ESTUDIO GEOELECTRICO (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA), VEREDA ESMERALDA, MUNICIPIO DE TOCANCIPA - CUNDINAMARCA.

ELABORADO POR

GEOSCIENCE S.A.S

AGOSTO DE 2025

TABLA DE CONTENIDO

1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA 4
2 GEOELÉCTRICA 6
2.1 ESTUDIO GEOELECTRICO (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA). 6
2.2 INTRODUCCIÓN 6
2.3 OBJETIVO 8
2.4 PRINCIPIO DEL MÉTODO GEOFÍSICO. 8
2.4.1 Resistividad Aparente: 8
2.4.2 Dispositivos: 10
2.5 METODOLOGÍA 12
2.6 GEOLOGÍA 16
2.7 PROCESAMIENTO 17
2.7.1 TOMOGRAFÍA N°1 20
3 CONCLUSIONES 28

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica. 5
Figura 2. Principio teórico de operación de las TER's. 7
Figura 3. Rangos de resistividad para diferentes materiales. 7
Figura 4. Resistividades de algunos suelos y rocas. 10
Figura 5. Resistividades de algunos suelos y rocas. 10
Figura 6. Dispositivo Schlumberger. 11
Figura 7. Arreglo Schlumberger. 12
Figura 8. Modelo de la toma de resistividades para cada medición. 14
Figura 9. Imágenes proporcionadas por el programa RES2DINV, una vez realizado el proceso de inversión. 15
Figura 10. Localización geológica Línea TER, plancha 209 Zipaquira. 16
Figura 11. Localización general línea de tomografía. 19
Figura 12. Perfil N°1 y 2: Resistividad y litología de los materiales presentes..... 22

INDICE DE TABLAS

Propiedades de los materiales presentes en el área de estudio línea No.1. 21

1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El área objeto de estudio se localiza en jurisdicción del municipio de Tocancipá, departamento de Cundinamarca, en el sector nororiental de la Sabana de Bogotá. Se enmarca dentro de la provincia de Sabana Centro, la cual limita con los municipios de Zipaquirá al occidente, Gachancipá al norte, Guatavita al oriente y Sopó al sur, constituyendo una zona estratégica de transición entre los corredores urbanos-industriales de la sabana y los relieves montañosos de la cordillera Oriental.

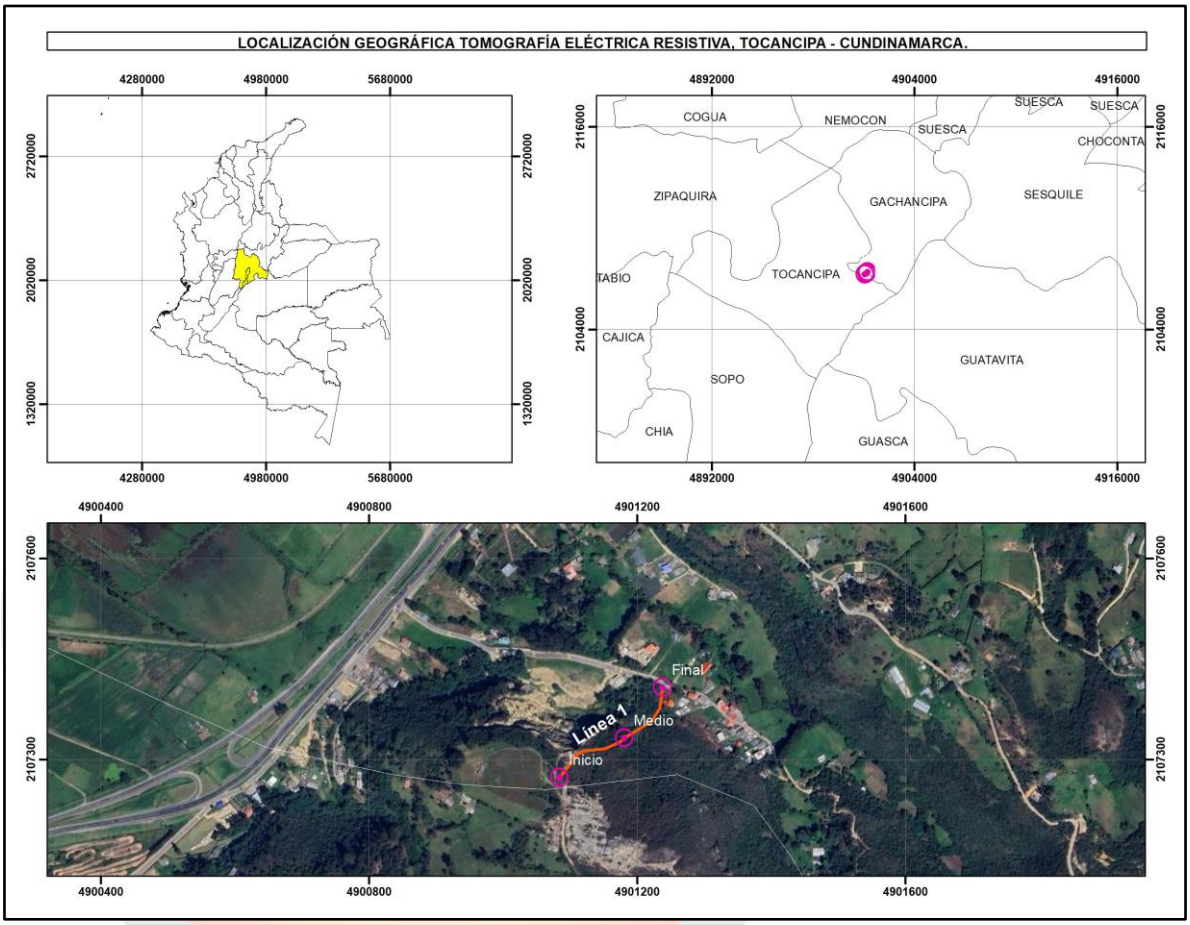
Desde el punto de vista morfológico, el sector de estudio corresponde a una ladera inclinada a escarpada con exposición de afloramientos rocosos y coberturas vegetales secundarias, intercalada con áreas de uso agropecuario y asentamientos rurales. La topografía combina superficies de denudación con taludes cortos y planos coluvio-aluviales, lo cual condiciona la dinámica hídrica superficial mediante escorrentías concentradas hacia quebradas menores que descienden en dirección occidente-oriente. La zona presenta pendientes inclinadas a escarpadas (20–60 %), con interrupciones locales debidas a cortes viales y explanaciones antrópicas.

Geológicamente, el área se encuentra dominada por unidades sedimentarias del Grupo Guadalupe, particularmente las formaciones Labor y Tierna, constituidas por areniscas de grano medio a fino, intercaladas con niveles limosos y arcillosos, que afloran ampliamente en el oriente de la Sabana de Bogotá. Estas litologías muestran procesos de meteorización diferencial que generan la presencia de saprolitos arenosos y suelos residuales de tonalidades amarillentas a rojizas, caracterizados por alta permeabilidad en sectores arenosos y mayor plasticidad en los niveles arcillosos. El contacto de estas formaciones con depósitos cuaternarios coluvio-aluviales en la base de ladera da lugar a un mosaico geotécnico heterogéneo que influye en la estabilidad de taludes y en la infiltración de aguas superficiales.

