos reducirá los gastos innecesarios en la perforación de pozos improductivos.

Una de las alternativas más accesibles es adoptar métodos indirectos de exploración, entre los más empleados son las imágenes de resistividad y con el presente estudio también analizaremos la aplicación de cargabilidad para reducir la ambigüedad en la interpretación.

1.2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es suficiente una inspección técnica del punto de perforación de un pozo de agua? Estamos en el siglo XXI y tenemos herramientas probadas de exploración, métodos indirectos que nos permiten ver con muy buena precisión el comportamiento de los diferentes estratos en el subsuelo y en el marco de los conceptos generales de hidrogeología seleccionar el sitio más

probable de perforación del pozo piloto, evaluar imágenes de resistividad vs. cargabilidad, y combinar métodos.

1.2.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué variables podemos medir con el método eléctrico? ¿Qué tan confiable es el método eléctrico de resistividad? ¿Qué tipo de configuración requiere el registro de cargabilidad en dominio de tiempo? ¿Qué tan confiable es la imagen de cargabilidad?

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la aplicabilidad de las tomografías electro resistivas y polarización inducida (cargabilidad) del método eléctrico de geofísica para delimitar acuíferos en base a los datos existentes de Registro Eléctrico Vertical (REV) de los pozos Tierra Linda y Fray Quebracho y evaluación en la cuenca pedagógica de Yesera.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la aplicabilidad de la Tomografía Electro Resistiva 2D y polarización inducida PI en dominio de tiempo en la exploración de aguas subterráneas.
2. Registrar datos de resistividad y cargabilidad con los arreglos Schlumberger y Gradiente con tres tiempos de 0.5, 1 y 1.5 segundos de las curvas de decaimiento en los pozos ya perforados de Tierra Linda y Fray Quebracho y la cuenca pedagógica de Yesera.
3. Analizar los datos de registro eléctrico vertical, muestras de suelo, litología y diseño de los pozos perforados de Tierra Linda y Fray Quebracho.
4. Analizar la cargabilidad normalizada para resolver ambigüedades de interpretación de tomografías ERT.
5. Analizar resultados de resistividad y cargabilidad comparados con los pozos ya perforados de Tierra Linda y Fray Quebracho.
6. Comparar ventajas y desventajas de diferentes arreglos de campo y tiempos.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Los resultados obtenidos generarán una reflexión técnica en ambientes académicos con el fin de establecer rangos de resistividades y cargabilidades de las diferentes formaciones geológicas del Valle Central de Tarija.

1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

El presente estudio propone una alternativa técnica adicional al registro de resistividad, el registro de cargabilidad o medición de la polarización inducida en tres tiempos (0.5, 1.0 y 1.5 segundos) con el fin de reducir la ambigüedad en la interpretación cuando los valores de resistividad son similares de los acuíferos en proximidades del pozo Tierra Linda y Fray Quebracho del Valle Central de Tarija.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El estudio realizado ayudará a comprender mejor los rangos de resistividad de los diferentes materiales del subsuelo de las zonas de estudio, muy importante para ambientes académicos y empresas que se dedican a la perforación de pozos de agua.

1.5 HIPÓTESIS

El registro de datos de polarización inducida, en dominio de tiempo registrados paralelamente a la resistividad del método eléctrico, en geofísica reduce la ambigüedad en la interpretación de la imagen de resistividad para la identificación de acuíferos productivos.

1.6 ALCANCE DEL ESTUDIO

En la presente tesis se obtendrán imágenes de resistividad y cargabilidad en 2D sobre los pozos de agua subterránea perforados por COSSALT llamados Tierra Linda y Fray Quebracho y en la cuenca pedagógica de Yesera, cada línea tiene dos arreglos, Schlumberger y Gradiente, cada arreglo tiene tres configuraciones de 0.5, 1.0 y 1.5 segundos de PI para analizar los resultados y comparar ventajas y desventajas de cada resultado de imagen comparando con los registros eléctricos verticales en los pozos perforados.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 PRINCIPIOS TEÓRICOS BÁSICOS.

La ley de Ohm (1827), postulada por el físico y matemático alemán Georg Simón Ohm (1789 – 1854), es una ley para entender los fundamentos principales de los circuitos eléctricos. Establece que la diferencia de potencial V que aplicamos entre los extremos de un conductor determinado es directamente proporcional a la intensidad de la corriente I que circula por el citado conductor. Ohm completó la ley introduciendo la noción de resistencia eléctrica R ; que es el factor de proporcionalidad que aparece en la relación entre V e I , de acuerdo a lo siguiente:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Donde:

V = Diferencia de Potencial o voltaje (Voltios)

I = Intensidad (Amperes)

R = Resistencia (Ohm)

En cambio, la resistividad ρ es un parámetro de propiedad del material que describe la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica. Es inversa a la conductividad eléctrica σ .

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.2)$$

Donde:

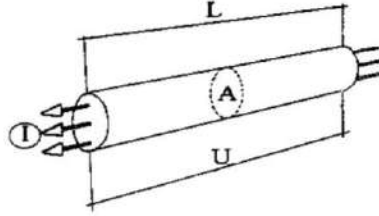
ρ = Resistividad (Ohmm)

σ = Conductividad eléctrica (Siemens)

Considerando una geometría completamente ideal con un flujo de corriente a través de un medio homogéneo y una sección transversal uniforme bien definida entre dos electrodos de potencial.

Figura 1

Flujo de corriente A través de un conductor homogéneo con resistividad ρ , longitud L y un área de sección transversal A



La Resistencia es también proporcional al área de sección transversal A y la distancia entre electrodos L

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.3)$$

Combinando estas relaciones, resolviendo la resistividad e introduciendo un factor geométrico K , llegamos a una nueva expresión.

$$\rho = \frac{A}{L} R = \frac{A}{L} \frac{V}{I} = K \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

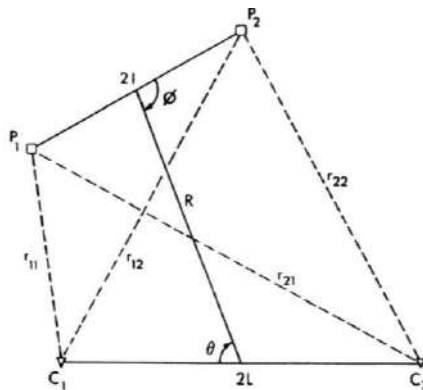
$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (2.5)$$

De esto se desprende claramente que la resistividad se puede calcular para un voltaje medido a una corriente conocida si se conoce la geometría. Esto puede aplicarse al problema original de cuatro electrodos en una superficie plana sobre una sub superficie conductiva homogénea y el factor geométrico puede ser calculado de acuerdo a lo siguiente:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{22}} \right)^{-1} \quad (2.6)$$

Figura 2

Esquema de la disposición de una medición general de cuatro electrodos con electrodos de potencial p_1 y p_2 y electrodos de corriente C_1 y C_2 . las distancias entre electrodos son empleadas para calcular el factor geométrico K



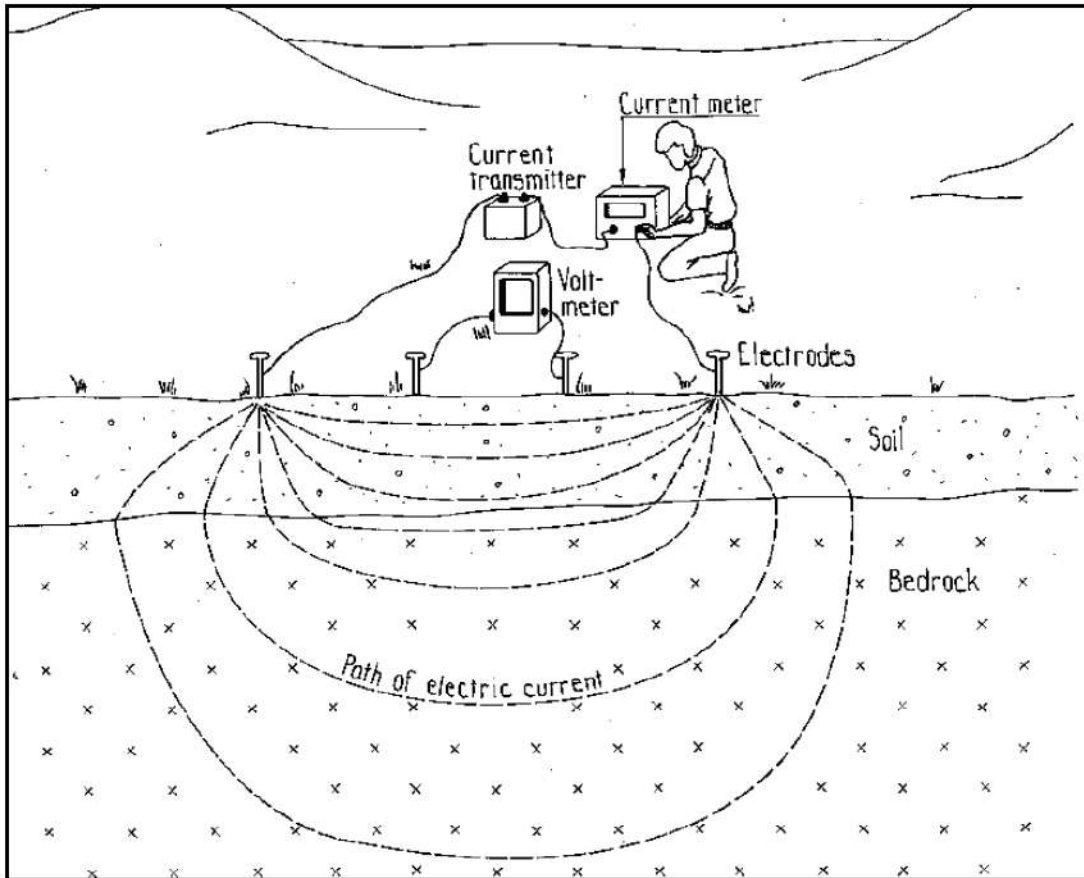
Si la distribución de resistividad del subsuelo es homogénea, la resistividad medida es la misma que la resistividad verdadera, sin embargo, en la práctica eso casi nunca sucede, en cambio la resistividad medida debe considerarse un concepto artificial que por lo general no coincide con la resistividad verdadera. Por lo tanto, se utiliza el término de resistividad aparente para los datos crudos de las mediciones.

2.1.2 ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO.

En el método de resistividad consiste en introducir una corriente eléctrica al suelo y se mide la distribución de potencial resultante. Los sistemas de resistividad más comunes emplean corriente continua DC y algunos, corriente alterna CA con frecuencias muy bajas.

Figura 3

Esquema de la disposición de un sistema de medición de resistividad superficial con cuatro electrodos (Robinson y Coruh, 1998)



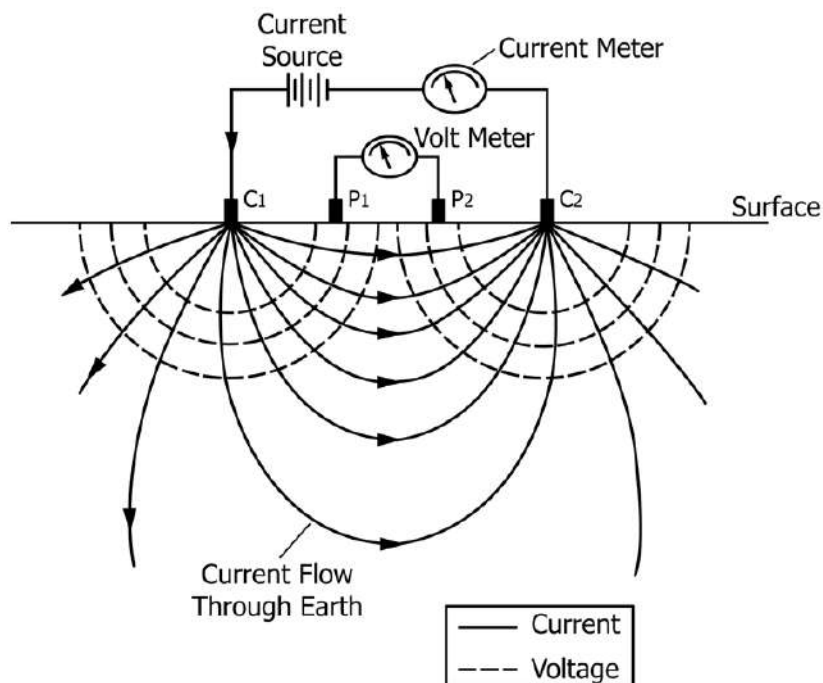
El voltaje medido a partir de una disposición de cuatro electrodos puede considerarse como un valor medio ponderado de las conductividades de todas las trayectorias de corriente entre los electrodos de potencial (Sjodahl y Dahlin, 2008). A partir de dicha medición, se recibe información sobre la resistividad promedio de un volumen específico del subsuelo, al alterar las distancias entre los electrodos, se detectan diferentes volúmenes del subsuelo y se obtiene información adicional sobre resistividades a diferentes profundidades.

Es imposible determinar la resistividad de una determinada capa directamente a partir de una medición de este tipo, la corriente se canalizará hacia regiones de menor resistividad y se desviará de las regiones con mayor resistividad.

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

Figura 4

Esquema básico de los métodos de resistividad (Fuente. Norma ASTM D6431-18).



Los métodos convencionales solo precisan 4 electrodos y se basan en introducir en el terreno, un campo eléctrico de corriente continua mediante dos electrodos de corriente (C1,C2) conectados a un miliamperímetro, mientras que con los otros dos electrodos (P1,P2) y que están conectados a un milivoltímetro, mediremos cual es la diferencia de potencial eléctrica ΔV entre esos dos puntos, parámetro a partir del cual podremos calcular el valor de la resistividad en el punto medio del dispositivo y a una profundidad determinada.

Existen diferentes configuraciones a la hora de colocar los 4 electrodos, siendo las más utilizadas Wenner (la variante α) y Schlumberger, etc. Que luego veremos a detalle cada arreglo.

Escogido el arreglo y realizada la primera medida, si lo que se persigue es medir como varía la resistividad del terreno sobre la vertical del punto medio “o”, iremos expandiendo los electrodos que en el caso de usar el dispositivo Wenner, deberán ser los 4 (para mantener la condición de $AM=MN=NB$), mientras que para Schlumberger (o Wenner-Schlumberger) sólo expandiremos los electrodos A y B. Este análisis de la variación vertical del valor de la resistividad es lo que se conoce con el nombre de sondeo eléctrico vertical “SEV”.

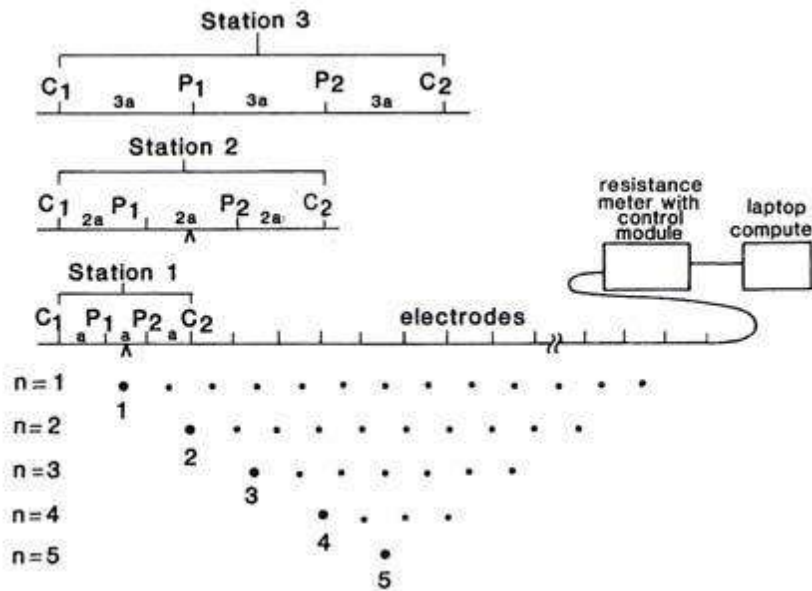
En cambio, si lo que pretendemos es medir la variación lateral de la resistividad del terreno, bastará con mover los 4 electrodos (tanto para Wenner como Schlumberger) hacia uno u otro lado. Esto es lo que se conoce como calicata eléctrica, proceso significativamente lento y pesado.

Partiendo de estos conceptos básicos, la gran innovación del método de Tomografía Electro Resistiva con respecto a los métodos convencionales, reside en que ahora tenemos ya varias estacas o electrodos clavados en el terreno y en base a un arreglo escogido, todas las medidas se realizarán de forma totalmente automática con un equipo especializado llamado tomógrafo eléctrico, es decir sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo.

Ello se debe a que por un lado trabajaremos con un gran número de electrodos en el terreno (dispuestos equiespaciadamente), y por otro lado a que nuestro dispositivo de medida de resistividades, se encargará de realizar automáticamente toda la secuencia de medidas preestablecida, formando para ello y según las especificaciones predefinidas, todas las posibles combinaciones de 4 electrodos. De esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente. En la figura 5 tenemos un ejemplo de la secuencia de medición utilizando el dispositivo Wenner.

Figura 5

Secuencia de medidas con dispositivo Wenner (Fuente. Manual RES2DINV)



2.1.3 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

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

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2.7)$$

Donde:

ρ = Resistividad (Ohmios metro Ohmm)

R = Resistencia (Ohmios Ohm)

l = longitud (m)

s = área (m²)

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (2.8)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro (Ωm). La conductividad se define como el inverso de la resistividad

$$\sigma = \frac{l}{\rho} \quad (2.9)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Estrictamente hablando todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

Una limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie, debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas.

Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías debido sólo a la topografía.

La Tomografía electro resistiva ERT es un método de resistividad multi electrodo, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas).

Todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado, esto nos permite realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo, en función del arreglo seleccionado y número de canales del equipo disponible obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución.

Este método nos permite obtener una sección 2D de resistividades reales del subsuelo, modelo a partir del cual podremos determinar los tipos de materiales existentes en la zona de estudio.

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

Cuando introducimos corriente eléctrica en el terreno, ésta se puede propagar de tres maneras diferentes a través del subsuelo: conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica (asociada a materiales con electrones libres, i.e. los metales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno).

La conducción electrolítica es el modo de propagación más importante, y en el que se basa los métodos de resistividad. En resumen, la resistividad es una propiedad física de un material que describe la capacidad para conducir corriente eléctrica.

2.1.4 FACTOR GEOMÉTRICO K

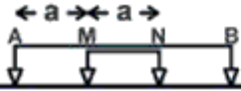
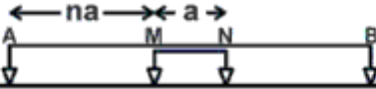
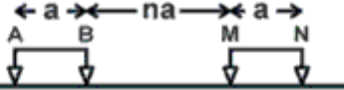
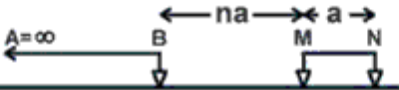
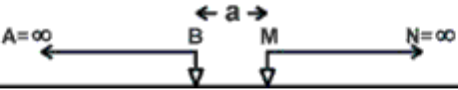
El factor geométrico K es un parámetro fundamental que se utiliza para relacionar las mediciones de resistividad eléctrica de un terreno con las propiedades físicas del mismo. Este factor toma en cuenta la geometría del sistema de electrodos utilizado durante la prospección.

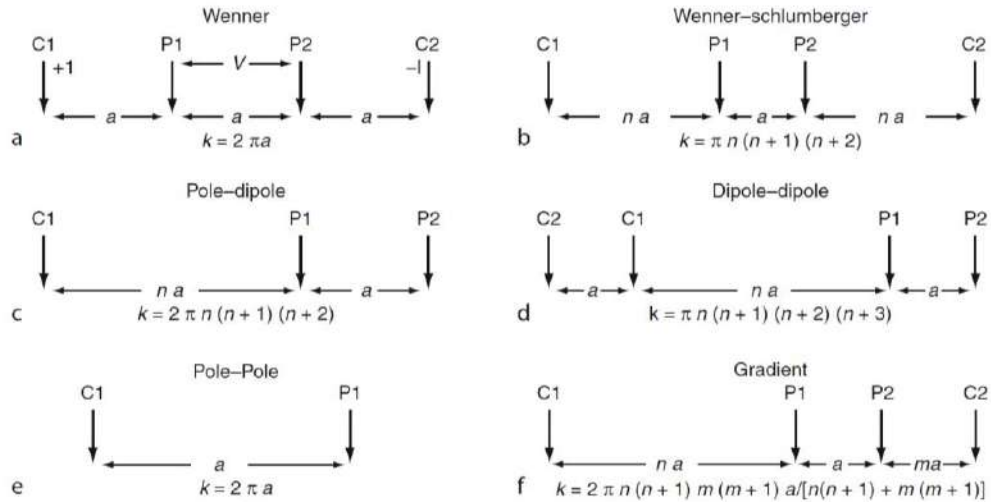
El valor de K varía según la disposición de los electrodos (por ejemplo, en configuraciones como Wenner, Schlumberger, etc.) y es esencial para calcular la resistividad aparente del suelo a partir de las lecturas obtenidas.

El factor geométrico K ayuda a convertir las lecturas de voltaje y corriente en un valor que refleja mejor la resistividad real del material subterráneo.

Figura 6

Valores de K (Factor Geométrico) para los principales arreglos.

| ARRAY | A, B = current M, N = potential | K |
|-----------------|--|--------------------|
| Wenner |  | $2\pi a$ |
| Schlumberger |  | $n(n+1)\pi a$ |
| Dipole - Dipole |  | $n(n+1)(n+2)\pi a$ |
| Pole - Dipole |  | $2n(n+1)\pi a$ |
| Pole - Pole |  | $2\pi a$ |



Nota. El factor geométrico K es diferente para cada arreglo y por ende el valor de resistencia multiplicado por el factor K nos da la resistividad aparente.

2.1.5 RESISTIVIDAD DE LAS AGUAS NATURALES

El agua pura es muy poco conductora, a causa de su muy reducida disociación, de modo que la resistividad del agua tridestilada es de unos 10^5 ohmm por lo que puede considerarse aislante. (Orellana, 1972).

El agua en la naturaleza presenta conductividad en mayor o menor grado, depende del tipo de roca en su entorno que haya entrado en contacto en su desplazamiento natural en el subsuelo.

De acuerdo al libro Prospección Geoeléctrica de Orellana (1972) se detalla los márgenes de variación de la resistividad de las aguas naturales.

| | |
|---|----------------------------------|
| Agua de lagos y arroyos de alta montaña | 10^3 a $3 \cdot 10^3 \Omega m$ |
| Aguas dulces superficiales | 10 a $10^3 \Omega m$ |
| Aguas salobres superficiales | 2 a $10 \Omega m$ |
| Aguas subterráneas | 1 a $20 \Omega m$ |
| Agua de lagos salados | 0.1 a $1 \Omega m$ |
| Aguas marinas | $\sim 0.2 \Omega m$ |
| Aguas de impregnación de rocas | 0.03 a $10 \Omega m$ |

2.1.6 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

La resistividad de las rocas depende de varios factores para que pueda atribuirse un solo valor, ni siquiera un margen moderadamente estrecho de variabilidad a cada tipo de roca, suele corresponder un campo de variación de unos tres órdenes decimales ya que, aunque la naturaleza sea la misma influyen condiciones locales de contenido de agua, conductividad de esta, tamaño de grano, porosidad, metamorfismo, efectos tectónicos. Etc. (Orellana, 1972).

Para campañas geofísicas, de menor escala, dentro de escenarios delimitados en cuencas sedimentarias el margen de variación es mucho más reducido.

Figura 7a

Rangos típicos de resistividades para rocas y suelos (Orellana, 1972).

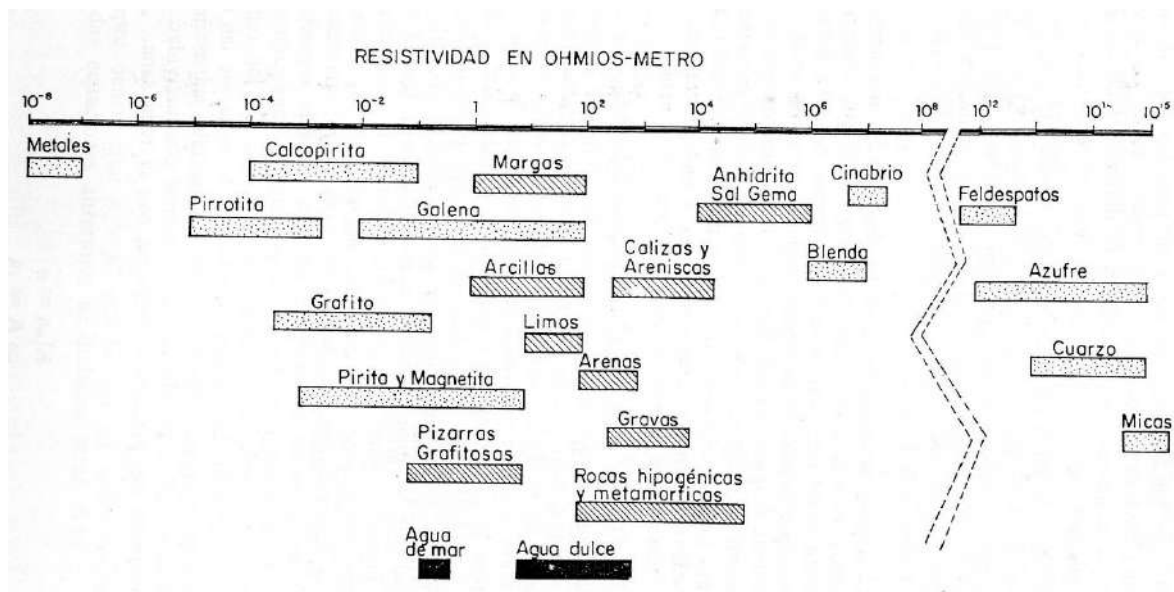


Figura 7b

Rangos de resistividad y conductividad para diferentes materiales geológicos. varios materiales diferentes pueden mostrar resistividades superpuestas. Palačky (1987) y norma ASTM D6431-18

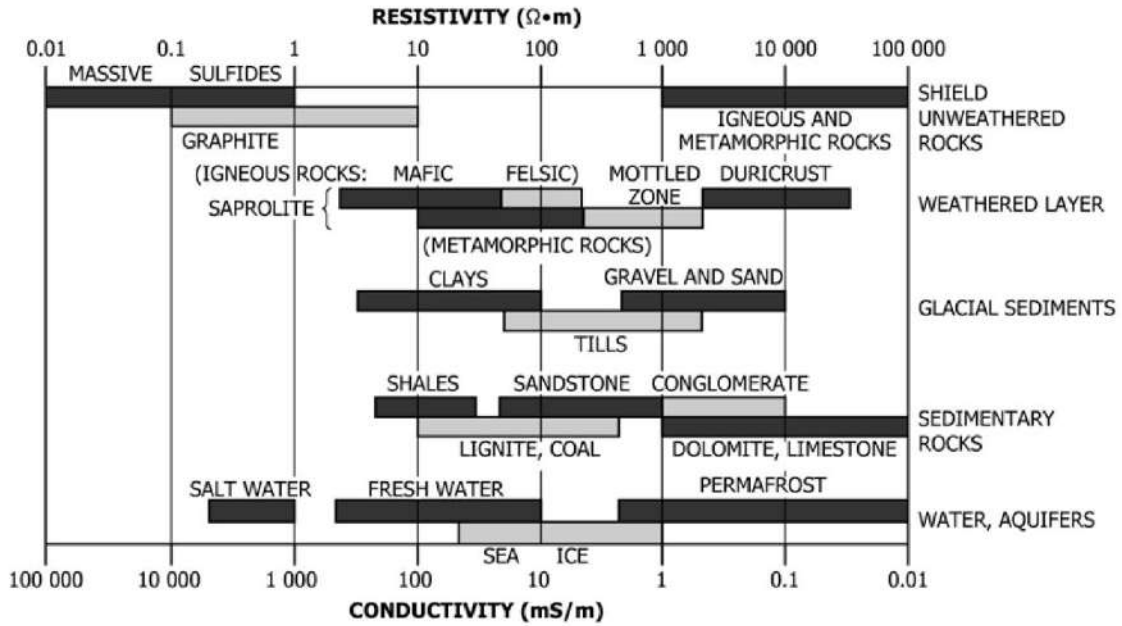


Tabla 1

Valores típicos de resistividad eléctrica para algunos materiales

| Common Materials | Cited Resistivity Values (Ωm) | | | | |
|------------------|---|--------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|
| | Loke (2002) | Gibson and George (2003) | SEGJ (2004) | Ewusi (2006) | AGI (2008) |
| Clay | 1 – 100 | 1 – 100 | 1 – 300 | 1 – 100 | 10 – 100 |
| Sand | 10 – 800 | 50 – 1050 | 1 – 1100 | 30 – 1050 | $600 - 1 \times 10^4$ |
| Lateritic Soil | ---- | ---- | ---- | 120 – 750 | ---- |
| Gravel | $600 - 10^4$ | 100 – 1400 | 20 – 7000 | 100 – 1400 | $600 - 1 \times 10^4$ |
| Mudstone | ---- | ---- | ---- | 20 – 120 | ---- |
| Siltstone | ---- | ---- | ---- | 20 – 150 | ---- |
| Limestone | 80 – 6000 | $50 - 10^6$ | ---- | ---- | $100 - 1 \times 10^6$ |
| Shale | 20 – 2000 | ---- | 3 – 200 | $20 - 2 \times 10^3$ | ---- |
| Sandstone | 10 – 5000 | $1 - 7.4 \times 10^6$ | 10 – 700 | 200 – 5000 | $100 - 1 \times 10^3$ |
| Granite | $5000 - 10^6$ | $100 - 10^6$ | 300 – 40000 | $3 \times 10^2 - 10^6$ | ---- |

Nota. (Loke 2002; Gibson and George 2003; Society of Exploration Geophysicist of Japan (SEGJ) 2004; Advanced Geosciences Incorporated (AGI) 2008) Según Adedibu Sunny Akingboye.

Tabla 2

Valores representativos de resistividad para suelo, agua y roca según norma ASTM – D6431-

18

| Regional Soil Resistivity | | Ωm |
|----------------------------|--|------------------|
| - wet regions | 50 to 200 | |
| - dry regions | 100 to 500 | |
| - arid regions | 200 to 1000 (sometimes as low as 50 if the soil is saline) | |
| Water Type | | Ωm |
| - soil water | 1 to 100 | |
| - rain water | 30 to 1000 | |
| - sea water | order of 0.2 | |
| - ice | 105 to 108 | |
| Earth Material Types | | Ωm |
| - igneous and metamorphic | 100 to 10,000 | |
| - consolidated sediments | 10 to 100 | |
| - unconsolidated sediments | 1 to 100 | |

Tabla 3

Valores típicos de resistividad eléctrica para diferentes tipos de suelo y roca.

| Material | Resistivity ($\Omega\text{ m}$) |
|--|-----------------------------------|
| Clay * | 3-30 |
| Saturated organic clay or silt † | 5-20 |
| Sandy clay * | 5-40 |
| Saturated inorganic clay or silt † | 10-50 |
| Clayey sand * | 30-100 |
| Hard, partially saturated clays † and silts, saturated sands and gravels † | 50-150 |
| Shales, dry clays, silts † | 100-500 |
| Sand, gravel * | 100-4000 |
| Sandstone * | 100-8000 |
| Sandstones, dry sands and gravels † | 200-1000 |
| Crystalline rocks * | 200-10000 |
| Sound crystalline rocks † | 1000-10000 |
| Rocksalt, anhydrite * | >1100 |

* Values from Dohr (1975).

† Values from Sowers and Sowers (1970).

2.1.7 FACTORES QUE AFECTAN A LA RESISTIVIDAD.

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno.

Algunos de los factores que lo influyen son :

18

- El grado de saturación del terreno.
- La temperatura.
- Porosidad y la forma de los poros.
- La salinidad del fluido.
- El tipo de roca.
- Los procesos geológicos que afectan a los materiales.
- La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Es precisamente esta estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, lo que permite el utilizar estos métodos de resistividad en la búsqueda de focos de filtración de agua en el subsuelo. En este sentido, incrementos del contenido en agua del terreno provocarán disminuciones de la resistividad.

En lo que concierne a los otros factores, destacar que la salinidad del fluido, la porosidad del terreno, y la temperatura (si bien éste es un factor poco importante), presentan un comportamiento análogo al del grado de humedad. Un caso curioso es el de la sal, ya que ésta se comporta como un excelente aislante en estado seco, mientras que en disolución confiere al terreno una alta conductividad.

2.1.8 RESISTIVIDAD APARENTE

El subsuelo en general no es un conjunto de capas homogéneas a lo largo de las estacas instaladas en campo, la homogeneidad lateral es difícil de esperar, es por eso que en geofísica de superficie se adopta el concepto de resistividad aparente ρ_a o resistividad ficticia para algunos autores.

Se define a la resistividad aparente en un semi-espacio homogéneo con heterogeneidades donde las lecturas cambian de una posición a otra obteniendo una ρ diferente a la del semi-espacio homogéneo. Esta variable es el valor de medición individual que se asocia al punto debajo del arreglo de electrodos y es función del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la ρ (Díaz Anaya, 2010). no es un promedio, ni media ponderada de las resistividades del entorno (Orellana,1972).

Lakubovskii y Liajov, 1980 describieron la ecuación general de la resistividad aparente como:

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I} \quad (2.10)$$

Donde:

ρ_a = resistividad aparente

k = factor geométrico

ΔU = Diferencia de potencial

I = Intensidad de corriente

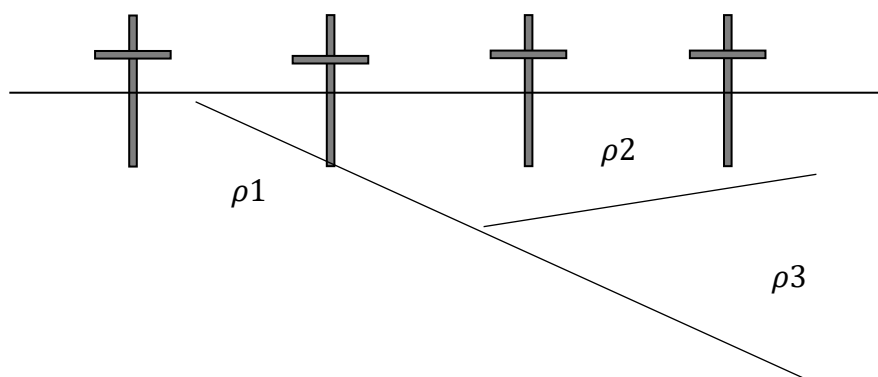
La cual nos indica que la resistividad aparente no depende de la intensidad de corriente (I) que se envía al terreno, ya que la variación de corriente origina otra variación proporcional a la diferencia de potencial (ΔU). Esta variable no es el promedio de los valores de resistividad (ρ) obtenidos del subsuelo, sino que cada valor de resistividad aparente (ρ_a) es una medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo empleado y de la distribución real de la resistividad (ρ).

En el caso particular de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera $\rho_a = \rho$ (Lakubovskii y Liajov, 1980).

Esto no se presenta con frecuencia en el subsuelo, debido a que el suelo no consta de capas homogéneas verticales ni laterales.

Figura 8

Medio heterogéneo en el subsuelo



2.1.9 TIPOS DE ARREGLOS

Los conjuntos de electrodos son diferentes arreglos de electrodos que se utilizan para realizar mediciones de resistividad geofísica. Los conjuntos de electrodos se desarrollaron para hacer que las mediciones de campo sean más eficientes y que la interpretación de los datos sea más fácil.

2.1.9.1 ARREGLO WENNER

El arreglo Wenner fue inventada en 1915 por el físico estadounidense Frank Wenner (1873-1954). Su desarrollo de un diseño de cuatro terminales que consiste en dos electrodos de inyección de corriente externos y dos electrodos de potencial internos igualmente espaciados que se conoció posteriormente como "Arreglo Wenner".

Hay tres opciones del arreglo el Wenner – Alpha, Wenner – Beta y Wenner - Gamma, el más conocido y empleado es el Wenner – Alpha.

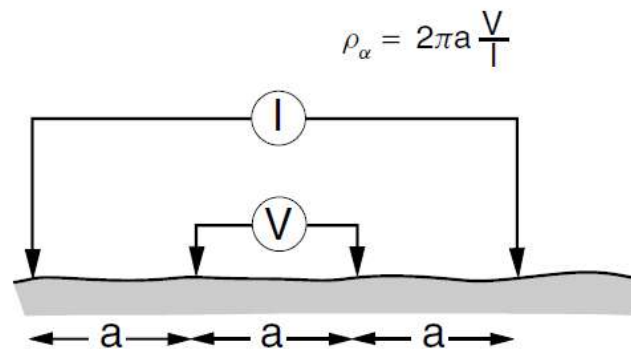
La matriz de electrodos de Wenner es la más simple de las matrices; en él, los cuatro electrodos, A, M, N y B, se colocan en línea y espaciados equidistantes entre sí. Los dos electrodos exteriores, A y B, son electrodos de corriente, y los dos electrodos interiores, M y N, son

electrodos de potencial. Con el conjunto de Wenner, la resistividad de las capas del subsuelo se encuentra aumentando la distancia entre los electrodos mientras se mantiene la ubicación del punto central del conjunto. La detección de cambios horizontales de resistividad se logra moviendo los cuatro electrodos a través de la superficie mientras se mantiene una separación constante entre los electrodos.

Buen arreglo para delimitar capas amplias y horizontales, pero no tan bueno para definir límites de características verticales o confinadas lateralmente. Tiene la mejor relación señal – ruido, por lo que también puede ser útil cuando se apunta a características particularmente profundas. Para tomografías ERT es lento ya que emplea un solo canal del equipo, es decir un dato por cada lectura. (Manual Terrameter LS 2, 2020)

Figura 9

Disposición de electrodos para el arreglo Wenner (J. Milsom, 2003)



El arreglo Wenner es relativamente sensible a los cambios verticales de resistividad debajo del centro del conjunto y menos sensible a cambios horizontales de resistividad (Loke,2002)

Este arreglo tiene la intensidad de señal más fuerte, es un factor importante si el estudio se realiza en áreas de alto ruido de fondo, como ductos con cargas estáticas o bien estructuras metálicas enterradas.

El factor geométrico para el arreglo Wenner es:

$$K= 2\pi a \quad (2.11)$$

Donde:

K= factor geométrico

a= espaciamiento de estacas

El arreglo Wenner emplea un solo canal del equipo empleado.

En un arreglo normal de cuatro cables y veintiuna estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 345 lecturas.

Adjunto en Anexo 1 el documento original del Sr. Frank Wenner que desarrolló el arreglo conocido a nivel global.

2.1.9.2 ARREGLO SCHLUMBERGER

El arreglo de Schlumberger lleva el nombre de Conrad Schlumberger, fundador de la compañía de servicios de campos petroleros Schlumberger de hoy en día y pionero de los métodos eléctricos a principios del siglo XX.

El arreglo Schlumberger es una matriz en la que se colocan cuatro electrodos en línea alrededor de un punto medio común. Los dos electrodos exteriores, A y B, son electrodos de corriente, y los dos electrodos interiores, M y N, son electrodos de potencial colocados juntos.

Con el arreglo de Schlumberger, para cada medición, los electrodos de corriente A y B se mueven hacia afuera a una mayor separación a lo largo del levantamiento, mientras que los electrodos de potencial M y N permanecen en la misma posición hasta que el voltaje observado se vuelve demasiado pequeño para medirlo (fuente). En este punto, los electrodos de potencial M y N se mueven hacia afuera a un nuevo espacio. Como regla general, la distancia razonable entre M y N debe ser igual o menor que una quinta parte de la distancia entre A y B al principio. Esta relación va hasta una décima o una quinceava parte dependiendo de la intensidad de la señal.

Este arreglo es excelente para delimitar capas amplias y horizontales, pero no tan bueno para definir límites de características verticales o confinadas lateralmente. Superado solo por Wenner en cuanto a la relación señal – ruido, por lo que también puede ser útil cuando se apunta a características particularmente profundas. Muy lento para tomografías ERT ya que emplea un solo canal del equipo (un solo dato en cada registro) (Manual Terrameter LS 2).

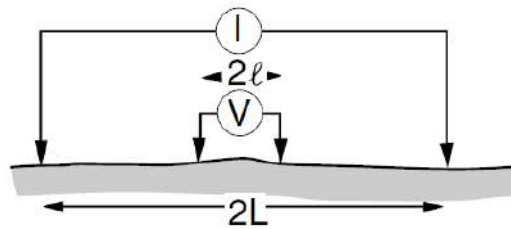
Es el único arreglo que rivaliza con el arreglo Wenner en cuanto a disponibilidad de material interpretativo, todo lo cual se relaciona con la matriz “ideal” con una distancia insignificante entre los electrodos internos. (J. Milsom, 2003)

Figura 10

Disposición de electrodos para el arreglo Schlumberger (J. Milsom, 2003)

$$\text{Exact } \rho_{\alpha} = \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \frac{V}{I}$$

$$\text{Ideal dipole '2l' } \rho_{\alpha} = \pi \frac{L^2}{2l} \frac{V}{I}$$



El factor geométrico K es:

$$K = \pi \frac{L^2 - l^2}{2l} \quad (2.12)$$

Este arreglo emplea un solo canal del equipo empleado.

En un arreglo normal de cuatro cables y veintiuna estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 748 lecturas.

2.1.9.3 ARREGLO DIPOLO – DIPOLO

Este arreglo es popular en trabajos de polarización inducida (PI) porque la separación completa de los circuitos de corriente y voltaje reduce la vulnerabilidad al ruido inductivo. Se encuentra disponible una cantidad considerable de material interpretativo. La información de diferentes

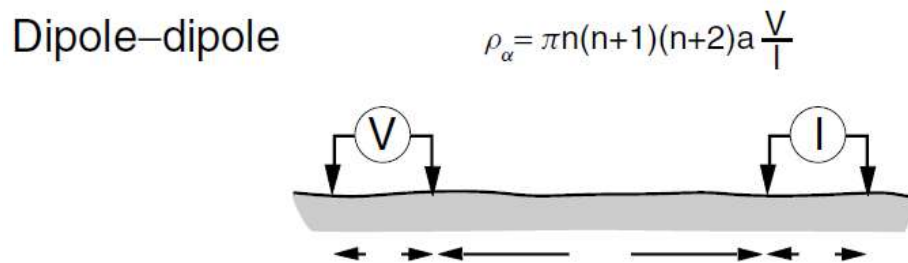
profundidades se obtiene cambiando n. En principio, cuanto mayor sea el valor de n, más profunda será la penetración del camino de corriente muestreado. Los resultados generalmente se representan como pseudosecciones.

Excelente para localizar características verticales o confinadas lateralmente, pero no tan bueno para definir capas horizontales. La mala relación señal – ruido significa que este protocolo puede ser problemático en entornos eléctricamente ruidosos o si se apunta a objetivos particularmente profundos.

La separación de los electrodos de corriente C1C2 de los P1P2 de potencia lo hace atractivo para la PI, rápido para tomografías ya que es una matriz compatible con múltiples canales. (Manual Terrameter LS 2)

Figura 11

Disposición de electrodos para el arreglo Dipolo – Dipolo (J. Milsom, 2003)



Este arreglo emplea cuatro canales si el equipo empleado cuenta con los canales.

En un arreglo normal de cuatro cables y veintiún estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 1149 lecturas.

2.1.9.4 ARREGLO POLO - DIPOLO

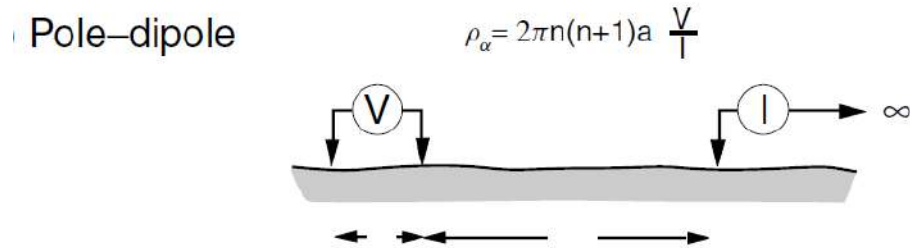
Este arreglo incluye un electrodo al infinito que con frecuencia es $3AB/2$ de forma perpendicular a la línea, logra penetrar más profundo que un arreglo Wenner, Schlumberger y Gradiente.

La distancia a un electrodo fijo "en el infinito" debe ser al menos 10 veces e idealmente 30 veces la distancia entre dos electrodos móviles cualesquiera. Los cables necesarios pueden impedir el

trabajo de campo y también pueden actuar como antenas, recogiendo Señales electromagnéticas perdidas (ruido inductivo) que pueden afectar las lecturas (J. Milsom, 2003).

Figura 12

Disposición de electrodos para el arreglo Polo – Dipolo (J. Milsom, 2003)



El factor geométrico K es:

$$K = 2\pi n(n+1)a \quad (2.13)$$

Donde:

K = Factor geométrico

n =

a = espaciamento

Este arreglo emplea todos los canales disponibles del equipo.

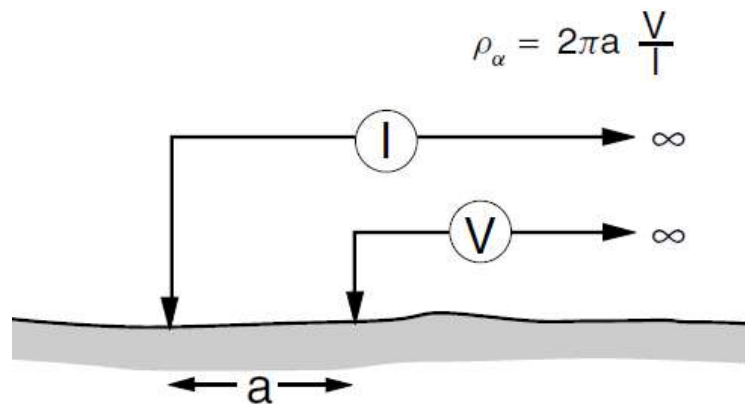
En un arreglo normal de cuatro cables y veintiuna estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 1092 lecturas.

2.1.9.5 ARREGLO POLO - POLO

Este arreglo emplea dos electrodos al infinito, comúnmente $3AB/2$ del centro del equipo hacia adelante (frente del equipo) y hacia atrás (lado posterior del equipo).

Figura 13

Disposición de electrodos para el arreglo Polo – Polo (J. Milsom, 2003)



En un arreglo normal de cuatro cables y veintiuna estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 860 lecturas.

2.1.9.6 ARREGLO GRADIENTE

El arreglo gradiente fue desarrollado por el Prof. Dahlin Torleif y Zhou Bing (Multiple – Gradient array measurement for multichannel 2D resistivity imaging Dahlin, 2006) el mismo que combina las características de los arreglos Polo – Dipolo (sin electrodo remoto), Wenner y Schlumberger.

El arreglo Gradiente es similar a la matriz de Schlumberger. La diferencia es que la matriz de Schlumberger registra solo el dipolo receptor central, mientras que la matriz de gradiente mide todos los dipolos adyacentes de un electrodo transmisor al otro, incluido el dipolo central.

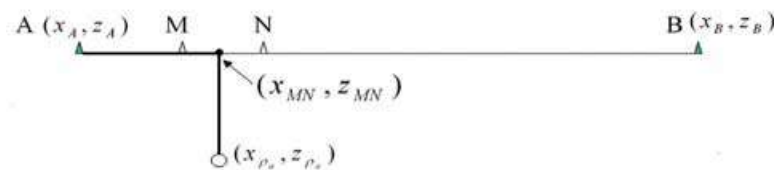
Para tomar una medida con el arreglo gradiente, se toma una lectura del campo potencial entre dos electrodos de corriente uno al lado del otro (que forman un dipolo). La siguiente lectura va un paso a la derecha y continúa hacia abajo en la fila de electrodos. Este proceso se repite hasta

que haya mapeado toda el área que está examinando. Los cambios laterales en el campo potencial del arreglo se miden entre el dipolo A y B del transmisor. El registro de los cambios laterales a menudo se denomina método de creación de perfiles.

Este arreglo combinado incluye gran cantidad de datos, información lateral y profundidad durante el registro de datos de campo.

Figura 14

Matriz de gradiente para el cálculo de la pseudo sección (Dahlin, 2006)



Como es un arreglo no clásico, el documento de investigación resumen en lo siguiente:

- El arreglo gradiente proporciona una adquisición de datos de campo muy estable, con una buena relación señal/ruido.
- No requiere un electrodo remoto, pero hasta cierto punto tiene una sensibilidad similar a la del conjunto polo-dipolo.
- Los modelos invertidos basados en datos de matrices de gradientes múltiples generalmente comparan bien con los basados en datos de Wenner y Dipolo – Dipolo.
- La matriz de gradientes múltiples es muy adecuada para la adquisición de datos multicanal, pero también es una buena alternativa para la adquisición de datos de un solo canal.

El registro de datos empleando en este arreglo es rápido y ampliamente usado en equipos de varios canales porque depende del número de canales disponibles en el equipo, a mayor número de canales el registro toma menos tiempo en campo y gran cantidad de datos, posiblemente en un 50% más de datos.

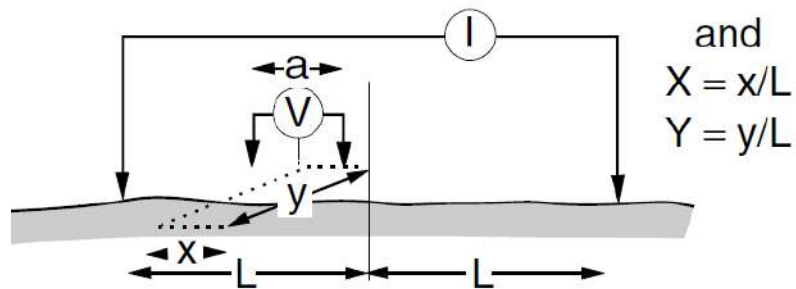
Proporciona un buen equilibrio entre los demás arreglos o protocolos, tiene buena relación señal – ruido, es compatible con múltiples canales y proporciona una buena definición de las estructuras horizontales y verticales (Manual Terrameter LS 2).

Figura 15

Disposición de electrodos para el arreglo gradiente (J. Milsom, 2003)

$$\text{Ideal dipole 'a'} \quad \rho_{\alpha} = \pi \frac{L^2}{a} K \frac{Y}{I}$$

$$\text{where } K = 2\pi \left[\frac{1-X}{[y^2 + (1-X)^2]^{3/2}} + \frac{1+X}{[y^2 + (1+X)^2]^{3/2}} \right]$$



Este arreglo emplea todos los canales disponibles del equipo empleado.

En un arreglo normal de cuatro cables y veintiuna estacas en campo (4x21) los datos de campo registrados son aproximadamente 730 lecturas.

La versión GradientXL registra aproximadamente 1050 datos en las mismas condiciones mencionadas anteriormente.

2.1.10 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ARREGLO

Tabla 4

Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los diferentes arreglos

| ARREGLO | VENTAJAS | DESVENTAJAS | RELACIÓN SEÑAL - RUIDO |
|-----------------|--|--|--|
| Wenner | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arreglo clásico. ▪ Sensible a las mediciones con respecto a los espaciamientos entre electrodos ▪ Trabaja en escenarios muy ruidosos (carga estática, ductos, mallas, etc.) ▪ Sensitiva a cambios verticales (estructuras horizontales) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cobertura horizontal es pobre a medida que incrementa “a”. ▪ Menos cantidad de datos para el proceso de inversión (aprox. 50% menos que Sch). ▪ Menor profundidad en comparación a otros arreglos. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Óptima relación señal - ruido. |
| Schlumberger | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arreglo simétrico. ▪ Excelente para medios estratificados. ▪ Datos balanceados. ▪ La profundidad de investigación es aprox. 10% mayor en comparación al arreglo Wenner, para la misma distancia entre electrodos. ▪ Dato limpio de campo. ▪ Buena cantidad de datos de campo. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor información lateral. ▪ Trabaja con un solo canal del equipo (mayor tiempo en campo). | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Regular (intensidad de la señal media) |
| Gradiente | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arreglo combinado que tiene buena profundidad de investigación y buena información lateral. ▪ Emplea todos los canales disponibles del equipo (menos tiempo en campo). ▪ Buena resolución. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ No es un arreglo clásico. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Regular |
| Dipolo - Dipolo | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arreglo simétrico. ▪ Mejor resolución. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inestable para situaciones complejas. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ |
| Polo - Dipolo | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena cobertura horizontal. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un electrodo remoto (infinito). | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena. |

| ARREGLO | VENTAJAS | DESVENTAJAS | RELACIÓN SEÑAL - RUIDO |
|----------------|--|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Buena profundidad. ▪ Gran número de datos para el proceso de inversión. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arreglo asimétrico. | |
| Polo - Polo | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor profundidad de investigación. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dos electrodos remotos (infinito). ▪ Posible afectación de ruido telúrico. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande (sensitiva a ruido telúrico). |

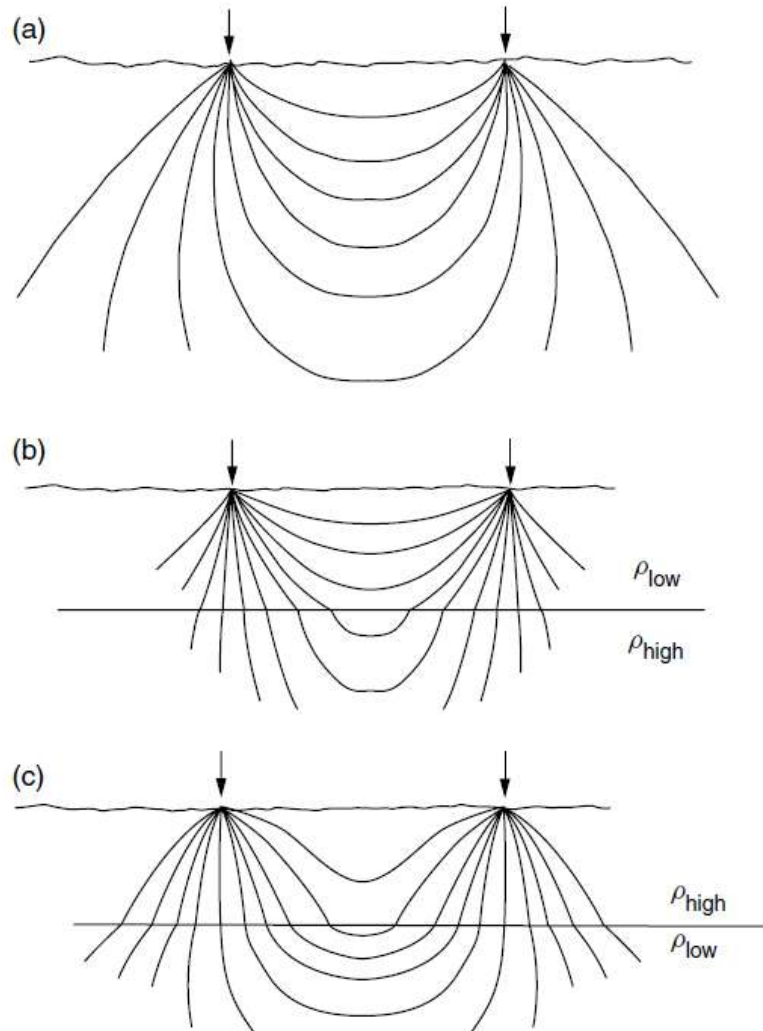
Nota. Fuente reportes ABEM y propia.

2.1.11 DIRECCIÓN DE FLUJO

La dirección de flujo depende del material por el que circula la corriente, existe mayor concentración cuando el material de menos resistivo y mayor separación cuando las resistividades son mayores como el gráfico adjunto. Como los terrenos con frecuencia no son homogéneos, el flujo de corriente depende del material, siendo por lo general semicírculos viéndolo de frente. En el gráfico siguiente se ve un escenario con dos tipos de materiales.

Figura 16

Patrones de flujo de corriente para (a) semiespacio uniforme; (b) terreno de dos capas con menor resistividad en la capa superior y (c) terrenos de dos capas con mayor resistividad en la capa superior.



Nota. Fuente J. Milsom, 2003

2.1.12 PROFUNDIDAD DEL ESTUDIO

Los arreglos escogidos para el registro de campo toman en cuenta el detalle de la información que se requiere y por ende la profundidad.

Cada arreglo tiene una profundidad promedio de penetración, todo depende de cuantos cables disponemos, espaciamiento entre estacas, en el siguiente cuadro resumimos una profundidad promedio y en Anexo x está el detalle de las profundidades para cada tipo de arreglo.

Tabla 5

Profundidad de penetración de diferentes arreglos

| Arreglo | Profundidad de penetración |
|-----------------|-----------------------------------|
| Schlumberger | $0.19 \times L$ |
| Wenner | $0.17 \times L$ |
| Gradiente | $\sim 0.19 \times L$ |
| Dipolo – Dipolo | $0.21 - 0.22 \times L$ |
| Polo – Dipolo | $\sim 0.25 \times L$ |
| Polo – Polo | $\sim 0.30 \times L$ |

Nota. Donde L es la longitud total del cable, Fuente Presentaciones ABEM

2.1.13 LEY DE ARCHIE

Esta ley se emplea con más frecuencia en la industria del petróleo para describir la relación entre la resistividad eléctrica de un sedimento saturado de agua y su saturación de agua.

Esta ley da la relación entre la resistividad de una roca porosa y el factor de saturación del fluido es aplicable para ciertos tipos de rocas y sedimentos, particularmente aquellos que tienen un bajo contenido de arcilla. (Geotomo Software RES2DINV, 2011).

En este caso, se supone que la conducción eléctrica se produce a través de los fluidos que llenan los poros de la roca.

Dado que la resistividad eléctrica de la mayoría de los minerales es alta (excepción: arcilla, minerales metálicos y grafito), la corriente eléctrica fluye principalmente a través del agua de los poros.

Según la ley de Archie, la resistividad del agua saturada el material libre de arcilla se puede describir como:

$$\rho_{\text{ACUIFERO}} = \rho_{\text{AGUA}} \times F \quad (2.15)$$

Donde:

ρ_{ACUIFERO} = resistividad específica de arena saturada de agua

ρ_{AGUA} = resistividad específica del agua de los poros.

Para material parcialmente saturado, F puede reemplazarse por $\frac{F}{SW^2}$ (SW = grado de saturación = fracción de espacio poroso lleno de agua).

El factor de formación **F** combina todas las propiedades del material que influyen flujo de corriente eléctrica como porosidad \emptyset , forma de poro y cementación diagenética.

$$F = a \cdot \emptyset^{-m} \quad (2.16)$$

Se utilizan diferentes expresiones para la constante del material m como porosidad exponente, factor de forma o (engañoso para depósitos) grado de cementación (R. Kirsch, 2009)

Los factores que influyen en m son, por ejemplo, la geometría de los poros, la compactación, la composición mineral y las propiedades aislantes de la cementación (Ransom 1984).

La constante a refleja la influencia de los granos minerales en el flujo de corriente. Si los granos minerales son perfectos aislantes (principal condición para la validez de la ley de Archie), entonces $a = 1$. Si los granos minerales contribuyen a la conductividad eléctrica hasta cierto grado, la constante a se reduce en consecuencia. (R. Kirsch, 2009)

Los valores típicos para a y m son (según Schön 1996): arenas sueltas, $a = 1.0$, $m = 1.3$, y areniscas, $a = 0.7$, $m = 1.9$. Más ejemplos para a y m están dados por Worthington (1993).

2.1.14 POLARIZACIÓN INDUCIDA PI

El método de polarización inducida llamado PI es empleado principalmente en prospección minera para la detección de cuerpos que contienen minerales diseminados que presentan conductividad electrónica, es el único método que permite la detección directa de minerales diseminados de tipo pórfido, tales como el cobre y los depósitos de plomo-zinc diseminados en rocas carbonatadas. Estos minerales están presentes en forma de pequeñas partículas y vetillas

de modo que la superficie de contacto entre los conductores electrónicos y electroquímicos es mayor y consecuentemente favorable para el fenómeno de sobrevoltaje.

La tierra se puede comparar como un condensador que se carga cuando se activa la corriente y se descarga cuando se apaga, eso se conoce como efecto PI.

Si se interrumpe una corriente eléctrica en el suelo, el voltaje a través de los electrodos de potencial no cae a cero instantáneamente, sino que se relaja durante varios segundos o minutos a partir de un valor inicial que es una pequeña fracción de voltaje (V) que existía cuando fluía la corriente (Parasnis, 1997)

Este fenómeno ha sido conocido y estudiado por profesionales electroquímicos que estudian el paso de la corriente eléctrica en los sistemas de electrodo y electrolito y en este sentido se ha denominado sobretensión, que existe un efecto muy similar a los dieléctricos puros. (Parasnis, 1997).

El fenómeno de polarización se presenta al existir fluidos al interior de los poros de las rocas que permiten el desplazamiento de iones cuando se aplica una corriente eléctrica en superficie. (Ambrus, 2012)

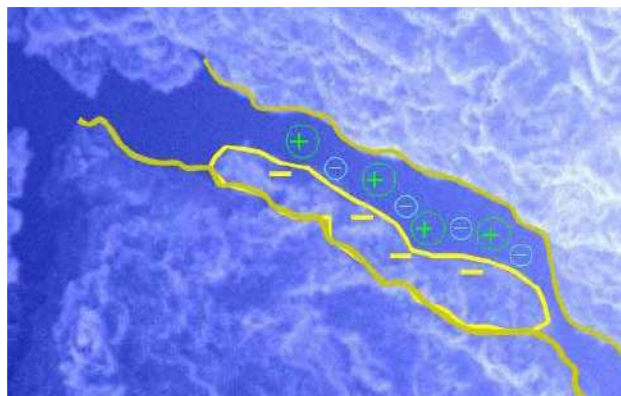
Las magnitudes del fenómeno de polarización dependen básicamente de la conductividad electrónica de los minerales diseminados, que generalmente es bastante alta.

Los materiales que conforman el subsuelo consisten en minerales metálicos y no metálicos que independiente al tipo, provocan con su presencia efectos de polarización inducida.

La aplicación de la polarización inducida en la ingeniería civil es básica porque desde la superficie del suelo, y previo a un programa de perforación, es factible distinguir la presencia de cuerpos de arcilla confinados por arenas, gravas o roca.

Figura 17

Esquema físico y químico representativo de un medio geológico



2.1.15 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA POLARIZACIÓN INDUCIDA

Existen cuatro técnicas de medida en la polarización, mencionamos brevemente cada una:

“Dominio del Tiempo”. (o transitorios de pulso) El efecto se detecta como un voltaje pequeño de decaimiento después de que una corriente continua cesó de aplicarse.

“Dominio de frecuencia o Frecuencia Variable”. Donde el efecto de polarización inducida se detecta como un decremento de la resistividad aparente al aumentar la frecuencia, se mide a dos o más frecuencias, normalmente inferiores a 10 Hz (Patella y Schiavone, 1977).

En la técnica de “Dominio de fase”, el desfase entre la corriente aplicada y el voltaje medido es un diagnóstico de la mineralización del subsuelo.

“Polarización Inducida Espectral”. En esta modalidad reciente el efecto se detecta como retraso en la fase del voltaje de recepción respecto al de transmisión. En Polarización Inducida espectral, la fase y la magnitud se miden sobre un rango de frecuencias de 10^{-3} a 4×10^3 Hz.

2.1.16 TIPOS DE POLARIZACIÓN

Solamente dos tipos de polarización se han reconocido: la de Polarización de Electrodo (PE) y Polarización de Membrana (PM).

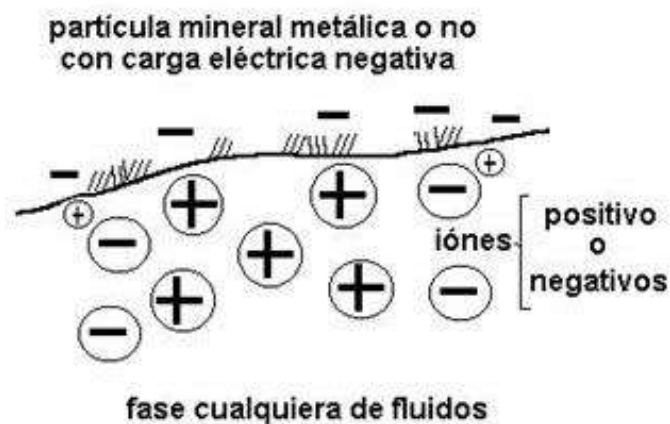
2.1.16.1 POLARIZACIÓN DE ELECTRODO (PE)

La polarización de electrodo se produce cuando entran en contacto partículas minerales y un electrolito. en la interface, se desarrolla una doble capa electroquímica que se comporta símil a un condensador, el cual almacena energía.

Los iones al encontrarse con partículas metálicas producen el desplazamiento de cargas eléctricas al interior de las partículas metálicas originando el fenómeno de polarización electrónica (Ambrus, 2012).

Figura 18

Polarización de electrodo (PE)



Cuando la corriente pasa por un electrodo metálico (conductor electrónico) sumergido en un electrolito, la carga puede acumularse continuamente en la interfaz cuando todos los procesos en la reacción electrolítica no son igualmente rápidos, esto produce la polarización de electrodo. (Parasnis, 1997).

La polarización del electrodo es un efecto similar que ocurre cuando hay minerales presentes, los granos metálicos conducen carga por conducción electrónica, mientras que la conducción electrolítica tiene lugar a su alrededor. Sin embargo, el flujo de electrones a través del metal es mucho más rápido que el flujo de iones en el electrolito, por lo que se acumulan cargas opuestas en las caras superficies de un grano metálico que bloquea el flujo de iones a través del fluido de los poros. Se genera una sobretensión durante algún tiempo después de conectar la corriente

externa. El tamaño del efecto es proporcional a la concentración metálica. Después de cortar la corriente, los iones acumulados se dispersan y la sobretensión decae lentamente. (W. Lowrie, 2007).

2.1.16.2 POLARIZACIÓN DE MEMBRANA (PM)

La polarización de membrana constituye el potencial de fondo, o la polarización normal del medio, y se puede observar aun en ausencia de minerales conductores de electricidad (Parasnis, 1997).

Las arcillas hidratadas también presentan el fenómeno de polarización al existir en su superficie el desplazamiento de cationes. La polarización de las arcillas se conoce como polarización de membrana y su efecto macroscópico observable en superficie es idéntico e indistinguible de la polarización electrónica producida por los granos metálicos de los sulfuros diseminados. (Ambrus 2012).

Las superficies de las arcillas y otros minerales laminares o fibrosos están cargadas negativamente y causan la polarización de membranas en rocas con espacios porosos pequeños. Los iones positivos en las aguas de formación en tales espacios se juntan cerca de las paredes de los poros, formando una doble capa eléctrica.

Figura 19

Polarización de membrana

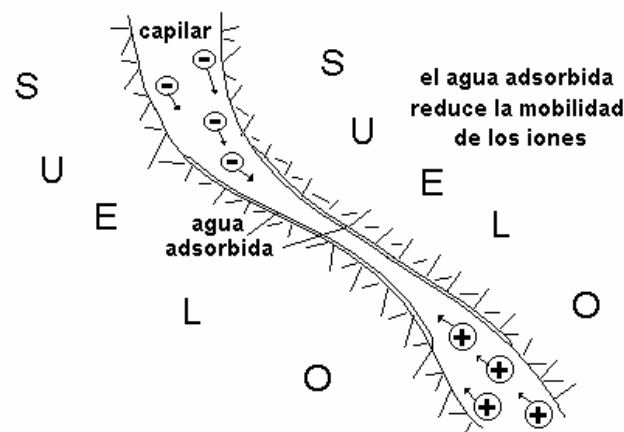
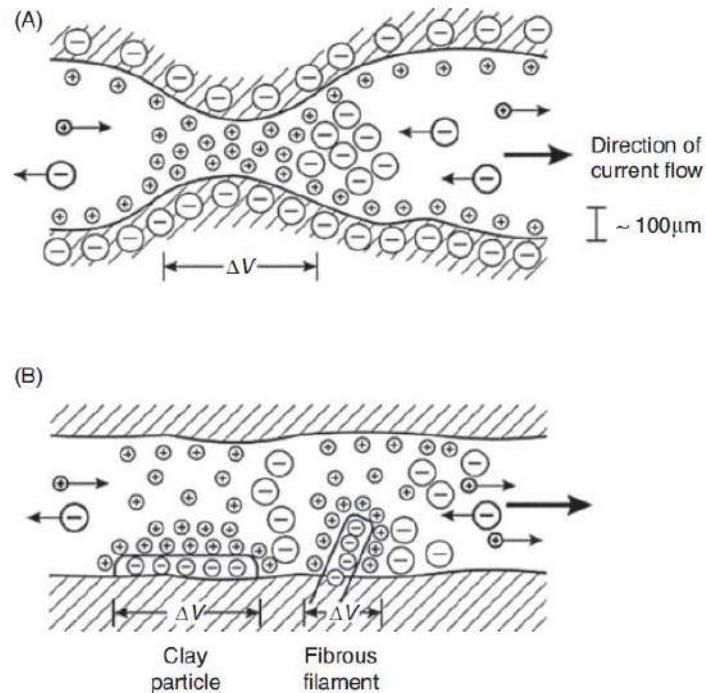


Figura 20

Desarrollo de polarización de membrana asociada con (a) una constricción dentro de un canal entre granos minerales, y (b) partículas de arcilla cargadas negativamente (Fraser et al., 1964) y elementos fibrosos a lo largo de los lados de un canal.



Este fenómeno se debe principalmente a la presencia de arcillas. La figura ilustra de manera esquemática este tipo de polarización.

La presencia de partículas de arcilla parece ser una condición necesaria para este efecto, ya que no se observa en arena de cuarzo limpia o medios similares desprovistos de minerales arcillosos. (Parasnis, 1997).

Las arcillas hidratadas, presentan una importante respuesta a la polarización ya que en su superficie permiten el movimiento de cationes dando origen a una polarización de tipo membrana. (Ambrus, 2012)

La superficie de las partículas de arcilla, los bordes de los materiales estratificados y fibrosos o las caras de clivaje de los cristales normalmente tienen cargas negativas desequilibradas que atraen una nube de iones positivos de un electrolito circundante. Cuando se fuerza una corriente

eléctrica a través de un sistema de arcilla y electrolito, por ejemplo, los iones positivos pueden pasar fácilmente a través de esta nube, pero los iones negativos quedan bloqueados, formando zonas de concentración de iones.

El retorno de los iones a la distribución de equilibrio anterior después que se detiene la corriente constituye una corriente residual y aparece como el efecto PI. (Parasnis, 1997).

Los minerales arcillosos pueden dar lugar a efectos PI de este tipo, que se explican por una acumulación de carga de iones por iones en la superficie cargada eléctricamente de las partículas de arcilla.

Esta característica hace que el método sea interesante para la discriminación entre estratos de baja resistividad con o sin arcilla, lo que es de gran importancia para las características hidráulicas de las aguas subterráneas.

La polarización de la membrana es una característica de la conducción electrolítica. Surge de diferencias en la capacidad de los iones en los fluidos de los poros migran a través de una roca porosa. los minerales en una roca generalmente tienen una carga superficial negativa y atraen así iones positivos en el fluido de los poros. Se acumulan en la superficie del grano y se extienden hacia el área poros adyacentes, bloqueándolos parcialmente. Cuando un voltaje externo se aplica, los iones positivos pueden pasar a través de la "nube" de carga positiva pero los iones negativos se acumulan, a menos que el tamaño de los poros es lo suficientemente grande como para permitirles evitar el bloqueo. El efecto es como el de una membrana que selectivamente permite el paso de un tipo de ion. Esto causa temporalmente acumulaciones de iones negativos, dando una distribución iónica polarizada en la roca. El efecto es más pronunciado en rocas que contienen minerales arcillosos; en primer lugar, porque el grano y el tamaño de los poros es pequeño y, en segundo lugar, porque los granos de arcilla están relativamente fuertemente cargados y adsorben iones en sus superficies. La acumulación iónica tarda poco tiempo después el voltaje está conectado; cuando se apaga la corriente, los iones regresan a su posición original. (W. Lowrie, 2007)

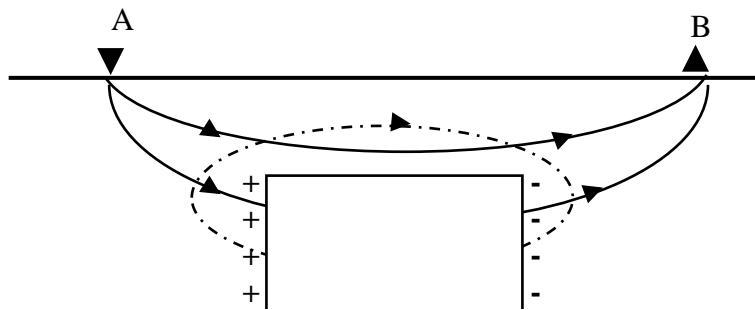
Los dos efectos responsables de la polarización inducida son indistinguibles a nivel de medición.

2.1.17 POLARIZACIÓN INDUCIDA NEGATIVA

Se puede apreciar en la Fig. 21 que la corriente de descarga es en la misma dirección que la corriente suministrada a tierra. Esto significa que las ecuaciones ΔV y V de la fórmula $(P_t^T)_a = \Delta V_t/V_0^T$ son del mismo signo y el efecto PI es positivo (Parasnis, 1997).

Figura 21

Difusión de iones producidos por el voltaje PI



Esto significa que el ΔV y V de la ecuación:

$$(P_t^T)_a = \Delta V_t/V_0^T \quad (2.17)$$

Donde:

$(P_t^T)_a$ = Polarizabilidad aparente para un determinado tiempo

T = Tiempo en segundos

ΔV = Voltaje medido en milivoltios

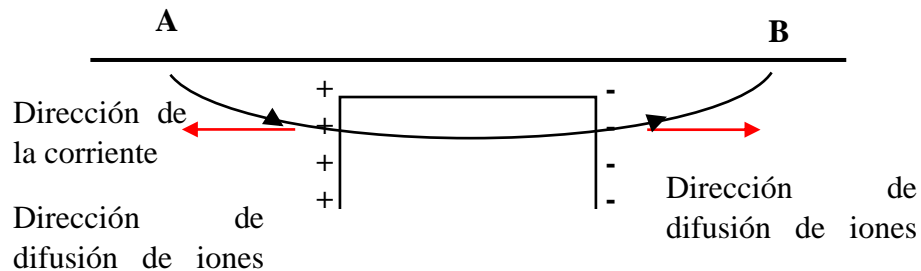
V = Voltaje medido en Voltios

V_0^T = Voltaje justo antes de la corriente al terreno en una duración T

Sin embargo, hay casos donde se observan valores negativos para PI, son casi siempre producto del efecto geométrico de objetivos de PI poco profundos o se deben a un fuerte acoplamiento electromagnético (Parasnis, 1997), se puede entender fácilmente como el gráfico siguiente:

Figura 22

Origen del PI negativo (Parasnis, 1997)



Aquí los iones positivos en el lado izquierdo encuentran más fácil difundirse hacia la izquierda en lugar de a través del paso estrecho que presenta una alta resistencia por encima del cuerpo polarizado y de manera similar, los iones negativos en el lado derecho difunden hacia la derecha.

En ambos casos, la corriente eléctrica en difusión es opuesta en dirección a la corriente de excitación.

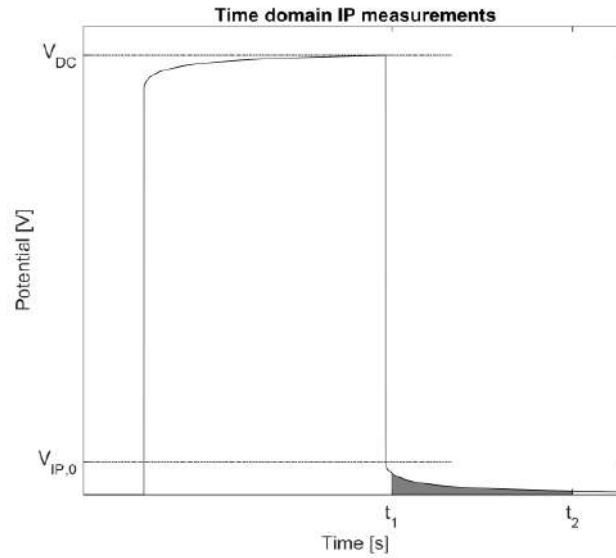
Los datos negativos se producen cuando las zonas impenibles se encuentran predominantemente en zonas de sensibilidad negativa, estos datos de PI negativos contienen información esencial y la exclusión de estos significa eliminar una parte importante de la información para la inversión. Además, cargabilidad negativa intrínseca ha sido registrado por la presencia de arcillas. (Dahlin, 2015).

2.1.18 CARGABILIDAD

La cargabilidad (mV/V) es una propiedad material que cuantifica la capacidad del material para almacenar energía. La cargabilidad se determina en el dominio del tiempo considerando la respuesta potencial transitoria del subsuelo tras un cambio en la corriente inyectada (Figura 23).

Figura 23

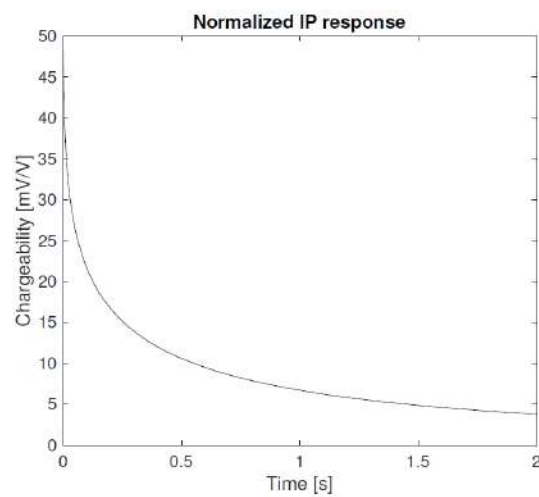
Potencial teórico de forma de onda completa para mediciones DCIP con indicación de parámetros importantes para la evaluación de datos.



Al igual que la resistividad y la resistividad aparente, no es posible directamente la cargabilidad del subsuelo a partir de las mediciones de DCIP a menos que sea homogéneo en términos de cargabilidad, por lo que normalmente es necesaria la inversión. (Olsson 2016).

Figura 24

Una respuesta pi normalizada generada a partir de la medición modelada.



De acuerdo a Murali y Patangay (2006) el agua subterránea tiene un valor bajo de cargabilidad igual a 0 msec.

Tabla 6

Cargabilidad de varios materiales (Murali y Patangay. 2006)

| Materials | Chargeability (MS) |
|-----------------------|--------------------|
| Groundwater | 0 |
| Alluvium | 1 - 4 |
| Gravels | 3 - 9 |
| Precambrian Volcanics | 8 - 20 |
| Precambrian Gneisses | 6 - 30 |
| Schists | 5 - 20 |
| Sandstone | 3 - 12 |
| rightArgillites | 3 - 10 |
| Quartzite | 5 - 12 |

De acuerdo al gráfico de GuidelineGEO, un fabricante de equipos de geofísica desde 1923, la cargabilidad de las arcillas es mayor que la cargabilidad del agua dulce y agua salada.

Figura 25

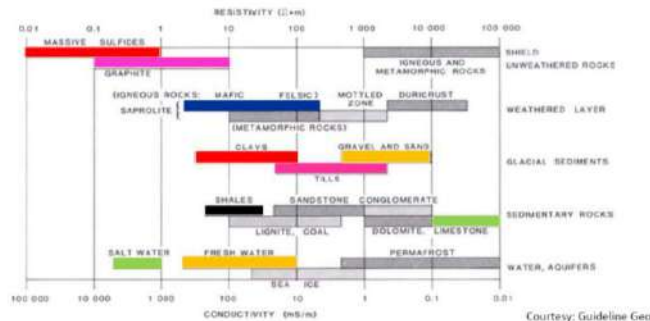
Gráfico de resistividad de diferentes materiales vs. cargabilidad

Induced Polarization

The following materials show high chargeability:

- Sulfide minerals
- Clay-rich materials
- Graphite

Chargeability



De acuerdo a varias investigaciones, entre ellas de Suryadi, 2018 las areniscas, el estrato que contiene agua subterránea o agua dulce es compatible con valores de 0 – 2 msec de cargabilidad.

2.1.19 CARGABILIDAD NORMALIZADA

La cargabilidad es fuertemente correlacionado con la resistividad y sugirió dividir el resultado de PI por la resistividad para dar un PI normalizado (PIN) con la unidad en Siemens, mS/m. Demostraron que la polarización inducida normalizada es proporcional a la conductividad (Slater y Lesmes, 2002). Este método destaca áreas con diferentes propiedades de conductancia superficial, mientras Eliminación de la conductancia causada por el líquido en el poro espacios (Magnusson, 2010).

El rango empleado es variable, con frecuencia el rango inferior es de 0.01 hasta 0.5 o rangos que puedan reflejar mejor la anomalía.

La cargabilidad normalizada muestra una respuesta consistente cuando alcanza capas con alto contenido de arcilla (A. Gonzales, 2016)

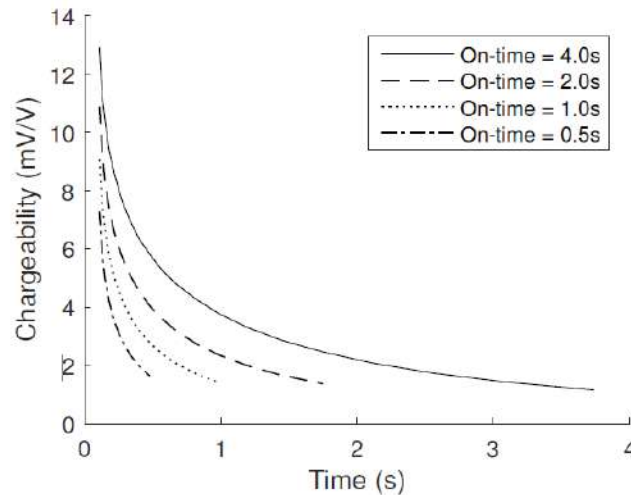
2.1.20 CURVA DE DECAIMIENTO

La Figura 26 muestra el decaimiento de PI de campo adquirido para el mismo cuádruple de los cuatro diferentes conjuntos de datos puntuales, en los valores iniciales de los decaimientos de PI medidos son aumentando con el aumento de tiempo.

Además, las magnitudes de los más largos las caídas en el tiempo son más altas que para las más cortas tiempos de activación para la duración total de las caídas.

Figura 26

Diferentes gráficos de la curva de decaimiento en función del tiempo (Danhlin, 2003)



2.1.21 ANÁLISIS DE LA CURVA DE DECAIMIENTO

Las respuestas de las curvas de decaimiento son variables, todas dependen del tipo de material por el que ocurre el efecto, cuando el material es dieléctrico, la polarización se relaja rápidamente, conocida más como curva exponencial.

Cuando el material es heterogéneo la curva con frecuencia no es exponencial.

Cuando el material es semiconductor el decaimiento puede seguir una ley logarítmica.

2.1.22 IONIZACIÓN DE LOS MINERALES DE LA ARCILLA

La ionización es el proceso mediante el cual un átomo o una molécula adquiere una carga eléctrica al perder o ganar electrones, en el caso de la arcilla ocurre ante la presencia de algún disolvente como el agua.

La ionización de las arcillas se refiere al proceso mediante el cual los minerales de arcilla, que son principalmente silicatos hidratados, interaccionan con iones en soluciones acuosas.

Cuando las arcillas se hidratan, pueden liberar ciertos iones, como cationes (por ejemplo, calcio, sodio o potasio) hacia la solución y absorber otros iones del medio. Este intercambio iónico afecta las propiedades físicas y químicas de las arcillas, como su capacidad de retención de agua, su plasticidad y su estabilidad.

2.1.23 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SEDIMENTOS

Los depósitos sedimentarios se forman por la acción de los procesos geomorfológicos y climáticos, destacando el medio de transporte y la meteorización. Los distintos medios de sedimentación originan una serie de depósitos cuyas características geotécnicas están relacionadas con las condiciones de formación de estos sedimentos. Así, la clasificación de los materiales, granulometría, forma y tamaño, dependen del medio de transporte. Conociendo los factores geomorfológicos y climáticos, es posible prever la disposición y geometría del depósito, propiedades físicas y otros aspectos de interés en ingeniería geológica. Con estos objetivos se describen los siguientes tipos de depósitos, en función de sus relaciones geológico-geotécnicas más características (Gonzales de Vallejo, 2002):

- Depósitos coluviales
- Depósitos aluviales
- Depósitos lacustres
- Depósitos litorales
- Depósitos glaciares
- Depósitos de climas áridos y desérticos
- Depósitos evaporíticos
- Depósitos de climas tropicales
- Depósitos de origen volcánico.

Para el presente documento vamos a considerar sólo los relacionados a los pozos de estudio.

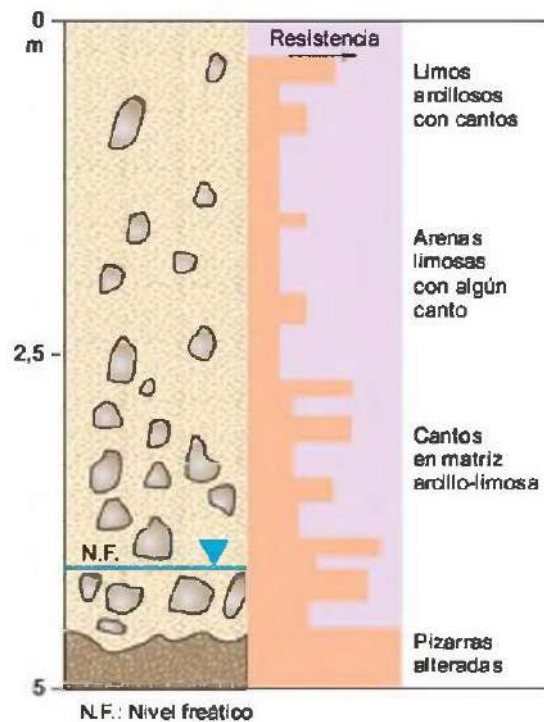
2.1.23.1 DEPÓSITOS COLUVIALES

Son materiales transportados por gravedad, la acción del hielo-deshielo y, principalmente, por el agua. Su origen es local, producto de la alteración in situ de las rocas y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de soliflucción. Frecuentemente están asociados a masas

inestables. Su composición depende de la roca de la que proceden, estando formados por fragmentos angulares y heterométricos, generalmente de tamaño grueso, englobados en una matriz limo arcillosa. Su espesor suele ser escaso, aunque puede ser muy variable (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 27

Perfil de tipo de depósitos coluviales (Gonzales de Vallejo, 2002)



La resistencia de estos materiales es baja, sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de lluvias intensas (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.1.23.2 DEPÓSITOS ALUVIALES

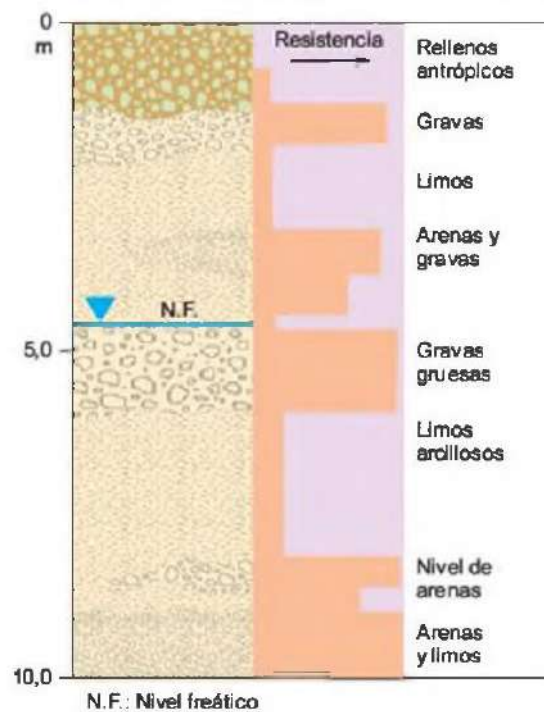
Son materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques. Las facies más gruesas presentan bordes redondeados. Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad. Están muy desarrollados en los climas templados, ocupando cauces y valles fluviales, llanuras y abanicos aluviales, terrazas y paleo cauces.

Son suelos muy anisotrópicos en su distribución, con propiedades geotécnicas altamente variables, estrechamente relacionadas con la granulometría. Su continuidad es irregular, pudiendo tener altos contenidos en materia orgánica en determinados medios. La permeabilidad depende de la granulometría.

Generalmente presentan un nivel freático alto. La investigación geotécnica precisa de un elevado número de reconocimientos dada su heterogeneidad y anisotropía. Los aluviales constituyen una fuente de recursos de materiales para la construcción, sobre todo como áridos, de acuerdo a la siguiente imagen (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 28

Depósitos aluviales (Gonzales de Vallejo, 2002)



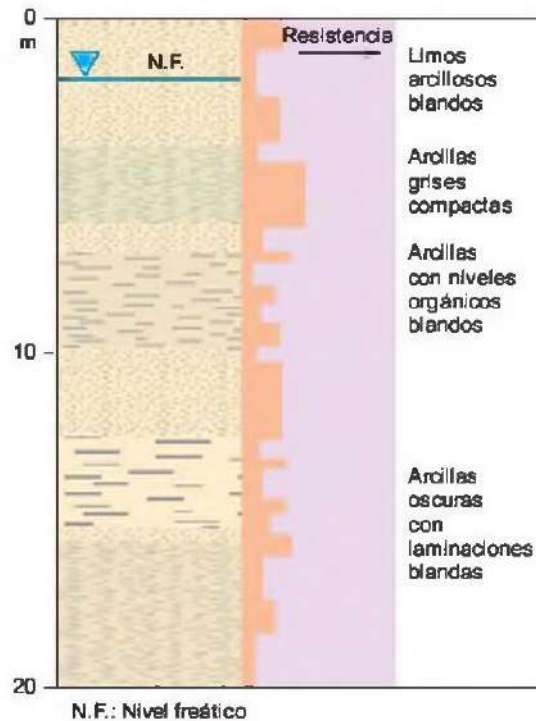
2.1.23.3 DEPÓSITOS LACUSTRES

En general los sedimentos de grano fino, predominando los limos y las arcillas. El contenido en materia orgánica puede ser muy alto, sobre todo en zonas pantanosas, en las que pueden encontrarse turberas. Frecuentemente presentan estructuras laminadas en niveles muy finos. En condiciones de agua salada se forman precipitados de sales.

Los principales problemas geotécnicos están en relación con su alto contenido en materia orgánica, siendo en general suelos muy blandos. También se pueden encontrar arcillas rápidas asociadas a estos suelos. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Figura 29

Depósitos lacustres (Gonzales de Vallejo, 2002).



2.1.24 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Las propiedades físicas o propiedades índice de las rocas se determinan en laboratorio; las más importantes a nivel de influencia en el comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, la alterabilidad, la resistencia y la velocidad de propagación de las ondas sónicas. Algunas de estas propiedades, además de servir para su clasificación, están directamente relacionadas con las características resistentes y deformacionales de las rocas.

2.1.24.1 POROSIDAD

La porosidad (n) es una medida del espacio abierto en las rocas, expresado como el porcentaje de espacio abierto que constituye el volumen total de la roca o material sedimentario. La porosidad puede ocurrir como porosidad primaria, que representa los espacios de poro originales

en la roca (por ejemplo, espacio entre granos de arena, vesículas en rocas volcánicas), o porosidad secundaria que ocurre después de que se forma la roca (por ejemplo, fracturas, porciones disueltas de roca). La litificación de sedimentos no consolidados reducirá la porosidad porque compacta los granos y agrega cemento. El agua atrapada en los poros no conectados de la roca durante los procesos de deposición y litificación se llama agua connate (C. Johnson, 2024)

La porosidad (n) no define la existencia del acuífero, sino que además se requiere de estos estén interconectados; característica que se ve afectada por los factores siguientes:

Grado de comparación del material, forma y arreglo de las partículas y su gradación, las cuales son independientes del tamaño de las mismas. El valor de “ n ”, varía de 0 a 50%, dependiendo de los factores mencionados (J. Ordoñez, 2011).

Alude a la cantidad de espacios vacíos dentro de la masa rocosa; la arcilla y la arena son porosas, igualmente una arenisca mal cementada o una roca fracturada o con planos de disolución, porque hay volumen de espacios vacíos en el seno de la roca.

La porosidad es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. Los poros, en el caso de rocas cristalinas, ígneas o metamórficas, pueden ser microfisuras o grietas en la matriz rocosa. La porosidad, en general, decrece con la profundidad y con la edad de las rocas (Gonzales de Vallejo, 2002).

La porosidad eficaz es la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen de la muestra. Puede obtenerse a partir de los pesos seco y saturado de la muestra:

En las rocas es frecuente que los poros no estén interconectados, por lo que la porosidad real será mayor que la eficaz. El índice de poros se define como la relación entre el volumen ocupado por los huecos, V_v , y el volumen ocupado por las partículas sólidas.

$$n_e = (W_{int} - W_{seco}) / (\gamma_w V) \quad (2.19)$$

Tabla 7

Tabla de porosidad de algunas rocas (Gonzales de Vallejo, 2004)

CUADRO 3.2

Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas

| Roca | Peso específico (g/cm ³) | Porosidad (%) |
|------------|--------------------------------------|---------------|
| Andesita | 2,2-2,35 | 10-15 |
| Anfibolita | 2,9-3,0 | — |
| Arenisca | 2,3-2,6 | 5-25 (16,0) |
| Basalto | 2,7-2,9 | 0,1-2 |
| Caliza | 2,3-2,6 | 5-20 (11,0) |
| Carbón | 1,0-2,0 | 10 |
| Cuarcita | 2,6-2,7 | 0,1-0,5 |
| Creta | 1,7-2,3 | 30 |
| Diabasa | 2,9 | 0,1 |
| Diorita | 2,7-2,85 | — |
| Dolomía | 2,5-2,6 | 0,5-10 |
| Esquisto | 2,5-2,8 | 3 |
| Gabro | 3,0-3,1 | 0,1-0,2 |
| Gneiss | 2,7-3,0 | 0,5-1,5 |
| Granito | 2,6-2,7 | 0,5-1,5 (0,9) |
| Grauvaca | 2,8 | 3 |
| Mármol | 2,6-2,8 | 0,3-2 (0,6) |
| Lutita | 2,2-2,6 | 2-15 |
| Pizarra | 2,5-2,7 | 0,1-1 |
| Riolita | 2,4-2,6 | 4-6 |
| Sal | 2,1-2,2 | 5 |
| Toba | 1,9-2,3 | 14-40 |
| Yeso | 2,3 | 5 |

Entre paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz.
 Datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rahn (1986),
 Waltham (1999), Farmer (1968).