De manera más detallada, la línea de tomografía eléctrica resistiva (TER) se dispone a lo largo de un corredor que inicia en la parte baja de una ladera rocosa con vegetación arbustiva dispersa, cruza un tramo inclinado con macizo rocoso expuesto y finaliza en las inmediaciones de la vía secundaria que conecta las veredas aledañas con el casco urbano de Tocancipá. Este recorrido permite obtener un perfil representativo de la transición suelo–saprolito–roca, así como de los contrastes eléctricos entre materiales superficiales meteorizados y los estratos arenosos subyacentes.

El acceso al área de estudio se realiza desde el casco urbano de Tocancipá por la vía departamental que comunica con Gachancipá, desviándose posteriormente hacia caminos veredales de tercer orden hasta alcanzar el sitio donde se desplegó la línea de geofísica.

Figura 1. Localización geográfica.



Fuente: *Resultado del estudio.*

2 GEOELÉCTRICA

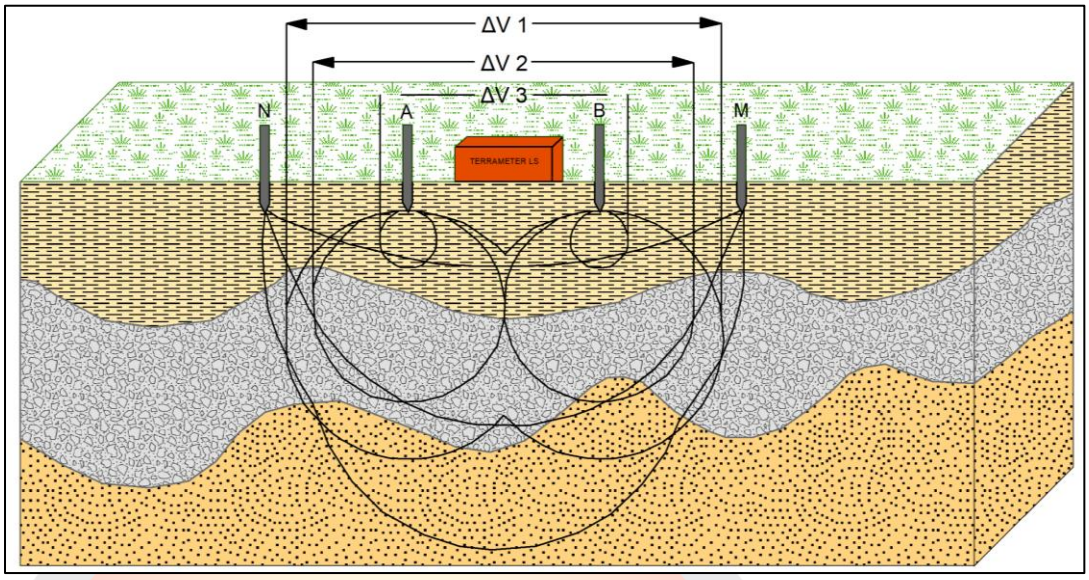
2.1 ESTUDIO GEOELECTRICO (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA)

2.2 INTRODUCCIÓN

Las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER) son métodos geofísicos de exploración o Ingeniería Geofísica, los cuales están constituidos por una serie de técnicas que permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas en los materiales que forman la corteza terrestre tales como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de las ondas elásticas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras. La medición y distribución de estas variaciones, permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los que se conocen las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática.

La Tomografía Eléctrica Resistiva es una técnica geofísica para generar secciones o perfiles del subsuelo en base a mediciones de caída de potencial eléctrico. Éste método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual, regresa al voltímetro en forma de una diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones en resistencia que resultan de cada tipo de material o estrato de suelo (Figura 2); sabiendo de antemano que cada tipo de material tiene diferente manera a “resistir” una corriente eléctrica, los buenos conductores o materiales humedecidos presentan una resistencia baja a la inyección de corriente, mientras que materiales aislantes presentan resistencias eléctricas mayores (Figura 3). Lo anterior, es relativo a diversos parámetros geológicos como el contenido mineralógico y de humedad, así como la porosidad y grado de saturación de agua dentro del material de estudio. Durante décadas, los Estudios de Resistividad Eléctrica han sido utilizados en investigaciones sobre hidrogeología, geotecnia y también actualmente en estudios ambientales (Loke 2004).

Figura 2. Principio teórico de operación de las TER's.



Fuente: *Mejora de técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial.*

Figura 3. Rangos de resistividad para diferentes materiales.

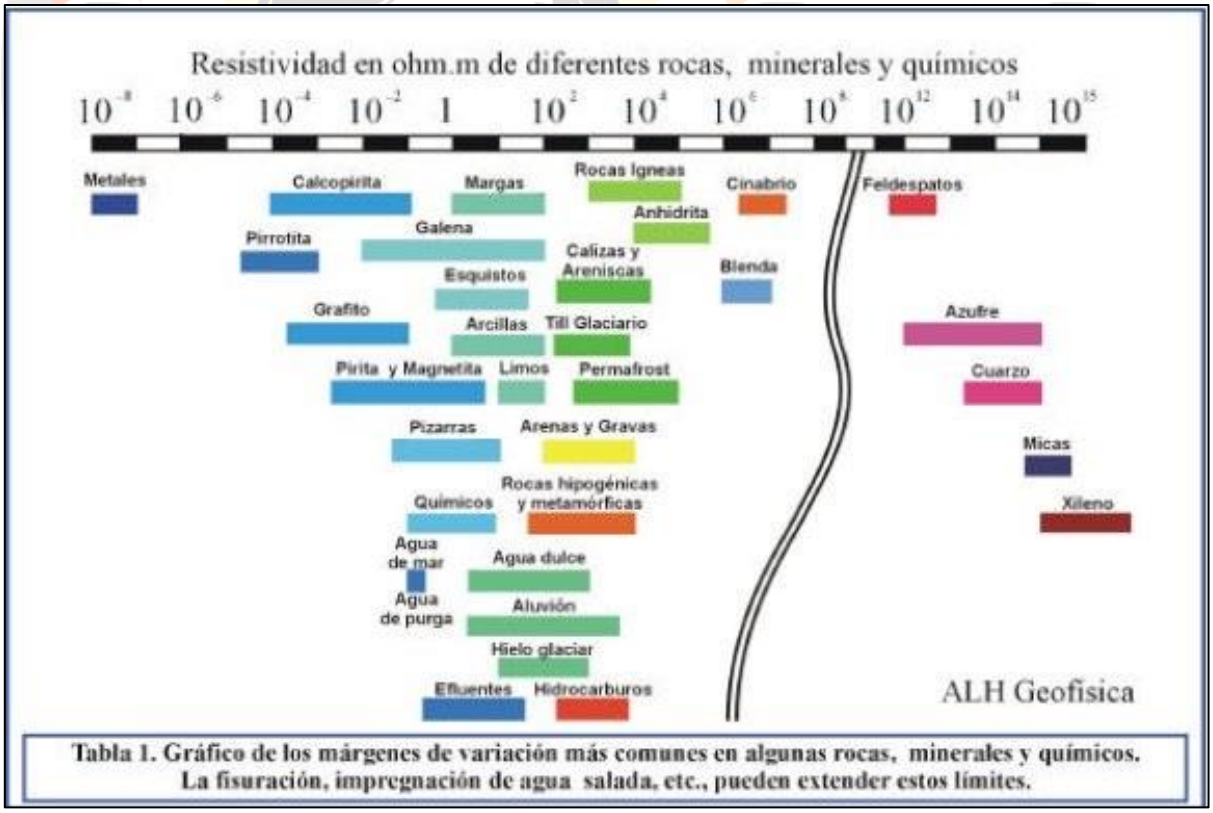


Tabla 1. Gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas, minerales y químicos. La fisuración, impregnación de agua salada, etc., pueden extender estos límites.

Fuente: *Keller y frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966, Orellana 1982.*

Se describe en este trabajo la metodología empleada para realizar levantamientos geofísicos de resistividad, aplicados a estudios del subsuelo enfatizando el hecho de que son métodos totalmente indirectos. El objetivo fundamental de tales estudios es el de medir contrastes de resistividad entre estructuras u objetos de interés con las rocas o suelos circundantes. Se analiza la importancia del estudio de la resistividad eléctrica de los suelos y se enumeran los factores más importantes que determinan sus valores para diversos materiales geológicos. En lo referente al método de resistividad, se describe a detalle el principio fundamental que gobierna su empleo en la práctica para estudios del subsuelo.

La adquisición de datos de campo puede llevarse a cabo con configuraciones de electrodos que pueden variar su arreglo y que dependen estrictamente del objeto para el cual se realiza la exploración. De introducción reciente es la tomografía eléctrica, técnica multielectródica en la que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado. Esto nos permite poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución.

2.3 OBJETIVO

Realizar un estudio geoeléctrico (tomografía eléctrica resistiva), en la parte posterior oriental de una cantera antigua en la vereda Esmeralda, en el municipio de Tocancipá - Cundinamarca, con la finalidad de determinar el comportamiento del material y continuidad del mismo en profundidad. Para ello será preciso el empleo de un programa de inversión, con el que se transformaran las resistividades aparentes obtenidas de la campaña de campo, a valores de resistividad real.

2.4 PRINCIPIO DEL MÉTODO GEOFÍSICO.

2.4.1 Resistividad Aparente:

Está regida por la **ley de Ohm** dice que la intensidad de la corriente que circula entre dos puntos de un circuito eléctrico es proporcional a la tensión eléctrica entre dichos puntos. Esta constante es la conductancia eléctrica, que es la inversa de la resistencia eléctrica.

La intensidad de corriente que circula por un circuito dado es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo.

La ecuación matemática que describe esta relación es:

$$I = GV = \frac{V}{R}$$

Donde, *I* es la corriente que pasa a través del objeto en amperios, *V* es la diferencia de potencial de las terminales del objeto en voltios, *G* es la conductancia en siemens y *R* es la resistencia en ohmios (Ω). Específicamente, la ley de Ohm dice que *R* en esta relación es constante, independientemente de la corriente.

Definición.

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en TGe y la que se toma como base para la inversión y posterior interpretación.
Esta está definida por la ecuación:

$$\rho a = K = \frac{\Delta V}{I}$$

Donde K es la constante de normalización de cada dispositivo o factor geométrico, ΔV es la diferencia de potencial medido sobre el terreno, e I la corriente inyectada.

Su relación con los elementos del Subsuelo.

En la Figura 4, se observan los valores de resistividad de las rocas más comunes, materiales de suelo y algunas sustancias químicas (Keller y Frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966, Orellana 1982).

El suelo es una mezcla de partículas sólidas, 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 contenidos de humedad en un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo. En la Figura 4 se encuentra un conjunto de valores típicos de resistividad de geomateriales.

Figura 4. Resistividades de algunos suelos y rocas.

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

***Fuente**: Exploración Geotécnica-Relaciones Geoeléctricas- DANIEL EDUARDO ARIAS.*

Figura 5. Resistividades de algunos suelos y rocas.

Material	Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot mm^2/m$)
Aluminio	0,03
Carbón	63
Cobre	0,017
Hierro	0,13
Plata	0,16

***Fuente**: Exploración Geotécnica-Relaciones Geoeléctricas- DANIEL EDUARDO ARIAS.*

2.4.2 Dispositivos:

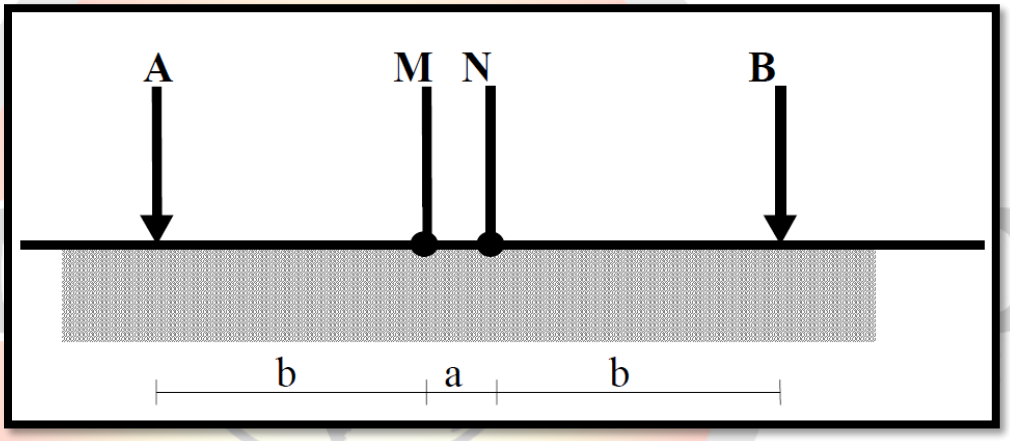
Un dispositivo es un arreglo de electrodos formado con dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1C2 se inyecta la corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie, y a través del segundo par se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1P2 con un Milivoltímetro. Se tienen arreglos donde uno o dos

electrodos se conectan a una distancia lo suficientemente grande, denominados remotos o infinitos, a la cual no producen perturbaciones en la zona de estudio.

En cualquier dispositivo electródico, si conocemos el factor geométrico k, la corriente eléctrica I inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente mediante ρ=k ΔV/I. El dispositivo utilizado en la tomografía realizada fue el siguiente:

Dispositivo Schlumberger: Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB (Ilustración 6). En la práctica, AB > 5MN. (Figura No.5).

Figura 6. Dispositivo Schlumberger.



Fuente: *Aplicaciones de la tomografía eléctrica 2-d al estudio del subsuelo Javier S. Salgado.*

El coeficiente del dispositivo en este caso es

$$K = \pi \frac{b(b+a)}{a}$$

Si definimos L = b + a/2, el factor geométrico se puede expresar como:

$$K = \pi \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4}\right)$$

Si la distancia de separación de los electrodos M y N tiende a cero, el factor geométrico Queda