2.1.24.2 PERMEABILIDAD

La permeabilidad es la capacidad de transmitir agua de una roca. La mayoría de las rocas presentan permeabilidades bajas o muy bajas. La filtración y el flujo del agua a través de la matriz rocosa se produce a favor de los poros y fisuras, dependiendo la permeabilidad de la interconexión entre ellos y de otros factores como el grado de meteorización, la anisotropía o el estado de esfuerzos a que está sometido el material (Gonzales de Vallejo, 2004).

La permeabilidad de una roca se mide por el coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulica, k , que se expresa en m/s, cm/s ó m/día:

$$k = K \left(\frac{\gamma_w}{\mu} \right) \quad (2.20)$$

Donde:

k = Permeabilidad de una roca

K = Permeabilidad intrínseca (dependiente únicamente de las características del medio físico).

γ_w = Peso específico del agua

μ = Viscosidad del agua

La presente tabla incluye valores del coeficiente de permeabilidad de algunas rocas. Ante la dificultad en la estimación y valoración de este parámetro, sus valores se indican en órdenes de magnitud.

Tabla 8

Tabla de permeabilidad de algunas rocas (Gonzales de Vallejo, 2004)

| Roca | k (m/s) |
|--------------------|---------------------------|
| Arenisca | 10^{-5} - 10^{-10} |
| Caliza y dolomía | 10^{-6} - 10^{-12} |
| Esquisto | 10^{-7} - 10^{-8} |
| Pizarra | 10^{-11} - 10^{-13} |
| Granito | 10^{-9} - 10^{-12} |
| Lutita | 10^{-9} - 10^{-13} |
| Rocas metamórficas | 10^{-9} - 10^{-12} |
| Rocas volcánicas | 10^{-7} - 10^{-12} |
| Sal | $< 10^{-11}$ - 10^{-13} |

La permeabilidad es una medida de la interconexión de los poros en una roca o sedimento. Las conexiones entre los poros permiten que ese material transmita agua. Una combinación de un lugar para poner agua (porosidad) y la capacidad de mover el agua (permeabilidad) hace un buen acuífero, una unidad rocosa o sedimento que contiene agua subterránea extraíble. Los sedimentos bien clasificados tienen mayor porosidad porque no hay partículas de sedimento más pequeñas que llenan los espacios entre las partículas más grandes. Las arcillas generalmente tienen una porosidad muy alta, pero los poros están mal conectados, lo que provoca baja permeabilidad (C. Johnson, 2024).

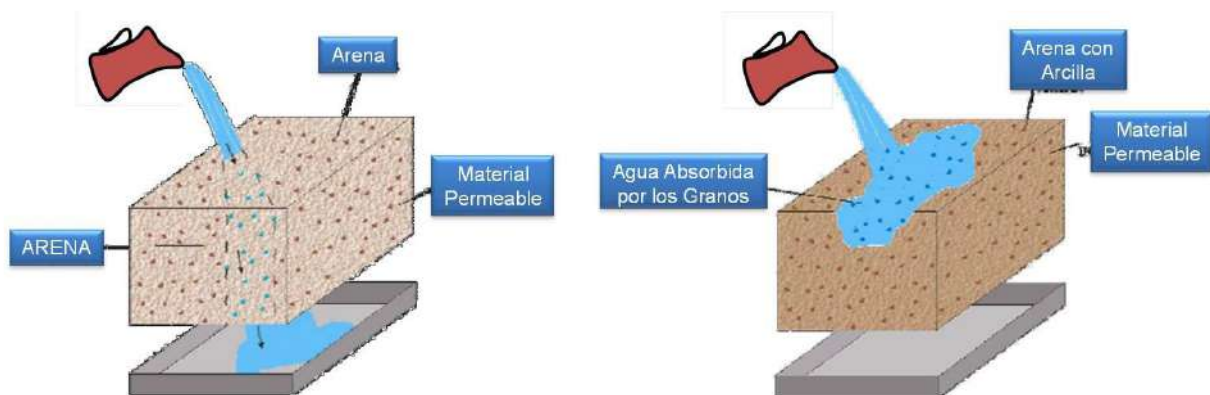
Si bien la permeabilidad es importante como medida de la capacidad de transmitir fluidos, generalmente no es el descriptor más utilizado entre los geólogos para esta propiedad. La

conductividad hidráulica es otra medida común de la conexión de los espacios porosos y es una función tanto de la permeabilidad como de las propiedades de los fluidos. Debido a que considera las propiedades de los fluidos, la conductividad hidráulica es utilizada tanto por geólogos petroleros como por hidrogeólogos para describir la capacidad de producción de yacimientos de petróleo y acuíferos. Una alta conductividad hidráulica indica una rápida transmisión de fluido a través de un acuífero. Las gravas no consolidadas, las rocas altamente fracturadas y disueltas y las areniscas bien clasificadas tienen altas conductividades hidráulicas. (C. Johnson, 2024).

La permeabilidad alude a la capacidad que tiene un material de permitir que se establezca el flujo de aguas subterráneas -o cualquier fluido- a través suyo. Ello dependerá de la porosidad y de la conexión entre las aberturas e intersticios, y del tamaño y forma de tales conductos. En otras palabras, la permeabilidad depende no sólo de la porosidad de la roca, sino del tamaño de los poros. (Cartilla Técnica, SENAMHI, Lima – Perú).

Figura 30

Porosidad y permeabilidad (cartilla técnica, SENAMHI, Lima – Perú).



2.1.25 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS

La clasificación de las rocas sedimentarias depende de la descripción de los clastos, como lo es su tamaño, forma (redondeado – anguloso) y selección, de los cuales podemos inferir su historia y ambiente.

2.1.25.1 TAMAÑO

El tamaño refleja las condiciones de sedimentación y de este depende la clasificación de las rocas clásticas. En la tabla 9 se presenta con mayor detalle la clasificación de sedimentos de acuerdo al tamaño de grano de la roca (Adams et al, 1984).

Tabla 9

Escala de tamaño de grano de udden-wentworth (modificado de Adams et at,1984)

| CLASIFICACIÓN DE SEDIMENTOS | | | | |
|---|----------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|
| Límites de clases (Milímetros) | Clases de tamaño | | Término para roca | |
| 256 16 4 | G R A V A S | Peñascos | | Conglomerado Brecha Rudita Rocas rudáceas |
| | | Mataténas | | |
| | | Guijarros | | |
| | | Gránulos | | |
| 2 1 0.05 0.25 | A R E N A S | Arenas muy gruesas | | Arenisca Arenita Rocas arenáceas |
| | | Arenas gruesas | | |
| | | Arenas medianas | | |
| | | Arenas finas | | |
| | | Arenas muy finas | | |
| 0.125 0.062 0.031 0.015 0.007 | L I M O S | Limo grueso | l i m o l i t a | Argilita Rocas argílaceas Lodolita Rocas lodosas Lutita |
| | | Limo medio | | |
| | | Limo fino | | |
| | | Limo muy fino | | |
| | | | | |
| 0.003 | | Arcilla | | Lutita |

2.1.25.2 GRAVA (GRANO GRUESO)

Sedimentos con diámetros > 2 mm. La composición de un depósito de grava no sólo refleja las rocas generadoras de la zona de que se derivó, también se ve influenciada por los agentes responsables de su formación, requiere de corrientes fuertes como ríos fluyentes con alta velocidad, erosión glaciar en las montañas u orillas altas de una playa rocosa para su transporte.

Su equivalente solidificado es el conglomerado si las formas de sus clastos son redondeadas y brecha si tienen forma angulosa.

2.1.25.3 ARENA (GRANO MEDIO)

Sedimentos bien redondeados con diámetro que varían de 0.0625 a 2 mm. En general tiende a ser dominado por pocos minerales de los cuales es frecuente que predomine el cuarzo. Son clastos que han tenido un largo transporte en suspensión por agua y viento, en los fondos de ríos, mares y lagos, aunque en algunos casos han sufrido escaso transporte. Su equivalente solidificado es la arenisca.

2.1.25.4 LIMO (GRANO FINO)

Con un tamaño de partícula de 0.0039 a 0.0625 mm., compuestos principalmente por cuarzo fino, por lo regular se llegan a encontrar junto con depósitos de arena y arcilla, sus depósitos más comunes son aluvial, lacustre, fluvio – glaciales y marinos, necesitando de aguas tranquilas para su sedimentación. Su equivalente solidificado es la limolita, que puede encontrarse en láminas o como roca masiva.

2.1.25.5 ARCILLA (GRANO FINO)

Fragmentos de diámetro < 0.0039 mm principalmente compuestos de cuarzo fino y minerales de arcilla, se presentan de forma hojosa o escamosa. Las tres familias principales de minerales de arcilla son la caolinita, illita y montmorillonita.

Su equivalente solidificado es la lutita y se caracteriza por su baja permeabilidad.

El material arcilloso se caracteriza por una baja resistividad eléctrica en el rango de 5 - 60 Ohmm y a menudo un objetivo en estudios eléctricos o electromagnéticos. La baja resistividad es causada por la conductividad superficial de los minerales arcillosos, como las arcillas minerales son planos, el agua puede difundirse entre los minerales y así aumentar la superficie específica.

El área superficial específica de las arcillas puede ser de hasta $1000\text{m}^2/\text{g}$, mientras que para las arenas esta área es inferior a $0,1\text{ m}^2/\text{g}$ (Scheffer y Schachtschabel 1984). La gran superficie específica soporta la superficie conductividad. Debido a que una cantidad de cationes en los minerales arcillosos es reemplazada por cationes de mayor valencia, la carga eléctrica de la superficie del mineral arcilloso es negativo. La carga negativa es compensada por la

concentración de cationes en el agua intersticial en la vecindad de la superficie del mineral. Este proceso se cuantifica por la capacidad de intercambio catiónico (CEC).

El cálculo de la resistividad del material arcilloso es complicado, ya que el flujo de corriente eléctrica es posible a través de minerales de arcilla, así como a través del fluido de los poros. Frohlich y Parke (1989). Asumen que la conductividad a granel del material arcilloso σ puede explicarse por la conexión en paralelo de la conductividad superficial σ superficie y conductividad del agua intersticial σ agua con contenido volumétrico de agua.

2.1.26 ACUIFEROS DE ARENA Y GRAVA

Arenas no consolidadas y depósitos de gravas de edad cuaternaria o ligeramente más antiguos (terciario) forman los sistemas de acuíferos más extendidos y más explotados del mundo. Estos sedimentos tienen su origen en la erosión de las rocas: los productos de la erosión se depositan después de haber sido transportados por corrientes de aguas (depósitos aluviales o fluviales), hielo (depósitos glaciares o fluvioglaciares), viento (depósitos eólicos) o el mar (depósitos marinos). Los depósitos de arena y grava tienen una alta porosidad y permeabilidad, a menudo están intercalados con sedimentos de textura más fina (limos y arcillas) y ocasionalmente incluyen componentes de gran tamaño (cantos rodados y bloques).

2.1.27 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA

Al interpretar los datos de resistividad aparente se obtiene información de las estructuras del subsuelo y de sus características físicoquímicas, definiendo las condiciones del medio geológico.

Los métodos de interpretación se pueden dividir en: el cualitativo o empírico y el cuantitativo.

2.1.27.1 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA

Tiene por objeto obtener una primera idea o aproximación de la distribución de las estructuras geológicas en el subsuelo; no se determinan valores absolutos, sino únicamente relaciones o rangos, y tendencias de las líneas de igual magnitud, las que representan fallas, escalones,

oquedades, etc. Se construyen mapas o secciones de igual valor de magnitudes, ya sea resistividad o de polarización inducida.

2.1.27.2 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

Consiste en evaluar la profundidad, espesor, resistividad y polarización verdaderos para cada estrato interpretando mediante la técnica del filtrado, desarrollada principalmente por D Gosh (1971), y O Koefoed (1979).

Un corte geoelectrico está compuesto por pares formados de espesor y resistividades características o verdaderas; tantos pares como estratos; la última capa, solamente se representa por su resistividad característica; la profundidad se extiende más allá de la apertura de electrodos máxima que puede ser “ $AB/2$ ” o “ nx ”, ya que en este intervalo no hubo un contraste de resistividades o polarización que marque el espesor.

El agua es sin duda el líquido más abundante de la corteza terrestre. La mayoría de las rocas permeables, porosas o fisuradas, en las que se encuentran los acuíferos e incluso muchas rocas poco permeables como las arcillas contienen agua hasta profundidades considerables. (Jean Margat, Jac van der Gun, 2013)

2.1.28 REGULACIÓN INTERNACIONAL Y NACIONAL DE TRABAJOS GEOFÍSICOS – MÉTODO ELECTRICO ERT

La normativa internacional y nacional es un poco escasa a pesar de ser un método empleado globalmente por más de un siglo, a continuación, menciono de forma resumida las diferentes normativas como respaldo del método que hemos adoptado para la presente tesis.

2.1.28.1 NORMA ASTM D6431-18

A nivel internacional tenemos la Guía Estándar de uso del método de resistividad de corriente continua para la caracterización del subsuelo, llamada en inglés “Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface site Characterization” bajo la designación No. D6431-18

En resumen, esta guía incluye los procedimientos de campo, equipo, métodos de interpretación para la evaluación de las propiedades eléctricas de los materiales del subsuelo y sus fluidos intersticiales, utilizando el método de resistividad de corriente continua.

Las mediciones de resistividad descritas en esta guía se aplican en investigaciones geológicas, geotécnicas, ambientales e hidrológicas. El método de resistividad se utiliza para mapear características geológicas como litología, estructura, fracturas y estratigrafía, características hidrológicas como profundidad del nivel freático, profundidad del acuitardo y salinidad del agua subterránea.

Esta guía no aborda en detalle la teoría, procedimientos de campo ni la interpretación de los datos.

Esta guía se limita a los arreglos Schlumberger, Wenner y Dipolo – Dipolo, no incluye mediciones de Potencia Espontáneo PS ni Polarización Inducida PI.

Adjunto en Anexo 2a el documento completo.

2.1.28.2 GUÍA IEEE STD 81 2012

Esta guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra, llamada en inglés IEEE Guide for

Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding Systems.

Aunque no es un método directo para las tomografías electro resistivas, esta guía presenta métodos y técnicas de prueba prácticos para medir las características eléctricas de los sistemas de puesta a tierra. Incluye condiciones de seguridad, medición de resistividad de la tierra, medición de la resistencia de frecuencia del sistema de energía o impedancia del sistema de puesta a tierra y otros temas netamente eléctricos.

Esta guía presenta métodos prácticos de instrumentación que pueden utilizarse para medir la resistividad del suelo y temas asociados a proyectos eléctricos.

Esta guía presenta gráficos de resistividad Vs. Salinidad, humedad y temperatura que son útiles al momento de interpretar los resultados de las tomografías eléctricas. Incluye una tabla de resistividad y periodos geológicos. Presenta con más detalle el método Wenner, el principio de funcionamiento con cuatro electrodos.

Adjunto en Anexo 2b el documento resumen.

2.1.28.3 NORMA BOLIVIANA NB 173001

Esta norma se denomina Proceso Técnico para la Construcción de Pozos de Agua, fue publicada el año 2020, producto de un trabajo de una comisión interinstitucional y publicada por IBNORCA que es responsable del estudio y normalización de normas bolivianas.

La presente normativa incluye lineamientos técnicos y directrices que contribuirá a los procesos antes, durante y después para la construcción de pozos, definiciones, principios de estudios geológicos, estudios hidrogeológicos, estudios geofísicos previos a la construcción del pozo como las tomografías electro resistivas, métodos de perforación, proceso de construcción de pozos de agua, pozo piloto, perfilaje de pozo o Registro Eléctrico Vertical de pozo con medición de los parámetros básicos como resistividad larga, corta, rayos gamma, potencial espontáneo y viscosidad de fluido, determinando las características físicas del pozo para el correspondiente diseño y entubado, pruebas de bombeo y rehabilitación de pozos entre otros temas tratados.

Es la única norma boliviana a la fecha que incluye este tipo de estudios geofísicos para un proyecto de construcción de pozo de agua.

Adjunto en Anexo 2c el documento resumen.

2.1.29 OTRAS APLICACIONES DE RESISTIVIDAD Y POLARIZACIÓN INDUCIDA EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

2.1.29.1 MINERÍA

La polarización inducida en dominio de tiempo es ampliamente usada en proyectos mineros, por la presencia de sulfuros mineralizados que reflejan anomalías fuertes de la presencia de minerales.

Figura 31

Imagen de resistividad, cargabilidad e interpretación geológica (fuente www.everestgeophysics.com)

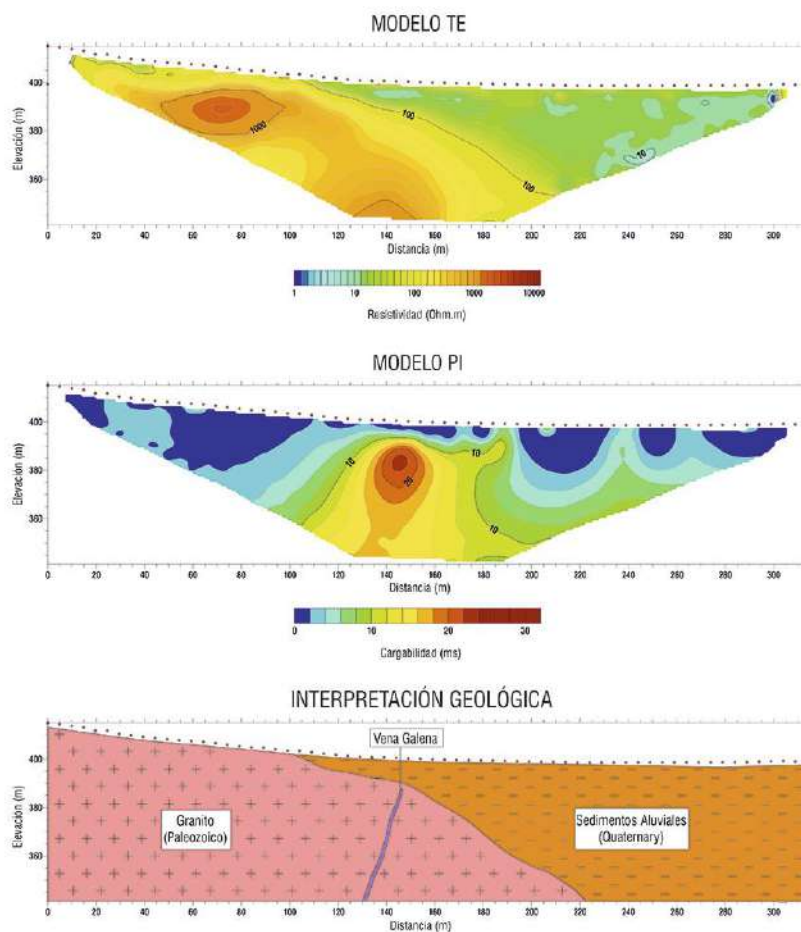
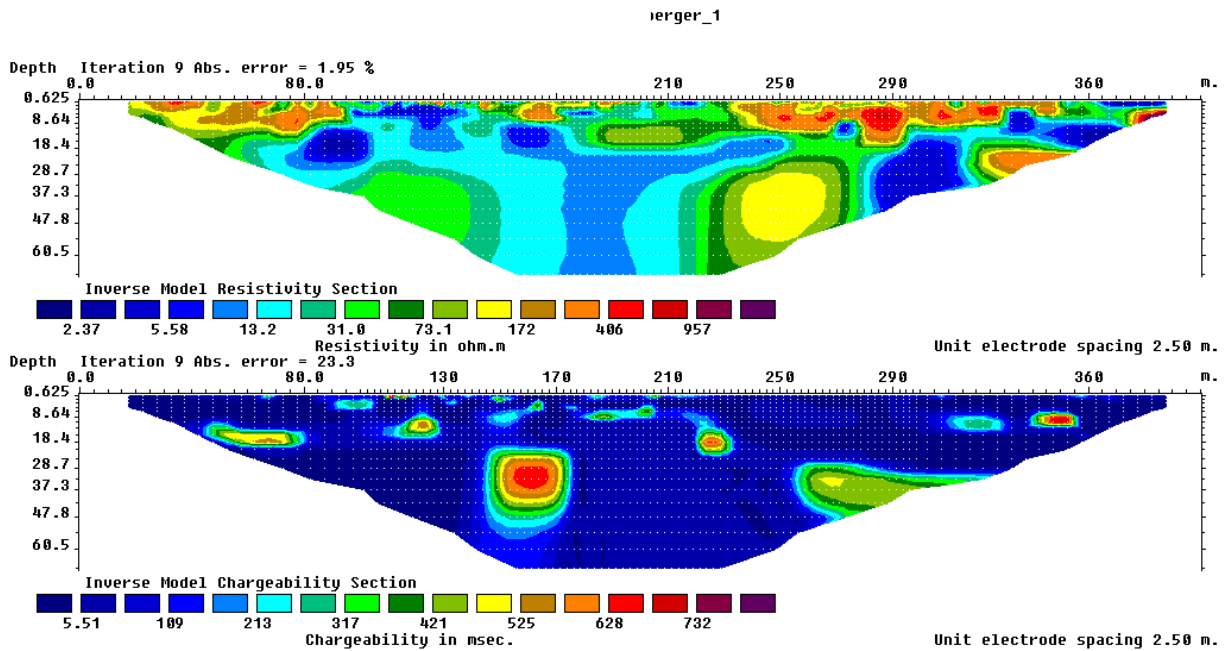


Figura 32

Imagen de resistividad, cargabilidad en interior mina Oruro – Bolivia (fuente propia)



2.1.29.2 MEDIO AMBIENTE

La aplicación en medio ambiente es amplia, en el ejemplo siguiente se puede apreciar claramente el contraste de la imagen, delimitando el área del relleno sanitario y el trabajo de todas las geomembranas, evitando la percolación y por ende contaminación a las aguas subterráneas.

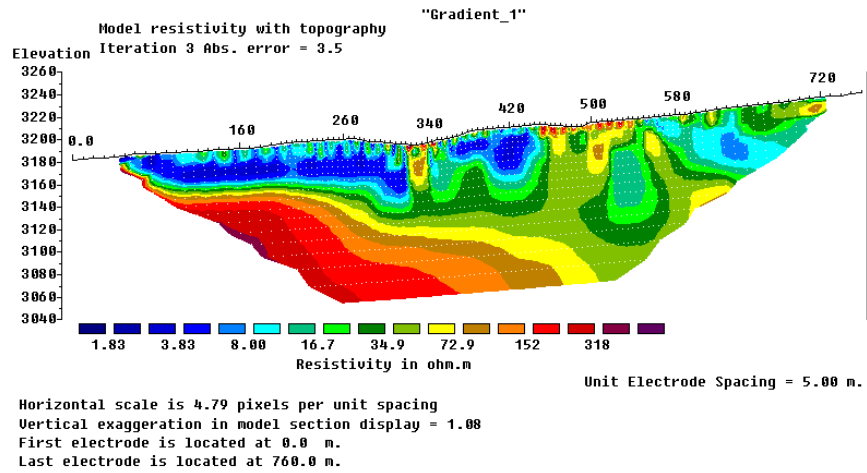
Figura 33

Equipo Terrameter LS 2 sobre relleno sanitario de Mallasa (Fuente propia)



Figura 34

Imagen de resistividad de relleno sanitario de Mallasas – La Paz (Fuente propia)



2.2 MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos descritos en el marco teórico son empleados con frecuencia en libros de geología y física, el presente estudio tomó en cuenta además papers de diferentes profesores como el Dr. Dahlin Torleif de la Universidad de Lund - Suecia, que siguen investigando aplicaciones de Resistividad y Polarización Inducida aplicados a proyectos de ingeniería.

2.3 MARCO ESPACIAL

El área de estudio se encuentra en Sur América, Estado Plurinacional de Bolivia, Departamento de Tarija, Provincia Cercado, Municipio de Tarija, Cuenca del Río Guadalquivir de acuerdo a la figura 35 y coordenadas UTM descritas de cada línea.

2.4 MARCO TEMPORAL

La resistividad del subsuelo puede variar en las estaciones del año, en época de lluvia el terreno está más húmedo y por ende la corriente fluye mejor en el subsuelo, en época seca, el terreno no tiene tanta humedad y por ende es un poco más difícil (se supera haciendo un pequeño hueco y humedeciendo con agua, la corriente fluye mejor), pero en general no afecta el resultado final.

Los valores de resistividad de diferentes materiales son relativos y la variación es mínima y sólo en superficie, el agua que fluye en el subsuelo, en el contacto con la parte más baja son considerados técnicamente de centenas de años, y no hubo cambios recientes. El presente estudio se realizó en el mes de junio del año 2024.

CAPÍTULO III

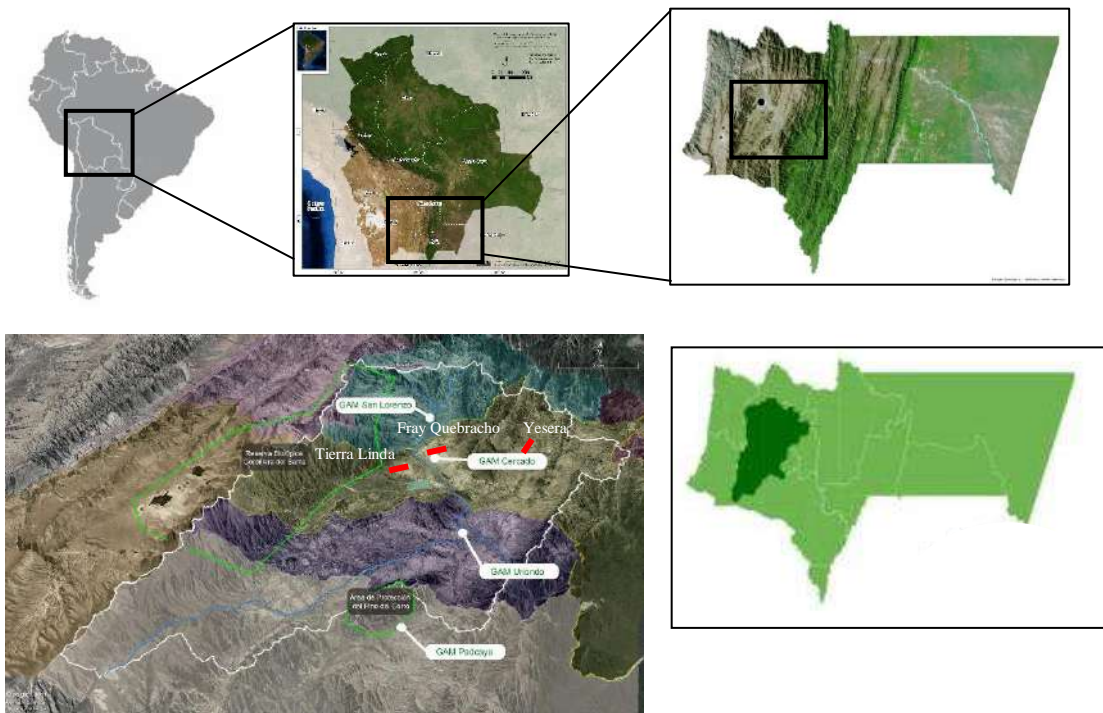
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 UBICACIÓN GENERAL

El área de estudio se encuentra en Sur América, Estado Plurinacional de Bolivia, Departamento de Tarija, Provincia Cercado, Municipio de Tarija, Cuenca del Río Guadalquivir de acuerdo a la figura 35 con coordenadas geográficas referenciales Latitud $21^{\circ}31'8.02''$ Sur y Longitud $64^{\circ}44'59.59''$ Oeste.

Figura 35

Ubicación del área de estudio (Fuente: sihita.org y propia)



3.2 TIERRA LINDA

3.2.1 ANTECEDENTES

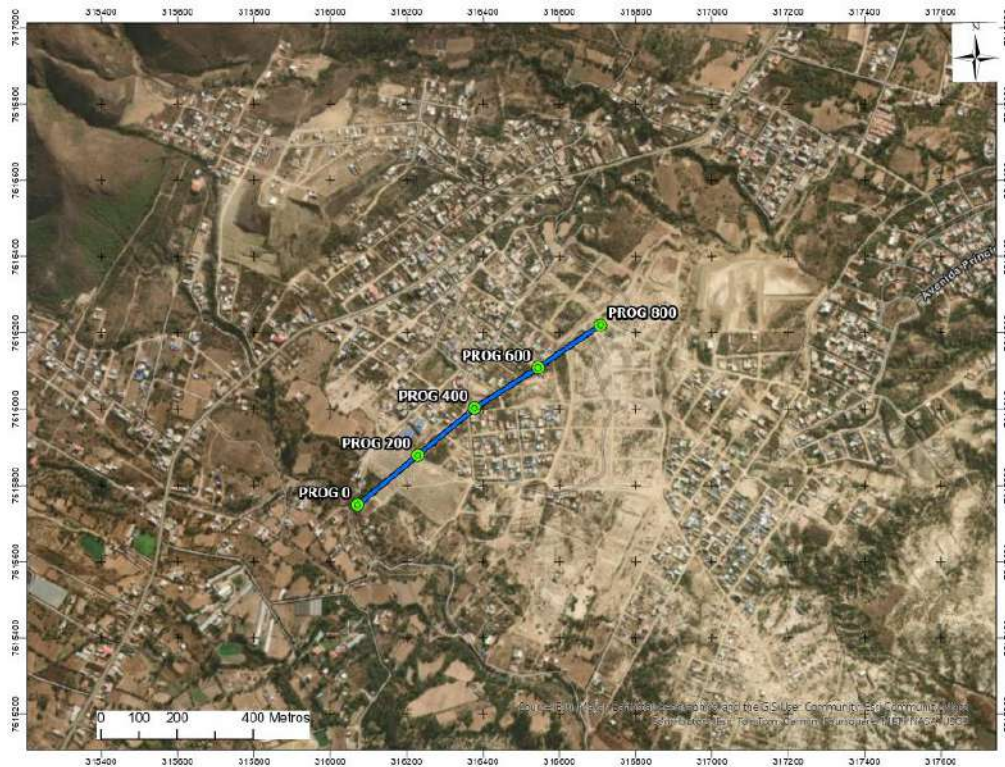
En el Valle Central de Tarija, Comunidad Tablada Chica, zona Tierra Linda, al sur oeste del río Guadalquivir se halla la Unidad Educativa Moto Méndez, en la vecindad se ha perforado un pozo de agua para la empresa COSSALT, el mismo que cuenta con datos de Registro Eléctrico Vertical o Perfilaje de pozo con datos de Potencial Espontaneo SP y de Resistividad Eléctrica RES corta y larga, en base a la información disponible se ha realizado la Tomografía Eléctrico Resistiva ERT, para correlacionar esta técnica con los resultados obtenidos y analizar la imagen de Resistividad y Cargabilidad.

3.2.2 UBICACIÓN

El estudio preliminar de geofísica a realizarse se encuentra en el Municipio del Cercado del valle central de la ciudad de Tarija, Provincia Cercado del Departamento de Tarija.

Mapa 1

Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés tierra linda, la ubicación de la línea de tomografía electro resistiva.



La línea de estudio de geofísica se encuentra en el municipio de Cercado (Figura. 35). Sus coordenadas en el Sistema Universal Transversa de Mercator WGS-84 Zona: 20 K, a una elevación: de 2000 msnm (referencial) y son las siguientes:

Tabla 10

Coordenadas de tomografía tierra linda.

| PROGRESIVA | ESTE | NORTE | ALTURA msnm | SITIO |
|-------------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------------|
| 0 | 316070 | 7615748 | 2037 | INICIO CARRETE 1 |
| 200 | 316228 | 7615878 | 2033 | INICIO CARRETE 2 |
| 400 | 316377 | 7616002 | 2021 | CENTRO – INICIO CARRETE 3 |
| 600 | 316543 | 7616108 | 2016 | INICIO CARRETE 4 |
| 800 | 316707 | 7616220 | 2017 | FINAL CARRETE 4 |

Nota. Fuente elaboración propia

3.2.3 GEOLOGIA

La geología de todo el valle central de Tarija y los entornos es compleja, este capítulo sólo tomará en cuenta la geología sobre las cuales fueron realizadas las tomografías electro resistivas. Adjunto en Anexo 8 la Hoja Geológica, corte geológico y el perfil donde se puede observar la base del ordovícico, la formación Cieneguillas compuesto de limolitas, lutitas gris oscura con niveles de areniscas que es de interés hidrogeológico del presente estudio (Hoja Geológica, GEOBOL 1991).

SISTEMA ORDOVÍCICO

El basamento rocoso en este sector del valle de Tarija, está constituido por estratos pelíticos blanco-verdosos en superficie alterada y lutitas oscuras con areniscas, además de delgados y dispersos niveles de pedernal, con laminación fina y muy fracturadas, plegadas y falladas, que afloran en la parte Nor oeste de la serranía de Cruz Loma, la cual se hunde debajo de los depósitos cuaternarios en el angosto de Tomatitas.

SISTEMA CUATERNARIO

Qta DEPÓSITOS DE TERRAZAS ALUVIALES

En los alrededores del río Guadalquivir afloran depósitos de terrazas aluviales constituido por gravas, arenas, limos y arcillas, constituyen la unidad basal del relleno de la cuenca de Tarija,

hacia los bordes de la cuenca estos depósitos se interdigitaban con facies proximales de abanicos aluviales y probablemente con depósitos coluviofluviales. En algunos casos con flujos de barro gravoso con presencia de cantos angulares. Por la permeabilidad primaria, constituyen buenos acuíferos

QII DEPÓSITOS DE FLUVIO LACUSTRES

Gran parte del valle de Tarija, está constituido por un relleno correspondiente a una serie de lagunas poco profundas con áreas de pantanos, condicionado por aspectos climáticos de época de lluvias torrenciales y épocas de estiaje muy secas, cada aluvión transportaba gravas, típicos turbiones que sigue ocurriendo en el valle Central de Tarija, en esa época la angostura no existía, entonces cuando dejaba de llover al disminuir las crecidas los sedimentos finos empezaban a decantar y a su vez en las partes someras elevadas crecía la vegetación por eso la abundante fauna fósil del Pleistoceno existente, que ramoneaba esa vegetación y la existencia de sus depredadores, que ahora se pueden observar en el Museo Nacional Paleontológico Arqueológico de Tarija.

Esta secuencia desarrollada en el valle Central de Tarija, ha conformado sobre los depósitos gruesos basales, la secuencia de sedimentos finos constituido por lentes de gravas con variabilidad lateral extensión y vertical espesor, alternado con capas de arenas permeables, limos y arcillas estas últimas que sufren dispersión dando paisajes lunares en las quebradas por la erosión diferencial y lavado de finos.

Toda esta secuencia a veces forma acuíferos semiconfinados y a veces acuíferos confinados con pozos surgente como el que existe en el Tejar ahora probablemente debidamente entubado y utilizado para los fines que hayan sido destinados.

Cuando se erosiono la angostura el relleno de material cuaternario comenzó a erosionarse y dio lugar a la formación del paisaje de Barrancas a lo largo de los cursos de los ríos que atraviesan el valle Central de Tarija.

Figura 36

Ubicación de las fotografías con la línea ERT Tierra Linda

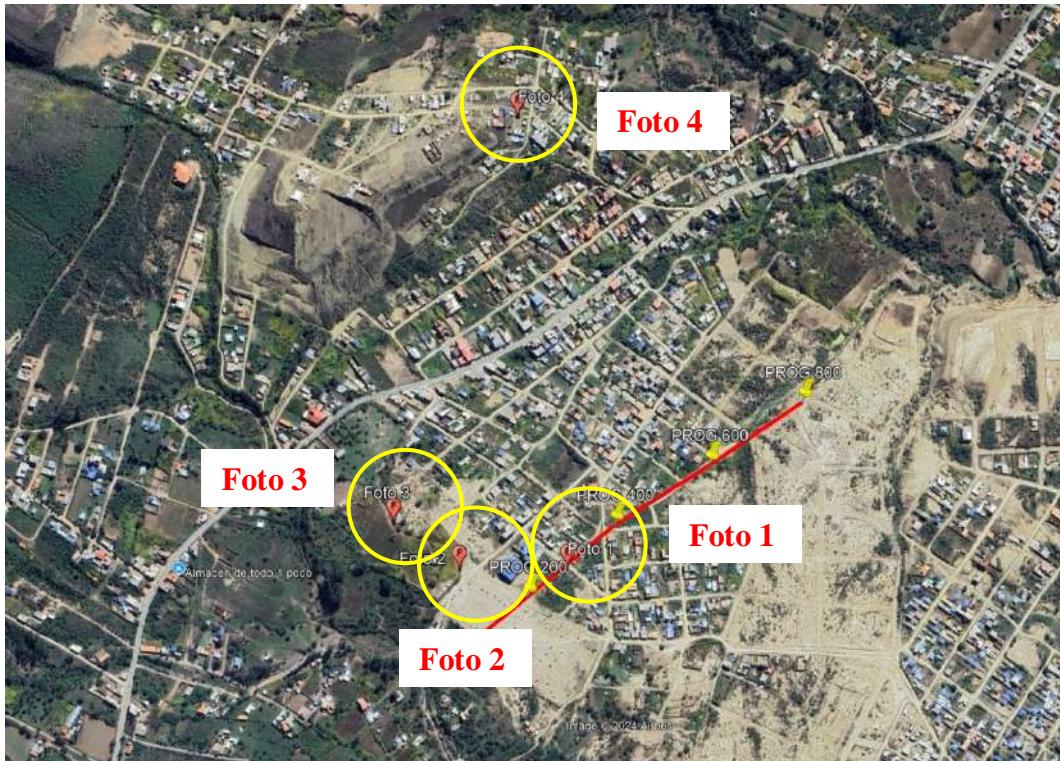
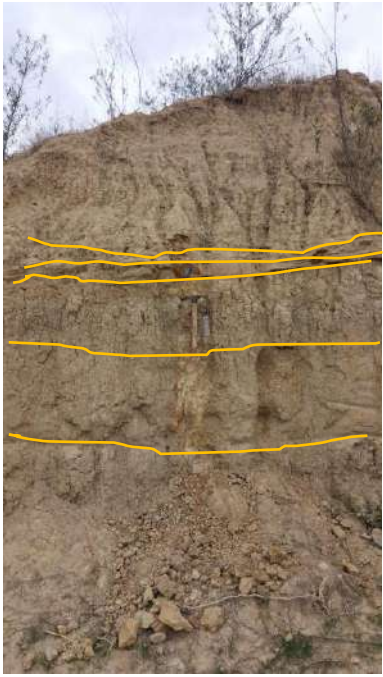
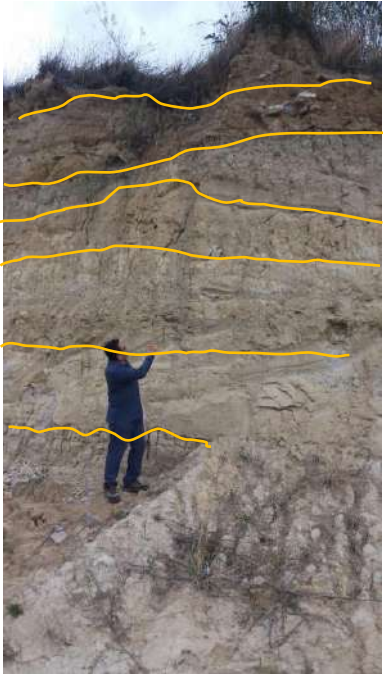




Tabla 11

Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Tierra Linda

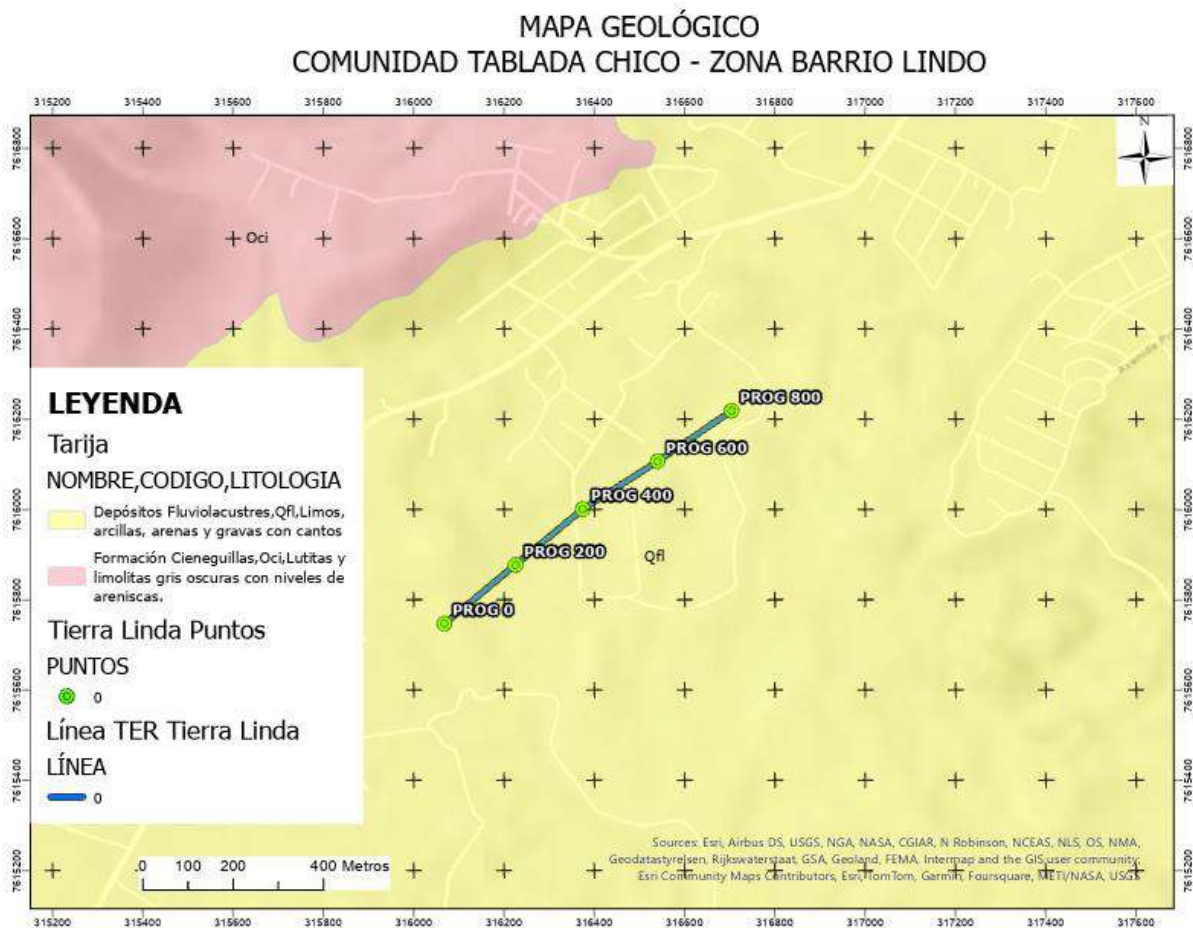
| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|--|---|
| 1 |  A photograph of a soil profile exposed on a hillside. The profile shows several distinct layers of soil. Yellow lines are drawn across the image to delineate these layers. From top to bottom, the layers are: a top layer of light-colored soil, a layer of silty clay, a thin layer of non-cohesive sand, a layer of clay, and a bottom layer of silty clay. A hammer is visible in the middle of the profile for scale. | <p>La presente fotografía se tomó sobre la calle de la Unidad Educativa Moto Méndez e intersección de calle (Aprox. a 110 metros del equipo, Prog. 290)</p> <p>2 m. de limos</p> <p>0.20 m. de arcilla</p> <p>0.15 de arena sin cohesión (bolígrafo)</p> <p>0.40 m. de arcilla (martillo)</p> <p>0.80 de limos</p> <p>Arcillas</p> <p>Se puede ver que son eventos cíclicos del periodo del Cuaternario (Pleistoceno)</p> |

| Foto | Imagen | Descripción |
|------|---|--|
| 2 |  | <p>La fotografía fue tomada a 100 metros al oeste de la Prog. 200.</p> <p>0.5 m. de material orgánico</p> <p>1.0 m. gravas y arenas color beige y marrón sin cohesión (permeables)</p> <p>0.5 m. de arcilla (amarilla)</p> <p>2.0 m. de suelo limo arcilloso (gris).</p> <p>1.5 m. de toba de caída, depósito piroclástico (violeta).</p> <p>Arcilla con contacto discordante.</p> <p>Alternancia de material fino de baja resistividad compuesta de arcillas, limos y arenas.</p> |
| 3 |  | <p>La fotografía se tomó a 230 metros aprox. de la línea hacia el oeste (Prog. 200)</p> <p>1.5 m. de material orgánico reciente</p> <p>1.0 m. de limos.</p> <p>1.0 m. de arcillas.</p> |

| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|---|--|
| 4 |  | <p>La fotografía se tomó aproximadamente a 650 metros del final de la línea (Prog. 800) hacia el noroeste.</p> <p>Limolitas con estratificación laminar media, con fracturas conjugadas, material que debe estar en el piso de todo el material sedimentario suelos de la cuenca de Tarija, Cuaternario Fluvioacustre del Pleistoceno.</p> <p>Por su disposición subvertical tiene la capacidad de almacenar agua por permeabilidad secundaria.</p> <p>La fotografía está ubicada al norte hacia la serranía (aprox. 700 m.)</p> |

Mapa 2

Mapa geológico Tierra Linda, imagen base topografía mundial software Arcgis Pro



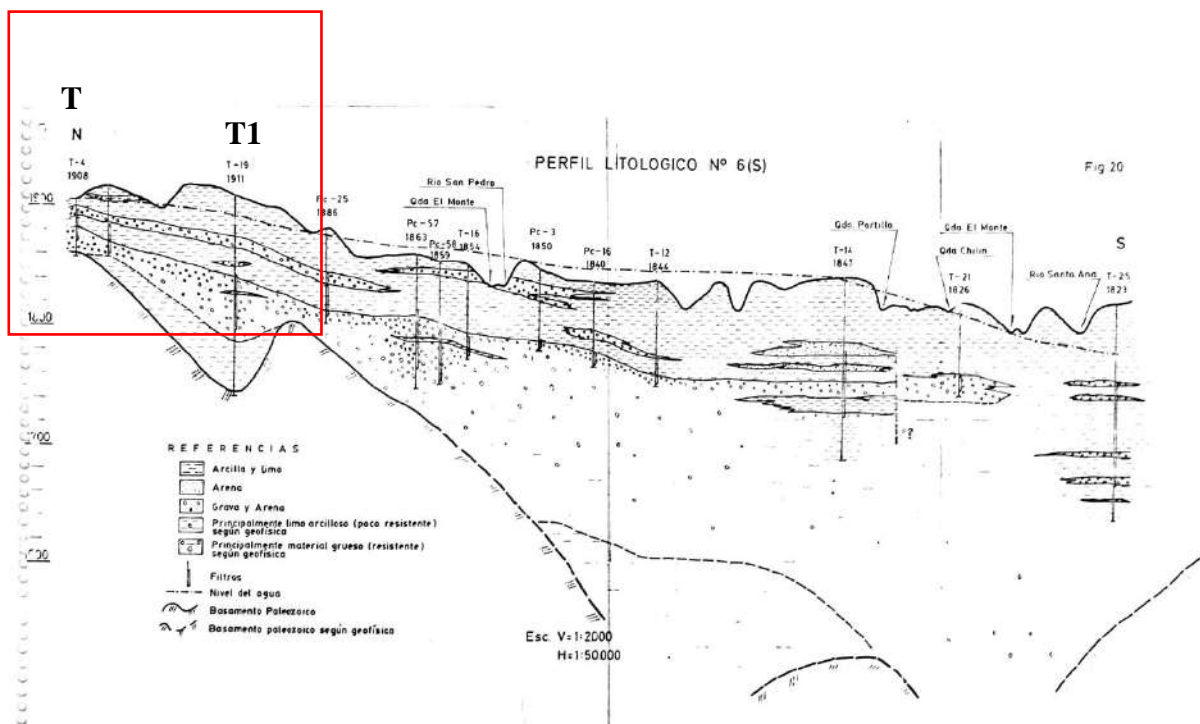
3.3 FRAY QUEBRACHO

3.3.1 ANTECEDENTES

Revisando la información disponible geológica de la zona de estudio, el documento “Investigación de aguas subterráneas en el valle central de Tarija” de la ex institución CODETAR Proyecto BOL.78/006 de Naciones Unidas 1979-1980. Realizó un estudio en proximidades de la línea, obteniendo el siguiente perfil:

Figura 37

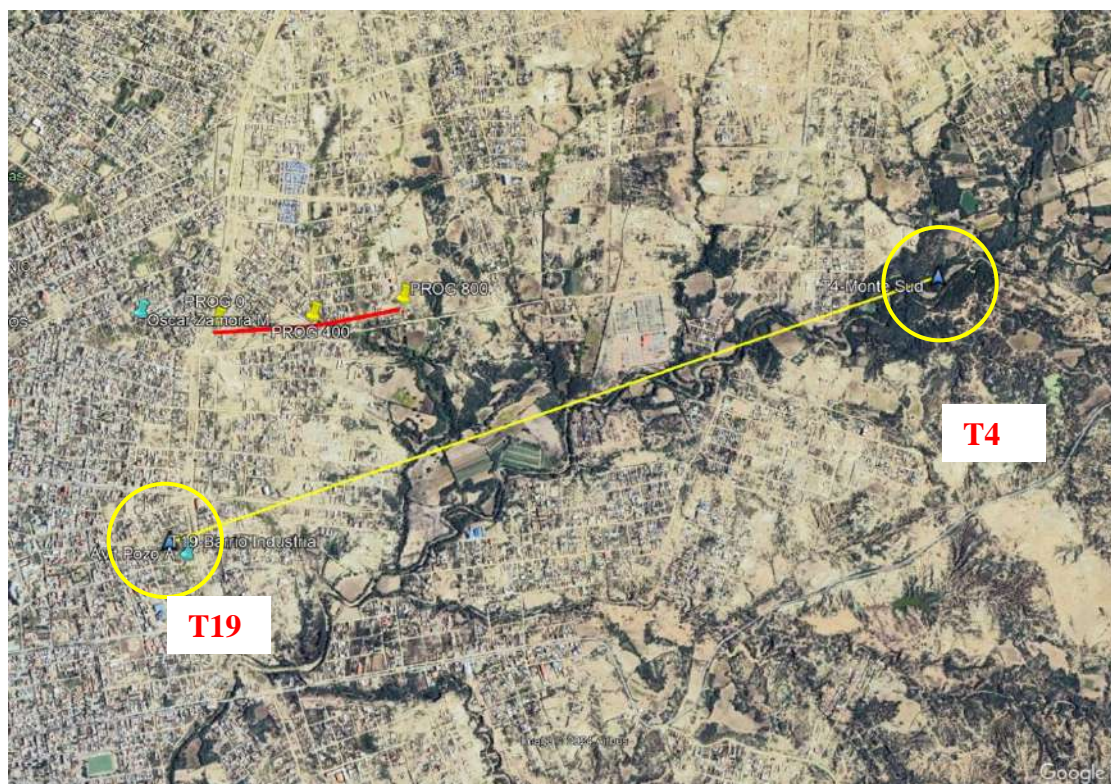
Perfil litológico 6(s) del documento proyecto BOL.78/006 de Naciones Unidas, 1980



La línea de geofísica Fray Quebracho se encuentra entre los pozos T4-T19 (lado izquierdo de la imagen), en la misma se puede ver eventos cíclicos de arcillas, limos, arenas, gravas, material grueso y fino a diferentes niveles y en profundidad el basamento paleozoico de acuerdo a los estudios geofísicos (Sondeos Eléctricos Verticales SEV con el arreglo Schlumberger, algunos pozos con Registro Eléctrico Vertical y pocos pozos con registro de rayos gamma) cuyos datos no están disponibles.