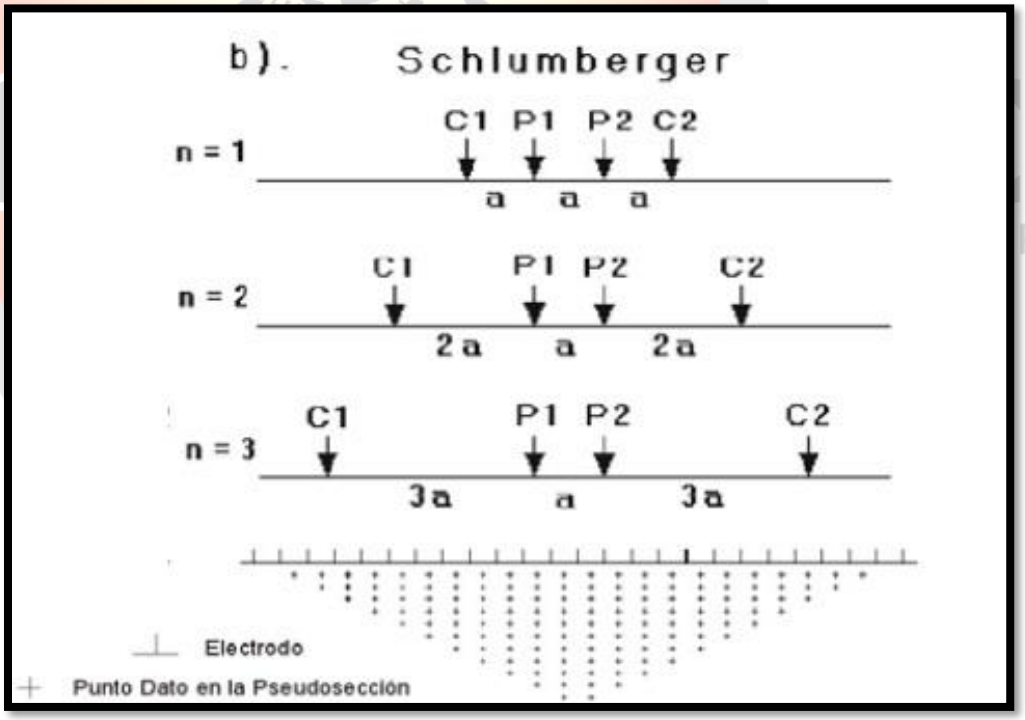
$$K = \pi \left(\frac{L^2}{a}\right)$$

que tiende a infinito. Sin embargo, la resistividad aparente es finita ya que ΔV en ρ = k $\frac{\Delta V}{I}$ decrece al mismo tiempo que a. Tendremos, pues,

$$\rho_a = \lim_{a \to 0} \pi \frac{L^2}{a} \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{L^2}{a} E$$

donde E es el campo eléctrico. La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia MN muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que medimos realmente es el campo E, el cual en la práctica se toma igual a ΔV/a. Trabajar con el campo eléctrico conlleva ventajas teóricas a la hora de trabajar con expresiones analíticas, el inconveniente es que la tensión diferencial medida disminuye linealmente con la separación a, y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia L. Además, la precisión de las mediciones geoeléctricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico). En ciertos casos, el electrodo B se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de ΔV observado. Se tiene entonces el dispositivo denominado Schlumberger asimétrico, o semi-Schlumberger.

Figura 7. Arreglo Schlumberger.



Fuente: *Aplicaciones de la tomografía eléctrica 2-d al estudio del subsuelo Javier S. Salgado.*

2.5 METODOLOGÍA

En su sentido más amplio la Tomografía es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico

característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde sondeos.

La Tomografía eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos sondeos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. Un factor clave de esta técnica es el número y distribución de las medidas de campo ya que de él depende tanto su resolución como la profundidad de investigación (mayor espaciamiento, mayor profundidad). Como regla general, un estudio mediante Tomografía eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un pequeño espaciado entre medidas para conseguir la necesaria resolución lateral que viene dada por la siguiente formula:

$$d = Xtotal\ /N°electrodos$$

Donde:
d= Distancia entre electrodos
X total= Distancia de la línea extendida
No. electrodos= Electrodos a utilizar

También que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad.

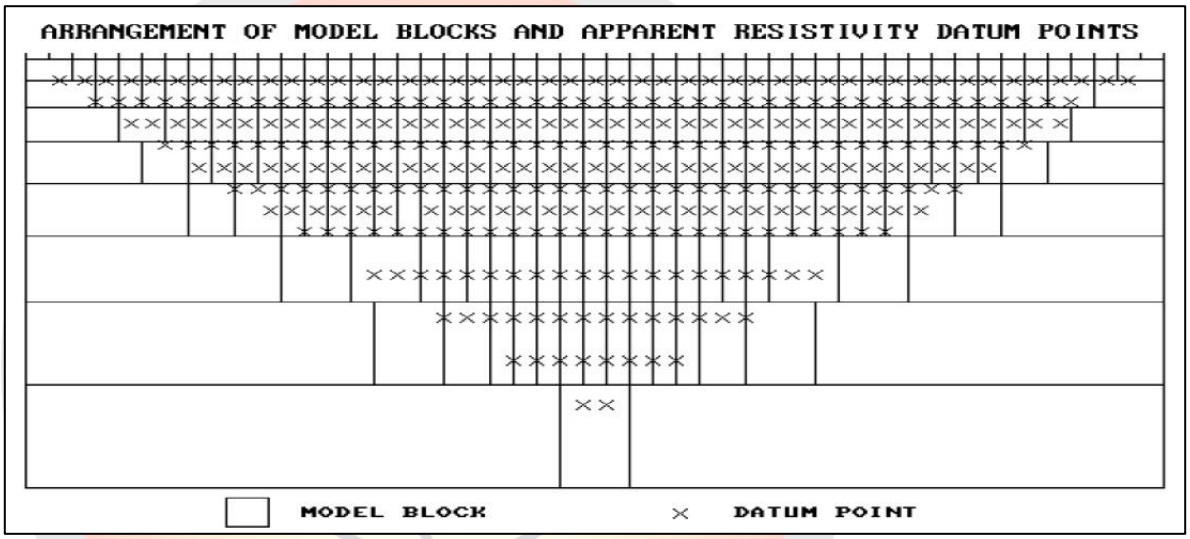
El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos. Para obtener estos resultados se procede a insertar los parámetros para el cálculo y la medición de las resistividades en campo, utilizando el método o dispositivo que en este caso se utilizó el de Schlumberger, en el software RES2DINV.

RES2DINV

El RES2DINV, versión 3.59.115, es un programa creado por Geotomo Software, que utiliza la técnica de inversión de mínimos cuadrados para producir un modelo 2D del subsuelo a partir de la pseudosección de resistividades aparentes. Este programa tiene un conjunto de parámetros automáticos que guían el proceso de inversión dando, en la mayoría de los casos, resultados razonables.

El programa divide la sección de subsuelo en un número de bloques rectangulares, asignando un valor de resistividad a cada bloque, obteniendo así un modelo con resistividades aparentes medidas (Espinosa, A.B. 2006). Partiendo de este modelo, el programa realiza una nueva inversión, obteniendo un perfil 2D de resistividades aparentes calculadas. El método iterativo de optimización ajusta el modelo resistivo en 2D hasta que la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos sea mínima. El error medio cuadrático, RMS (root-mean-square), da una medida de esta diferencia; el RMS es el parámetro que estima el error de ajuste del modelo, dando un porcentaje de error del modelo teórico propuesto (Espinosa, A.B. 2006).