Figura 38

Sobreposición de línea ERT Fray Quebracho sobre perfil litológico parcial no. 6 (s) sólo tramos T19-T4.



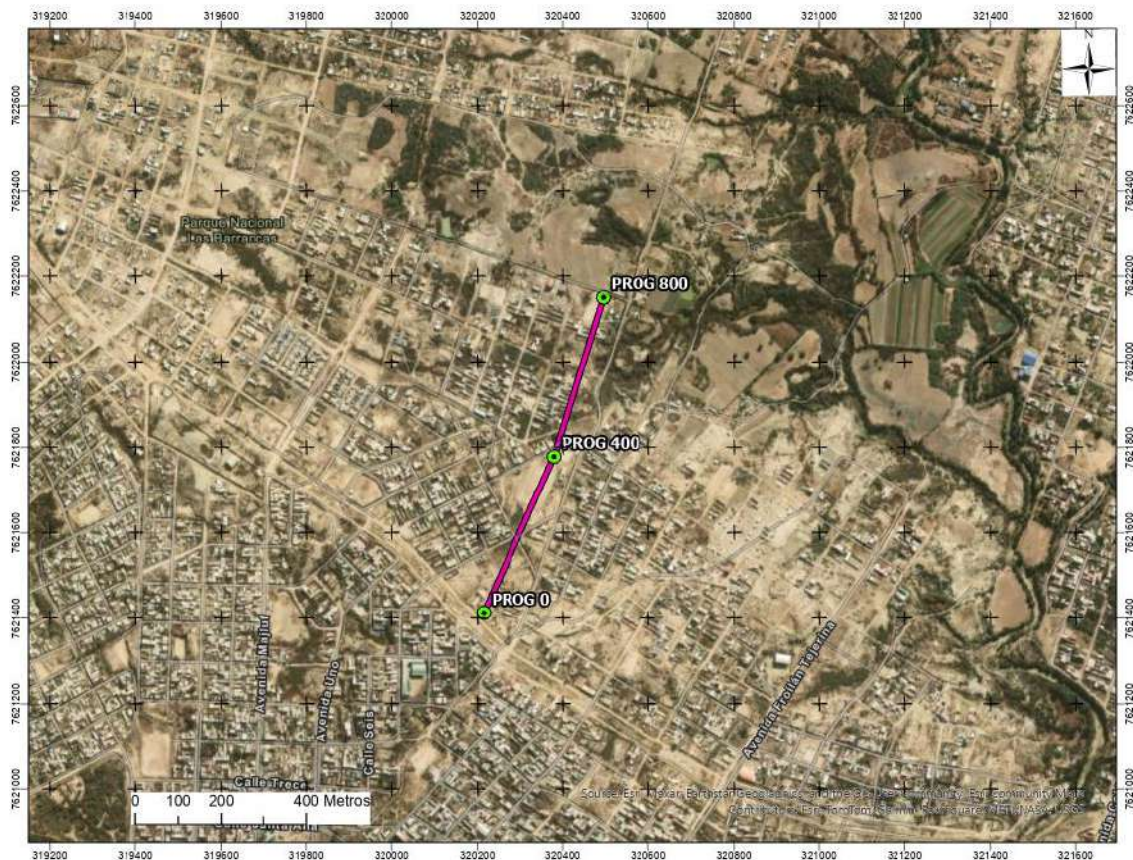
El pozo llamado Fray Quebracho cuenta con Registro Eléctrico Vertical o Perfilaje de pozo con las variables medidas de Potencial Espontaneo SP y de Resistividad Eléctrica RES corta y larga, en base a esa información se ha realizado la Tomografía Eléctrico Resistiva ERT, para correlacionar esta técnica con los resultados obtenidos y analizar el perfil de ERT.

3.3.2 UBICACIÓN

El estudio preliminar de geofísica a realizarse se encuentra en el Departamento de Tarija, Provincia Cercado, Municipio de Tarija del valle central.

Mapa 3

Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés Fray Quebracho, la ubicación de la línea de Tomografía Eléctro Resistiva.



Se encuentra en el municipio del Cercado del Departamento de Tarija. Sus coordenadas en el Sistema Universal Transversa de Mercator WGS-84 Zona: 20 K, a una elevación: de 2000 msnm (referencial) y son las siguientes:

Tabla 12

Coordenadas de tomografía Fray Quebracho (Fuente. Elaboración propia)

| PROGRESIVA | ESTE | NORTE | ALTURA msnm | SITIO |
|------------|--------|---------|----------------|------------------------------|
| 0 | 320216 | 7621413 | 1996 | INICIO CARRETE 1 |
| 200 | 320296 | 7621598 | 1988 | INICIO CARRETE 2 |
| 400 | 320381 | 7621779 | 1983 | CENTRO – INICIO CARRETE 3 |
| 600 | 320441 | 7621962 | 1978 | INICIO CARRETE 4 |

| PROGRESIVA | ESTE | NORTE | ALTURA msnm | SITIO |
|-------------------|-------------|--------------|------------------------|-----------------|
| 800 | 320496 | 7622151 | 1984 | FINAL CARRETE 4 |

3.3.3 GEOLOGÍA

SISTEMA ORDOVÍCICO

El basamento rocoso en este sector del valle de Tarija, está constituido por estratos pelíticos blanco-verdosos en superficie alterada y lutitas oscuras con areniscas, además de delgados y dispersos niveles de pedernal, con laminación fina y muy fracturadas, plegadas y falladas, estas rocas no afloran en el sector, pero se estima que se hallan por debajo de la cobertura de materiales del Cuaternario Pleistoceno.

SISTEMA CUATERNARIO

Qfl Depósitos de Fluvio lacustres

En el sector solo afloran los depósitos fluvio lacustres.

Gran parte del valle de Tarija, está constituido por un relleno correspondiente a una serie de lagunas poco profundas con áreas de pantanos, condicionado por aspectos climáticos de época de lluvias torrenciales y épocas de estiaje muy secas, cada aluvión transportaba gravas, típicos turbiones que sigue ocurriendo en el valle Central de Tarija, en esa época la angostura no existía, entonces cuando dejaba de llover al disminuir las crecidas los sedimentos finos empezaban a decantar y a su vez en las partes someras elevadas crecía la vegetación por eso la abundante fauna fósil del Pleistoceno existente, que ramoneaba esa vegetación y la existencia de sus depredadores, que ahora se pueden observar en el Museo Nacional Paleontológico Arqueológico de Tarija..

Esta secuencia desarrollada en el valle Central de Tarija, ha conformado sobre los depósitos gruesos basales, la secuencia de sedimentos finos constituido por lentes de gravas con variabilidad lateral extensión y vertical espesor, alternado con capas de arenas permeables, limos y arcillas estas últimas que sufren dispersión dando paisajes lunares en las quebradas por la erosión diferencial y lavado de finos.

Cuando se erosiono la angostura el relleno de material cuaternario comenzó a erosionarse y dio lugar a la formación del paisaje de Barrancas a lo largo de los cursos de los ríos que atraviesan el valle Central de Tarija.

Figura 39

Ubicación de las fotografías para la línea ERT Fray Quebracho

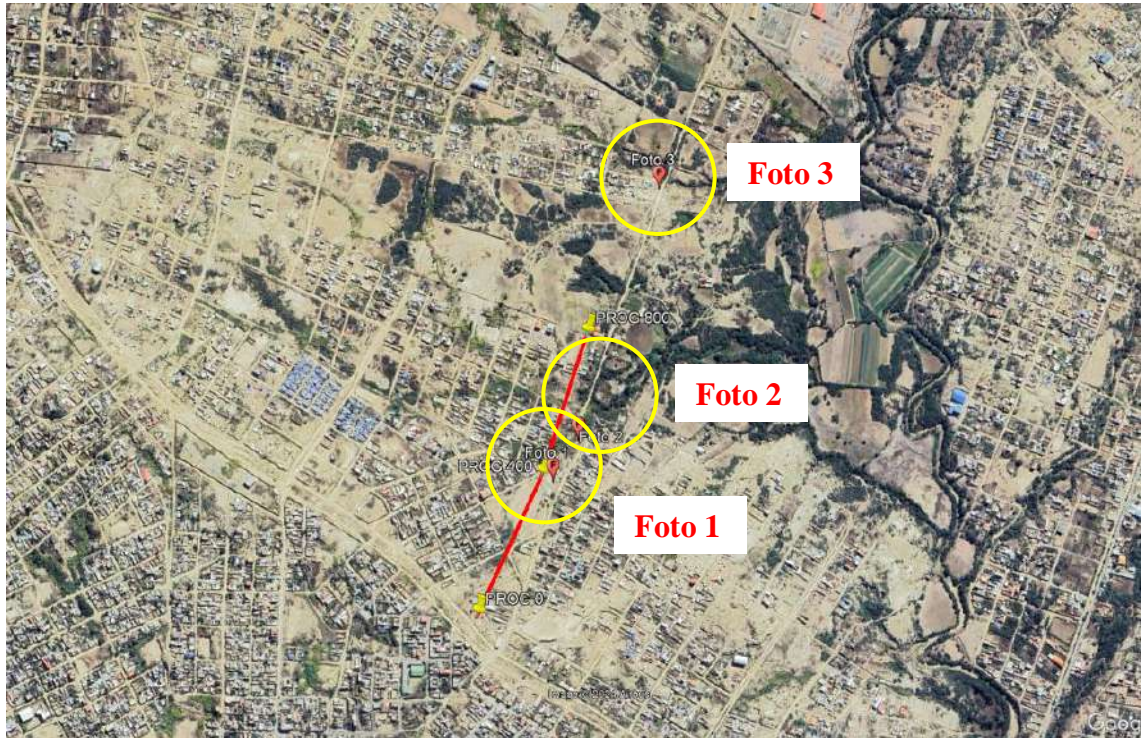





Tabla 13

Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Fray Quebracho

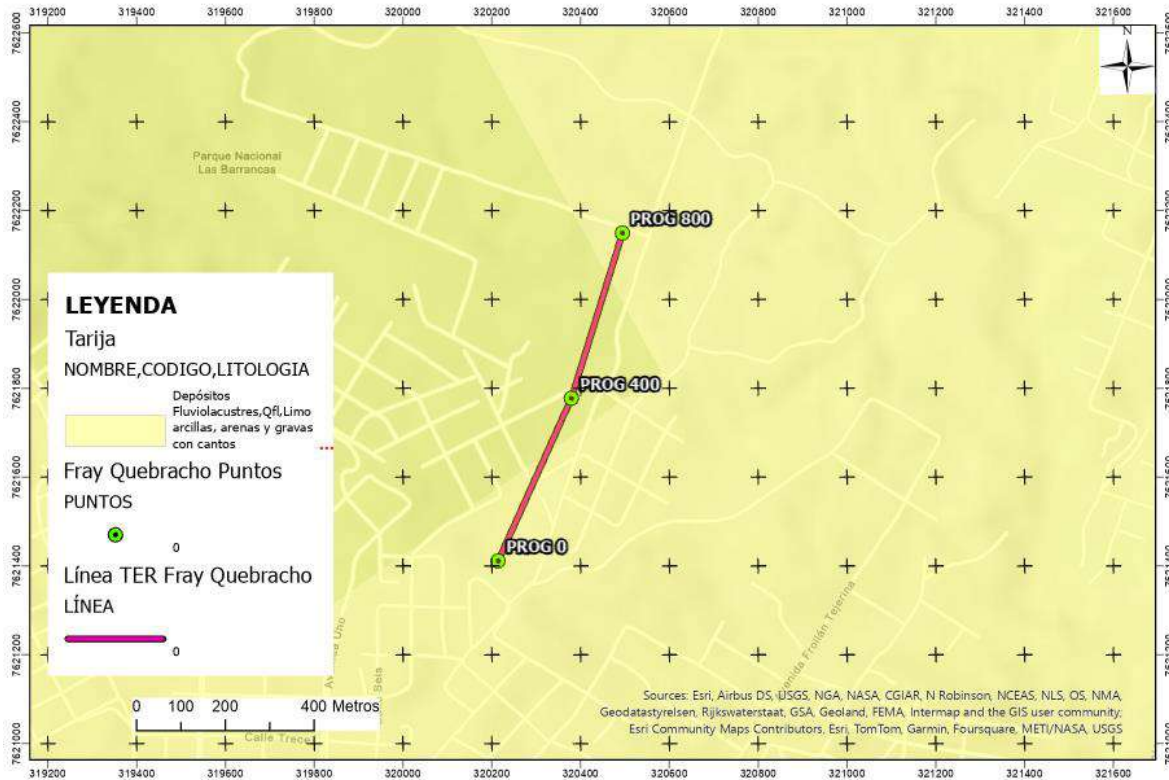
| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|---|--|
| 1 |  | <p>Fotografía tomada a 30 metros del centro de la línea hacia el este.</p> <p>0.5 m. arena fina.</p> <p>0.5 m. arcilla con materia orgánica.</p> <p>1.0 m. limo.</p> <p>Arcilla</p> <p>Demuestra secuencia cíclica de sedimentación.</p> <p>Alternancia de material fino de baja resistividad compuesta de arcillas y limos.</p> |
| 2 |  | <p>Fotografía tomada sobre la quebrada aproximadamente a 120 metros del equipo hacia el noreste (progresiva 520).</p> <p>Estrato superior más competente compuesto de arcilla.</p> <p>Estrato inferior menos competente de limos, arenas y material orgánico (color oscuro).</p> |

| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|--|---|
| 3 |  <p>The image shows a vertical soil profile with several distinct layers. Three yellow lines are drawn across the profile to delineate these layers. The top layer is a thin, light-colored band. Below it is a thicker, darker layer containing small stones and pebbles. The third layer is a lighter, more uniform band. The bottom layer is the most textured, appearing to be composed of fine particles and clays. A small white square marker is visible on the left side of the profile, and a vertical metal rod is visible at the top edge.</p> | <p>Fotografía tomada aproximadamente a 400 metros del final de la línea, en proximidades de la quebrada, donde se puede observar:</p> <p>1.0 m. limo arenoso.</p> <p>0.50 m. de gravas y arenas (depósito aluvial de alta energía).</p> <p>0.5 m. arena sin cohesión.</p> <p>Arcillas</p> |

Mapa 4

Mapa geológico Fray Quebracho, imagen base topografía mundial software Arcgis Pro

MAPA GEOLÓGICO PARQUE NACIONAL LAS BARRANCAS - ZONA FRAY QUEBRACHO



3.4 YESERA

3.4.1 ANTECEDENTES

En el Valle Yesera, al Este de la serranía de Gamoneda, zona de Caldera Chica, se ha realizado una Tomografía Electro Resistiva ERT, para analizar y ver la litología del suelo mediante métodos indirectos con el fin de aprovechar aguas subterráneas e identificar posibles paleocauces y el espesor de los mismos.

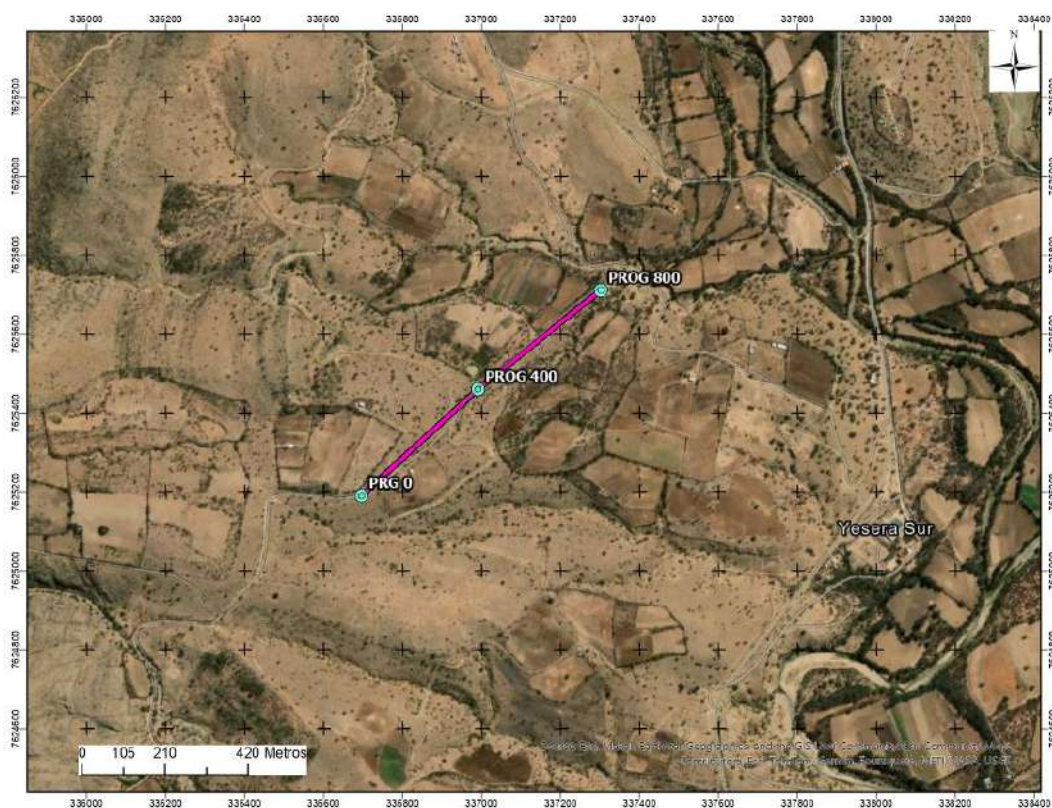
En este sitio no tenemos ningún pozo como referencia para comparar los resultados, es un primer registro de tomografía, en base a este resultado se pueden evaluar posibles potenciales zonas de agua subterránea.

3.4.2 UBICACIÓN

El estudio preliminar de geofísica a realizarse se encuentra en la Provincia Cercado, Valle de Yesera, en las proximidades de la comunidad de Yesera Sud del departamento de Tarija.

Mapa 5

Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés de Yesera, la ubicación de la línea de Tomografía Eléctrica Resistiva.



La línea se encuentra en el Departamento de Tarija, sus coordenadas en el sistema Universal Transversa de Mercator WGS-84 Zona: 20 K, a una elevación: de 2200 msnm (referencial) son las siguientes:

Tabla 14

Coordenadas de tomografía Yesera

| PROGRESIVA | ESTE | NORTE | ALTURA msnm | SITIO |
|-------------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------------|
| 0 | 336698 | 7625190 | 2202 | INICIO CARRETE 1 |
| 200 | 336866 | 7625307 | 2193 | INICIO CARRETE 2 |
| 400 | 336993 | 7625460 | 2181 | CENTRO – INICIO CARRETE 3 |

| PROGRESIVA | ESTE | NORTE | ALTURA msnm | SITIO |
|-------------------|-------------|--------------|------------------------|------------------|
| 600 | 337149 | 7625585 | 2170 | INICIO CARRETE 4 |
| 800 | 337304 | 7625711 | 2161 | FINAL CARRETE 4 |

Nota. Fuente. Elaboración propia

3.4.3 GEOLOGÍA

SISTEMA DEVÓNICO

El basamento rocoso en este sector del valle de Yesera está conformado por areniscas gris marrón y verdoso, grano medio fino, subredondeado a redondeado, buena selección, matriz limosa o limpias, algunos bancos con cemento silíceo; intercaladas con lutitas gris verde, micáceas. Asignadas a la Formación Huamampampa que constituye el basamento Neógeno y Cuaternario Sistema Cuaternario

Qⁿⁱ DEPÓSITOS DE FLUVIO LACUSTRES

Gran parte del valle de Yesera, está constituido por un relleno correspondiente a una serie de lagunas poco profundas con áreas de pantanos, condicionado por aspectos climáticos de época de lluvias torrenciales y épocas de estiaje muy secas, cada aluvión transportaba gravas, típicos turbiones que sigue ocurriendo en los valles de Tarija, en esa época la angostura no existía, entonces cuando dejaba de llover al disminuir las crecidas los sedimentos finos empezaban a decantar y a su vez en las partes someras elevadas crecía la vegetación por eso la abundante fauna fósil del Pleistoceno existente, que ramoneaba esa vegetación y la existencia de sus depredadores, que ahora se pueden observar en el Museo Nacional Paleontológico Arqueológico de Tarija.

Toda esta secuencia a veces forma acuíferos semiconfinados en este valle de Yesera

Q^{ta} DEPÓSITOS DE TERRAZA ALUVIAL

En los alrededores del río de la Yesera afloran depósitos de terrazas aluviales constituido por gravas, arenas, limos y arcillas, formados a los costados del canal principal y por su morfología regular casi plana estos suelos son utilizados para el cultivo.

Qa DEPÓSITOS ALUVIALES

El curso actual del río de la Yesera contiene el flujo de agua superficial y sus depósitos reciente están constituidos por gravas, arenas limos y arcillas- con presencia de cantos.

Figura 40

Ubicación de las fotografías para la línea ERT - Yesera

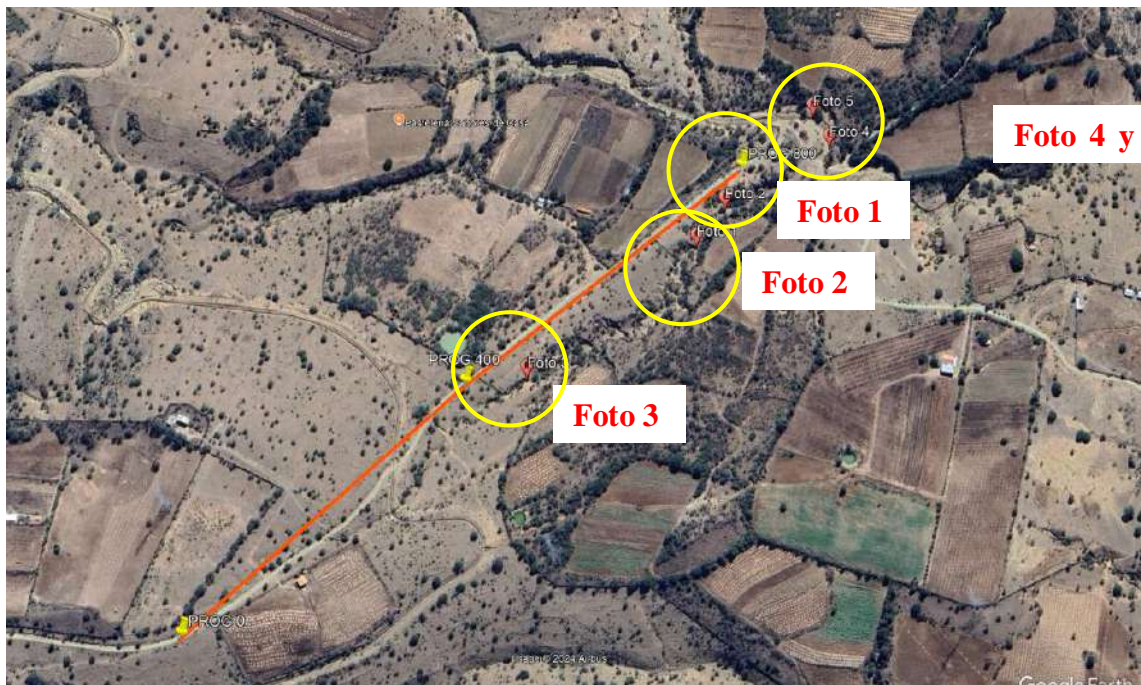






Tabla 15

Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Yesera

| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|---|--|
| 1 |  | <p>La fotografía fue tomada sobre la progresiva 700 a 30 metros de la línea de geofísica sobre la quebrada.</p> <p>Grietas de desecación (mud cracks) rellenado con yeso.</p> |
| 2 |  | <p>La fotografía fue tomada sobre la progresiva 850 a 20 metros de la línea de geofísica sobre la quebrada.</p> <p>Cobertura reciente compuesto de gravas, arenas en una matrix de limos y arcillas.</p> |

| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|--|---|
| 3 |  | <p>La fotografía fue tomada sobre la progresiva 460 (a 60 metros del equipo de geofísica) a 30 metros de la línea de geofísica sobre la quebrada.</p> <p>En la parte superior se observa una cobertura aluvial de alta energía por la presencia de material grueso como piedras y gravas en una matrix limo arenoso y al tope se observa los restos de un charco en él han decantado limos y yesos, asumiendo que las aguas en esa época Pleistoceno son sulfatadas cálcicas.</p> |
| 4 |  | <p>Fotografía tomada al final de la línea de geofísica a 100 metros siguiendo la misma dirección.</p> <p>En la parte superior se puede ver una terraza aluvial compuesto de gravas y arenas en una matrix limo arenosa, reciente.</p> <p>En la parte media se observa limos y arcillas.</p> <p>El río compuesto de gravas con bloques y arena, que conforman los depósitos aluviales actuales.</p> |

| Foto | Imagen | Descripción |
|-------------|--|--|
| 5 |  A photograph showing a streambed composed of numerous large, light-colored rocks and boulders. A small, shallow pool of water is visible in the lower-left portion of the streambed. The background shows a line of trees and a clear sky. | <p>Fotografía tomada al final de la línea de geofísica a 100 metros siguiendo la misma dirección un poco a la izquierda.</p> <p>Se puede observar gravas de la cobertura de alta energía. Ya que estas corrientes transportan bloques de tamaños mayores a los 150 cm.</p> |

CAPÍTULO IV

MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

4.1 PLANIFICACIÓN

Para la planificación se tomó en cuenta la disponibilidad del equipo, pronóstico del clima, porque no conviene trabajar en época de lluvia si hubiera descargas eléctricas, personal disponible para todo el apoyo de campo, transporte y logística mínima para el personal.

4.2 EQUIPO GEOFÍSICO

Para el presente estudio se ha empleado un tomógrafo electro resistivo Terrameter LS 2 de Guideline GEO ABEM (Suecia). Este equipo emplea un transmisor, un receptor de alta resolución y un selector de electrodos integrados a una computadora con plataforma Linux integrados en un solo elemento.

El transmisor de corriente constante envía una onda cuadrada casi perfecta, eso significa que el instrumento es menos sensible a las perturbaciones de ruido. El instrumento también incorpora canales de entrada aislados galvánicamente, donde cada entrada puede medir de forma totalmente independiente de los demás.

Tradicionalmente la polarización inducida se mide con electrodos no polarizados, pero gracias al amplio rango dinámico, el equipo Terrameter LS 2 realiza excelentes mediciones de PI con electrodos de acero inoxidable comunes (Dahlin, Leroux y Niseen, 2002) aumentando así la efectividad del campo y eliminando la necesidad de mantenimiento de electrodos especiales.

4.3 PRUEBAS PRELIMINARES

4.3.1 PRUEBAS DE ISOLACIÓN Y CONTINUIDAD

Esta prueba consiste en verificar el buen estado de los cables, el problema de isolación se presenta cuando el cable por algún motivo fue aplastado (cruce de alguna movilidad) y cada cable tiene una toma y conexión a un pin del puerto, estos cables están unidos y el dato que registra está totalmente exagerado.

La prueba de continuidad consiste en algún problema del cable que tiene un hilo cortado, esto puede pasar por aplastamiento o bien el cable ya estaba reparado y los ayudantes estiraron los cables sin cuidado volviendo a desconectar esa unión.

Estas pruebas se tienen que realizar en gabinete con frecuencia, mucho mejor antes de cualquier campaña geofísica, si el cable presenta estos problemas es necesario el mantenimiento y reparación de los cables previos al ingreso de campo.

4.4 TRABAJO DE CAMPO

La configuración estándar de campo consiste en conectar el equipo a cuatro cables de 21 tomas cada uno, los electrodos de acero inoxidable se conectan a cada toma y el selector de electrodos direcciona automáticamente a las estacas que corresponda la corriente y registra de otros el diferencial de potencial, según el arreglo o protocolo seleccionado.

Los electrodos deben ser enterrados más de la mitad de su longitud, mucho mejor $2/3$, para evitar, aproximadamente a 20 cm. del cable, mucho mejor si se hace un pequeño hoyo con la pala y clavar ahí la estaca y echar un poco de agua para mejorar el contacto del suelo con la estacas, en lo posible bien alineados en una sola línea todo el cable y estacas, porque el modelo matemático producto de la inversión no contempla cambio de dirección de la línea, modelará pensando que todo está bien alineado.

Si el terreno está libre de construcciones y es terreno abierto es mejor empezar del lado izquierdo Oeste a Este para que se pueda sobreponer a Google Earth y tener más idea de los posibles cambios ocurridos a lo largo del tiempo en esa línea. Si la línea es perpendicular, de Sur a Norte.

Durante la medición de Resistividad + Polarización Inducida, el Terrameter LS 2 toma muestras de la descarga de tensión con una frecuencia de 1 KHz y una resolución de 24 bits, capturando la curva completa de PI, gracias a los cables aislados galvánicamente el Terrameter LS puede medir con su rango de entrada más fino de ± 2.5 V.

En los cables extremos sólo se conectan las estacas impares para llegar a la profundidad del arreglo y los dos cables junto al equipo todas las estacas.

Figura 41

Configuración 4x21 (4 cables de 21 estacas cada uno)

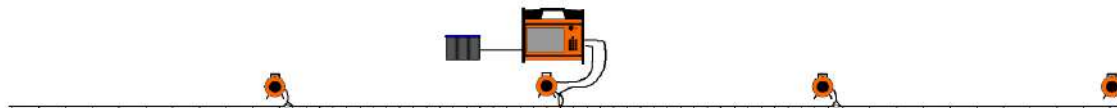


Figura 42

Equipo Terrameter LS 2 en el centro Prog. 400 de la línea de Tierra Linda



Una vez que se tenga las estacas instaladas y el equipo en operación se puede realizar el levantamiento topográfico de todas las estacas, para la presente tesis se realizó en modo RTK enlazado al punto GEO-9 de la ciudad de Tarija, enlazado a la red MARGEN del IGM. Adjunto en Anexo 3 la Monografía de la base.

Adjunto en Anexo 4a la topografía de Tierra Linda, 4b topografía de Fray Quebracho y 4c la topografía de Yesera, coordenadas de cada línea.

Figura 43

Levantamiento en modo RTK de todas las estacas o electrodos clavados en tierra



4.5 EQUIPO EMPLEADO

- 1 Tomógrafo Electro Resistivo Terrameter LS 2
- 4 Cables de 21 tomas con espaciamiento de 10 metros
- 2 Adaptadores de cable
- 65 Estacas o electrodos de acero
- 65 Cables jumper de conexión estaca – cable
- 1 Batería de 12V 75Ah
- 3 Handys de comunicación
- 2 Combos
- 6 Conos de advertencia
- Agua, para mejor el contacto de las estacas con el suelo.
- 1 Receptor GPS navegador
- 1 Receptor GNSS RTK

4.6 SOFTWARE EMPLEADO

- Terrameter Toolbox
- X2IPI (Prof. Alexey Bobachev)
- RES2DIN (Prof. Loke)
- Erigraph (Prof. Torleif)

4.7 CONFIGURACIÓN DE EQUIPO

Para la presente tesis se empleó la siguiente configuración.

| | |
|---|---|
| Measure mode (Modo de medición) | RES / IP |
| Number of stackings (Número de pasadas por una estaca) | Mínimo 1 Máximo 2 |
| Error limit (Límite de Error) | 1% |
| Delay time (Tiempo de retraso) | 0.2 Seg. |
| Acq time (Tiempo de adquisición) | 0.3 seg. |
| Number of IP windows (Número de ventanas IP) | 8 (Ver cuadro siguiente) |
| Record full waveform (registro de onda) | SI |
| Power line frequency (Frecuencia de la línea eléctrica) | 50 Hz |
| Sample rate (tasa de muestreo) | 1000 Hz |
| Current (corriente) | Mín. 10 mA Max. 500 mA |
| Max power (Salida de poder) | 200W |
| Max output voltage (Salida de voltaje) | 400V |
| Electrode test (Prueba de electrodos) | Focus one |
| Failed electrode (Electrodo fallado) | 300 KOhm |
| Bad electrode (Electrodo malo) | 5 KOhm |
| Electrode test current (Prueba de electrodo de corriente) | 20 mA |
| Load variation margin (Margen de variación) | 15% |
| IP minimum off time (tiempo de registro de PI siguiente) | 0.5 seg, 1 seg. 1.5 seg. (ver cuadro siguiente) |

IP delay time

0.02 s

Integration time (s) for IP windows (Ventanas de PI) Ver cuadro siguiente

Cada arreglo Schlumberger y Gradiente tiene tres registros de campo tanto de resistividad y PI con diferentes configuraciones de tiempo para PI de 0.5, 1 y 1.5 segundos para ver cuál configuración se acerca al registro eléctrico vertical y litología del pozo perforado.

Tabla 16

Configuración de tiempos de polarización inducida PI en dominio de tiempo en seg.

| Número de ventanas | Tiempo de PI en segundos | | |
|--------------------|--------------------------|----------|------------|
| | 0.5 | 1 | 1.5 |
| 1 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 2 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| 3 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| 4 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| 5 | 0.12 | 0.12 | 0.1 |
| 6 | 0.18 | 0.16 | 0.14 |
| 7 | | 0.22 | 0.18 |
| 8 | | 0.3 | 0.24 |
| 9 | | | 0.26 |
| 10 | | | 0.38 |
| | 0.5 | 1 | 1.5 |

Es recomendable establecer los tiempos de las ventanas de PI en múltiplos de los periodos de tiempo de la frecuencia de las líneas de energía de la red local (ejemplo 20, 40, 60, o 100 ms en el caso de frecuencias de 50 Hz) (Manual Terrameter LS)

4.8 PROCESO DE INVERSIÓN DE DATOS

4.8.1 ANÁLISIS DE DATOS

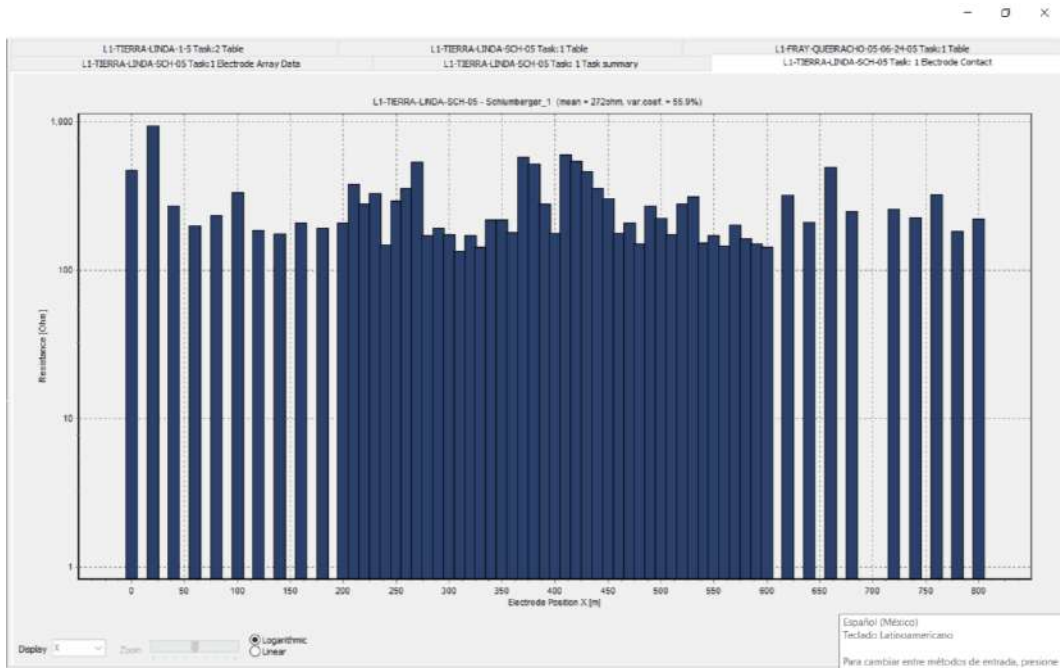
Terrameter Toolbox

Este software es parte de las herramientas del fabricante ABEM, sirve para leer el dato crudo, exportar en un formato que se pueda realizar el proceso de inversión.

Un primer paso es verificar qué estacas fueron instalados en campo, en función del gráfico debemos eliminar esa progresiva incluido la cota.

Figura 44

Gráfico de estacas instalados en campo Resistencia vs. Progresiva en metros.



En función de las estacas instaladas en campo, se tabula la topografía en dos columnas la primera de progresiva y la siguiente de la cota, eliminando las estacas que no hayan trabajado en campo, como el gráfico anterior la estaca de la progresiva 700.

Figura 45

Tabla .txt de datos de topografía (ejemplo Tierra Linda)

The image shows a text editor window with the file name "topoTierraLinda.txt" and the content of a topographic data table. The table has two columns: the first column represents the electrode position in meters (progresiva) and the second column represents the elevation in meters (cota). The data points are as follows:

| Electrode Position X [m] | Elevation [m] |
|--------------------------|---------------|
| 0 | 2037.47 |
| 20 | 2036.85 |
| 40 | 2036.29 |
| 60 | 2036.17 |
| 80 | 2034.56 |
| 100 | 2035.78 |
| 120 | 2036.10 |
| 140 | 2035.46 |
| 160 | 2034.64 |
| 180 | 2033.63 |
| 200 | 2033.42 |
| 210 | 2033.44 |
| 220 | 2033.49 |
| 230 | 2033.76 |
| 240 | 2031.78 |
| 250 | 2031.35 |
| 260 | 2031.81 |
| 270 | 2032.30 |
| 280 | 2030.38 |
| 290 | 2027.78 |
| 300 | 2027.27 |
| 310 | 2026.87 |
| 320 | 2026.70 |
| 330 | 2026.32 |
| 340 | 2025.97 |
| 350 | 2025.44 |
| 360 | 2024.66 |
| 370 | 2023.46 |
| 380 | 2022.58 |
| 390 | 2021.91 |
| 400 | 2021.49 |
| 410 | 2022.18 |
| 420 | 2021.19 |
| 430 | 2020.85 |
| 440 | 2020.06 |
| 450 | 2019.98 |
| 460 | 2020.07 |
| 470 | 2020.19 |
| 480 | 2019.93 |
| 490 | 2019.24 |
| 500 | 2018.66 |

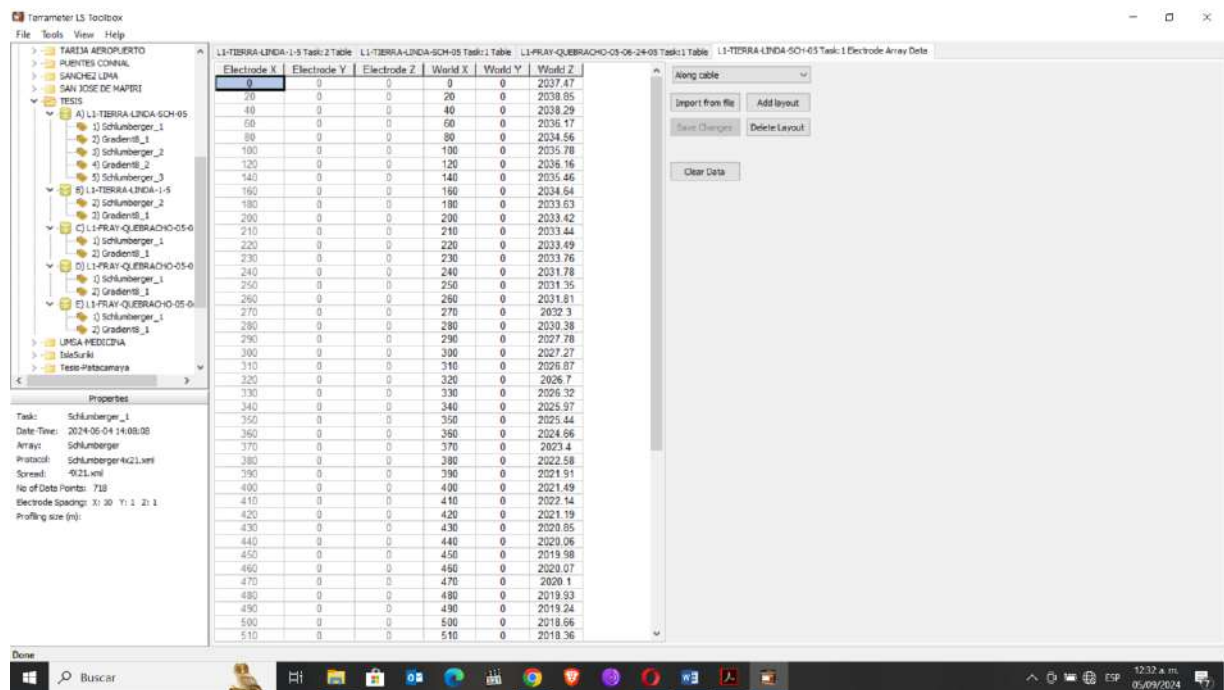
Uno de los primeros pasos es evaluar si tiene pendiente la línea de tomografía y si corresponde añadir topografía a los datos crudos, cuando los terrenos son planos no es necesario añadir topografía a no ser que los resultados de profundidad quieran verse en metros sobre el nivel del mar, claro tienen que ser datos correctos para tener profundidades correctas.

Si el terreno tiene pendientes es necesario obtener las cotas de cada estaca o electrodo instalado en campo, se registra la progresiva y cota de cada punto.

Para la presente tesis hemos realizado un levantamiento con receptores GNSS RTK enlazado a la base CORS GEO-9 de la ciudad de Tarija. Adjunto monografía en Anexo 3.

Figura 46

Cuadro de importación de topografía



Después de evaluar la topografía, tenemos que evaluar el dato crudo de campo, la primera exportación es exportar sin aplicar ningún filtro (Varianza y Resistividad), se exporta tal y cual fue registrado en campo.

Figura 47

Datos de campo de Tierra Linda sin ningún filtro.

| N(east) | E(south) | I(mA) | U(uV) | R(ohm) | V(var%) | Cycles | IP Delay | Window(mV/V) | IP #1(mV/V) | IP #2(mV/V) | IP #3(mV/V) | IP #4(mV/V) | |
|--------------------------------|----------|------------|---------------|---------------|----------------|------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| 11 280 | 63 717 | 503 148374 | 158 095895 | 0 00348499595 | 0 00692637824 | 62 988 | 26 1118308 | 2 | 0 | 1 2313226 | 8 2059074 | 103 88932 | 3 |
| 39 440 | 129 92 | 503 765605 | 200 718684 | 0 00323186884 | 0 00641617723 | 10 116 | 58 6431561 | 2 | 0 | 82 6222323 | 44 780846 | 23 392186 | 3 |
| 29 130 | 41 859 | 239 960967 | 184 342239 | 0 00307302517 | 0 01236924011 | 9 742 | 24 1443480 | 2 | 0 | 44 124836 | 17 102761 | 17 755502 | - |
| 7 250 | 84 96 | 370 872915 | 251 773186 | 0 002804058 | 0 00767148308 | 9 452 | 34 2525826 | 2 | 0 | -1 002873 | 20 907491 | 16 489351 | 2 |
| 15 330 | 64 96 | 502 279631 | 151 816804 | 0 00391281036 | 0 00779012655 | 7 2749 | 35 2415541 | 2 | 0 | 24 974754 | -3 561646 | -1 296852 | 1 |
| 35 390 | 148 691 | 504 068879 | 287 784222 | 0 00403317232 | 0 00800128016 | 6 8536 | 63 3446427 | 2 | 0 | 75 516376 | 22 971776 | 40 863306 | - |
| 9 270 | 64 96 | 502 176532 | 243 927857 | 0 00277086503 | 0 00551771112 | 6 4462 | 24 961537 | 2 | 0 | -80 9305 | 8 43561 | -58 63466 | 9 |
| 63 590 | 57 27 | 502 261975 | 245 524924 | 0 00404060751 | 0 00894498084 | 6 2608 | 28 306939 | 2 | 0 | 30 872881 | 28 429072 | 51 425946 | 3 |
| 45 510 | 57 27 | 424 270442 | 251 436115 | 0 00369673411 | 0 006718079708 | 6 1725 | 30 6496721 | 2 | 0 | 64 520166 | 29 580491 | 36 157371 | 6 |
| 7 250 | 57 27 | 502 278324 | 140 045651 | 0 00446317104 | 0 0088888239 | 6 3778 | 31 265616 | 2 | 0 | 28 870929 | 74 861872 | 37 781042 | 5 |
| 30 150 | 49 564 | 239 893193 | 186 202452 | 0 00205290108 | 0 0110586759 | 5 5349 | 29 1831583 | 2 | 0 | -40 74912 | 16 800517 | -37 50416 | - |
| 49 550 | 64 96 | 448 421788 | 257 937325 | 0 0027650249 | 0 00616612524 | 6 932 | 27 8948934 | 2 | 0 | 0 4049522 | 12 217404 | -30 36236 | - |
| 33 390 | 64 96 | 502 418237 | 141 809158 | 0 00364606849 | 0 0072570385 | 5 8331 | 32 830687 | 2 | 0 | -11 64192 | 5 0242408 | -1 781112 | - |
| 34 400 | 84 96 | 502 145062 | 163 699248 | 0 00368063931 | 0 0073293273 | 6 767 | 31 1593821 | 2 | 0 | 38 839818 | 67 413152 | 46 644311 | 3 |
| 43 490 | 49 564 | 502 154411 | 196 393441 | 0 00501705404 | 0 0099205428 | 5 786 | 26 36841 | 2 | 0 | 8 4248693 | 10 45769 | -16 80877 | - |
| 35 410 | 49 564 | 502 248624 | 110 598268 | 0 00451881881 | 0 00899717509 | 6 6214 | 23 7423657 | 2 | 0 | 2 1472152 | 43 66813 | -2 447286 | 1 |
| 37 420 | 129 92 | 503 794568 | 195 731105 | 0 00206409543 | 0 0055595375 | 5 4243 | 50 3585631 | 2 | 0 | -15 70366 | 10 384356 | -23 50596 | - |
| 41 475 | 28 635 | 501 947525 | 103 889129 | 0 00627135667 | 0 0124940482 | 5 3407 | 21 9806776 | 2 | 0 | 14 043079 | 11 741835 | 12 751152 | 2 |
| 53 590 | 64 96 | 239 878312 | 180 120711 | 0 00112925601 | 0 00714081233 | 5 2268 | 32 3042739 | 2 | 0 | 215 08504 | 141 47447 | 102 45201 | 8 |
| 9 270 | 57 27 | 394 981278 | 252 321988 | 0 0028988545 | 0 00711389287 | 5 2143 | 26 030828 | 2 | 0 | 72 164216 | -11 63665 | 2 4202674 | 2 |
| 55 510 | 64 96 | 502 436896 | 225 085599 | 0 00348182201 | 0 00634972227 | 4 9836 | 31 4402091 | 2 | 0 | -9 889978 | -29 02359 | 14 482348 | - |
| 39 440 | 83 717 | 503 011818 | 308 248965 | 0 00542205994 | 0 0110779226 | 4 8815 | 48 638721 | 2 | 0 | 37 844846 | 18 374711 | 14 870228 | 3 |
| 5 230 | 64 96 | 502 160688 | 123 246828 | 0 00345251439 | 0 006876531795 | 4 8912 | 31 1032056 | 2 | 0 | -1 01821 | 30 000881 | 30 070616 | 3 |
| 45 500 | 68 252 | 502 78603 | 163 134281 | 0 00642175637 | 0 012773005 | 4 6809 | 32 1020629 | 2 | 0 | 46 418832 | 6 149434 | -18 76849 | - |
| 11 280 | 99 127 | 239 793213 | 241 220997 | 0 00204139804 | 0 00851316768 | 4 578 | 44 9314405 | 2 | 0 | 20 109394 | -27 88991 | 58 558851 | 2 |
| 34 406 | 24 782 | 502 024432 | 150 910045 | 0 00780456278 | 0 0151477942 | 4 5707 | 19 9870436 | 2 | 0 | 25 424061 | 8 6435304 | 18 831709 | - |
| 33 395 | 32 48 | 501 920479 | 95 1822994 | 0 00608132051 | 0 0121161036 | 4 5593 | 27 4058065 | 2 | 0 | -15 25241 | -22 49679 | -27 65944 | - |
| 15 330 | 57 27 | 502 348182 | 118 848852 | 0 00446517552 | 0 0088889699 | 4 5956 | 31 275398 | 2 | 0 | -15 35868 | -6 174875 | -1 976606 | - |
| 17 350 | 57 27 | 502 488797 | 152 088173 | 0 00411414395 | 0 00819877849 | 4 2635 | 28 8129301 | 2 | 0 | 75 968874 | 26 511569 | 3 1539892 | 1 |
| 34 400 | 49 564 | 503 014638 | 190 198069 | 0 0051102591 | 0 0181810296 | 4 2304 | 26 8871043 | 2 | 0 | 56 572308 | 82 569703 | 14 543807 | 1 |
| 11 290 | 49 564 | 389 442067 | 253 28797 | 0 00138851943 | 0 0113885171 | 4 1011 | 30 0537363 | 2 | 0 | 51 341194 | 46 888408 | 15 262209 | 4 |
| 37 420 | 114 54 | 503 601877 | 183 999799 | 0 00344528731 | 0 00684129172 | 4 0712 | 48 1433161 | 2 | 0 | 33 566185 | 16 149227 | 38 816477 | 1 |
| 19 360 | 114 54 | 503 710677 | 293 746154 | 0 00387593518 | 0 0075947648 | 4 0317 | 54 1493491 | 2 | 0 | -50 33184 | -6 820552 | -5 388924 | - |
| 1 190 | 84 96 | 239 859348 | 191 089294 | 0 00216624384 | 0 00993130869 | 3 9567 | 40 8966787 | 2 | 0 | 89 906748 | -13 02688 | 35 361842 | 7 |
| 37 430 | 49 564 | 502 242599 | 113 444157 | 0 00539073861 | 0 0181733361 | 3 9492 | 26 3040867 | 2 | 0 | 16 93974 | -25 41927 | 10 041491 | - |
| 11 290 | 84 96 | 502 313657 | 128 047951 | 0 00396761622 | 0 0078787823 | 3 9223 | 35 6427714 | 2 | 0 | 39 908823 | 21 875715 | -12 9352 | - |
| 9 270 | 49 564 | 502 337535 | 110 92728 | 0 00405026817 | 0 00805284199 | 3 8921 | 21 2773387 | 2 | 0 | -10 69084 | -8 805474 | -12 68123 | - |
| 16 345 | 32 48 | 502 007336 | 214 760553 | 0 00536200764 | 0 010661214 | 3 8622 | 24 115098 | 2 | 0 | 14 86731 | 17 563896 | 26 400443 | - |
| 13 310 | 41 859 | 389 366875 | 253 814334 | 0 00623215118 | 0 0160005807 | 3 8064 | 30 1703229 | 2 | 0 | 41 849136 | 21 912965 | 21 059005 | 3 |
| 16 340 | 41 859 | 502 048069 | 219 211452 | 0 00696416388 | 0 0138518987 | 3 8043 | 26 1096315 | 2 | 0 | -1 907587 | 2 0245456 | -4 893096 | - |
| Filtered data points: 0 of 738 | 32636 | 197 056203 | 0 00387441239 | 0 00789094739 | 3 7699 | 54 1224854 | | | -34 93004 | 15 845688 | -12 18835 | | 1 |

Luego verificamos básicamente dos variables, la varianza y la resistividad de cada lectura y se aplica un primer filtro en función de la varianza (La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media).

Figura 48

Ejemplo de Tierra Linda arreglo Schlumberger de PI de 0.5 seg.

| Nadr | Freq | I | Uua(V) | UUb(V) | R(Ohm) | Var(%) | Rho-a(Ohm-m) | Cycles | IP Delay | Windesim(VV) | IP #1(mV/V) | IP #2(mV/V) | IP #3(mV/V) | IP #4 | | | | |
|------|------|--------|--------|---------|--------|---------|---------------|---------------|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----|---------|-----|---------|
| 30 | 150 | 49.564 | 220 | 8931193 | 186 | 207452 | 0.00265201189 | 0.0110266799 | 6.9349 | 90 | 1811153 | 2 | 49 | 44912 | 16 | 800917 | -37 | 58418 |
| 49 | 550 | 64.96 | 448 | 4211788 | 257 | 837325 | 0.0027650249 | 0.00616612034 | 5.9322 | 27 | 8948934 | 2 | 0 | 0.4845522 | 12 | 217404 | -30 | 38236 |
| 33 | 390 | 64.96 | 502 | 418237 | 141 | 809159 | 0.0036606848 | 0.0072570385 | 6.8331 | 32 | 8300887 | 2 | 0 | 11.64182 | 6 | 6242408 | -1 | 791112 |
| 34 | 400 | 64.96 | 502 | 141002 | 163 | 832049 | 0.0036063031 | 0.0073283273 | 5.787 | 33 | 1532821 | 2 | 0 | 38.82916 | 57 | 433352 | 46 | 544211 |
| 43 | 450 | 49.564 | 502 | 15441 | 195 | 193441 | 0.00581765404 | 0.0099205428 | 5.736 | 26 | 36341 | 2 | 0 | 8.4548693 | 10 | 40769 | -16 | 68077 |
| 35 | 410 | 49.564 | 502 | 248624 | 110 | 509288 | 0.00451881881 | 0.00899717509 | 5.6214 | 23 | 7429857 | 2 | 0 | 2.1472152 | 43 | 668813 | -2 | 447285 |
| 37 | 420 | 129.92 | 503 | 794958 | 199 | 731105 | 0.00280409943 | 0.00556595375 | 5.4243 | 30 | 3595621 | 2 | 0 | -16.70366 | 10 | 384366 | -23 | 56956 |
| 41 | 475 | 20.635 | 501 | 947525 | 163 | 889129 | 0.0027135657 | 0.0124948482 | 5.3407 | 21 | 9800776 | 2 | 0 | 14.043079 | 11 | 741835 | 12 | 751152 |
| 53 | 590 | 64.96 | 238 | 878332 | 180 | 120711 | 0.00171286091 | 0.00714881233 | 6.2268 | 32 | 3942739 | 2 | 0 | 215.08504 | 141 | 47447 | 192 | 45261 |
| 9 | 270 | 57.27 | 394 | 981278 | 252 | 321088 | 0.00283698645 | 0.00711899897 | 6.2143 | 25 | 838828 | 2 | 0 | 72.104216 | -11 | 63565 | 2 | 4202674 |
| 55 | 510 | 64.96 | 502 | 436896 | 225 | 105509 | 0.00349182201 | 0.0069497227 | 4.9035 | 31 | 4400291 | 2 | 0 | -9.580978 | 25 | 02359 | 14 | 482348 |
| 39 | 440 | 83.717 | 503 | 010183 | 368 | 248955 | 0.0054205994 | 0.010170218 | 4.8815 | 40 | 636721 | 2 | 0 | 37.844946 | 18 | 372471 | 14 | 870228 |
| 5 | 230 | 64.96 | 502 | 190688 | 123 | 248628 | 0.00345261439 | 0.00687931795 | 4.8012 | 31 | 1032096 | 2 | 0 | -1.01821 | 30 | 002981 | 30 | 078016 |
| 45 | 500 | 60.252 | 502 | 7003 | 183 | 134281 | 0.0062175937 | 0.012733005 | 4.6509 | 32 | 1020629 | 2 | 0 | 45.418832 | 6 | 140424 | -18 | 75849 |
| 11 | 200 | 89.427 | 239 | 732143 | 241 | 220867 | 0.00204139884 | 0.00851316768 | 4.578 | 44 | 9344805 | 2 | 0 | 20.105964 | -27 | 88961 | 58 | 553815 |
| 34 | 405 | 24.782 | 502 | 024432 | 160 | 910045 | 0.00768465278 | 0.0151477942 | 4.5707 | 19 | 9870436 | 2 | 0 | 25.424061 | 8 | 6436304 | 18 | 831709 |
| 33 | 395 | 32.48 | 501 | 920479 | 95 | 1823084 | 0.00608132051 | 0.0121161036 | 4.5583 | 27 | 4069806 | 2 | 0 | -15.25241 | 22 | 49679 | -27 | 65944 |
| 15 | 330 | 57.27 | 502 | 348192 | 118 | 846832 | 0.00446517552 | 0.00888986929 | 4.5056 | 31 | 275308 | 2 | 0 | -15.36866 | -6 | 172975 | -1 | 976886 |
| 17 | 350 | 57.27 | 502 | 430797 | 162 | 888173 | 0.0041141435 | 0.0081887849 | 4.3535 | 28 | 812931 | 2 | 0 | 76.806874 | 28 | 815569 | 3 | 1638082 |
| 34 | 400 | 49.564 | 502 | 014638 | 190 | 198069 | 0.0051102891 | 0.0101801026 | 4.2304 | 26 | 8671943 | 2 | 0 | 56.872308 | 52 | 559703 | 14 | 5638801 |
| 11 | 290 | 49.564 | 399 | 442067 | 253 | 287957 | 0.00443518943 | 0.011389531 | 4.1011 | 30 | 8537363 | 2 | 0 | 51.341194 | 46 | 888848 | 15 | 262209 |
| 37 | 420 | 114.54 | 503 | 601871 | 183 | 989799 | 0.00344528731 | 0.00684129172 | 4.0712 | 48 | 1433161 | 2 | 0 | 33.566185 | 16 | 149227 | 38 | 416477 |
| 19 | 360 | 114.54 | 503 | 710677 | 283 | 746184 | 0.00387939618 | 0.0076947648 | 4.0317 | 54 | 1492491 | 2 | 0 | -50.33184 | 8 | 826062 | -5 | 388924 |
| 1 | 150 | 64.96 | 238 | 853346 | 191 | 109294 | 0.0015624384 | 0.00801318085 | 3.9567 | 40 | 8564787 | 2 | 0 | 59.906748 | 13 | 02568 | 35 | 361042 |
| 37 | 420 | 49.564 | 502 | 242595 | 113 | 444167 | 0.00538078661 | 0.0107333361 | 3.9423 | 36 | 3346067 | 2 | 0 | 16.95974 | 25 | 41527 | 10 | 241451 |
| 11 | 290 | 64.96 | 502 | 313057 | 128 | 847951 | 0.00395761522 | 0.0078787823 | 3.9223 | 36 | 6427714 | 2 | 0 | 39.908823 | 21 | 676715 | -12 | 9352 |
| 9 | 270 | 49.564 | 502 | 337535 | 110 | 97278 | 0.00405026817 | 0.00806294199 | 3.8921 | 21 | 272387 | 2 | 0 | -19.68084 | 8 | 805474 | -12 | 68123 |
| 16 | 345 | 32.48 | 502 | 807335 | 214 | 769553 | 0.0035200764 | 0.010661234 | 3.8622 | 24 | 115098 | 2 | 0 | 14.857341 | 17 | 553886 | 26 | 400443 |
| 13 | 310 | 41.859 | 388 | 388875 | 253 | 814334 | 0.00623215118 | 0.0100006987 | 3.8064 | 30 | 1703329 | 2 | 0 | 41.048136 | 21 | 92966 | 21 | 063805 |
| 16 | 340 | 41.859 | 502 | 048860 | 219 | 211462 | 0.00958416388 | 0.0138515897 | 3.8043 | 26 | 1096315 | 2 | 0 | -1.907687 | 2 | 0246455 | -6 | 893096 |
| 1 | 150 | 64.96 | 238 | 853346 | 191 | 109294 | 0.0015624384 | 0.00801318085 | 3.7069 | 54 | 124854 | 2 | 0 | -34.93004 | 15 | 846668 | -12 | 18835 |

En general, se recomienda no filtrar datos superiores a un 5% de la cantidad total de datos.

Revisamos los valores altos y podemos aplicar si corresponde un primer filtro, desactivando el dato malo y exportando los datos aceptables.

Mientras menos datos desactivemos en la exportación, mucho mejor, como el 5% de 718 datos del ejemplo de la imagen es 36 datos, desactivamos máximo 10 datos, porque hay otros filtros posteriormente.

Los datos mayores a 5.9 fueron filtrados en el ejemplo superior.

Todas las líneas fueron evaluadas también en función de la Resistividad, en algunos casos pueden encontrarse datos muy altos de resistividad que si están fuera del promedio también son filtrados.

Para el presente estudio no había valores extremos que representen ruido.

Puede presentarse valores extremos, pero son por causas de cables en mal estado, o bien alguna cavidad grande que el equipo de acuerdo al protocolo haya registrado, pero deberían ser una

agrupación de varios puntos con alta resistividad (ejemplo, mayores a 15,000 ohmm) que no son coherente con el entorno.

Figura 49

Cuadro de datos crudos en función de la resistividad de Tierra Linda – Schlumberger de PI de 0.5 seg. que muestra la calidad de los datos de resistividad.

The screenshot shows a software window titled 'Terrestrial LS Toolbox' with a tree view on the left and a data table on the right. The table has columns: Depth (m), F (Hz), I (mA), U (mV), R (Ohm), V (V), Rho-a (Ohm.m), Cycles, IP Delay, Window (V/V), IP #1 (mV/V), IP #2 (mV/V), IP #3 (mV/V), and IP #4. The data rows show various values for these parameters across different measurement points.

Luego se exporta en formato .dat para leer con el software RES2DINV.

Hay otras opciones de exportación de datos como la .usf (Universal Sounding Format) y .txt entre otros.

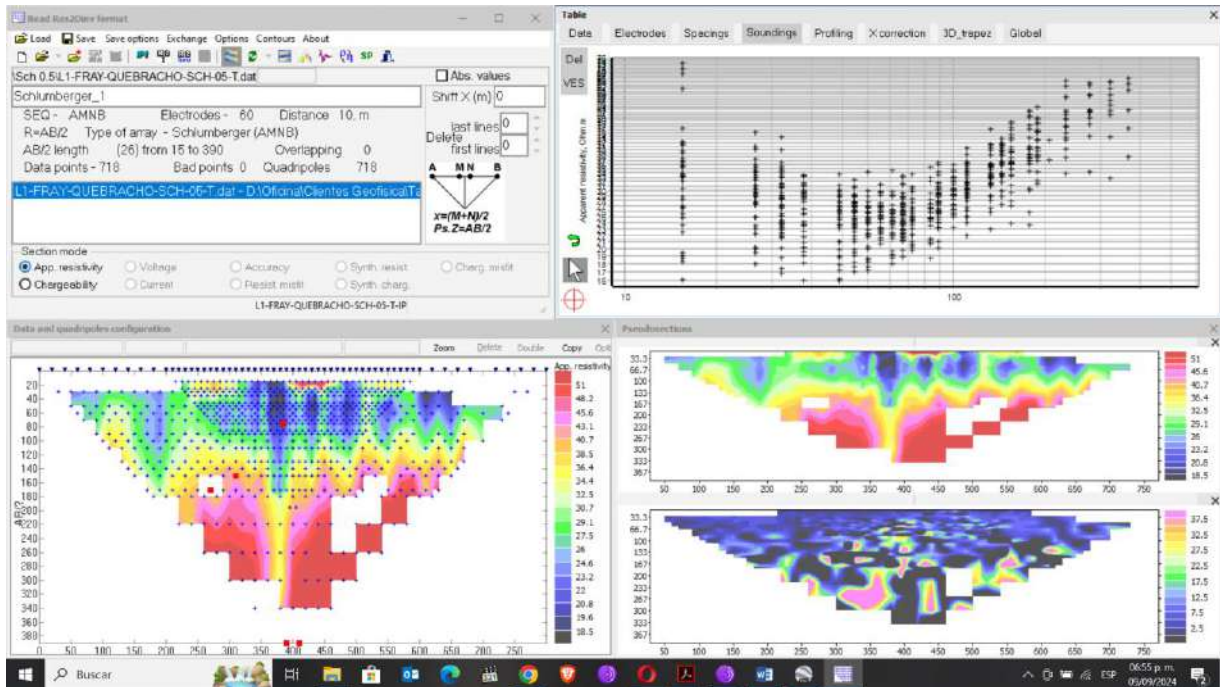
El software X2IPI nos permite evaluar el dato crudo, corregir los datos de campo, analizar datos de PI, fusionar o separar conjunto de datos, optimizar secuencia de tomografías, preparar archivos para la inversión 2D y analizar resultados de inversión 2D (X2IPI Manual, 2023), revisamos los datos sin filtro y con filtro (varianza y resistividad).

Entre las bondades también mecom que se puede eliminar una estaca que posiblemente haya tenido mucho ruido en campo, o sea que estaba sobre algún ducto metálico o fierros enterrados, este punto era parte de varios registros de campo por la combinación que tenía como A,B o bien M y N, entonces al eliminar el punto del registro eliminamos también las múltiples combinaciones que tuvo en el registro de campo.

Para tal efecto empleamos el software X2IPI.

Figura 50

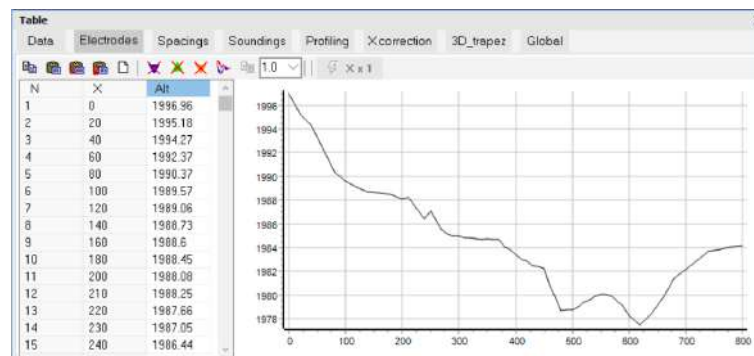
Software X2IPI



En caso de no añadir topografía en la primera opción del software Terrameter LS toolbox, este software nos permite añadir la topografía a todas las estacas.

Figura 51

Cuadro para añadir topografía a los datos de campo

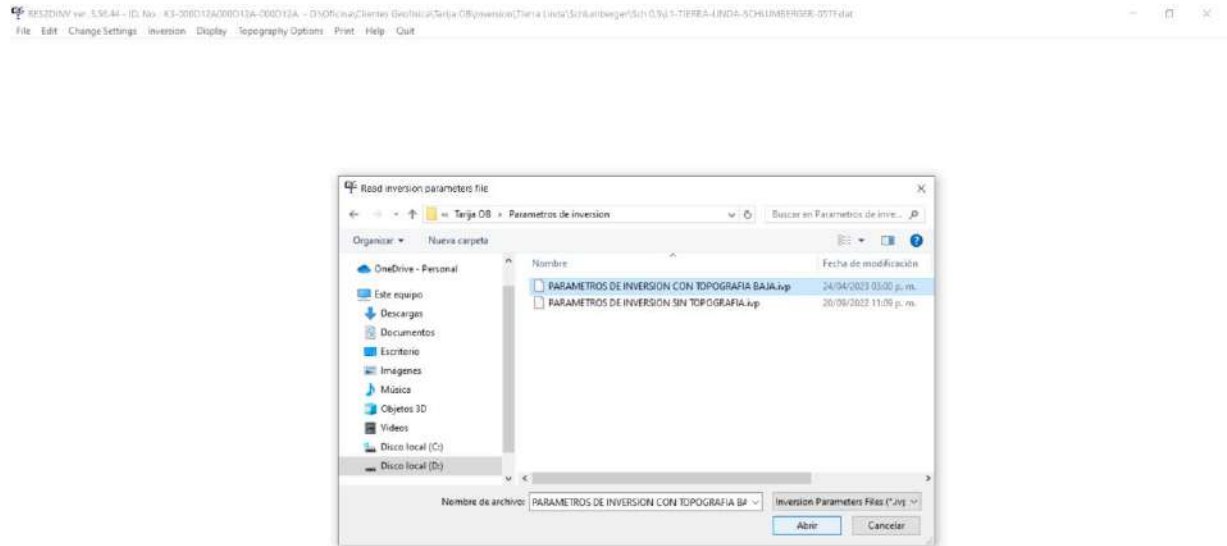


4.8.2 PARÁMETROS DE INVERSIÓN

Los parámetros de inversión son las reglas básicas para realizar el proceso de inversión, para la presente tesis hemos creado un archivo que incluye una topografía baja porque no había pendientes fuertes en la zona de estudio.

Figura 52

Cuadro de lectura de los parámetros de inversión



Resumen de los parámetros de inversión.

Figura 53

Resumen de los parámetros de inversión

```
RES2DINV ver 3.56.44 - ID. No. K3-000017A00013A-000013A - C:\Oficina\Clientes Geofisica\Tarija 08\Inversion\Tierra Linda\Schlumberger\Stn 0.3\1-TIERRA-LINDA-SCHLUMBERGER-05TF.dat
File Edit Change Settings Inversion Display Topography Options Print Help Quit

Restoring inversion parameters from file D:\Oficina\Clientes Geofisica\Tarija 08\Parametros de inversion\PARAMETROS DE INVERSION CON TOPOGRAFIA BAJA.iup.

Initial damping factor is 0.1500.
Minimum damping factor is 0.0200.
Line search is always used.
Convergence limit is 5.0000.
Minimum change in RMS error is 0.5000.
Number of iterations is 5.
Vertical to horizontal flatness filter ratio is 1.0000.
User defined increase in layer thickness.
Number of nodes between adjacent electrodes is 4.
Smoothness constrain is only used directly on model resistivity values.
Number of topographical datum points is not reduced.
Topographical modeling is to be carried out.
Average topographical trend to be removed.
Jacobian matrix is recalculated after each iteration.
Increase of damping factor with depth is 1.1000.
Finite element method is used for topographic modeling.
Robust data inversion constrain is used with cutoff factor 0.0500.
Robust model inversion constrain is used with cutoff factor 0.0050.
Extended model is not used.
Effect of side blocks is not reduced.
Finer mesh is used.
Damping factor is optimised at each iteration.
Robust smoothness constrain is used in time-lapse inversion.
Simultaneous time-lapse inversion is used.
Thickness of first layer is 1.0000.
Factor to increase thickness layer with depth is 1.1110.
Finite element method is used.
Width of blocks used is 1 times the unit electrode spacing.
All models blocks must have the same width.
RMS convergence limit is 0.1 percent.
Logarithm of apparent resistivity values are used for the inversion.
Resistivity/IP data are inverted sequentially.
Do not proceed automatically in sequential IP inversion.
IP damping factor is 0.1000.
Automatic IP damping factor is not used.
Cutoff factor for borehole data is 0.00010.
Range of resistivity values are limited.
Upper resistivity cutoff limit is 50.00000.
Lower resistivity cutoff limit is 0.02000.
Average resistivity used.
Incomplete Gauss-Newton method used with convergence limit of 0.0050.
Reference model with damping factor of 0.010 used.
```

En resumen, los parámetros más importantes para el proceso de inversión son:

Número de iteraciones: 5 para no alterar o forzar el modelo matemático.

Elementos finitos: Porque nos permite modelar con mejor exactitud cualquier estructura, independiente de su posición.

Vertical to horizontal flatness filter ratio: el rango máximo es 2 para estructuras verticales, 1.5 cuando hay pendientes considerables o bien estructuras inclinadas, 1 para estructuras relativamente horizontales y 0.5 para terrenos planos o estructuras horizontales, para la presente tesis hemos adoptado 1.0 porque las estructuras que buscamos son afloramientos que desconocemos su continuidad en profundidad y son relativamente horizontales.

4.8.3 ELEMENTOS FINITOS

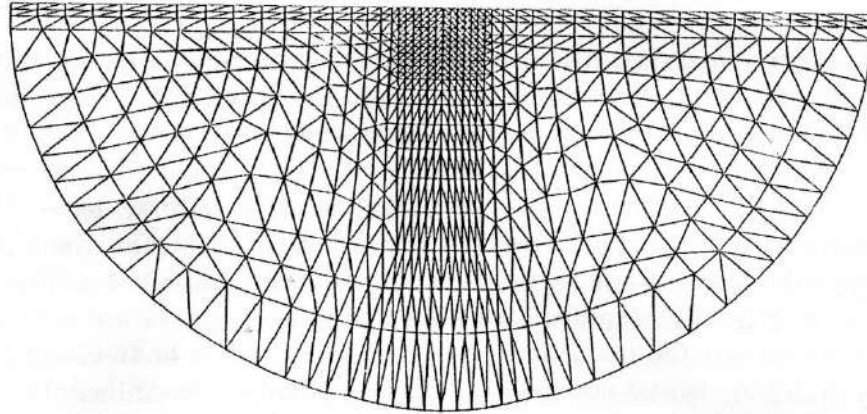
En el método de elementos finitos, la malla de elementos puede variar de una manera muy irregular, utilizando elementos triangulares de diferentes tamaños y orientaciones, lo que facilita el modelado de diversas geometrías geológicas y las variaciones topográficas. (Torleif, 1993).

El tamaño de la malla se incrementa hacia los bordes del modelo para simular el infinito.

Para la presente tesis, hemos adoptado elementos finitos como modelo matemático.

Figura 54

Ejemplo de división de grilla usando elementos finitos (Coggon, 1971)



4.8.4 DIFERENCIAS FINITAS

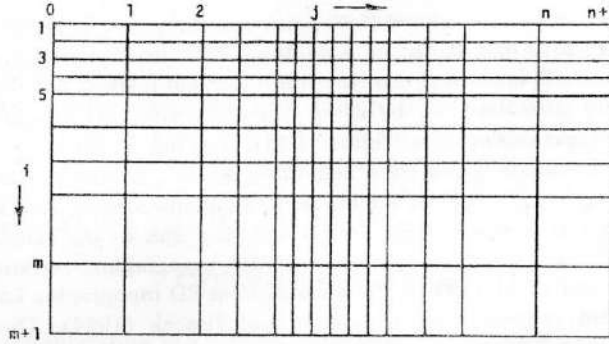
El método de diferencias finitas también incluye la división de la región modelada en celdas, pero la división de la cuadrícula es siempre rectangular, los espaciamientos pueden variar a lo largo de los diferentes ejes modelados para simular límites infinitos del modelo. (Torleif, 1993).

El método de diferencias finitas utiliza una descripción numérica más simple que el método de Elementos Finitos, este método no es el adecuado para modelar la topografía y menos adecuada para estructuras geológicas.

Cuando las estructuras son horizontales, podemos emplear diferencias finitas como modelo matemático para el proceso de inversión, pero no es muy frecuente, porque las estructuras en el subsuelo pueden tener un buzamiento diferente, pueden presentarse alguna fractura o falla o bien discontinuidad de la estructura.

Figura 55

Ejemplo de división de grilla usando el método de diferencias finitas (Mufti, 1978)



4.8.5 MODELACIÓN TOPOGRAFIA

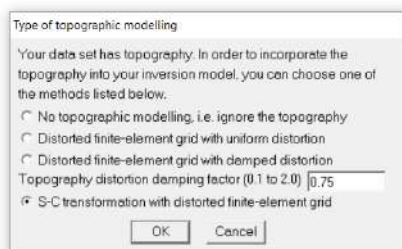
Para la modelación topográfica, hay varias opciones para adoptar del software RES2DINV, entre ellas sin topografía, con modificación uniforme de grillas, modificado superficialmente y la opción transformación S-C (Schwartz – Christoffel).

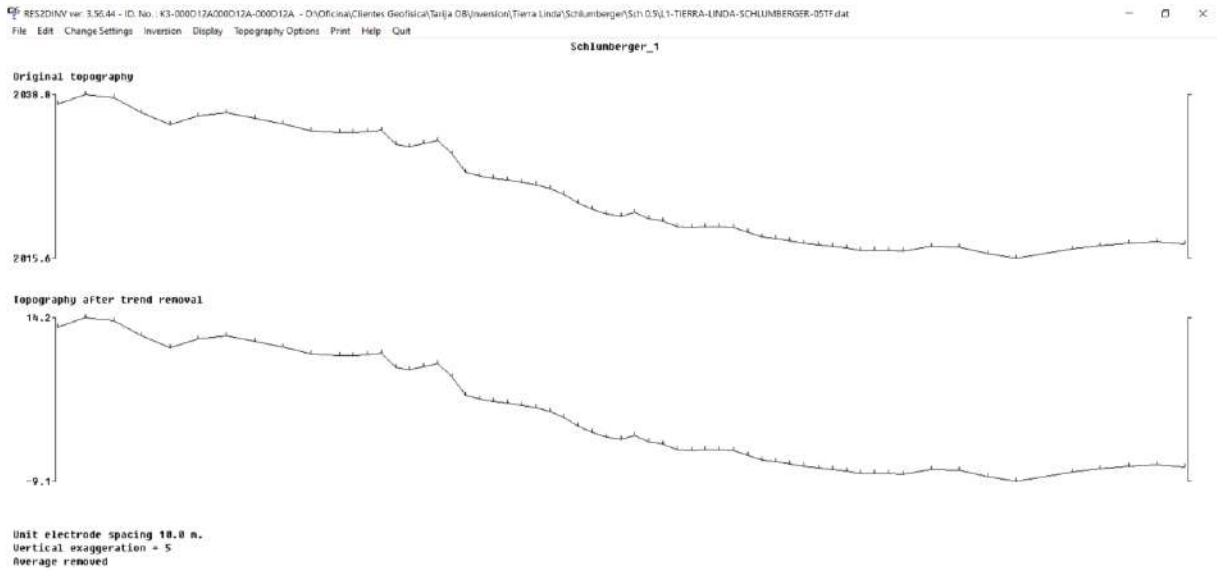
Para la modelación matemática de la topografía se empleó: S-C Transformation with distorted finite-element grid.

Figura 56

Topografía cargada al software tomando en cuenta la opción S-C

RES2DINV ver. 3.56.44 - ID. No. : K3-000F162/000F162-000F162 - D:\Clientes Geofisica\Connal\San Ignacio - San Matias\Inversion\Cartera 1B\SCH\CANTERA-1B-15-02-23_Schlumberger_1TF1edit.dat
File Edit Change Settings Inversion Display Topography Options Print Help Quit

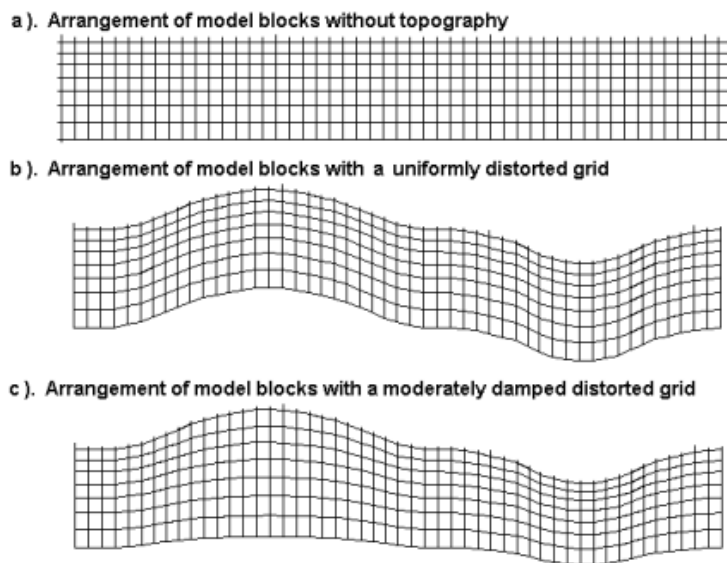




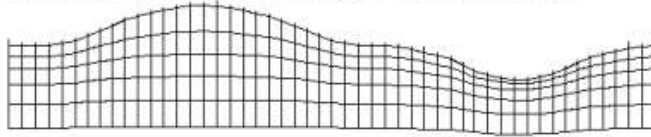
La opción de S-C Transformation with distorted finite-element grid: El método de transformación Schwarz – Christoffel fue seleccionado porque calcula la distorsión en las capas internas, considerado la mejor opción reflejando de forma natural el modelo matemático.

Figura 57

Diferentes opciones para incorporar la topografía al modelo matemático obtenido.



d). Arrangement of model blocks with a highly damped distorted grid



e). Arrangement of model blocks with the inverse Schwartz-Christoffel transformation

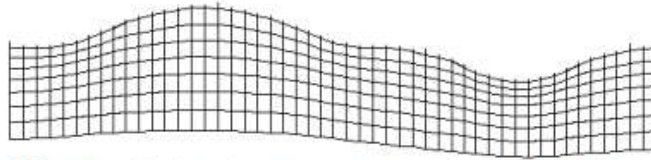


Figure 4.14. Different methods to incorporate topography into a 2-D inversion model. (a) Schematic diagram of a typical 2-D inversion model with no topography. A finite-element mesh with four nodes in the horizontal direction between adjacent electrodes is normally used. The near surface layers are also subdivided vertically by several mesh lines. Models with a distorted grid to match the actual topography where (b) the subsurface nodes are shifted vertically by the same amount as the surface nodes, (c) the shift in the subsurface nodes are gradually reduced with depth or (d) rapidly reduced with depth, and (e) the model obtained with the inverse Schwartz-Christoffel transformation method.

Nota. Fuente. Manual RES2DINV

El proceso de inversión obtiene a partir de resistividades aparentes, un modelo matemático del subsuelo que puede considerarse una solución válida.

Este modelo matemático es una representación idealizada del subsuelo, el vínculo entre la matemática de los parámetros del modelo y la respuesta es resuelto para la presente tesis mediante los elementos finitos.

Finalmente, después de las iteraciones automáticas se obtiene el modelo matemático, obteniendo los siguientes resultados:

El modelado puede ser realizado mediante varias formas entre ellas, Diferencias finitas, Elementos finitos, Ecuaciones integrales y Centros de alfa (Torleif, 1999).

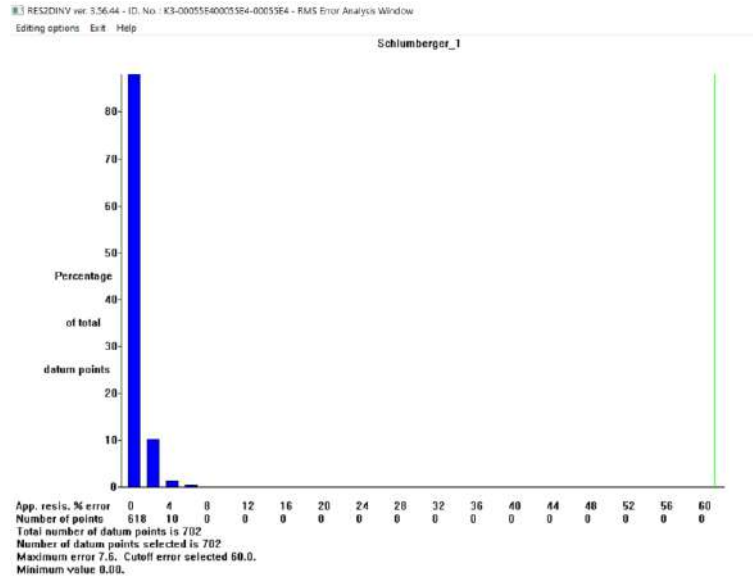
4.9 HISTOGRAMA DE ERROR MEDIO CUADRÁTICO RMS

El histograma del Error Medio Cuadrático (Root Mean Square RMS) muestra el desajuste de datos entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados, esta opción se utiliza para filtrar o eliminar datos atípicos. (Manual software RES2DINV V.3.71)

Los datos con ruido aleatorio mostrarán una disminución exponencial en la cantidad de puntos con desajustes de datos creciente.

Figura 58

Histograma ejemplo de Yesera



En el ejemplo de la tomografía de Yesera (Sch de 1.5 Seg. de PI) vemos que el histograma tiene 87% de los datos (618 datos) tienen una diferencia de cero (0) valores óptimos, 10 % tienen una diferencia de 2 y 2% una diferencia de 4 y el 1% una diferencia de 6, los datos atípicos que muestran una gran diferencia se eliminan moviendo el curso o línea verde hacia la izquierda, esto elimina estos datos para reprocesar nuevamente el modelo matemático.

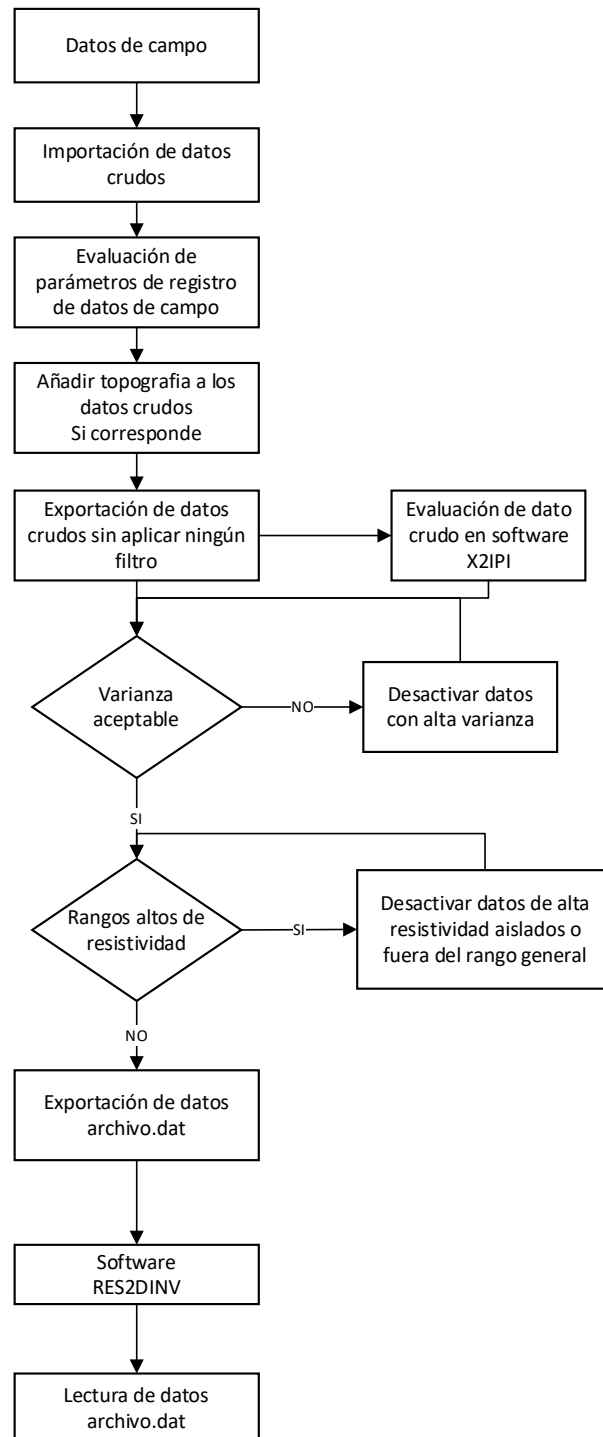
Si los datos están casi todos al lado izquierdo, los datos son de excelente calidad, si el histograma está balanceado al lado derecho el RMS será alto y los datos no son de buena calidad.

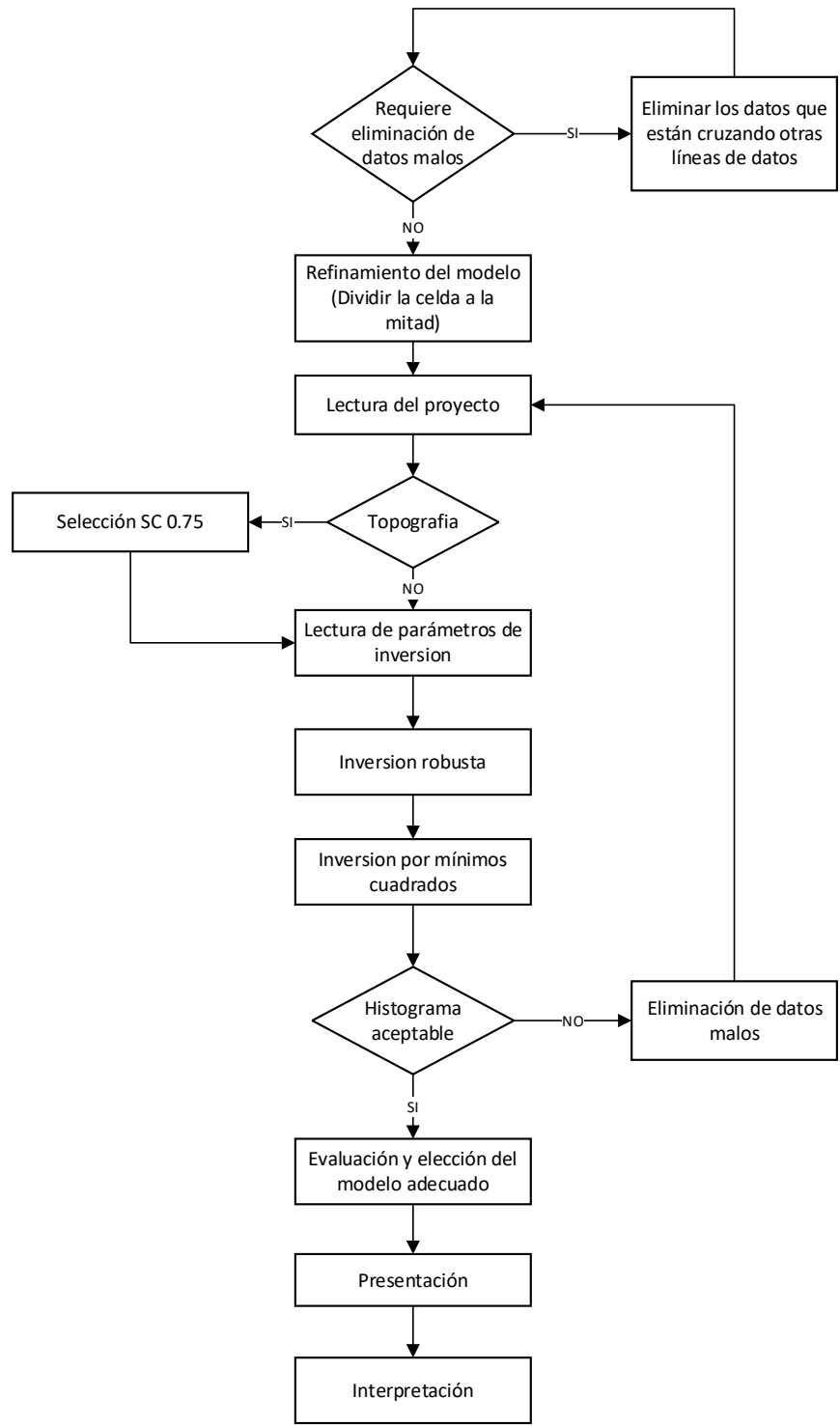
En resumen, tenemos tres momentos para filtrar datos, la primera en la exportación, la segunda en la opción de exterminar datos malos (exterminate bad datum points) y la tercera en el histograma del error medio cuadrático.