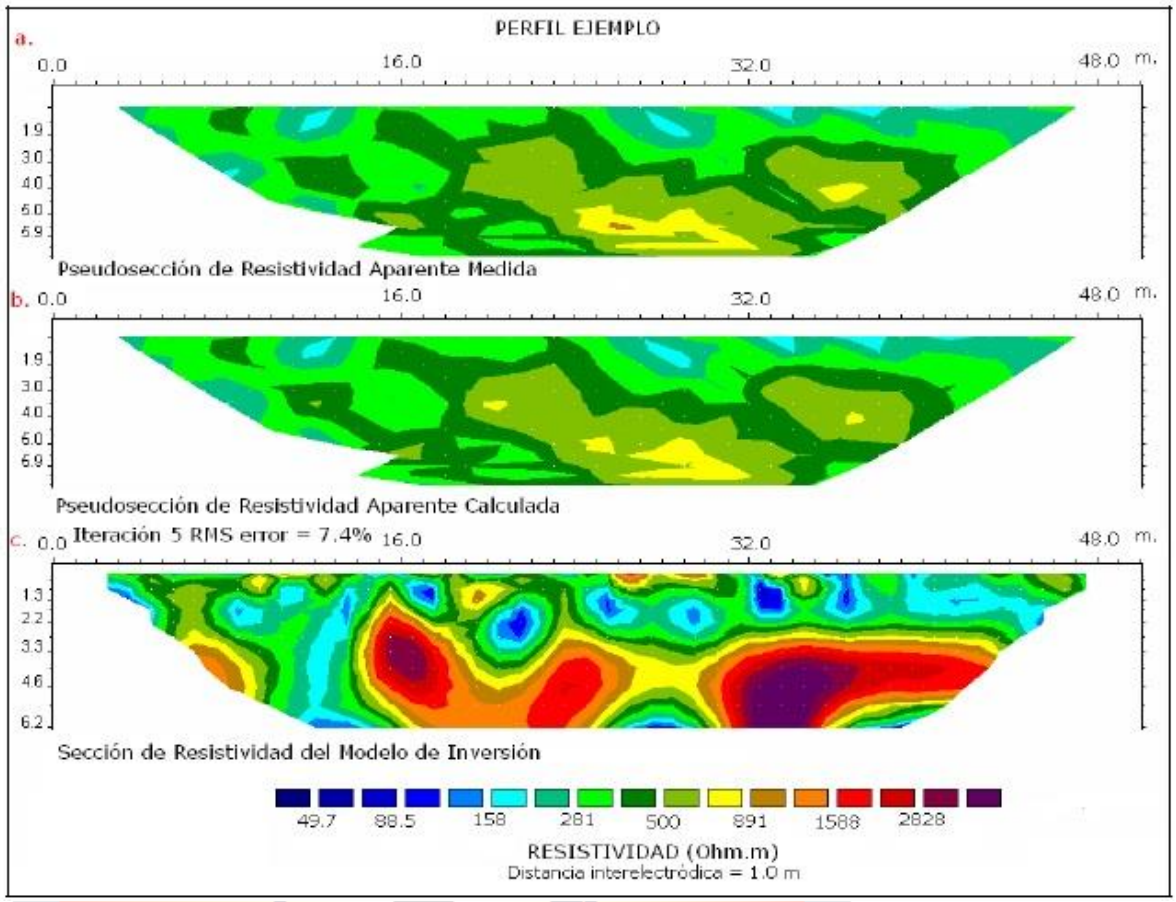
Figura 8. Modelo de la toma de resistividades para cada medición.



Fuente: Los autores.

Una vez finalizado este proceso, el programa proporciona como resultado tres Imágenes (Figura 9). La primera (Figura 9a) es la pseudosección de resistividades aparentes medidas, la segunda (Figura 9b) es la pseudosección de resistividades aparentes calculadas por el programa y la tercera (Figura 9c) es la sección final del modelo de inversión donde se observan las resistividades reales. Mientras más similares sean las pseudosecciones de resistividades aparentes medidas y calculadas, más exacto será el resultado final. Dicha similitud se ve reflejada en el valor del error RMS; cuando el mismo se encuentra entre 0 y 10 %, el resultado final se considera “bueno”.

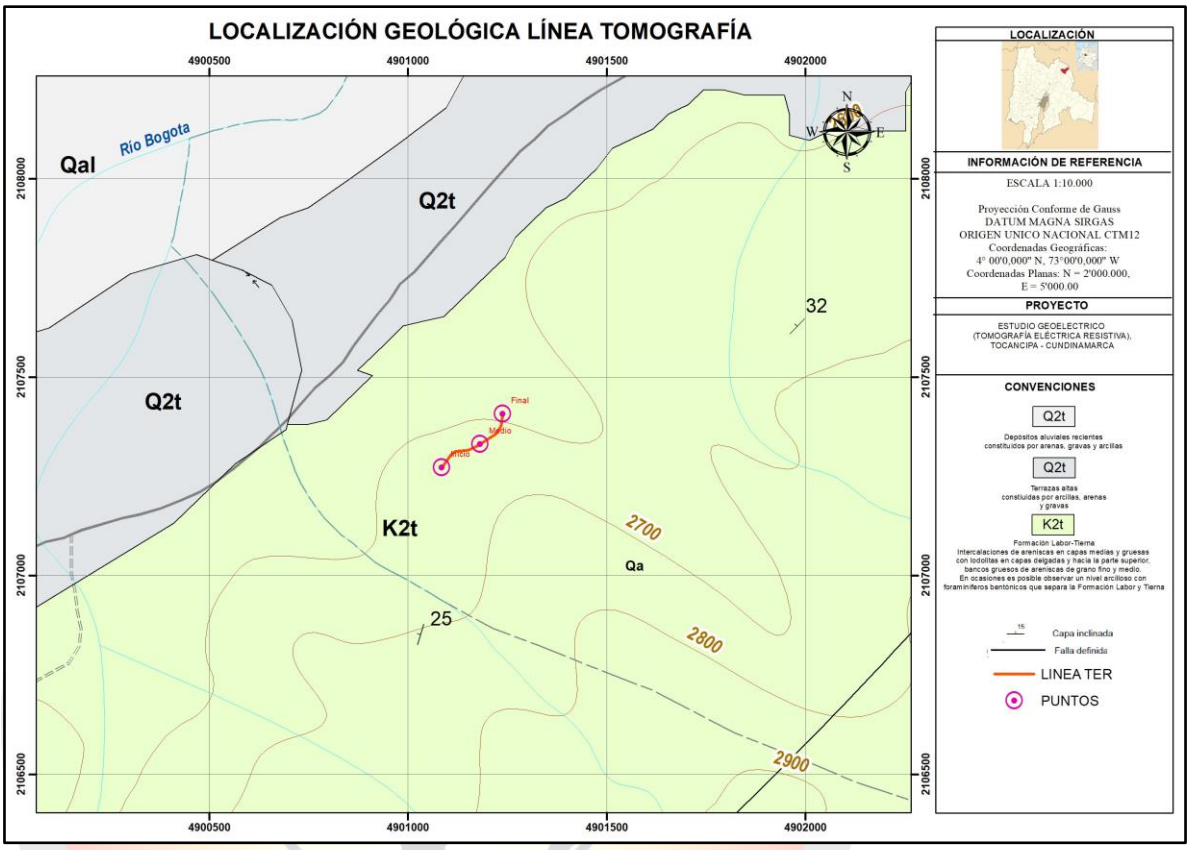
Figura 9. Imágenes proporcionadas por el programa RES2DINV, una vez realizado el proceso de inversión.



Fuente: *Prospección geofísica con tomografía eléctrica 2D y 3D para la caracterización del subsuelo en zonas kársticas de yesos. Verónica Adriana Bello Biava.*

2.6 GEOLOGÍA

Figura 10. Localización geológica Línea TER, plancha 209 Zipaquira.



***Fuente**: Resultado del estudio.*

- **Formación Labor y Tierna (K2t)**

Esta unidad corresponde a la secuencia sedimentaria del Grupo Guadalupe, donde se intercalan areniscas de grano medio a fino, de color amarillo claro a pardo, con niveles de arcillolitas y limolitas. Localmente se presentan niveles de areniscas gruesas con estratificación cruzada y laminación paralela. En afloramientos de ladera es frecuente observar procesos de meteorización diferencial, que generan saprolitos arenosos de tonalidad amarillenta y arcillas residuales de color rojizo.

La Formación Labor (parte superior) se caracteriza por areniscas medianas a gruesas, bien estratificadas, que generan relieves estructurales más competentes; mientras que la Formación Tierna (base) presenta mayor proporción de lutitas y arcillolitas, favoreciendo la formación de laderas suaves y suelos residuales más plásticos.