4.10 FLUJO DEL PROCESO DE INVERSIÓN

Figura 59

Flujo del proceso de inversión





Nota. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

5.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo refleja los resultados del proceso de inversión siguiendo todo el proceso indicado en el capítulo anterior.

La primera imagen es un resumen del proceso de inversión, indica el arreglo, el espaciamiento del modelo, producto de refinamiento o división de celda a la mitad del espaciamiento en campo, el total de puntos 690, número de electrodos que trabajaron en campo 119, número de niveles o n de profundidad, en este ejemplo 25, incluye topografía el modelo identificado con el número 2, ubicación de la primera estaca en la progresiva 0, ubicación de la última estaca de campo en la progresiva 800, espaciamiento de 5 (producto del refinamiento), el original era de 10 metros, el total de las iteraciones para obtener el modelo matemático, para este ejemplo 5 iteraciones y los resultados del error medio cuadrático RMS de Resistividad en la primera columna y Polarización Inducida en la segunda columna.

```
Reading file D:\Oficina\Cientes Geofisica\Tarija OB\Inversion\Tierra Linda\Schlumberger\Sch 0.5\L1-TIERRA-LINDA-SCHLUMBERGER-05TF1edit.INV

Schlumberger_1
Minimum electrode spacing is 5.0.
General array
Wenner-Schlumberger array arrangement
Total number of data points is 690.
IP values given in terms of chargeability
Half-size model blocks used for general array data set.
Model with half the unit electrode spacing is used
Number of electrodes is 119
Number of data levels is 25.
Topography present 2.
Minimum electrode location is 0.0.
Maximum electrode location is 800.0.
Minimum electrode spacing is 5.0.
Reading inversion results.
The model has 14 layers and 1267 blocks.
Iteration 1 : Abs. error 5.64 15.02.
Iteration 2 : Abs. error 2.64 11.07.
Iteration 3 : Abs. error 1.73 11.02.
Iteration 4 : Abs. error 1.36 11.00.
Iteration 5 : Abs. error 1.17 10.99.

Topographical data present in inversion file.
Schwartz-Christoffel transformation topography modelling was used.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 1.292.
Inversion constraints information present.
Reading of file has been completed.
```

Luego presentamos la iteración 1, 3 y 5 de cada proceso de inversión, si el objetivo fuera un estrato importante, la primera iteración nos puede mostrar de forma referencial ya un buen indicio de que el modelo está por buen camino.

La iteración 3 del modelo matemático con frecuencia ya refleja la geología del proyecto, es mejor contar con un profesional geólogo para interpretar correctamente los diferentes estratos.

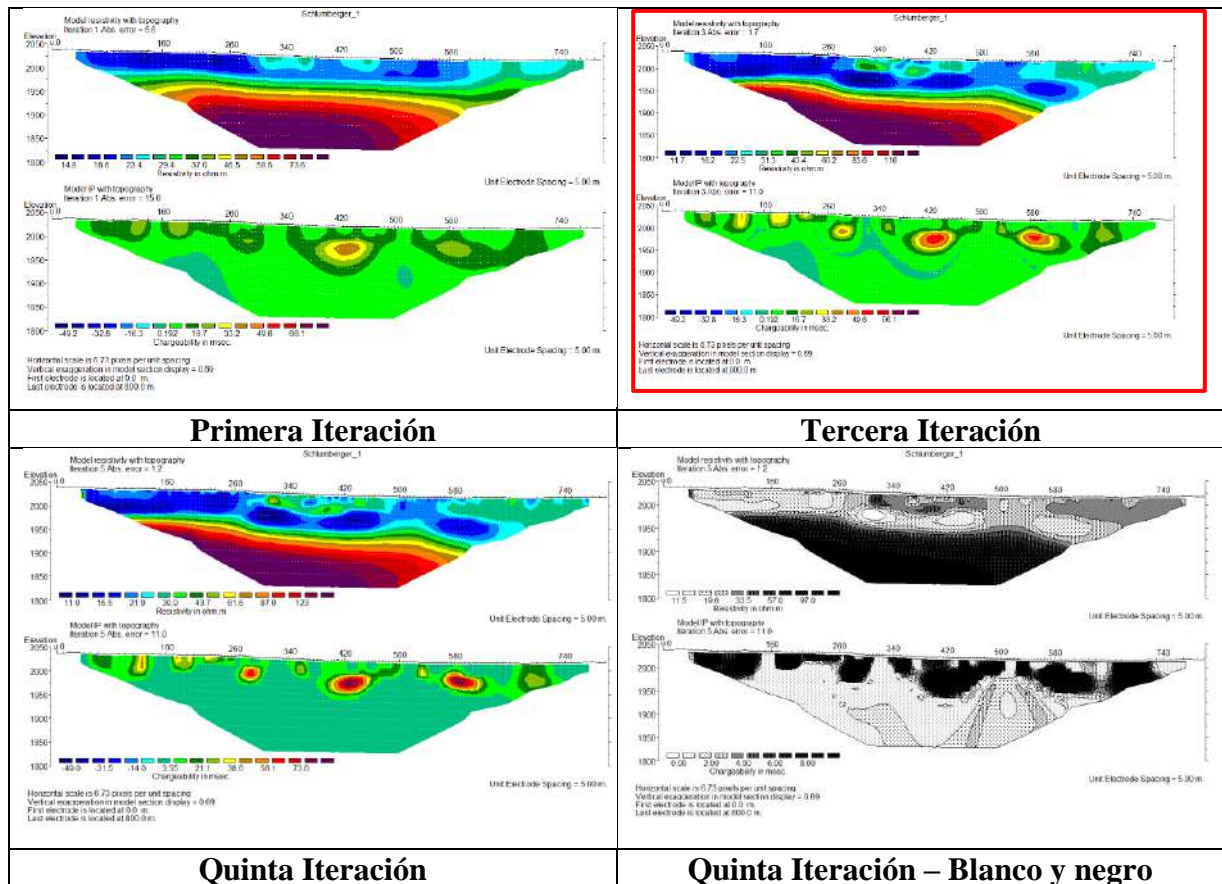
La iteración 5 puede tener un RMS más bajo, pero no siempre refleja el mejor resultado. Con frecuencia escogemos la iteración 5 ó 3 del modelo matemático.

En Anexo 5a, 5b y 5c se encuentran las imágenes de resistividad y cargabilidad de las iteraciones 1, 3 y 5 del proceso de inversión con imágenes más ampliadas de los tres sitios en evaluación, Tierra Linda, Fray Quebracho y Yesera.

A continuación, vamos a presentar las iteraciones 1, 3, 5 y presentación en modo blanco y negro de todos los registros de Schlumberger y Gradiente de 0.5, 1.0 y 1.5 segundos de tiempo de decaimiento de polarización inducida (PI) para ver el comportamiento de las arcillas, limos, gravas y arenas a la cargabilidad.

Las imágenes resaltadas de color rojo muestran valores próximos al cero de cargabilidad, que muestra la presencia de agua subterránea.

5.2 TIERRA LINDA ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG.



Lo que podemos observar es que la primera iteración muestra un rango muy bajo de cargabilidad de 0.192 msec dando una muy buena aproximación de la posible existencia de agua subterránea.

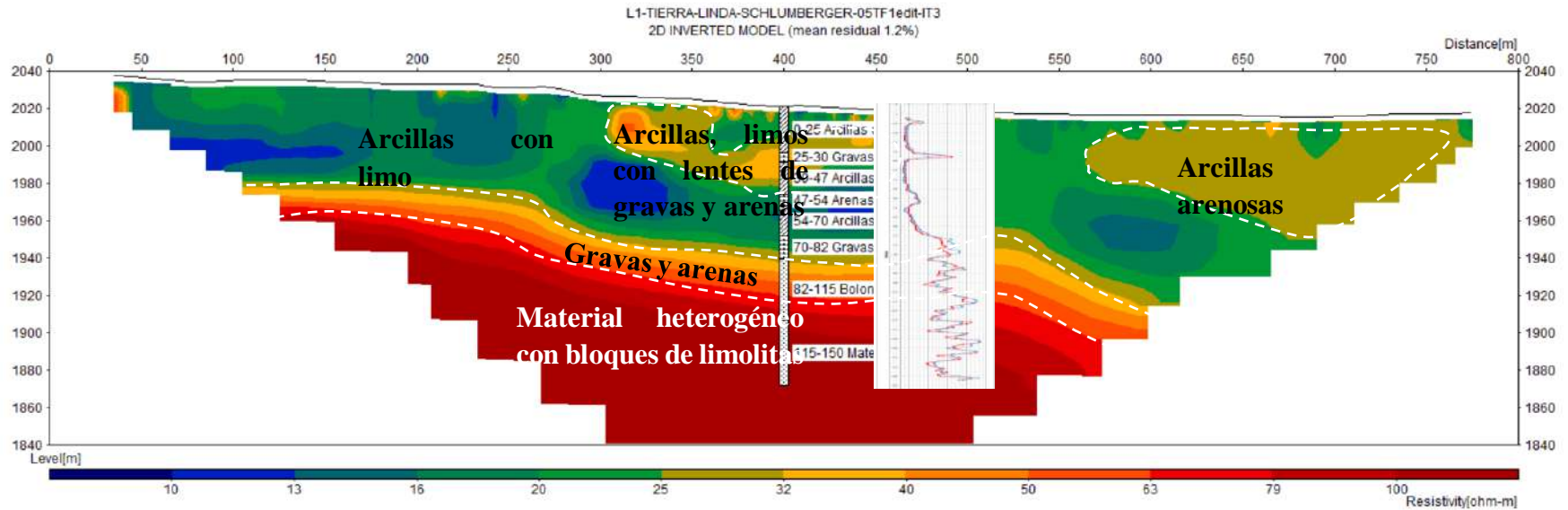
La Tercera iteración sigue mostrando el mismo valor bajo, pero ya delimitando la ubicación en el gráfico, que posiblemente sea el área del contacto y los primeros estratos debajo del contacto.

La quinta iteración agrupa todos los valores bajos, y los encierra en un solo valor de 3.55 msec. que no reflejaría lo teórico.

La imagen de blanco y negro es una agrupación de valores bajos de cargabilidad, observamos con mejor claridad el área de menor cargabilidad delimitando el área teóricamente de agua dulce.

IMAGEN DE RESISTIVIDAD VS. REGISTRO ELECTRICO VERTICAL

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG. / ITERACIÓN 3



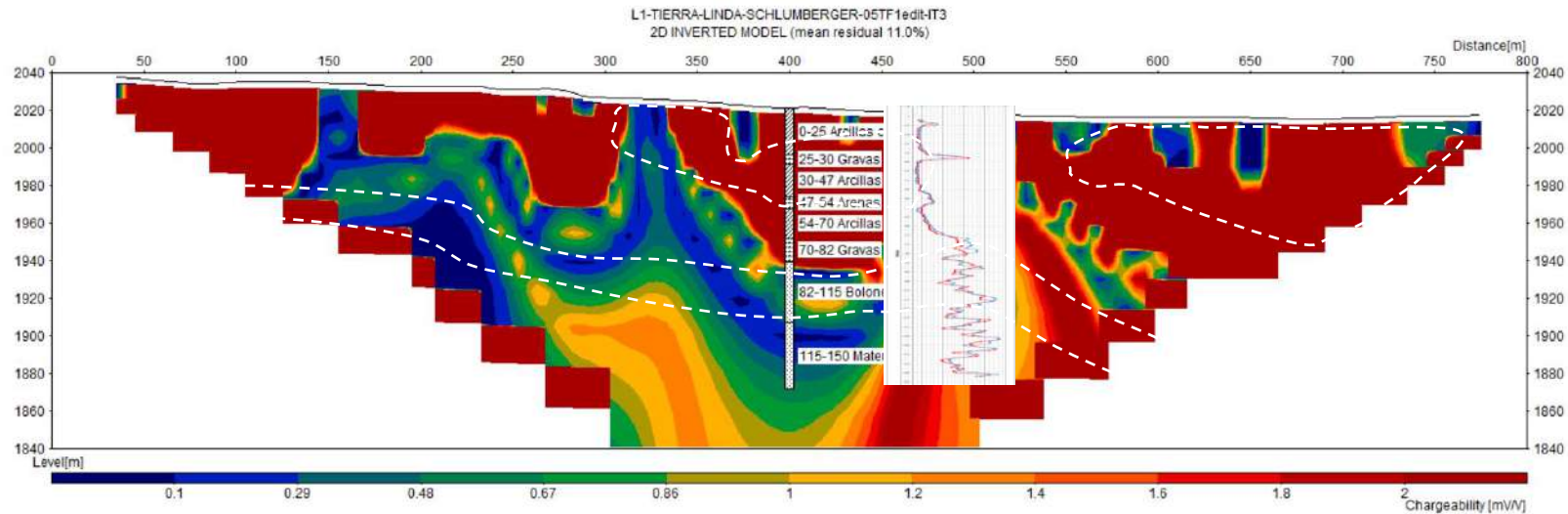
- | | |
|---------------|---|
| 10 - 25 Ohmm | Material de arcilla con limos |
| 25 – 32 Ohmm | Arcillas con limos y arenas |
| 32 – 63 Ohmm | Gravas y arenas |
| 63 – 100 Ohmm | Material heterogéneo, bloques de limolitas con ligante arenoso, probablemente saturado. |

En este gráfico observamos claramente los diferentes tipos de material, la curva del REV hacia el lado izquierdo confirmando la presencia de arcillas y limos y las curvas hacia la derecha la presencia de gravas y arenas portadoras de agua en mayor proporción, el rango de 32 a 63 Ohmm refleja el contacto de dos estratos importantes.

La imagen de resistividad coincide con el registro eléctrico vertical REV de las curvas de resistividad corta y larga.

IMAGEN DE CARGABILIDAD VS. REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL

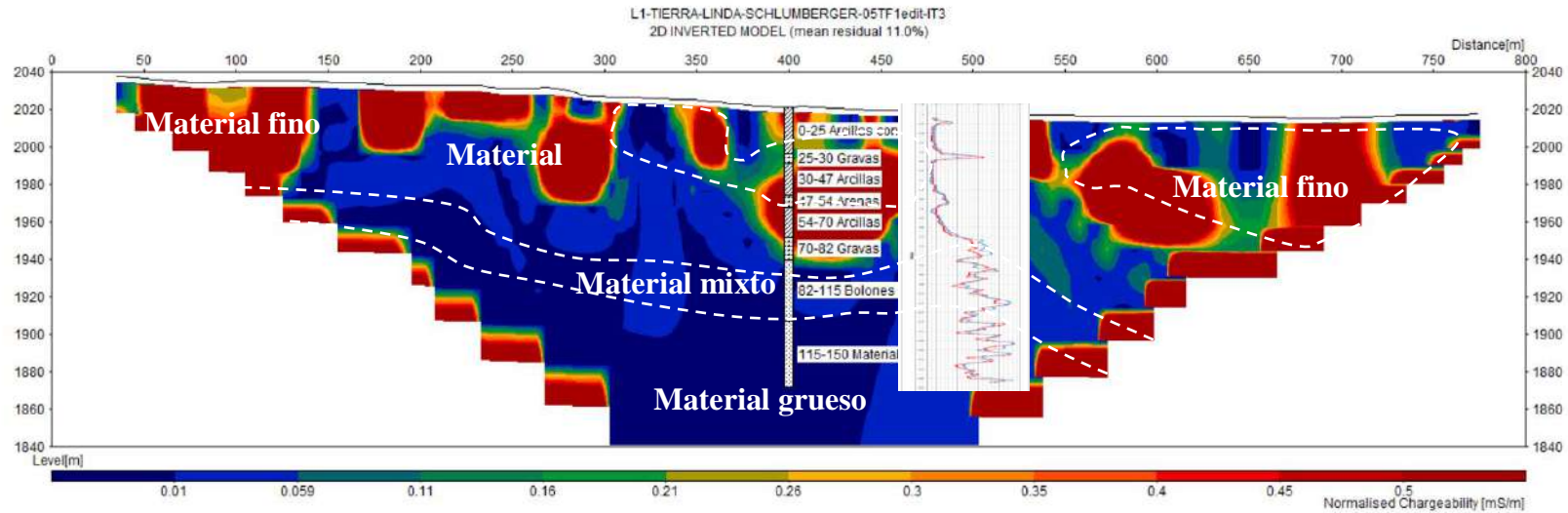
ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG. / ITERACIÓN 3



En la imagen de cargabilidad o Polarización Inducida se puede ver la cargabilidad mayor en todo el estrato superior, reflejando la presencia de material arcilloso con limos y un valor bajo de cargabilidad que se ubica en proximidades del contacto que refleja la presencia de agua y en el estrato inferior saturado.

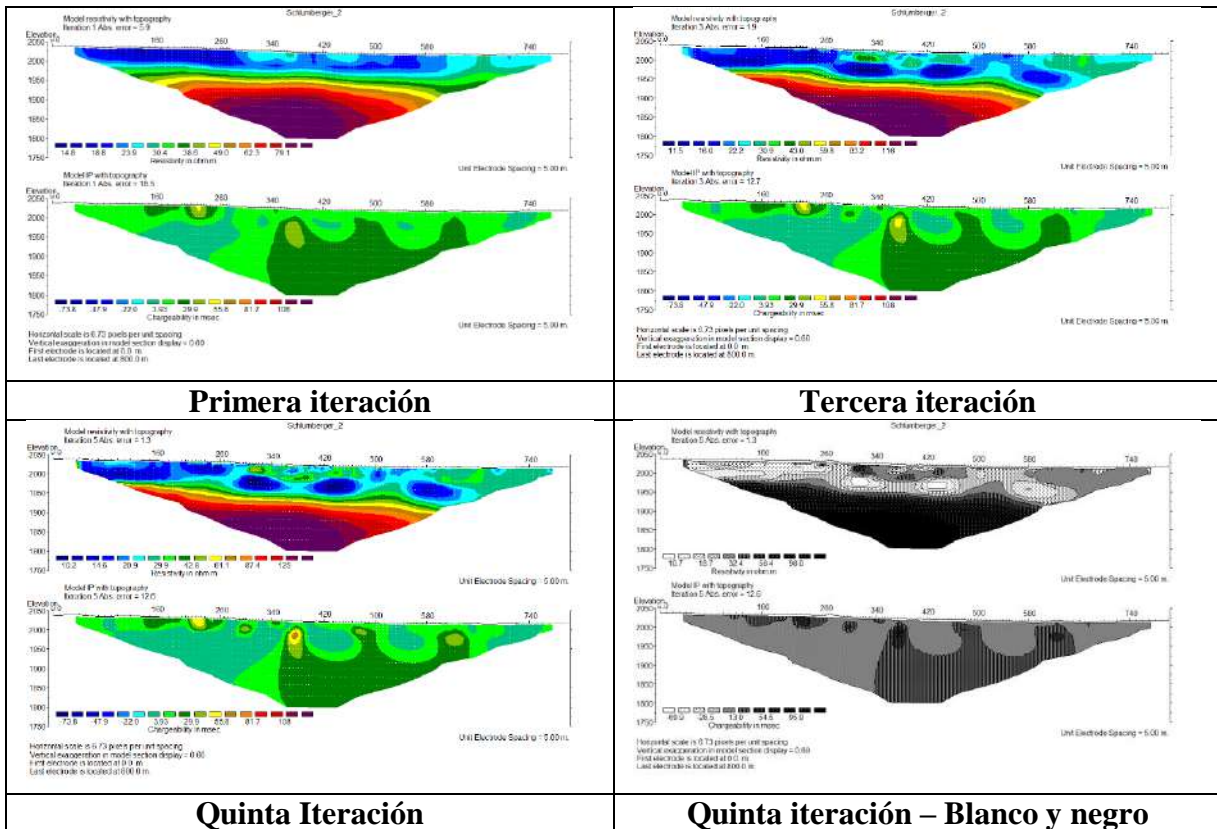
IMAGEN DE CARGABILIDAD NORMALIZADA VS. REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG. / ITERACIÓN 3



- En la imagen de cargabilidad normalizada se puede identificar tres tipos de materiales, fino, mixto y grueso.
- El material fino por la presencia de arcillas y limos, el material mixto compuesto de gravas y arenas y el material grueso compuesto por material heterogéneo de bloques de limolitas con ligante arenoso.

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.0 SEG.

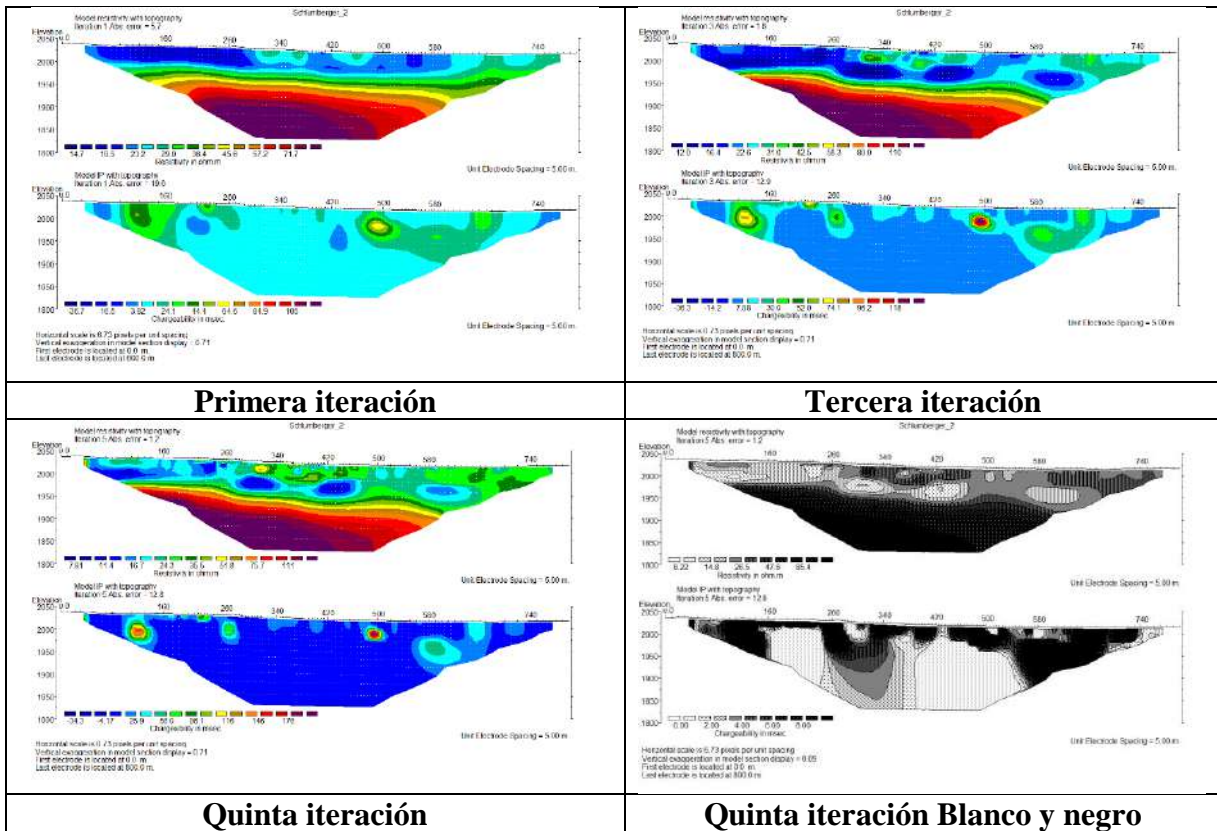


La primera iteración muestra un rango bajo de cargabilidad de color celeste, pero no indica el valor del mismo.

Algo que se puede observar en las diferentes iteraciones es que no cambia el rango de cargabilidad, reflejando en la tercera y la quinta. Algo diferente en la tercera iteración es que aumenta la cargabilidad de las partes confirmadas con arcilla, el rango de 55.8 msec.

La quinta iteración agrupa todos los valores bajos, y los encierra en un solo valor de 3.93 msec. que no reflejaría lo teórico.

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.5 SEG.



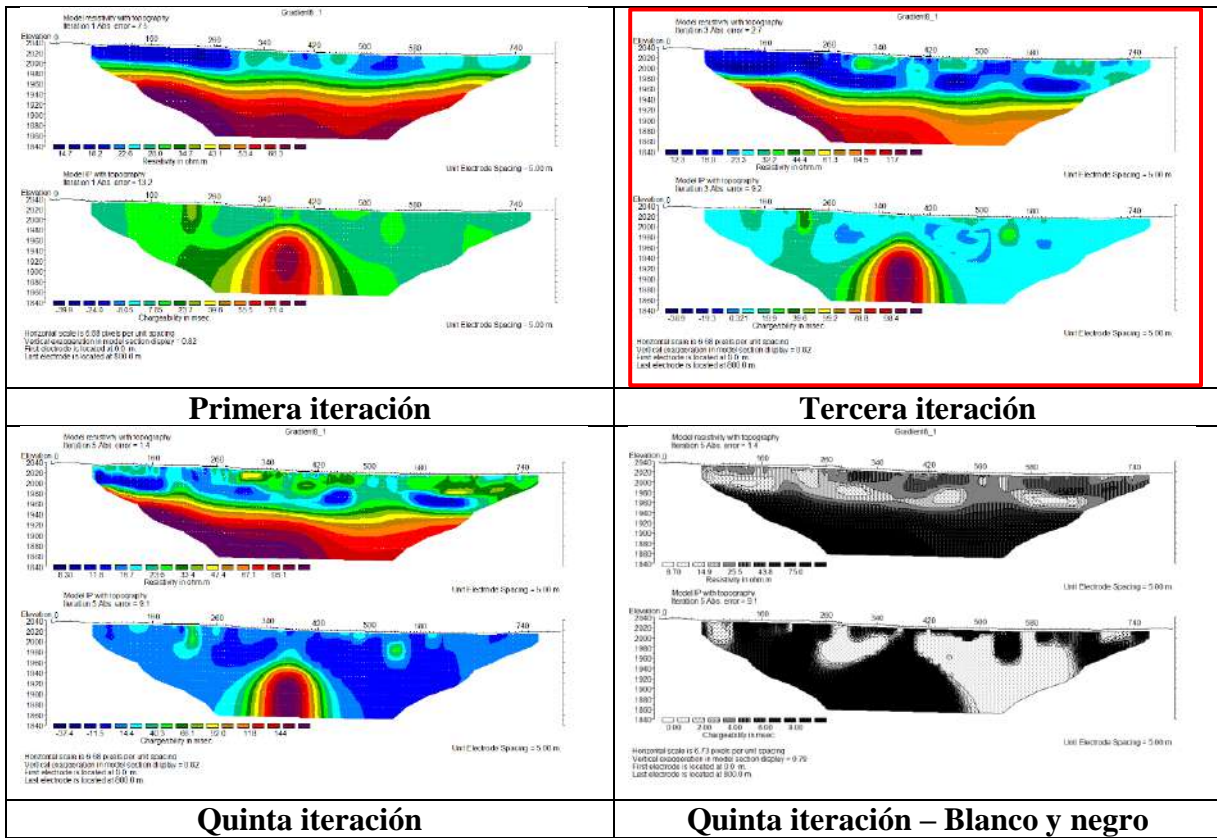
Lo que podemos observar es que la primera iteración muestra gráficamente de color azul con un rango bajo de cargabilidad dando una buena aproximación de la posible existencia de agua subterránea.

La tercera iteración agrupa todos los valores bajos generalizando en un valor de 7.88 msec.

La quinta iteración agrupa mucho más todos los valores bajos.

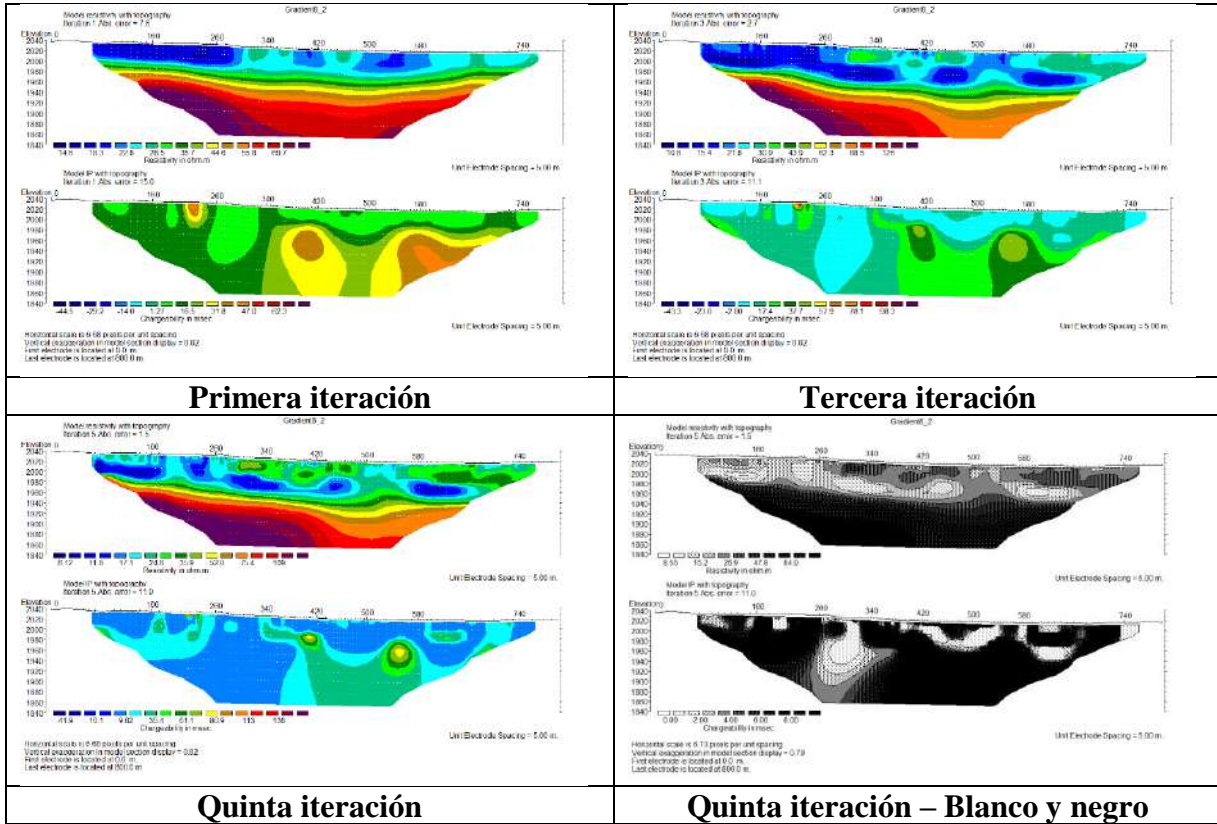
La imagen de blanco y negro es un gráfico forzado para identificar dónde está la cargabilidad más baja, observamos con mejor claridad que la parte inferior tiene menor cargabilidad delimitando el área de agua dulce, la parte superior de la imagen refleja claramente las arcillas con mayor cargabilidad, confirmando lo teórico.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 0.5 SEG.



La tercera iteración tiene valores de 0.321 msec, valores bajos que teóricamente refleja la presencia de agua subterránea en proximidades del contacto, también esta imagen tiene una anomalía mayor en la parte central baja, que no se puede ver en otras imágenes con otra configuración.

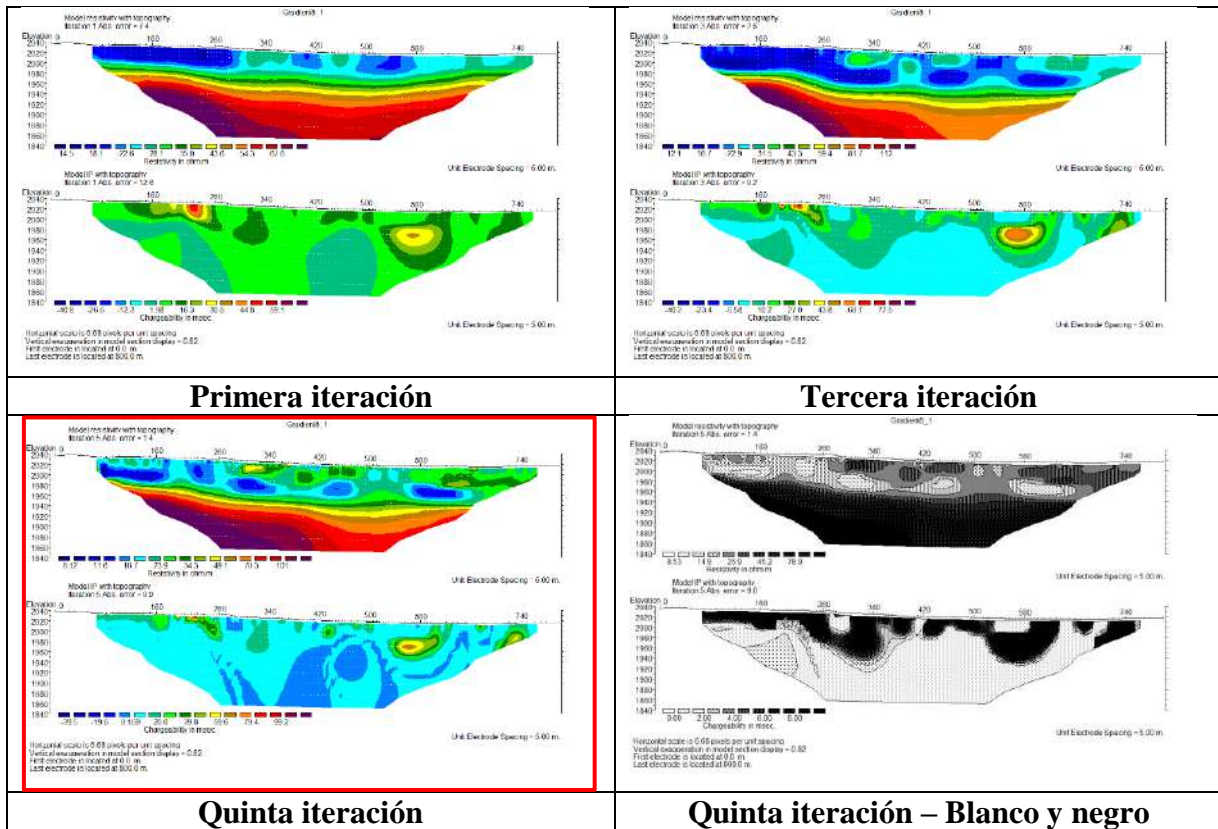
ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.0 SEG.



La primera iteración refleja un valor bajo de 1.27 en la parte baja de la imagen.

La configuración de 1.0 Seg. de Schlumberger también muestra una imagen similar, concluyendo que posiblemente no sea la configuración ideal para el registro de aguas subterráneas.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.5 SEG.



La primera iteración refleja valores de 1.98 msec de cargabilidad en la parte inferior de la imagen.

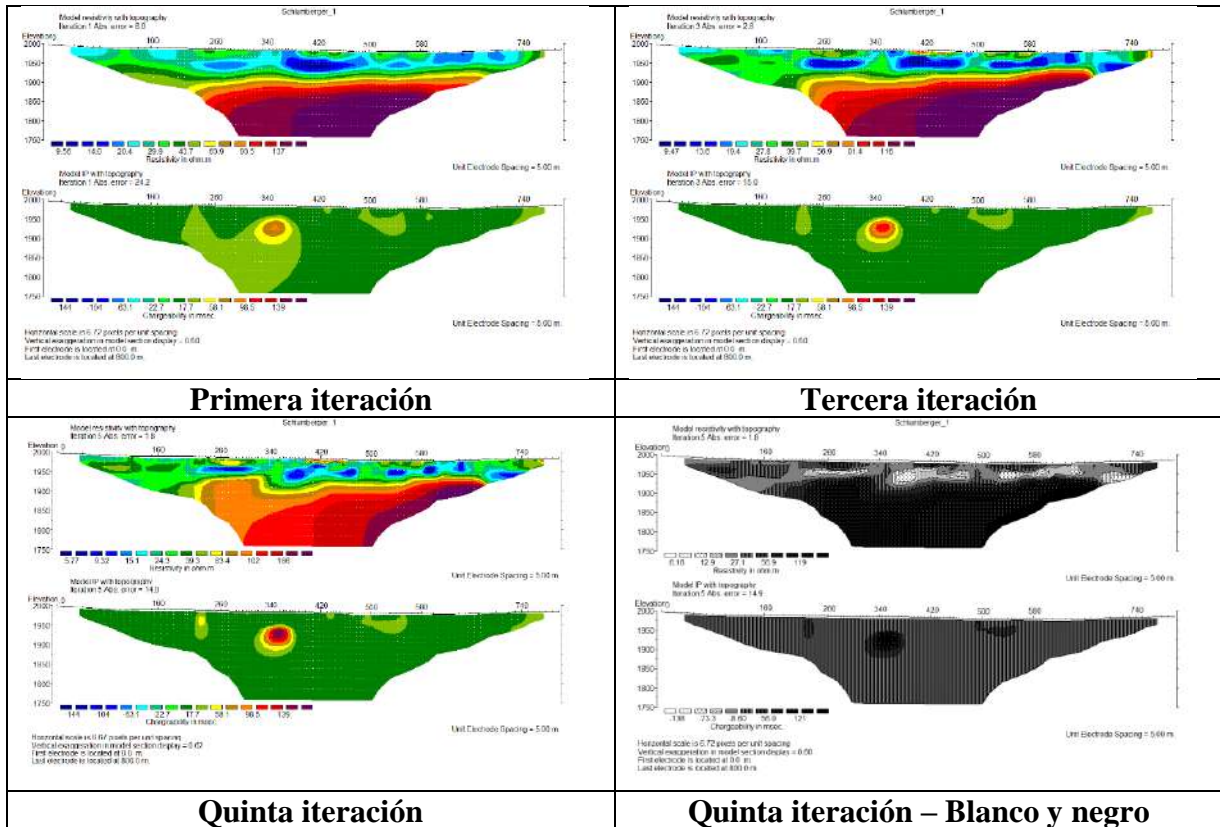
En la tercera iteración, la escala de colores bajos refleja toda la parte inferior de la imagen.

La quinta iteración en la imagen de cargabilidad de Gradiente de 1.5 seg. de PI muestra cargabilidad baja en la parte inferior con rangos de 0.169 msec, reflejando la posible presencia de agua subterránea por permeabilidad determinado por la alta cargabilidad en la parte superior, confirmando lo teórico de alta cargabilidad por la presencia de arcillas y limos y baja cargabilidad por la presencia de agua subterránea.

5.3 FRAY QUEBRACHO

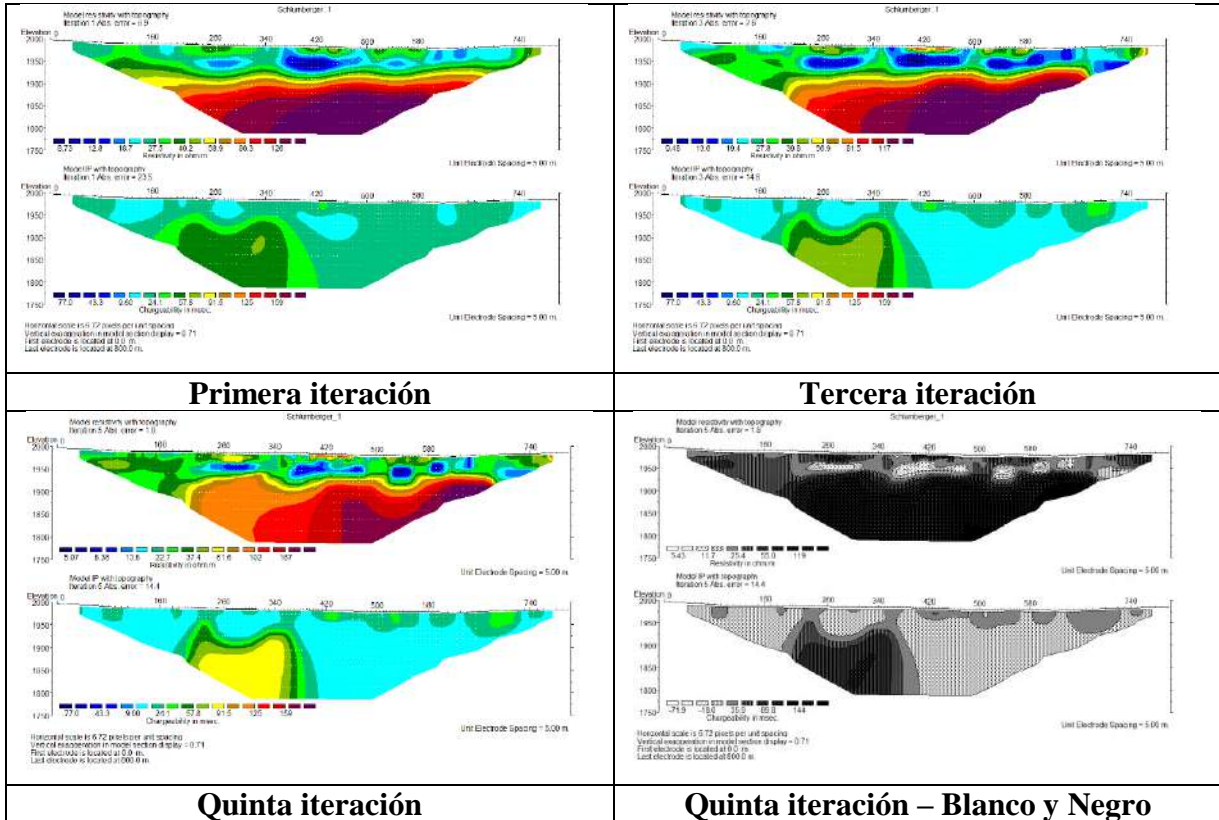
De acuerdo al proceso de datos tenemos lo siguiente:

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG.



El gráfico de cargabilidad no presenta valores próximos al cero en ningunas de las iteraciones.

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.0 SEG.

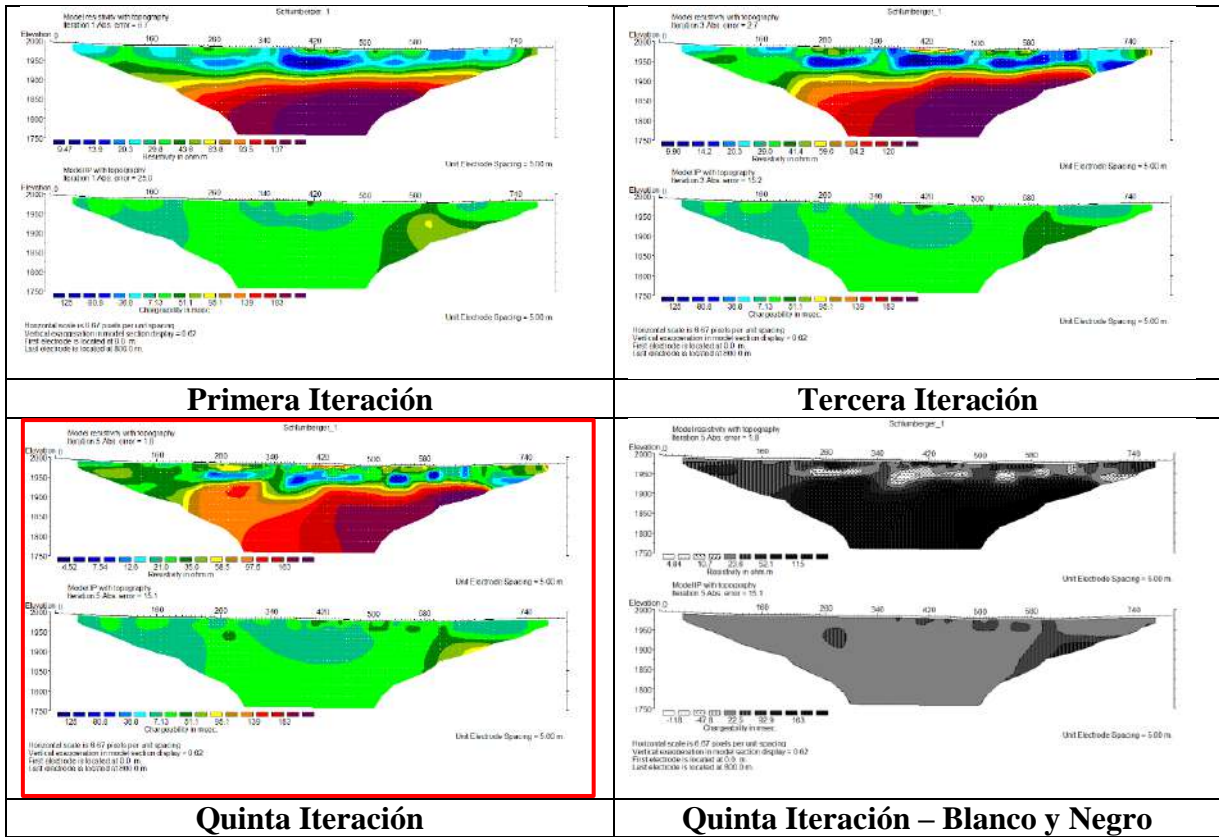


La imagen de cargabilidad en la tercera y quinta iteración refleja parcialmente baja cargabilidad en la parte inferior y mayor cargabilidad entre las progresivas 260 - 340 en profundidad.

En la quinta iteración se puede ver que a partir de la progresiva 340 hacia la derecha existe continuidad de alta cargabilidad en la parte superior (valores superiores a 24.1 msec.) y la anomalía de alta cargabilidad en el lado izquierdo inferior, puede ser por la baja resistividad que refleja la imagen superior.

En general vemos que la configuración de 1 seg. no refleja una imagen clara de alta cargabilidad de arcillas de forma conjunta o agrupada en el estrato superior.

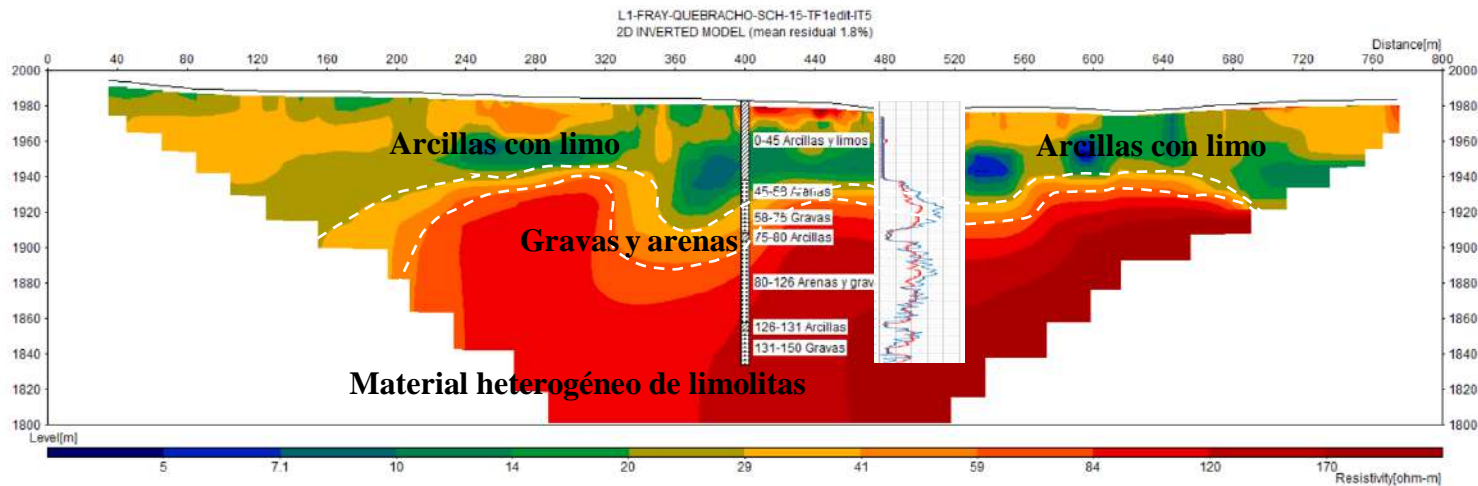
ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.5 SEG.



La imagen de cargabilidad de la quinta iteración del arreglo Schlumberger en general tiene alta cargabilidad en toda la parte superior de la imagen (valores de 7.13 msec.), que refleja la presencia de arcillas y limos, y mayor cargabilidad a 7.13 msec. en la parte inferior posiblemente por la presencia de la matrix fina en toda imagen.

IMAGEN DE RESISTIVIDAD VS. REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL – FRAY QUEBRACHO

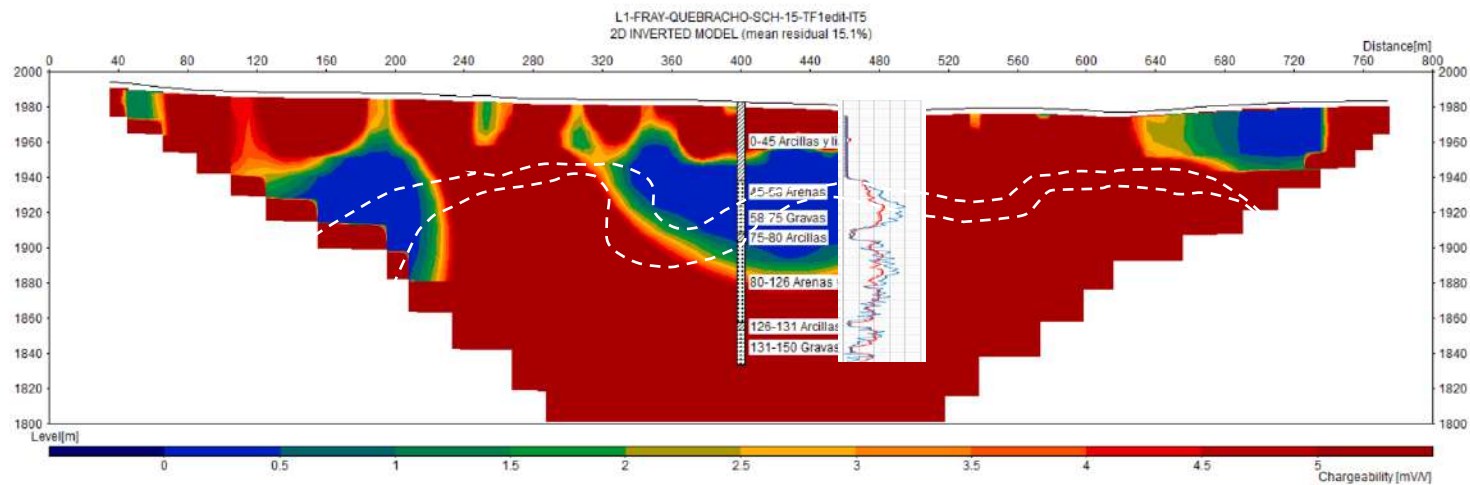
ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.5 SEG. / QUINTA ITERACIÓN



- 5 - 29 Ohmm Material cíclico compuesto de arcillas, limos y arenas en la superficie con materia orgánica.
- 29 – 59 Ohmm Material de gravas, arenas con cantos rodados.
- 59 – 170 Ohmm Material heterogéneo, grueso correspondiente a su régimen aluvial de alta energía con bloques de limolitas con ligante arenoso, probablemente saturado.
- En este gráfico observamos claramente los diferentes tipos de material, la curva del REV hacia el lado izquierdo confirmando la presencia de arcillas y limos y las curvas hacia la derecha la presencia de gravas y arenas portadoras de agua en mayor proporción, el rango de 29 a 59 Ohmm refleja el contacto de dos estratos importantes.
- La imagen de resistividad coincide con el registro eléctrico vertical REV de las curvas de resistividad corta y larga.

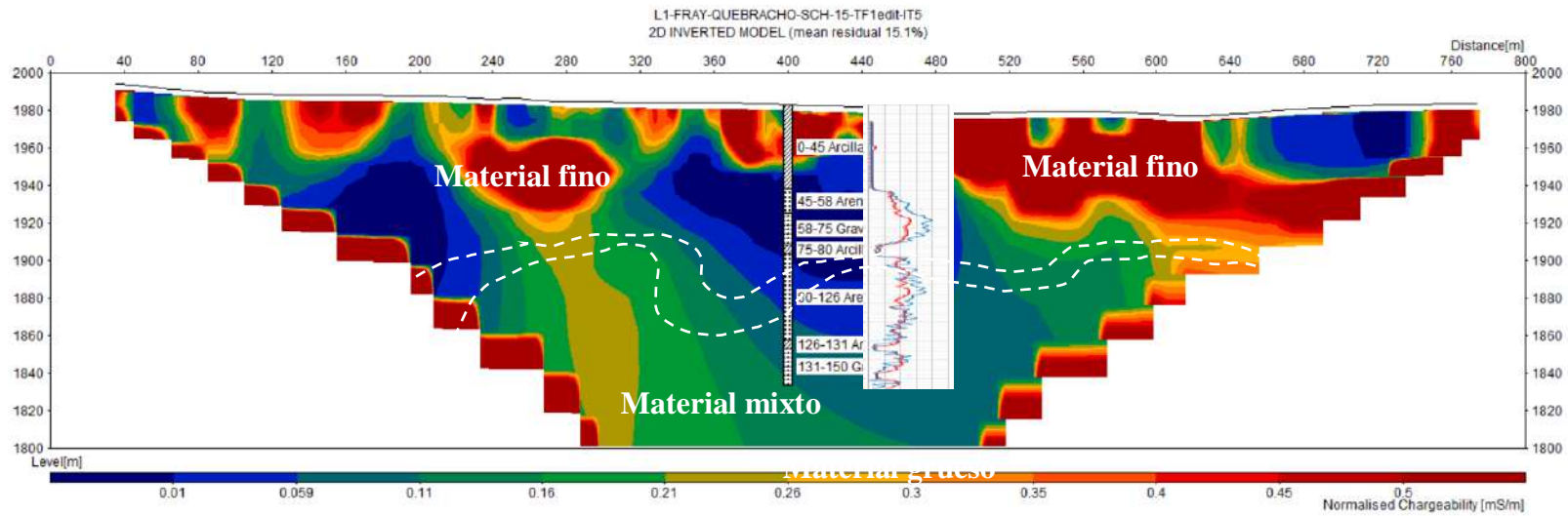
IMAGEN DE CARGABILIDAD VS. REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL – FRAY QUEBRACHO

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.5 SEG. / QUINTA ITERACIÓN



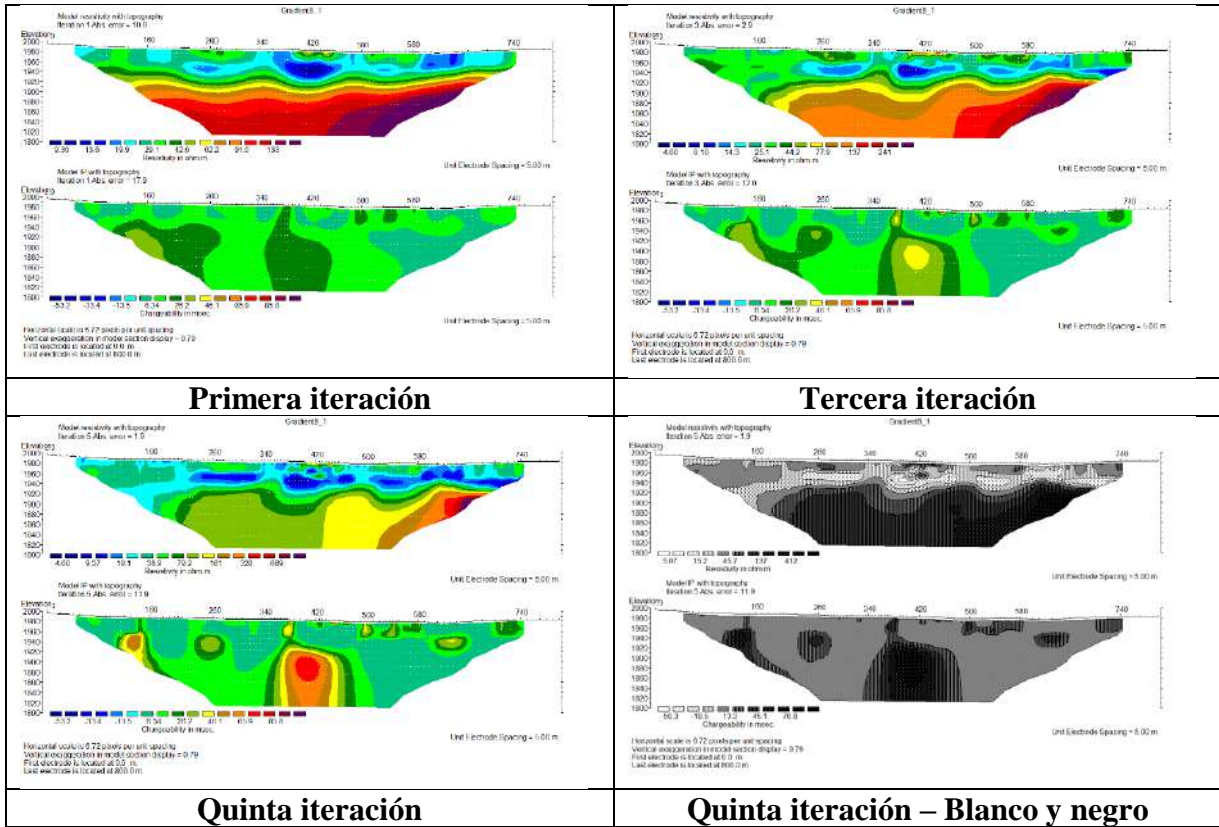
- En la imagen de cargabilidad o Polarización Inducida se puede ver la cargabilidad mayor en una gran parte de la imagen, incluido el estrato superior, reflejando una matrix limo arcilloso en una gran parte del perfil.
- También se puede observar un valor bajo de cargabilidad debajo de las arcillas que se ubica en proximidades del contacto que refleja la presencia de agua en tres posibles sectores.

IMAGEN DE CARGABILIDAD NORMALIZADA VS. REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL – FRAY QUEBRACHO
ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.5 SEG. / QUINTA ITERACIÓN



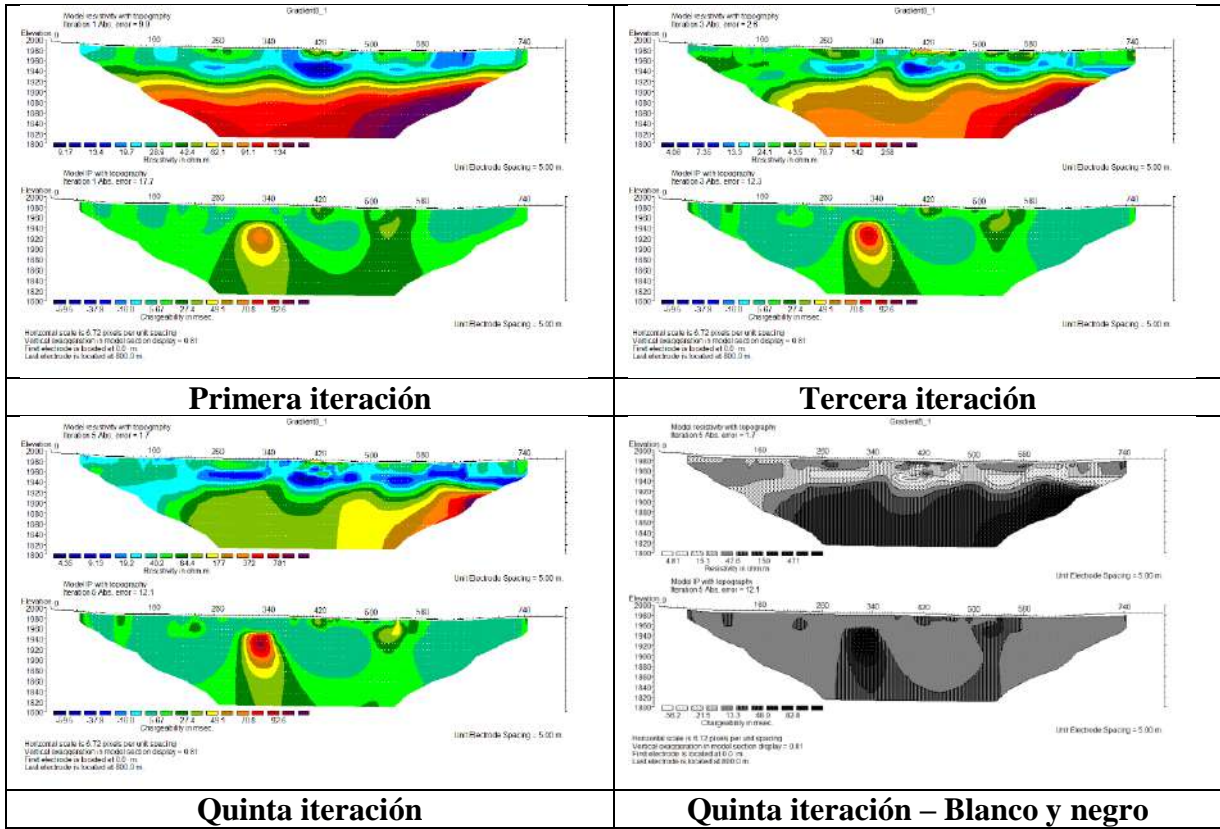
- En la imagen de cargabilidad normalizada se puede identificar dos tipos de materiales, fino y mixto.
- El material fino por la presencia de arcillas y limos, el material mixto heterogéneo compuesto de gravas y arenas con bloques de limolitas con ligante arenoso.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 0.5 SEG.



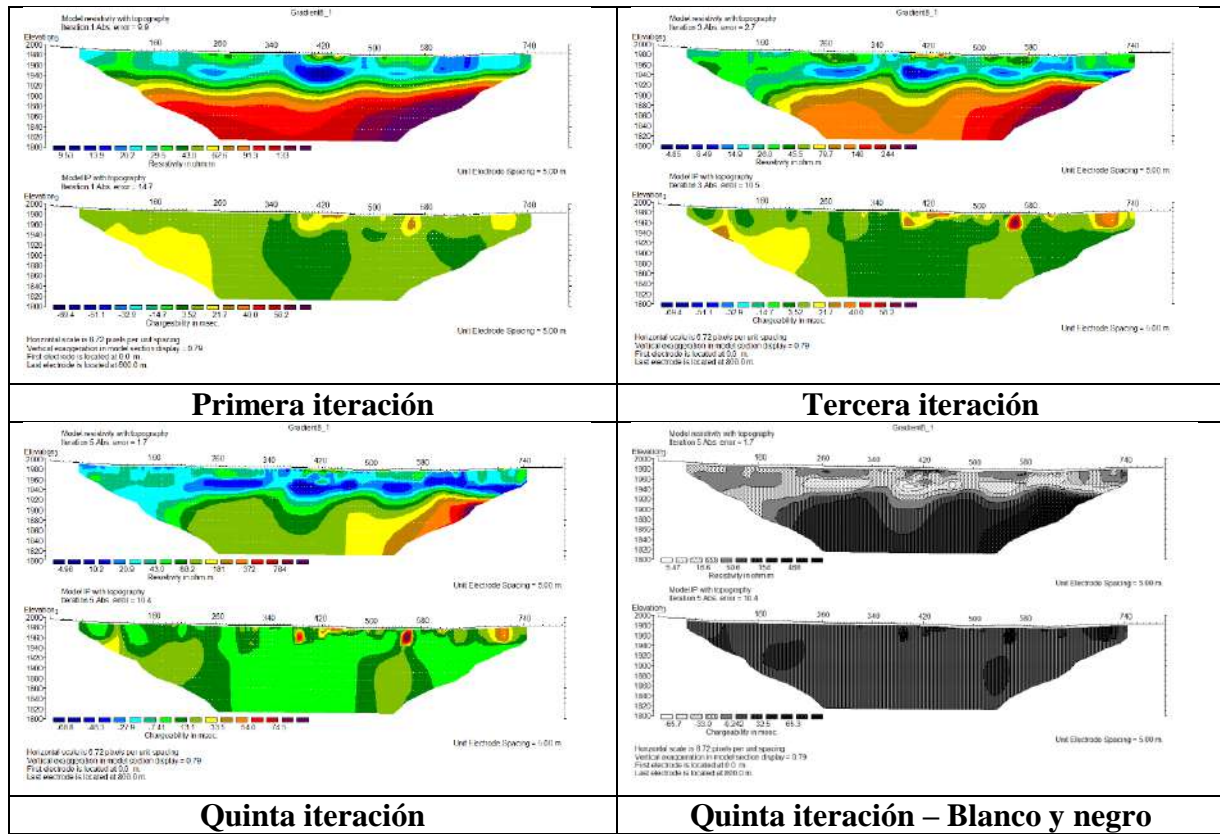
La imagen de la quinta iteración no coincide con lo planteado teóricamente. La parte superior debería tener alta cargabilidad y la parte inferior baja cargabilidad. Refleja parcialmente hacia el lado derecho (valores de 6.34 msec.) que tampoco es lo planteado (valores bajos próximos al cero).

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.0 SEG.



La imagen de cargabilidad no refleja baja cargabilidad en la parte inferior y alta cargabilidad en el estrato superior, sólo parcialmente hacia el lado derecho menor cargabilidad, que da un indicio, pero no refleja lo que pretendemos demostrar.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.5 SEG.

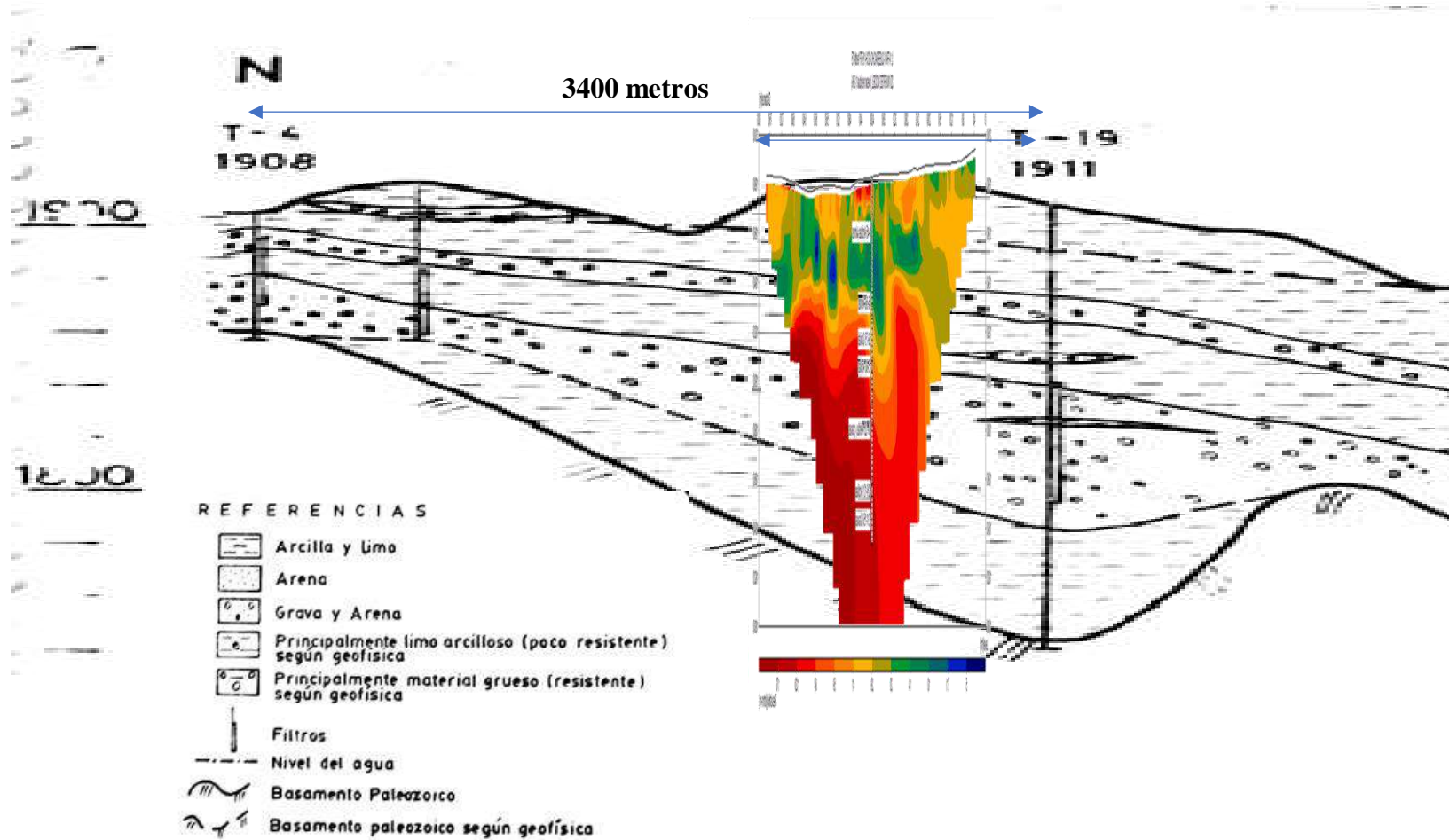


La quinta iteración refleja baja cargabilidad en la parte inferior que muestra la existencia en mayor o menor grado de agua dulce, en la parte superior se puede observar un estrato de mayor cargabilidad (valores superiores a 13.1 msec.) reflejando la existencia de arcillas y limos.

Finalmente comparamos la tomografía de Fray Quebracho (imagen invertida para sobreponer al perfil) con el perfil litológico 6 (S) del Proyecto BOL.78/006 de Naciones Unidas 1980 en la imagen que sigue, donde se puede ver que el perfil litológico coincide con la interpretación, eventos cíclicos compuestos de arenas, gravas, alternancia de material de baja resistividad compuesta de limos y arcillas, estratos de material grueso compuesto de gravas y arenas de alta energía.

Un dato importante es el pozo Avit-A que es parte de la red de pozos de COSSALT que está perforado a 70 metros del pozo T-19 (según coordenadas del informe), el mismo tiene un caudal de 22 l/s. con un estrato de aproximadamente de 70 metros de espesor compuesto de gravas y arenas (Anexo 7b). Es buena referencia de la existencia de acuíferos de buena potencia.

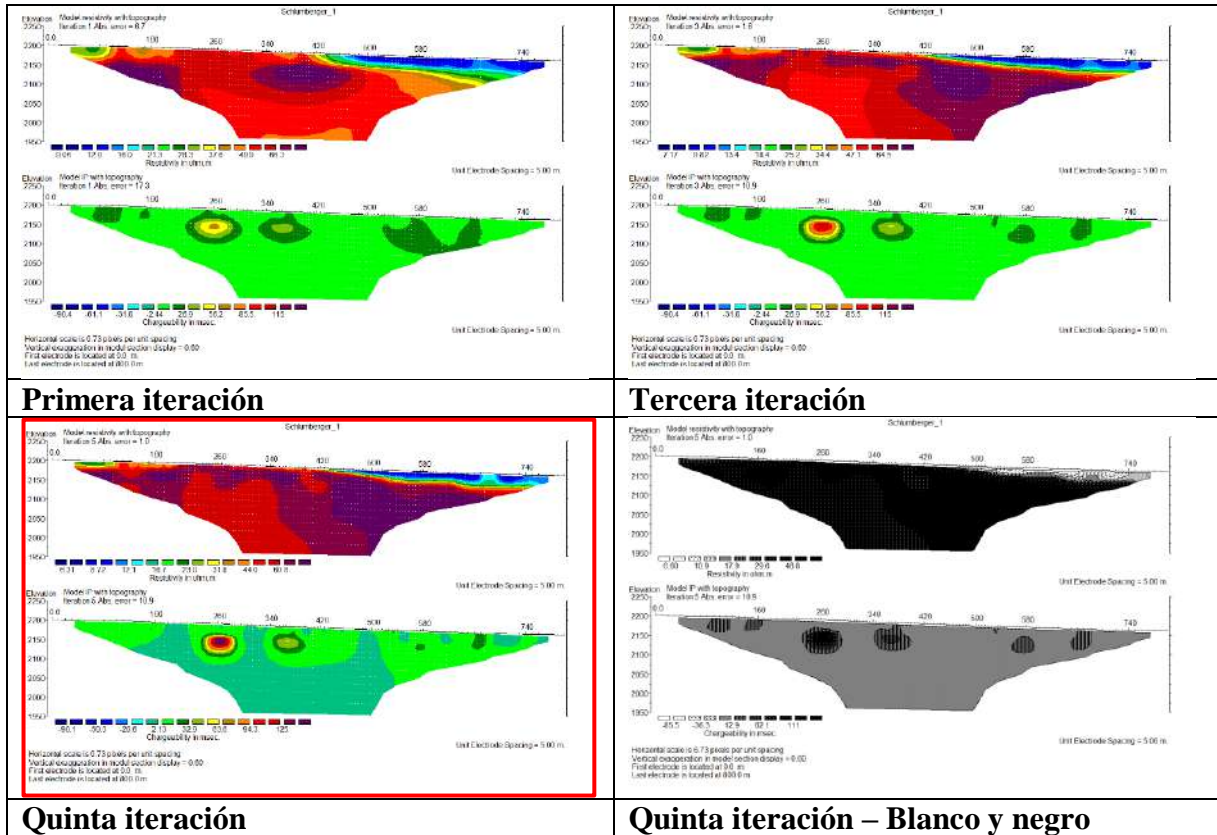
IMAGEN DE RESISTIVIDAD SOBREPUESTA AL PERFIL LITOLÓGICO 6 (S) DEL PROYECTO BOL.78/006 DE NACIONES UNIDAS 1979-1980



5.4 YESERA

De acuerdo al proceso de datos tenemos lo siguiente:

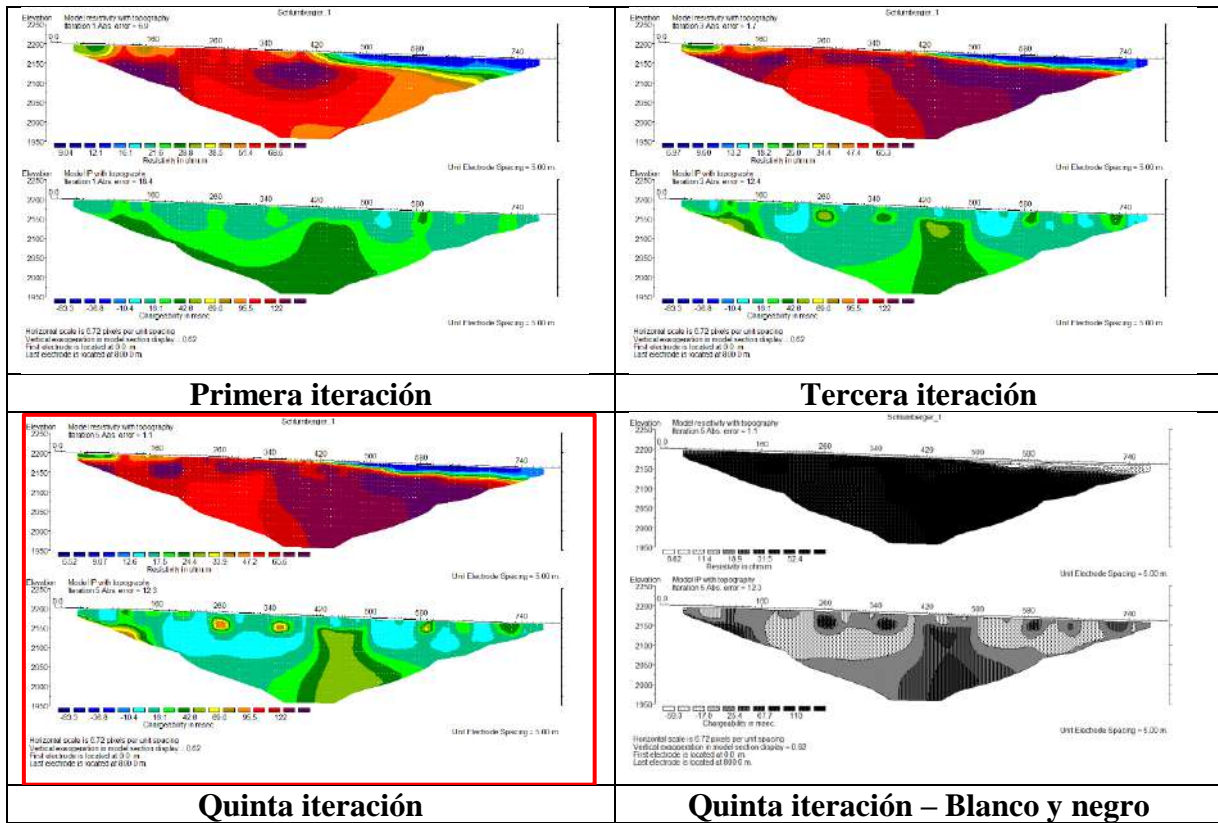
ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 0.5 SEG.



De acuerdo a la imagen de resistividad se puede evidenciar la existencia de material grueso compuesto de gravas y arenas, aluvial en una matrix limo arenoso con lentes de evaporitas con rangos de 60 ohmm. Hacia el lado derecho con menor resistividad compuesto de limos y arcillas hasta 30 ohmm.

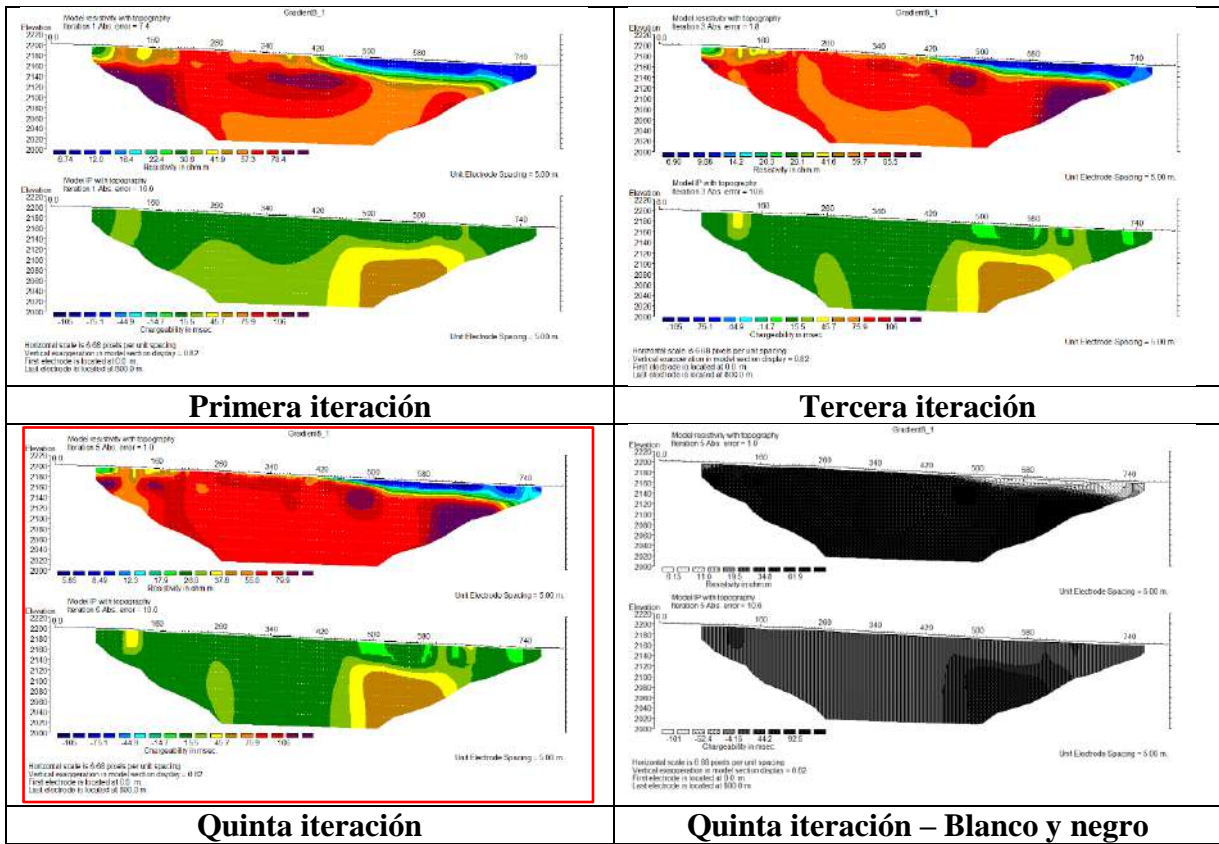
La imagen de cargabilidad de la quinta iteración refleja valores bajos de cargabilidad de 2.13 msec. posiblemente por la presencia de humedad.

ARREGLO: SCHLUMBERGER / PI: 1.0 SEG.



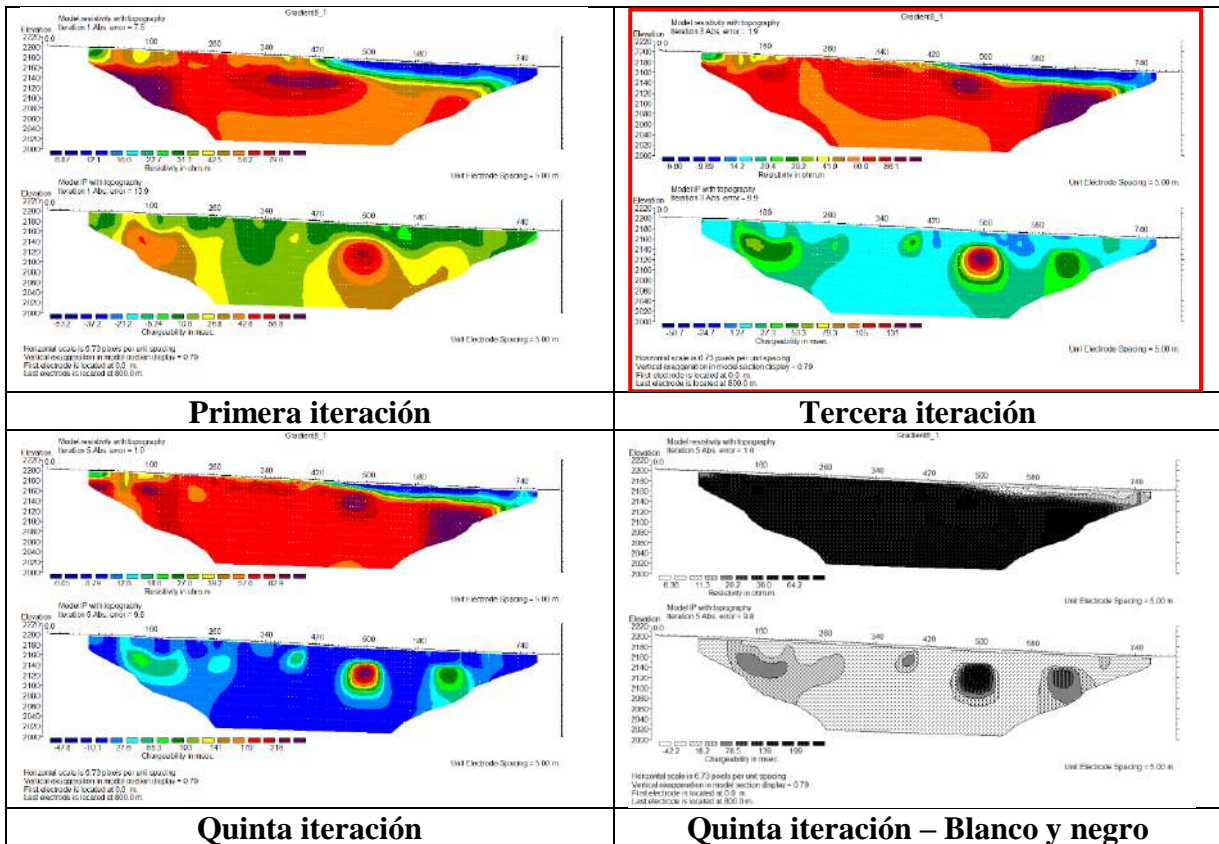
En la imagen de cargabilidad de 1.0 segundo de PI (quinta iteración) presenta un estrato de baja cargabilidad.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 0.5 SEG.



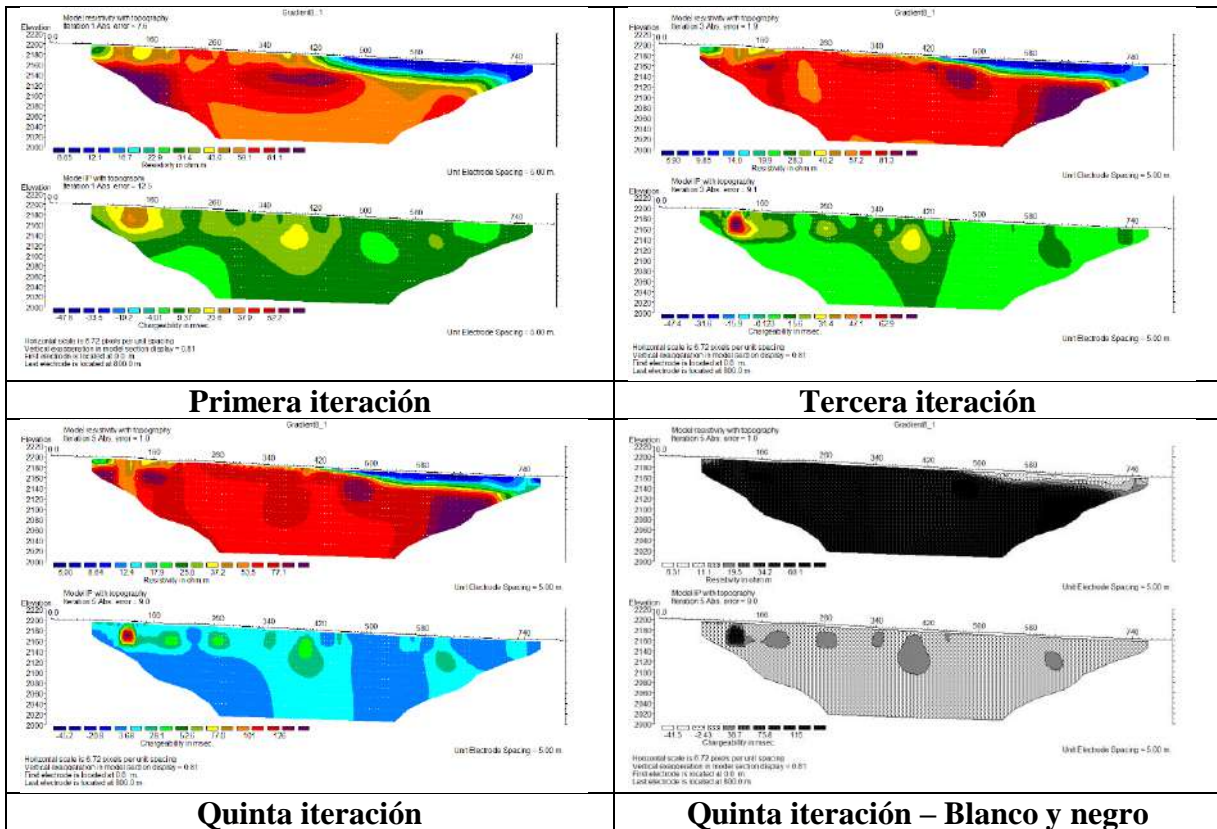
La imagen de cargabilidad del arreglo Gradiente, iteración 5 de 0.5 segundos de PI muestra valores altos de cargabilidad en casi toda la imagen, excepto un valor más bajo en la parte superior derecha, que es claramente el lado de las quebradas.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.0 SEG.



La imagen de cargabilidad del arreglo Gradiente de la iteración 3 de 1 segundo de PI, refleja valores altos de cargabilidad en casi toda la imagen y valores bajos de cargabilidad (1.27 msec.) color azul, en la parte superior derecha, reflejando que es el lugar más probable para encontrar agua y el resto no es un lugar apto para perforaciones.

ARREGLO: GRADIENTE / PI: 1.5 SEG.



La imagen de cargabilidad del arreglo Gradiente de la iteración 5 Blanco y negro de 1.5 segundos de PI, muestra valores altos de cargabilidad, reflejando que no es un buen sitio de perforación de pozo de agua subterránea.

5.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL POZO PERFORADO TIERRA LINDA

El pozo de explotación de agua subterránea de Tierra Linda es de propiedad de COSSALT, perforado por la UERH (Unidad de Exploración de Recursos Hídricos) dependiente de COFADENA (Corporación de las Fuerzas Armadas para el Desarrollo Nacional) del Ministerio de Defensa Nacional.

Es parte del contrato de 5 pozos ubicados en los barrios de Tierra Linda, Los Chapacos II, Municipal, Fray Quebracho y Torrecillas dentro del departamento de Tarija.

De acuerdo al informe se realizó la perforación del pozo en las coordenadas:

Este 316335

Norte 7616022

Elevación 1962 msnm

WGS-84 – UTM – ZONA 20K

El informe indica la tomografía eléctrica (realizada en el mes de julio del año 2020), pero no incluye la imagen o el resultado de dicho estudio.

En fecha 1 de abril del año 2021 se inició la perforación del pozo empleando un tricono de 8 pulgadas llegando a 150 metros de profundidad, de acuerdo al avance se extrajeron varias muestras de suelo metro a metro para determinar el perfil litológico del pozo, de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 17

Informe técnico de Tierra Linda de UERH – COSSALT 2021

| Inicio | Final | Descripción del suelo | Clasificación del suelo |
|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| 0.00 | 20.00 | Arcilla | Arcilla delgada (CL) |
| 20.00 | 49.00 | Arcilla con arena | Arcilla con grava o arena (CL) |
| 49.00 | 52.00 | Arena azul | Arena bien gradada (SW) |
| 52.00 | 61.00 | Arcilla con arena | Arcilla con grava o arena (CL) |
| 61.00 | 65.00 | Arena con granito | Arena bien gradada (SW) |
| 65.00 | 72.00 | Piedra laja o pizarra | Roca sedimentaria |
| 72.00 | 73.00 | Arena fina | Arena mal gradada (SP) |
| 73.00 | 75.00 | Arena fina amarilla y azul | Arena mal gradada (SP) |
| 75.00 | 88.00 | Piedra laja o pizarra | Roca sedimentaria |
| 88.00 | 92.00 | Arena con pizarra azul | Arena bien gradada (SW) |

| Inicio | Final | Descripción del suelo | Clasificación del suelo |
|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| 92.00 | 99.00 | Piedra laja azul | Roca sedimentaria |
| 99.00 | 104.00 | Arena con piedra laja | Arena bien gradada (SW) |
| 104.00 | 124.00 | Piedra laja o pizarra | Roca sedimentaria |
| 124.00 | 150.00 | Arena con piedra laja o azul | Arena bien gradada (SW) |

Una vez concluido la perforación del pozo piloto, se realizó el Registro Eléctrico Vertical (REV) de Pozo (24 de abril de 2021), registrando Potencial Espontáneo SP, Resistividad larga y resistividad corta, adjunto en Anexo 6a el perfil del Registro Eléctrico Vertical del pozo de Tierra Linda.

El informe indica que se observan valores resistivos, los cuales pueden estar asociados a un acuífero de agua dulce en las siguientes profundidades:

Tabla 18

Sugerencia de ubicación de filtros en función del resultado de REV por parte de la empresa contratada

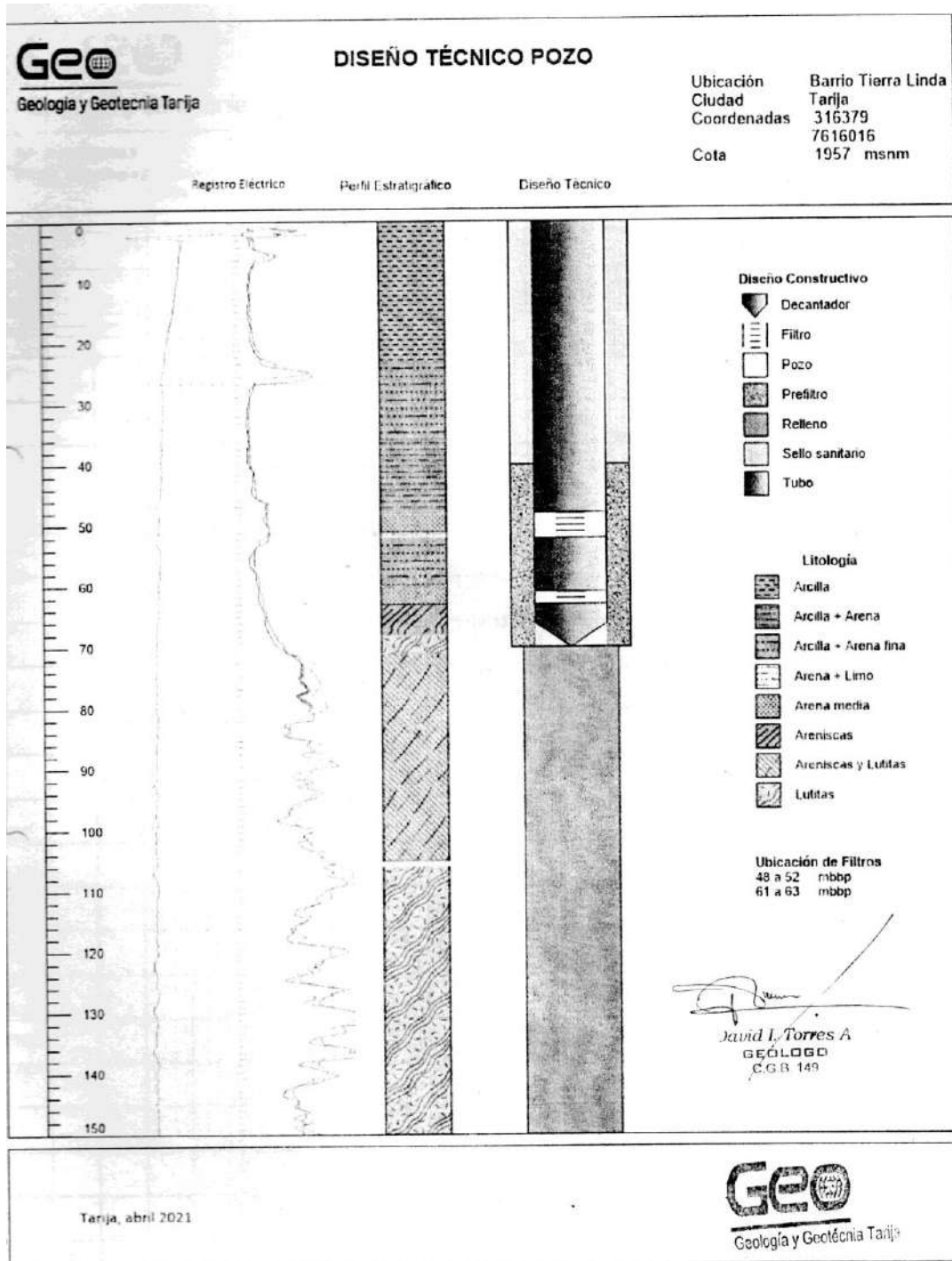
| Profundidad (m) | | |
|------------------------|-------|--------|
| 48.00 | 52.00 | Filtro |
| 61.00 | 63.00 | Filtro |

Indicando que no es recomendable encamisar el pozo hasta los 150 metros debido a que los valores inferiores a los 65 metros son improductivos.