El ambiente de depósito corresponde a sistemas fluviales y deltaicos del Cretácico Superior (Campaniano–Maastrichtiano), con alternancia de canales de alta energía y planicies de inundación. Geotécnicamente, esta unidad constituye el basamento de los depósitos cuaternarios y presenta un comportamiento heterogéneo: alta resistencia en las areniscas poco meteorizadas y baja cohesión en los niveles arcillosos alterados.

- **Terrazas altas (Q2t)**

Constituyen acumulaciones cuaternarias más antiguas que los depósitos aluviales recientes, dispuestas en superficies elevadas respecto al cauce actual del río Bogotá. Están compuestas por arenas, gravas y limos estratificados, con clastos subredondeados a redondeados, producto de la acción fluvial en condiciones de mayor energía durante fases anteriores del sistema aluvial.

Estas terrazas forman niveles escalonados sobre el valle, con pendientes suaves a moderadas (5–15 %), generando superficies aptas para actividades agropecuarias y asentamientos. Los depósitos presentan espesores de 2 a 8 m y suelen encontrarse parcialmente cubiertos por suelos residuales. Geotécnicamente, muestran moderada competencia, aunque con heterogeneidad lateral que condiciona su capacidad portante.

- **Depósitos aluviales recientes (Qal)**

Corresponden a acumulaciones cuaternarias recientes asociadas a la dinámica del río Bogotá y drenajes locales. Están conformados por arenas, gravas y limos de granulometría heterogénea, con clastos subredondeados a subangulares de composición cuarzosa, embebidos en matriz arcillosa. Estos depósitos se disponen en superficies planas y de baja pendiente, constituyendo valles de inundación y canales activos.

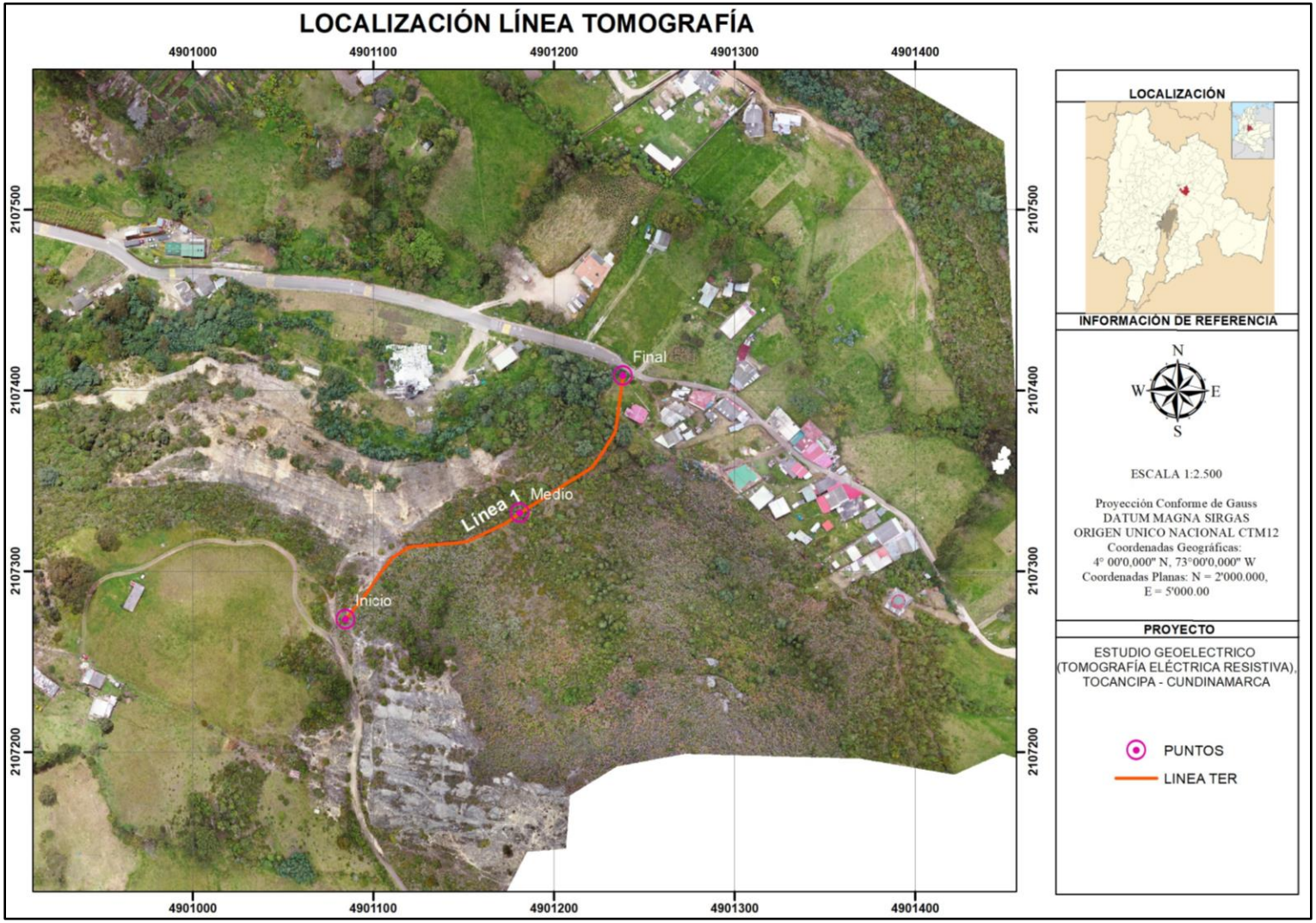
Geomorfológicamente se asocian a planicies aluviales actuales, con evidencias de sedimentación reciente, alta permeabilidad en sectores arenosos y susceptibilidad a inundación estacional. Su espesor es variable (1–5 m) y depende de la energía de los flujos que los originaron.

2.7 PROCESAMIENTO

Para la realización de la tomografía, en la parte posterior oriental de una cantera antigua en la vereda Esmeralda, en el municipio de Tocancipá - Cundinamarca, se utilizó el equipo Terrameter, con 2 secciones de cable, 41 electrodos conectados cada uno respectivamente al equipo, para su interpretación se han asociado sus rangos resistivos a litologías probables en base a valores y tabulaciones publicadas

(Keller y frischknecht 1966, Daniels y Alberty 1966, Orellana 1982), con ayuda de la geología presente (plancha 209 Zipaquirá), para obtener así la siguiente línea con su respectiva interpretación:

Figura 11. Localización general línea de tomografía.



***Fuente**: Resultado del estudio.*

2.7.1 TOMOGRAFÍA N°1

Dirección 239°, coordenadas parte inicial X: 4901085, Y: 2107273, parte final X: 4901238, Y: 2107408, longitud de 320 m, profundidad obtenida de 70 m, electrodos conectados a una distancia de 8 m cada uno, medidas de resistividad tomadas 524, se ubica sobre la Formación Labor y Tierna (K2t).

Fotografía 1. Línea tomografía, medio TER, X: 4901181, Y: 2107332.





Fuente: *Los autores.*

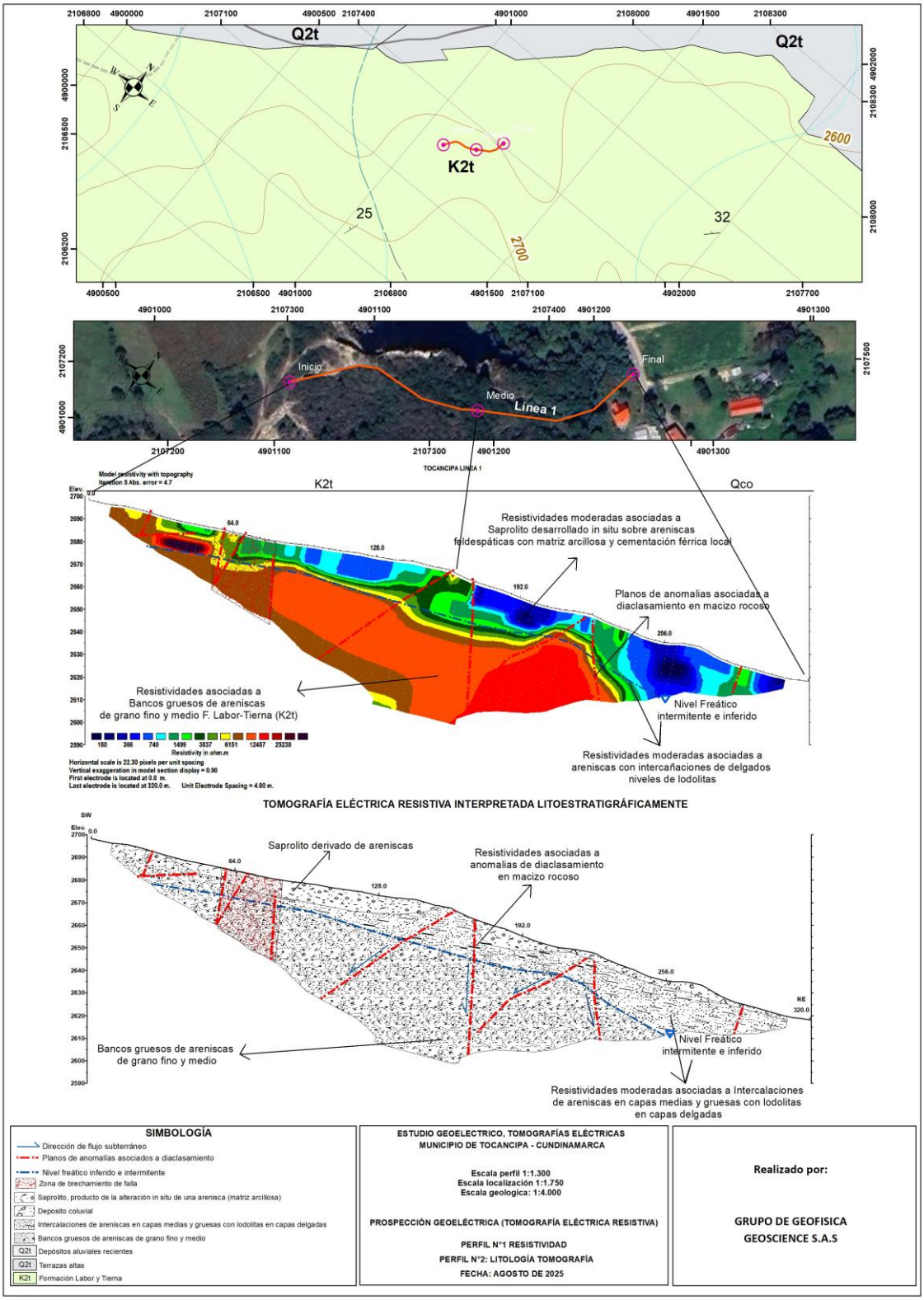
Como resultado de la línea realizada en esta parte de la zona de estudio se encontraron los siguientes materiales:

Propiedades de los materiales presentes en el área de estudio línea No.1.

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ω*m)	**INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA**	**FORMACIÓN GEOLOGICA**
1	180 – 1499	Saprolito, producto de la alteración in situ de una arenisca (matriz arcillosa)	Saprolito
2	366 – 3037	Mezcla de bloques y clastos subangulares de areniscas derivadas de la meteorización de la Formación Labor–Tierna, inmersos en una matriz de arcillas y limos arenosos	Deposito coluvial (Qco)
3	740 – 3037	Intercalaciones de areniscas en capas medias y gruesas con lodolitas en capas delgadas	Formación Labor y Tierna (K2t)
4	3037 - 25230	Bancos gruesos de areniscas de grano fino y medio	Formación Labor y Tierna (K2t)

***Fuente**: Resultado del estudio.*

Figura 12. Perfil N°1 y 2: Resistividad y litología de los materiales presentes.



Fuente: *Resultado del estudio.*

La tomografía eléctrica realizada en el sector de Esmeralda, municipio de Tocancipá (Cundinamarca), permitió caracterizar el subsuelo a partir de los contrastes de resistividad y su correlación con los afloramientos observados en campo y con la cartografía geológica regional. La línea, orientada en dirección suroeste–noreste, atraviesa afloramientos de la Formación Labor–Tierna del Grupo Guadalupe y cubrimientos residuales y coluviales asociados a la meteorización de las areniscas feldespáticas. El perfil evidencia una marcada heterogeneidad litológica y estructural, producto de la acción combinada de procesos de alteración, diaclasamiento y acumulación de materiales de vertiente.

El modelo resistivo invertido, con un error de ajuste cercano al 5 %, permite distinguir cuatro horizontes principales. El primero corresponde al saprolito (180–1499 Ω·m), producto de la alteración in situ de areniscas feldespáticas, que se presenta con colores amarillentos a rojizos, textura friable y matriz arcillosa enriquecida en óxidos de hierro, con espesores entre 2 y 6 m.

Fotografía 2. Saprolito alteración in situ de areniscas feldespáticas de la Formación Labor–Tierna. Se presenta con coloraciones amarillentas y rojizas, textura friable y matriz arcillosa enriquecida en óxidos de hierro. Su espesor varía entre 2 y 6 m, preservando estructuras heredadas de la roca madre



Fuente: *Los autores.*

El segundo horizonte está representado por depósitos coluviales (386–3037 Ω·m), conformados por mezclas heterométricas de bloques y clastos subangulares derivados de la meteorización de la Formación Labor–Tierna, embebidos en matriz

limo-arcillosa; se concentran en pie de ladera y depresiones y carecen de estratificación definida.

Fotografía 3. Mezcla heterogénea de bloques y clastos subangulares inmersos en una matriz limo-arcillosa, proveniente de la desagregación de las areniscas. Estos depósitos ocupan depresiones y pie de ladera, carecen de estratificación definida y presentan variabilidad en el contenido de humedad y grado de compactación.