Adjunto el diseño de pozo:

Figura 60

Informe técnico con sugerencia de filtros pozo en base a los resultados del REV (informe técnico empresa geo geología y geotécnia Tarija)



Posterior al estudio geofísico REV, en base al estudio y las muestras se hizo el diseño de pozo, de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 19

Informe de perforación UERH – COSSALT, 2021

| Profundidad (m) | | Tipo tubería PVC 8" | Cantidad de tubería ciega (m) | Cantidad de filtro (m) |
|-----------------|--------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| 0.00 | 48.00 | Ciega | 48.00 | 0.00 |
| 48.00 | 53.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 53.00 | 61.00 | Ciega | 8.00 | 0.00 |
| 61.00 | 65.00 | Filtro | 0.00 | 4.00 |
| 65.00 | 70.00 | Ciega | 5.00 | 0.00 |
| 70.00 | 75.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 75.00 | 92.00 | Ciega | 17.00 | 0.00 |
| 92.00 | 94.00 | Filtro | 0.00 | 2.00 |
| 94.00 | 99.00 | Ciega | 5.00 | 0.00 |
| 99.00 | 103.00 | Filtro | 0.00 | 4.00 |
| 103.00 | 104.40 | Ciega | 1.40 | 0.00 |
| | | | 84.40 | 20.00 |

El desarrollo del pozo se realizó mediante el suministro de grava especial de 5 mm de diámetro utilizada como filtro natural y empaque para las tuberías y filtros instalados, finalmente se realizó el compresorado y la prueba de bombeo para establecer el caudal. De acuerdo al informe no se pudo realizar la prueba de bombeo de forma correcta.

En resumen, tenemos el cuadro siguiente:

Tabla 20

Cuadro resumen de la litología, REV y pozo construido

| MUESTRAS DE PERFORACION | | | SUGERENCIA REV | | | CONSTRUIDO | | |
|-------------------------|-------|-----------------------|----------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| 0.00 | 20.00 | Arcilla | | | | 0.00 | 48.00 | Ciego |
| 20.00 | 49.00 | Arcilla con arena | | | | | | |
| 49.00 | 52.00 | Arena azul | 48.00 | 52.00 | Filtro | 48.00 | 53.00 | Filtro |
| 52.00 | 61.00 | Arcilla con arena | | | | 53.00 | 61.00 | Ciego |
| 61.00 | 65.00 | Arena con granito | 61.00 | 63.00 | Filtro | 61.00 | 65.00 | Filtro |
| 65.00 | 72.00 | Piedra laja o pizarra | | | | 65.00 | 70.00 | Ciega |
| 72.00 | 73.00 | Arena fina | | | | 70.00 | 75.00 | Filtro |

| MUESTRAS DE PERFORACION | | | SUGERENCIA REV | | | CONSTRUIDO | | |
|-------------------------|--------|------------------------------|----------------|--|--|------------|--------|--------|
| 73.00 | 75.00 | Arena fina amarilla y azul | | | | | | |
| 75.00 | 88.00 | Piedra laja o pizarra | | | | 75.00 | 92.00 | Ciego |
| 88.00 | 92.00 | Arena con pizarra azul | | | | | | |
| 92.00 | 99.00 | Piedra laja azul | | | | 92.00 | 94.00 | Filtro |
| 99.00 | 104.00 | Arena con piedra laja | | | | 94.00 | 99.00 | Ciego |
| 104.00 | 124.00 | Piedra laja o pizarra | | | | 99.00 | 103.00 | Filtro |
| 124.00 | 150.00 | Arena con piedra laja o azul | | | | 103.00 | 104.40 | Ciego |

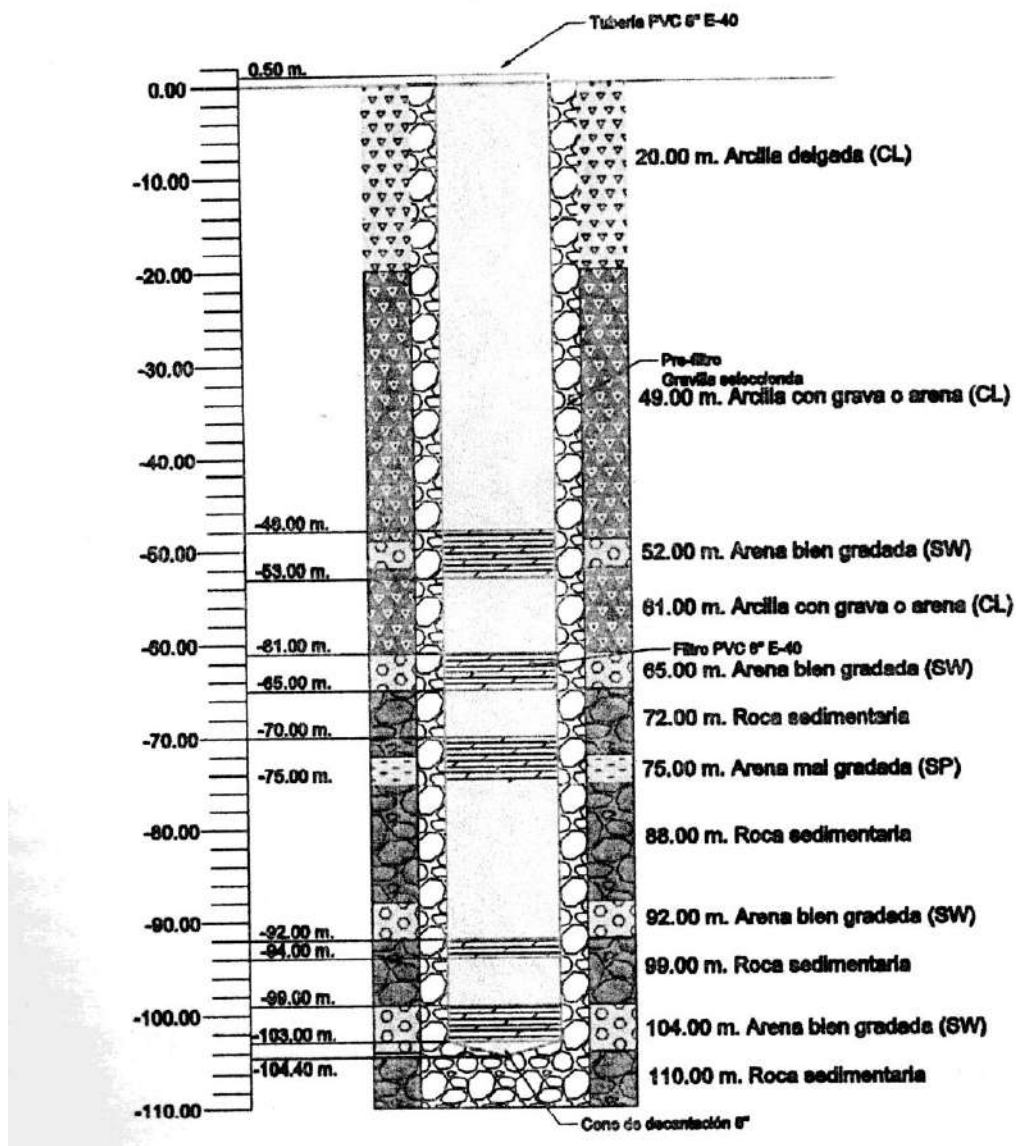
Figura 61

Diseño y construcción de pozo tierra linda (Informe Técnico UERH – COFADENA)

MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL
U.E.R.H. – COFADENA
BOLIVIA



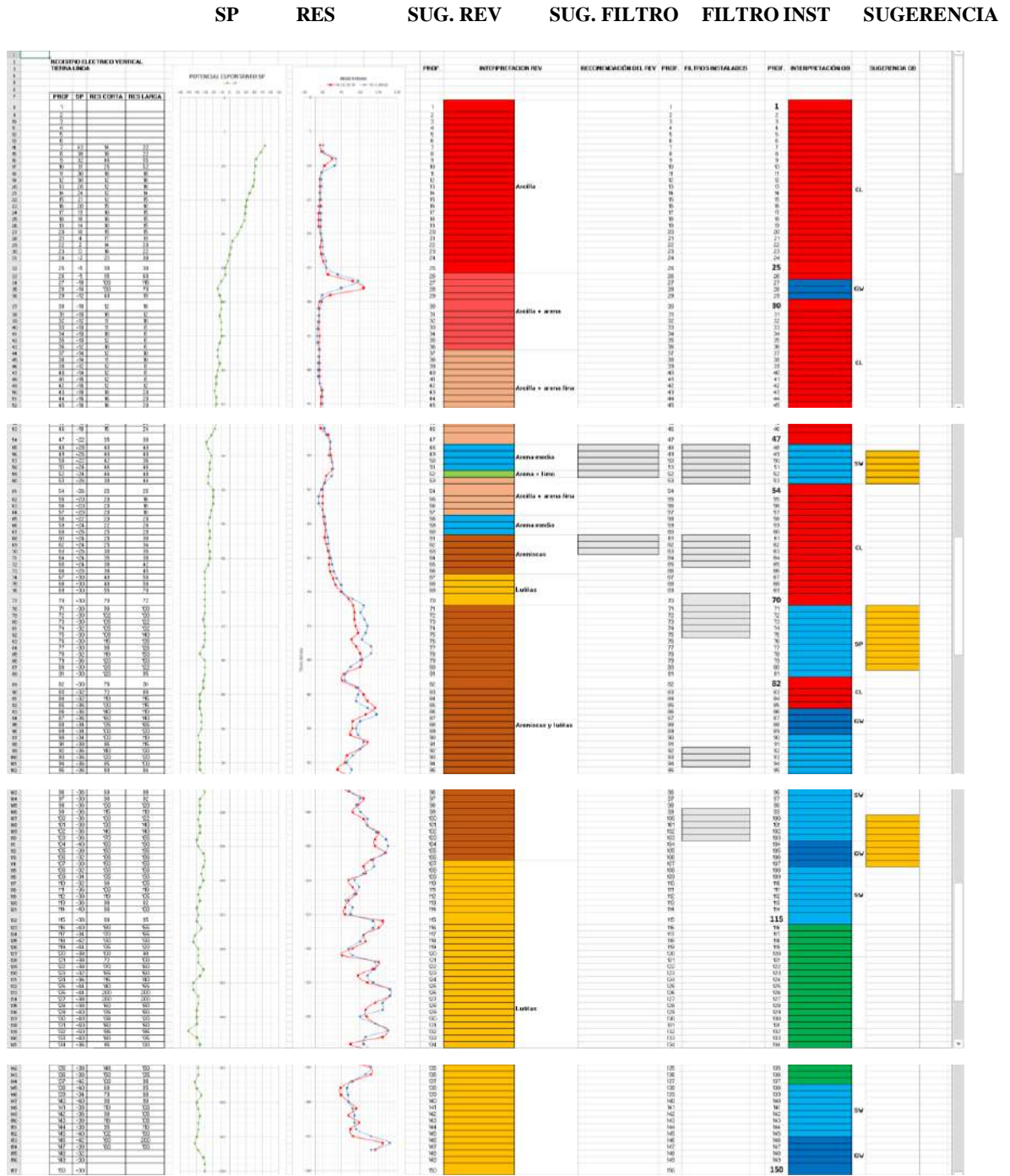
II. DISEÑO DE POZO BARRIO TIERRA LINDA – TARIJA



ANÁLISIS EN FUNCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TOMOGRAFÍA RES + PI

Figura 62

Registro eléctrico vertical REV Tierra Linda, con interpretación y sugerencia post construcción de pozo.



Nota. Fuente. Informe técnico y propia

En función de la tomografía y el registro eléctrico vertical, teniendo clara evidencia de los estratos se pueden agrupar en lo siguiente:

Tabla 21

Interpretación del registro REV en función de la tomografía de tierra linda.

| Rango | | Tipo de material | Sugerencia de ubicación de filtros | |
|-------|-----|---|------------------------------------|------------------|
| 1 | 25 | Arcillas y limos | | |
| 25 | 30 | Arenas | | |
| 30 | 47 | Arcillas | | |
| 47 | 54 | Arenas | Filtro | Entre 49-53m. |
| 54 | 70 | Arcillas | | |
| 70 | 82 | Gravas y arenas | Filtro | Entre 71-80m. |
| 82 | 115 | Bolones, gravas y arenas | | |
| 115 | 150 | Material heterogéneo con bloques de limolitas | Filtro | Entre 100-107 m. |

5.6 ANÁLISIS DEL POZO PERFORADO FRAY QUEBRACHO

El pozo de explotación de agua subterránea de Fray Quebracho es de propiedad de COSSALT, perforado por la UERH (Unidad de Exploración de Recursos Hídricos) dependiente de COFADENA (Corporación de las Fuerzas Armadas para el Desarrollo Nacional) del Ministerio de Defensa Nacional.

Es parte del contrato de 5 pozos ubicados en los barrios de Tierra Linda, Los Chapacos II, Municipal, Fray Quebracho y Torrecillas dentro del departamento de Tarija.

De acuerdo al informe se realizó la perforación del pozo en las coordenadas:

Este 323934

Norte 7617326

Elevación 1883 msnm

WGS-84 – UTM – ZONA 20K

El informe indica la tomografía eléctrica (mes de julio), pero no incluye la imagen o el resultado de dicho estudio.

Se inició la perforación del pozo empleando un tricono de 8 pulgadas llegando a 150 metros de profundidad, de acuerdo al avance se extrajeron varias muestras de suelo metro a metro para determinar el perfil litológico del pozo, de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 22

Informe técnico Fray Quebracho de UERH – COSSALT 2021

| Profundidad | | Descripción del suelo | Clasificación del suelo |
|-------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|
| 0.00 | 50.00 | Tierra con arcilla | Arcilla con grava o arena (CL) |
| 50.00 | 80.00 | Piedra con arena roja | Grava bien gradada (GW) |
| 80.00 | 84.00 | Piedra con arena | Grava bien gradada (GW) |
| 84.00 | 87.00 | Arena con grava | Arena bien gradada (SW) |
| 87.00 | 89.00 | Piedra con arena | Grava bien gradada (GW) |
| 89.00 | 94.00 | Arena con bolones de piedra | Arena bien gradada (SW) |
| 94.00 | 100.00 | Piedra con arena | Grava bien gradada (GW) |
| 100.00 | 106.00 | Arena con grava y piedra | Arena bien gradada (SW) |
| 106.00 | 109.00 | Arcilla con piedra | Arena bien gradada (SW) |
| 109.00 | 113.00 | Arena con piedra | Arena bien gradada (SW) |
| 113.00 | 120.00 | Piedra con arena | Grava bien gradada (GW) |
| 120.00 | 133.00 | Arcilla con arena | Arcilla con grava o arena (CL) |
| 133.00 | 139.00 | Piedra con arena | Grava bien gradada (GW) |
| 139.00 | 150.00 | Arcilla con arena | Arcilla con grava o arena (CL) |

Una vez concluido la perforación del pozo piloto, se realizó el Registro Eléctrico Vertical (REV) de Pozo (14 de enero de 2021), registrando Potencial Espontáneo SP, Resistividad larga y resistividad corta, de acuerdo a Anexo 6b.

El informe indica que se observan valores resistivos, los cuales pueden estar asociados a un acuífero de agua dulce en las siguientes profundidades:

Tabla 23

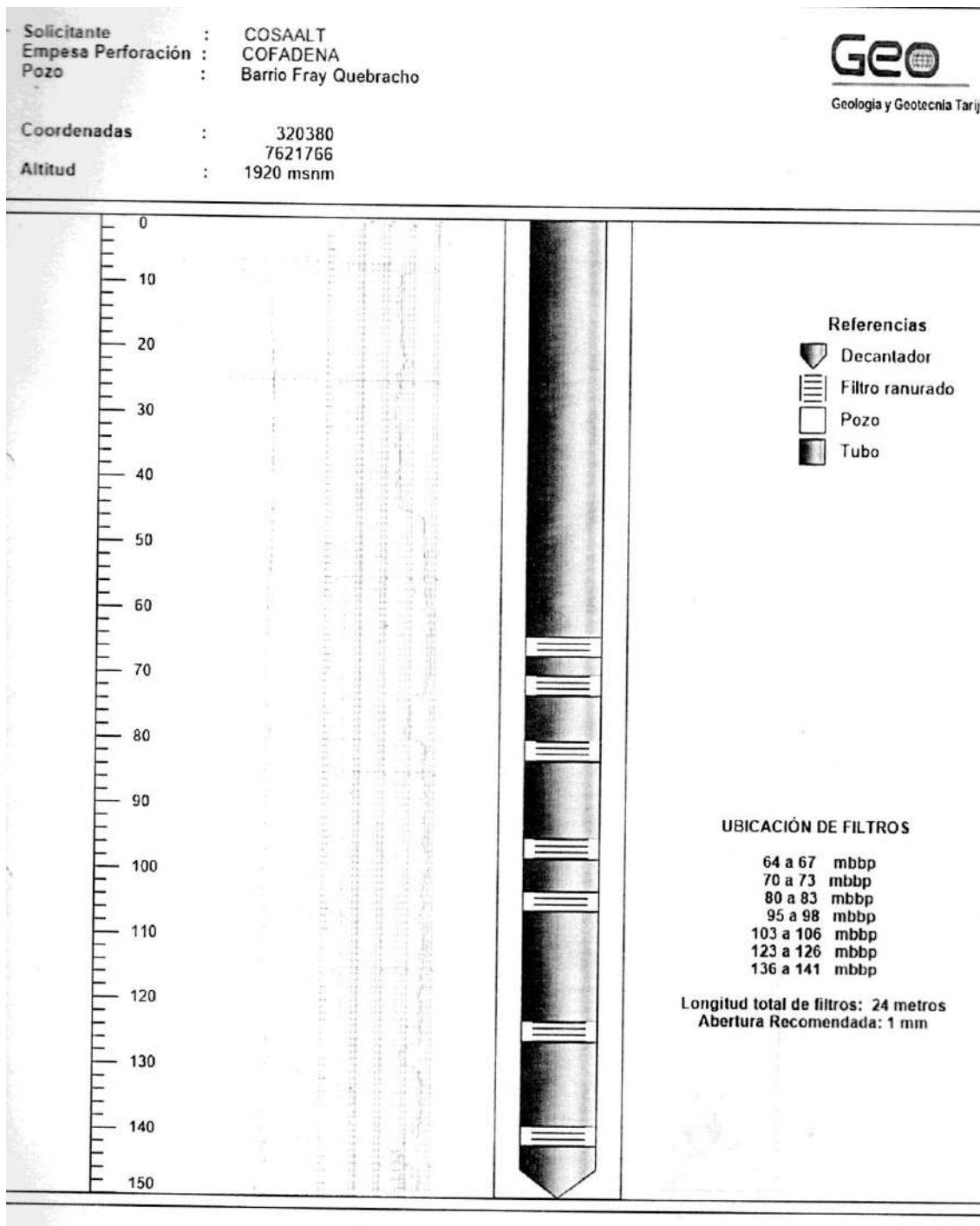
Sugerencia de ubicación de filtros en función del resultado de REV

| Profundidad (mbbp) | | |
|--------------------|--------|--------|
| 64.00 | 67.00 | Filtro |
| 70.00 | 73.00 | Filtro |
| 80.00 | 83.00 | Filtro |
| 95.00 | 98.00 | Filtro |
| 103.00 | 106.00 | Filtro |
| 123.00 | 126.00 | Filtro |
| 136.00 | 141.00 | Filtro |

Adjunto el diseño de pozo:

Figura 63

Informe técnico de sugerencia de instalación de filtros en base a los resultados de REV por parte de empresa Geo Tarija



Nota. Informe técnico de empresa Geología y Geotecnia Tarija

Posterior al estudio geofísico REV, en base al estudio y las muestras se hizo el diseño de pozo, de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 24

Informe técnico fray quebracho de perforación UERH – COSSALT, 2021

| Profundidad (m) | | Tipo tubería PVC 8" | Cantidad de tubería ciega (m) | Cantidad de filtro (m) |
|-----------------|--------|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| 0.00 | 64.00 | Ciega | 64.00 | 0.00 |
| 64.00 | 67.00 | Filtro | 0.00 | 3.00 |
| 67.00 | 70.00 | Ciega | 3.00 | 0.00 |
| 70.00 | 75.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 75.00 | 80.00 | Ciega | 5.00 | 0.00 |
| 80.00 | 83.00 | Filtro | 0.00 | 3.00 |
| 83.00 | 95.00 | Ciega | 12.00 | 0.00 |
| 95.00 | 100.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 100.00 | 103.00 | Ciega | 3.00 | 0.00 |
| 103.00 | 108.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 108.00 | 123.00 | Ciega | 15.00 | 0.00 |
| 123.00 | 128.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 128.00 | 136.00 | Ciega | 8.00 | 0.00 |
| 136.00 | 141.00 | Filtro | 0.00 | 5.00 |
| 141.00 | 150.00 | Ciega | 9.00 | 0.00 |
| | | | 119.00 | 31.00 |

El desarrollo del pozo se realizó mediante el suministro de grava especial de 5 mm de diámetro utilizada como filtro natural y empaque para las tuberías y filtros instalados, finalmente se realizó el compresorado y la prueba de bombeo y se obtuvo lo siguiente:

Nivel estático: 3.30 metros

Nivel dinámico: 3.85 m

Caudal erogado: 6.09 litros x segundo

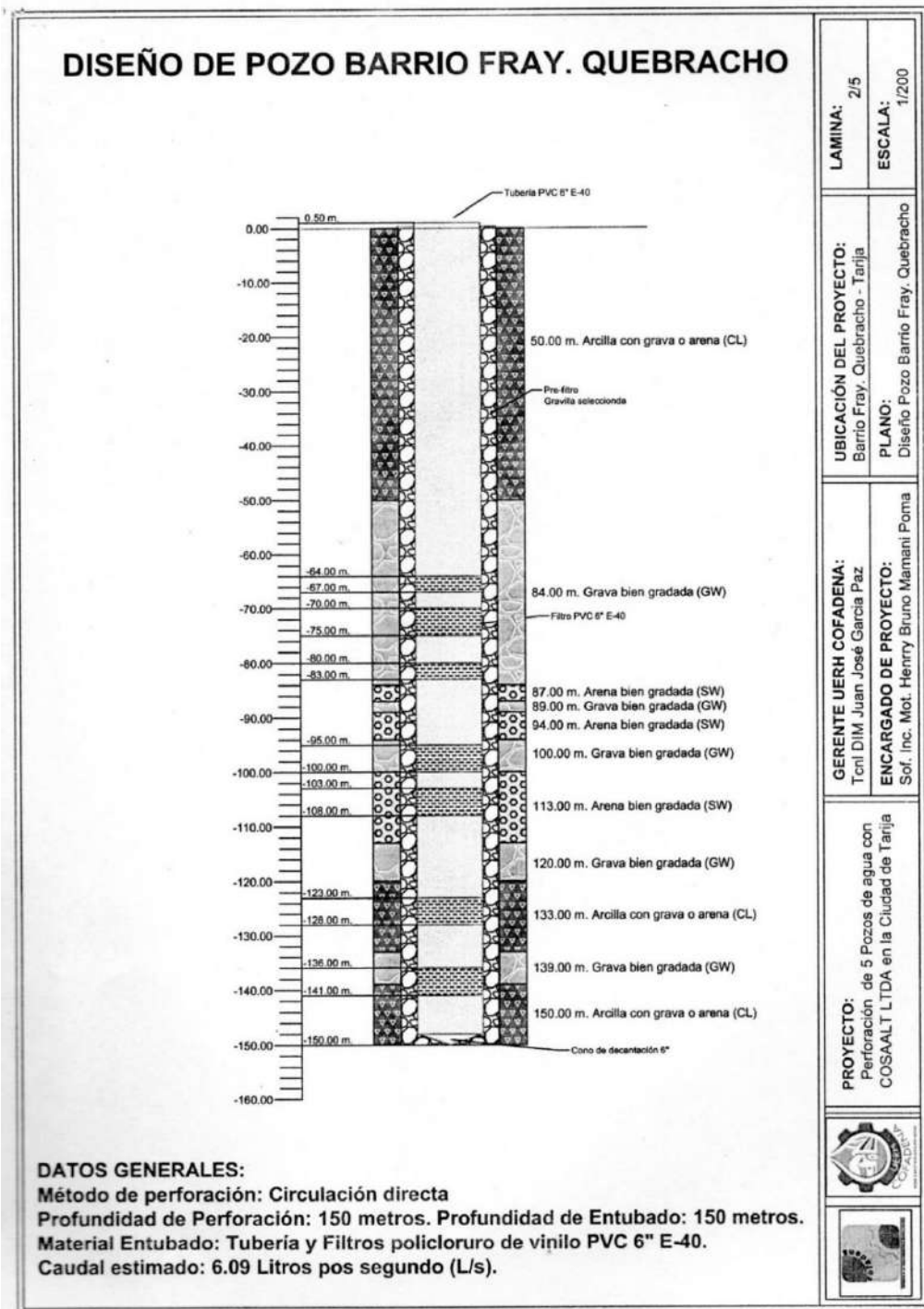
En resumen, tenemos el cuadro siguiente:

Tabla 25*Cuadro resumen de la litología, REV y pozo construido*

| MUESTRAS DE PERFORACIÓN | | | REV | | | CONSTRUIDO | | |
|-------------------------|--------|----|--------|--------|--------|------------|--------|--------|
| 0.00 | 50.00 | CL | | | | 0.00 | 64.00 | Ciega |
| 50.00 | 80.00 | GW | 64.00 | 67.00 | Filtro | 64.00 | 67.00 | Filtro |
| | | | | | | 67.00 | 70.00 | Ciega |
| 80.00 | 84.00 | GW | 70.00 | 73.00 | Filtro | 70.00 | 75.00 | Filtro |
| 84.00 | 87.00 | SW | | | | 75.00 | 80.00 | Ciega |
| 87.00 | 89.00 | GW | 80.00 | 83.00 | Filtro | 80.00 | 83.00 | Filtro |
| 89.00 | 94.00 | SW | | | | 83.00 | 95.00 | Ciega |
| 94.00 | 100.00 | GW | 95.00 | 98.00 | Filtro | 95.00 | 100.00 | Filtro |
| 100.00 | 106.00 | SW | | | | 100.00 | 103.00 | Ciega |
| 106.00 | 109.00 | SW | 103.00 | 106.00 | Filtro | 103.00 | 108.00 | Filtro |
| 109.00 | 113.00 | SW | | | | 108.00 | 123.00 | Ciega |
| 113.00 | 120.00 | GW | 123.00 | 126.00 | Filtro | 123.00 | 128.00 | Filtro |
| 120.00 | 133.00 | CL | | | | 128.00 | 136.00 | Ciega |
| 133.00 | 139.00 | GW | 136.00 | 141.00 | Filtro | 136.00 | 141.00 | Filtro |
| 139.00 | 150.00 | CL | | | | 141.00 | 150.00 | Ciega |

Figura 64

Diseño y construcción de pozo de agua subterránea pozo fray quebracho



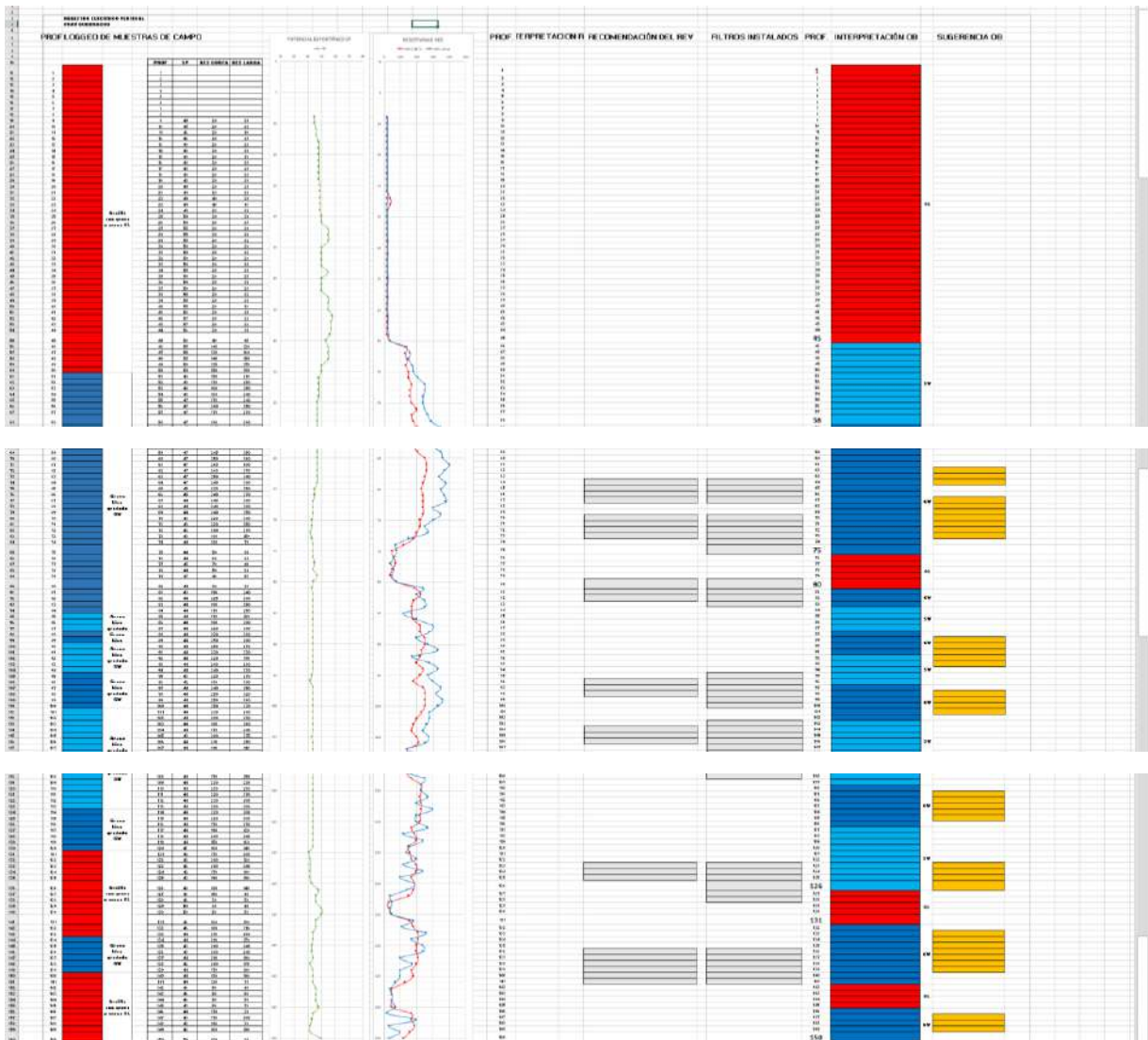
Nota. Informe técnico UERH – COFADENA

ANÁLISIS EN FUNCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA TOMOGRAFÍA RES + PI}

Figura 65

Registro eléctrico vertical REV Fray Quebracho, con interpretación y sugerencia post construcción de pozo.

SP RES RECOM. REV FILTRO INST. SUGERENCIA



Nota. Fuente. informe técnico y propia

En función de la tomografía y el registro eléctrico vertical, teniendo clara evidencia de los estratos se pueden agrupar en lo siguiente:

Tabla 26

Interpretación del registro REV en función de la tomografía de Fray Quebracho.

| Rango | | Tipo de material | Sugerencia de ubicación de filtros | |
|--------------|-----|---|---|---|
| 0 | 45 | Arcillas y limos | | |
| 45 | 58 | Arenas | | |
| 58 | 75 | Gravas | Filtro | Entre 62-73 m. |
| 75 | 80 | Arcillas | | |
| 80 | 125 | Arenas y gravas | Filtro | Entre 89-93 m. Entre 98-101 m. Entre 111-115 m. Entre 123-126 m. |
| 126 | 131 | Arcillas | | |
| 131 | 150 | Material heterogéneo con bloques de limolitas | Filtro | Entre 133-139 m. Entre 147-149 m. |

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES - TIERRA LINDA

- Existe buen contraste (clara diferencia de los estratos más importantes) en el resultado de las tomografías, en base a los resultados de resistividad.
- Se puede ver con mucha claridad el espesor del estrato cuaternario compuesto de arcillas y limos, de acuerdo a la imagen de resistividad.
- De acuerdo al mapa geológico, la clasificación Qfl cuaternario fluvio lacustre comparado con el resultado de la imagen de resistividad corresponde a su clasificación.
- Como corresponde a un extinto lago, la secuencia acumulada iniciará con una grava, ocupando siempre la parte más baja, alcanzando un espesor decamétrico. de aprox. 60 Ohmm a más en las imágenes de resistividad se demuestra la saturación de la capa gravosa.
- El agua como parte del ciclo hidrológico sigue su curso natural de infiltración hasta llegar a la zona saturada, cumpliendo el proceso de percolación y acumulándose en el contacto por gravedad.
- El pozo perforado no tuvo la prueba de bombeo de la forma correcta que indica el informe, teóricamente por los valores de resistividad hay agua en el contacto, en la base del material cuaternario (arcillas, limos, grava y arenas).
- Las imágenes de resistividad de Schlumberger de 0.5 seg. de PI agrupa rangos similares, de 1.0 seg. discrimina algunos cuerpos y de 1.5 seg. da más detalle de los diferentes tipos de material.
- Todos los registros de resistividad de Gradiente coinciden tanto de 0.5, 1.0 y 1.5 segundos de polarización inducida.
- La imagen de cargabilidad de Schlumberger de la iteración 3 de 0.5 seg. de PI muestra en la parte superior mayor cargabilidad que en la parte inferior, coincide con lo teórico de alta cargabilidad arriba y baja cargabilidad abajo.
- La imagen de cargabilidad de Gradiente de la iteración 3 de 0.5 seg. de PI muestra valores de baja cargabilidad de 0.321 msec en la imagen, en proximidades del contacto

con el material más resistivo, que refleja lo teórico, aguas subterráneas con valores de baja cargabilidad.

- La imagen de cargabilidad de Gradiente de la primera iteración de 1.0 seg. de PI muestra valores bajos de 1.27 msec. en parte de la imagen, en general la configuración de 1 segundo de PI no refleja lo teórico planteado originalmente.
- La imagen de cargabilidad de Gradiente de la iteración 5 de 1.5 seg. de PI muestra cargabilidad baja en la parte inferior con rangos de 0.169 msec, reflejando la posible presencia de agua subterránea por porosidad secundaria y alta cargabilidad en la parte superior, confirmando lo teórico de alta cargabilidad por la presencia de arcillas y limos y baja cargabilidad por el proceso de infiltración y percolación en el bed rock compuesto de limolitas con estratificación sub vertical que tiene la capacidad de permitir el paso del agua entre sus capas y las diaclasas que presenta en todo el macizo.
- Instalar filtros en la roca es viable por la posibilidad de encontrar agua por porosidad secundaria (agua en las grietas o fisuras) en resistividades mayores a 60 Ohmm.
- De acuerdo al registro eléctrico vertical se puede ver un claro cambio de las curvas por el tipo de material registrado.
- No hay pozos perforados en proximidades para evaluar los niveles estático y dinámico y hacer una correlación de profundidades y caudales.
- En el arreglo Schlumberger, el espesor de resistividad de 50 a 60 Ohmm es mayor entre las progresivas 500 y 580 aproximadamente, un posible paleocause.
- En el arreglo Gradiente, el espesor de resistividad de 50 a 60 Ohmm es mayor en la progresiva 500 aproximadamente, un posible paleocause.
- Teóricamente las arcillas tienen un valor mayor de cargabilidad, el estrato superior cuaternario compuesta por arcillas y limos refleja en la configuración de 0.5 y 1.5 segundos valores altos que reflejan la inexistencia o muy baja presencia de agua de agua subterránea en estas capas superiores.
- El valor bajo de cargabilidad (correspondiente a agua dulce entre 0 y 2 msec) es reflejado en profundidad, debajo de las capas de mayor cargabilidad, posiblemente por la porosidad secundaria ya que el material en profundidad por el reconocimiento del entorno está compuesto de limolitas con estratificación sub vertical (casi vertical)

heterogéneo y los valores registrados en el perfilaje eléctrico coinciden con los valores obtenidos de la resistividad y cargabilidad.

- El logueo realizado (toma de muestras del pozo en proceso de perforación) por el perforista realizado el año 2021 señalan la existencia de pizarras, pero revisando la geología del lugar sobre todo los macizos rocosos aflorantes, todas son rocas sedimentarias conformadas por limolitas, parcialmente por lutitas y areniscas, no reportándose en ningún caso rocas metamórficas tal como cuarcitas, pizarras y esquistos.
- Aproximadamente a 700 metros hacia el Nor oeste se puede evidenciar la formación Cieneguillas, que tienen una estratificación sub vertical compuesta de limolitas con contacto discordante rugoso, en la zona de estudio o línea geofísica no llegamos a registrar el valor de dicha formación.
- De acuerdo al Registro Eléctrico Vertical del pozo, los valores de resistividad corta y larga en profundidad llegan aproximadamente a 200 Ohmm, con curvas variables que corresponden a un material heterogéneo, compuesto de material grueso, mixto y fino, que corresponde a depósitos coluviales de alta energía.
- Finalmente concluimos que los rangos bajos entre 0-2 msec reflejan la presencia de agua subterránea en el contacto y en el material heterogéneo por debajo del contacto.

6.2 RECOMENDACIONES – TIERRA LINDA

- No está en la carpeta el resultado de la tomografía electro resistiva, sólo es mencionado, pero no incluyen ninguna imagen. Si hubiera habido la posibilidad de escoger un sitio para Tierra Linda posiblemente hubiera sido más productivo un pozo en proximidades de los anteriores cursos de agua, buscando paleocanales o paleocausas más productivos, una opción en proximidades de la progresiva cero (PROG. 0) de la línea o bien más al noroeste de la línea de tomografía, entre las progresivas 500 para adelante.
- El registro de Schlumberger de 0.5 seg. de PI y Gradiente de 0.5 y 1.5 seg. de PI o tiempo de decaimiento, reflejan mejor la anomalía de cargabilidad baja en el estrato que contiene agua dulce y mayor cargabilidad en los estratos con mayor contenido de arcilla y limos.

- Analizar las imágenes de cargabilidad con mayores tiempos de 2 y 3 segundos, para confirmar el resultado de cargabilidad.
- En caso de nuevos proyectos en el mismo sector, realizar tomografías en modo roll along cubriendo mayor distancia y cubriendo los indicios de posibles paleocausas en la zona de interés.
- Una base de datos georeferenciada de datos crudos y procesados en la entidad encargada de todos los proyectos geofísicos para un análisis multitemporal de los datos en función del tiempo.
- Realizar una línea en modo roll along en la misma dirección del flujo sobre la formación Cieneguillas para determinar el valor real de resistividad de la formación, el comportamiento en profundidad y cuantificar las potencias de los acuíferos.

6.3 CONCLUSIONES - FRAY QUEBRACHO

- Existe buen contraste de los diferentes estratos en la imagen de resistividad de las tomografías obtenidas, una clara diferencia de los estratos más importantes.
- Se puede evidenciar el espesor de los materiales entre finos y gruesos con mucha claridad, de acuerdo a la imagen de resistividad.
- Evaluando la información existente de los pozos ubicados en proximidades del pozo Fray Quebracho, como el pozo Oscar Zamora (700 metros al sur oeste) Anexo 7a, este pozo tiene un espesor de gravas y arenas de aproximadamente 40 metros, de acuerdo a los registros el caudal es mayor a 14 litros/segundo, se puede evidenciar que el caudal es mayor en este pozo, eso da a entender que posiblemente existen mejores paleocausas o acuíferos con mejor potencia en proximidades del lugar.
- De igual forma el pozo Avit A (1100 metros al sur este) Anexo 7b, este pozo tiene un espesor de gravas y arenas de aproximadamente 60 metros, de acuerdo a los registros el caudal es mayor a 20 litros/segundo, se puede evidenciar que el caudal es mayor en este pozo, concluyendo que posiblemente haya acuíferos con mejores resultados en proximidades del pozo Fray Quebracho.

- De acuerdo a la imagen de resistividad del arreglo Schlumberger y Gradiente, una posible mejor ubicación del pozo hubiera sido la progresiva 160 ó 360 por verse claramente un paleocauce.
- La imagen de cargabilidad que refleja lo teórico es de 0.5 y 1 seg., pero la imagen de 1,5 seg. no refleja esa situación, por lo que se puede determinar la influencia de la matrix fina.
- Como corresponde a un extinto lago, la secuencia acumulada iniciara con una grava, ocupando siempre la parte más baja, alcanzando un espesor decamétrico. de aprox. 60 Ohmm en el arreglo Schlumberger y entre 60 y 70 Ohmm del arreglo Gradiente, en las imágenes de resistividad se demuestra la saturación de la capa gravosa.
- El agua como parte del ciclo hidrológico sigue su curso natural de infiltración hasta llegar a la zona saturada, cumpliendo el proceso de percolación y acumulándose en el contacto por gravedad.
- Todas las imágenes de resistividad de Schlumberger y Gradiente coinciden tanto de 0.5, 1.0 y 1.5 segundos de polarización inducida.
- El valor bajo de cargabilidad (correspondiente a agua dulce) es reflejado en profundidad, debajo de las capas de mayor cargabilidad, por el tipo de material heterogéneo en base a los valores registrados en el perfilaje eléctrico coincidentes con los valores obtenidos de la resistividad y cargabilidad.
- No existen afloramientos próximos al pozo Fray Quebracho, por inferencia estimamos que es la formación Cieneguillas, que tienen una estratificación sub vertical compuesta de limolitas con contacto discordante rugoso, en la zona de estudio o línea geofísica no llegamos a registrar el valor de dicha formación.
- De acuerdo al Registro Eléctrico Vertical del pozo, los valores de resistividad corta y larga son variables encontrando entre la profundidad 45-75 metros arenas y gravas en el orden de 250 y 400 Ohmm, pero a mayor profundidad valores bajos de arcillas, en el orden de 50 Ohmm (75-80 metros) y en profundidad curvas variables que corresponden a materiales heterogéneos, entre ellos arcillas de baja resistividad
- El rango entre 0-3 msec puede reflejar mejor la presencia de agua subterránea en el contacto y en el material heterogéneo por debajo del contacto.

6.4 RECOMENDACIONES – FRAY QUEBRACHO

- No está en la carpeta el resultado de la tomografía electro resistiva, sólo es mencionado, pero no incluyen ninguna imagen. Si hubiera habido la posibilidad de escoger un sitio para Fray Quebracho hubiera sido más productivo un pozo en proximidades de la prog 160 o posiblemente por la progresiva 360, buscando paleocanales o paleocausas más productivos.
- El registro de Schlumberger y Gradiente con 1.5 seg. de tiempo de decaimiento, reflejan mejor la anomalía de cargabilidad baja en el estrato que contiene agua dulce y mayor cargabilidad en los estratos con mayor contenido de arcilla y limos.
- Analizar las imágenes de cargabilidad con mayores tiempos de 2 y 3 segundos, para confirmar el resultado de cargabilidad.
- En caso de realizar nuevas tomografías en el mismo sector, realizar tomografías en modo roll along siguiendo las referencias de los pozos Oscar Zamora y Avit A, cubriendo mayor distancia y cubriendo los indicios de posibles paleocausas en la zona de interés.

6.5 CONCLUSIONES - YESERA

- Existe buen contraste en la imagen de resistividad de Schlumberger y Gradiente confirmando dos estratos importantes.
- No había ningún pozo perforado en la zona de la tomografía para correlacionar los resultados.
- Este primer ensayo nos permite ver que antes de realizar futuros proyectos de perforación de pozos, especialmente dentro de la cuenca pedagógica de Yesera, es muy importante la evaluación preliminar de posibles fracturas para asegurar un mejor caudal o proximidades de posibles paleocausas.
- La imagen de resistividad de la iteración 5 de 0.5 segundos de Schlumberger refleja la existencia de material grueso en una gran parte de la imagen, compuesto de gravas, arenas en una matrix limo arenoso y la imagen de cargabilidad refleja valores bajos de

2.13 msec en la parte inferior, siendo un valor referencial de una posible existencia de agua subterránea en profundidad.

- La imagen de cargabilidad de la iteración 5 de 1.5 segundos de Schlumberger refleja baja cargabilidad en la escala gráfica en la parte inferior con probabilidad de encontrar agua.
- La imagen de cargabilidad del arreglo Gradiente, iteración 5 de 0.5 segundos de PI muestra valores altos de cargabilidad en casi toda la imagen, excepto un valor más bajo en la parte superior derecha, que es claramente el lado de las quebradas.
- La imagen de cargabilidad del arreglo Gradiente de la iteración 3 de 1 segundo de PI, refleja valores altos de cargabilidad en casi toda la imagen y valores bajos de cargabilidad (1.27 msec.) color azul, en la parte superior derecha, reflejando que es el lugar más probable para encontrar agua y el resto no es un lugar apto para perforaciones.
- Sobre el camino asfaltado hacia Yesera se puede evidenciar la formación Huamampampa, que tienen una estratificación sub vertical compuesta de limolitas con contacto discordante rugoso, en la zona de estudio o línea geofísica no llegamos a registrar el valor de dicha formación, pero por referencia de una línea aproximadamente a 4 km al sur el valor de la formación es superior a 350 Ohmm.

6.6 RECOMENDACIONES - YESERA

- El método eléctrico de geofísica es uno de los más confiables para cuantificar espesores de acuíferos, como también identificar tipos de rocas o materiales existentes, en este caso se puede confirmar un estrato de depósito cuaternario de material grueso aluvial en una matrix areno limoso.
- Para un resultado óptimo de un pozo de agua es recomendable seguir todos los pasos preliminares e identificar los posibles mejores sitios y realizar las tomografías de resistividad y cargabilidad correspondientes.

6.7 CONCLUSIÓN GENERAL

- Las respuestas de polarización inducida en dominio de tiempo de 0.5 y 1.5 segundos de PI aportan mejor información que junto con la resistividad permiten una mejor comprensión e interpretación de la geología.

- El rango de 0-3 msec de cargabilidad refleja mejor la presencia de agua subterránea en el contacto y por debajo del mismo por ser un material heterogéneo.

6.8 RECOMENDACIÓN GENERAL

- Todo registro de datos de resistividad debería incluir datos de polarización inducida para reducir la ambigüedad de la interpretación y cubrir una mayor longitud en modo roll along para tener mejores opciones de perforación.
- Analizar las imágenes de cargabilidad con mayores tiempos de 2 y 3 segundos, para confirmar el resultado de cargabilidad.
- Realizar tomografías en modo roll along para cubrir mayor longitud y tener la posibilidad de seleccionar mejores sitios con mayor probabilidad de aumentar el caudal para el proyecto.
- La Tomografía Electro Resistiva es uno de los primeros métodos geofísicos, el Registro Eléctrico Vertical (REV) debe ser registrado con todas las variables que indica la norma IBMETRO entre ellas los Rayos Gamma, RES corta, larga, SP, y SPR.
- Realizar una campaña combinada del método Electro Resistivo (ERT) 2D y 3D con el método Transiente Electromagnético (TEM) 1D un método que permite llegar a profundidades mayores a 500 metros para delimitar la paleocuenca e identificar los acuíferos para explotar o cuidar evitando contaminaciones para una futura explotación.