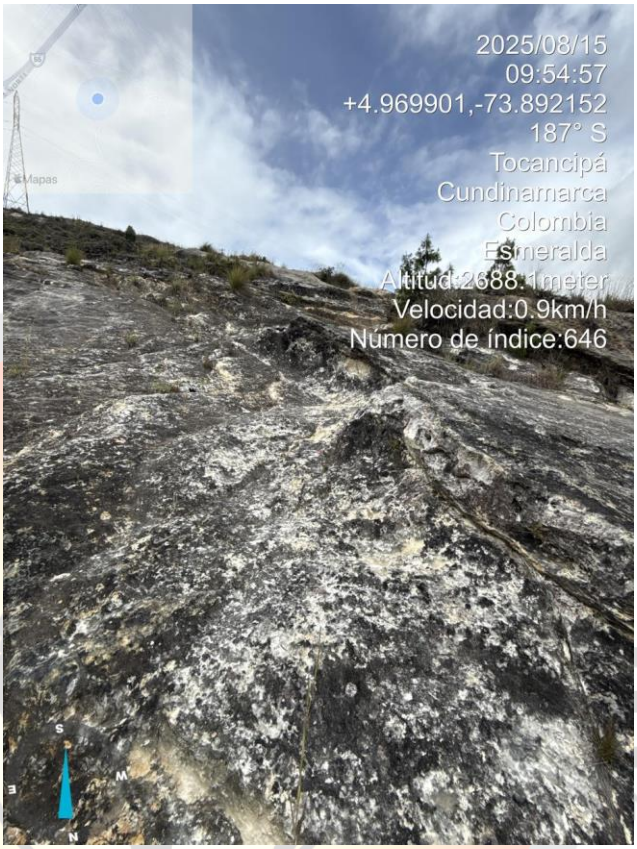


Fuente: *Los autores.*

El tercer horizonte corresponde a areniscas con intercalaciones de lodolitas (740–3037 Ω·m), donde se observan bancos de arenisca fina a media alternados con capas delgadas de limolitas y arcillolitas que introducen discontinuidades mecánicas y generan variaciones en el grado de humedad, reflejadas en resistividades moderadas.

Fotografía 4. Bancos de areniscas finas a medianas con delgadas capas de limolitas y arcillolitas. Se reconocen resistividades moderadas que denotan un grado de humedad intermedia y la influencia de fracturas y planos de discontinuidad.

Fotografía 5.



Fuente: *Los autores.*

Finalmente, se identifican areniscas masivas (3037–252530 Ω·m), integradas por bancos competentes de areniscas de grano medio a grueso, de alta resistencia, que aparecen como zonas de muy alta resistividad, aunque localmente presentan fracturamiento y variaciones ligadas a la infiltración.

Fotografía 6. Niveles de mayor competencia mecánica dentro de la Formación Labor–Tierna, integrados por bancos de areniscas de grano medio a grueso. Sus resistividades elevadas reflejan baja humedad y continuidad litológica, aunque localmente aparecen afectadas por fracturamiento.



Fuente: *Los autores.*

En campo se registraron familias de diaclasas con rumbos predominantes N62°E/39°NW, N35°E/32°NW y N60°E/30°NW, lo que confirma un sistema estructural orientado NE–SW con buzamientos moderados al noroeste. Estas discontinuidades afectan de manera directa la estabilidad del macizo, pues actúan como planos de debilidad y vías preferenciales para la infiltración de agua. El diaclasamiento, sumado a la meteorización superficial, condiciona la formación de saprolito y la aparición de niveles de saturación intermitentes, generando contrastes geoeléctricos y geomecánicos en el subsuelo.

En el perfil de resistividades se reconoce un sector caracterizado por resistividades heterogéneas y anomalías lineales que corresponden a una **zona de brechamiento de falla** dentro de la Formación Labor–Tierna. Este tramo se manifiesta con valores de resistividad moderados a bajos, dispuestos en geometrías irregulares y discontinuidas, lo que indica la presencia de un macizo rocoso intensamente fracturado y alterado. El brechamiento está compuesto por fragmentos angulosos de areniscas de grano fino a medio, embebidos en una matriz arcillo–limosa producto de la descomposición mecánica y química asociada a la deformación tectónica.

Desde el punto de vista estructural, esta zona se asocia a las diaclasas y planos de falla con rumbo NE–SW y buzamientos al noroeste, que generan discontinuidades abiertas y permeables. La fracturación y trituración del material reducen de manera significativa la competencia del macizo, convirtiéndolo en un horizonte de baja resistencia y alta anisotropía mecánica.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el perfil sugiere la presencia de un nivel freático discontinuo, asociado a contactos arenisca–lodolita y a sectores con depósitos coluviales de matriz arcillosa. Se trata de un acuífero libre colgado de escaso espesor, con permeabilidad variable: media a alta en las facies arenosas y muy baja en los niveles arcillosos intercalados. Este contraste favorece la formación de perchas de agua y la acumulación de humedad en zonas controladas por la estructura, lo que incrementa la vulnerabilidad del terreno a la saturación y a la pérdida de resistencia.

El análisis geotécnico señala que los materiales presentes presentan comportamientos diferenciados. El saprolito y el coluvial, de baja cohesión y alta variabilidad lateral, pierden resistencia al saturarse, siendo propensos a erosión, y deslizamientos superficiales. Las areniscas intercaladas con lodolitas representan planos de despegue con baja fricción, que bajo condiciones de saturación se convierten en superficies críticas de deslizamiento. Las areniscas masivas, pese a su buena competencia, muestran bloques diaclasados susceptibles de desprendimientos locales, favorecidos por el intemperismo, la infiltración y los ciclos de humedecimiento–secado. La orientación de las diaclasas NE–SW, con buzamiento al NW, genera condiciones geométricas que pueden activar deslizamientos planares o en cuña, especialmente donde los planos intersectan la superficie de la ladera.

La infiltración de aguas de escorrentía constituye el factor más crítico en la estabilidad de este sector. La reducción de succión en el saprolito durante eventos de lluvia, la acumulación de agua en intercalaciones arcillosas y el aumento de presiones intersticiales reducen significativamente el factor de seguridad de los taludes. El diaclasamiento abierto, al servir de vía rápida para la infiltración, acelera la degradación del macizo y favorece la conexión entre las perchas superficiales y los niveles más profundos.

En términos de manejo, se recomienda implementar drenajes superficiales bien diseñados, con cunetas revestidas y disipadores que eviten la concentración de escorrentía sobre el talud, así como la instalación de drenes subhorizontales en zonas donde se identifiquen perchas persistentes. En áreas de saprolito y coluvial se sugiere mantener pendientes suaves (≤30–35°), incorporar bermas de descanso

y reforzar con cobertura vegetal de raíces fibrosas para mejorar la estabilidad superficial. Donde se identifique riesgo de desprendimiento de bloques en afloramientos de arenisca masiva, es aconsejable la aplicación de mallas ancladas y pernos localizados. Adicionalmente, se debe evitar la generación de sobrecargas en la corona del talud y controlar descargas pluviales y domésticas sobre la ladera.

3 CONCLUSIONES

- ✓ El saprolito desarrollado a partir de areniscas feldespáticas presenta baja cohesión y pérdida de resistencia al saturarse. Este comportamiento lo convierte en un material crítico frente a la infiltración, pues la reducción de la succión matricial disminuye drásticamente el factor de seguridad en laderas con pendientes moderadas a fuertes.

- ✓ Los depósitos coluviales de bloques y matriz areno-arcillosa generan un medio altamente heterogéneo, con zonas de alta y baja permeabilidad. La infiltración diferencial puede concentrarse en sectores arenosos, mientras que los niveles arcillosos retienen humedad, lo que promueve deslizamientos superficiales y erosión interna.

- ✓ Las capas finas de lodolitas dentro de la Formación Labor–Tierna actúan como planos de despegue en condiciones de saturación, generando superficies críticas para deslizamientos planares. Su baja fricción natural se ve aún más reducida por la infiltración de agua.

- ✓ Areniscas masivas y desprendimiento de bloques: Aunque las areniscas de grano medio a grueso presentan buena competencia, el diaclasamiento abierto y los procesos de meteorización facilitan el desprendimiento de bloques. Estos desprendimientos pueden ser activados por ciclos de humedecimiento–secado, raíces vegetales y sobre todo por la infiltración de agua en juntas y planos estructurales.

- ✓ Diaclasamiento NE–SW como factor crítico: El sistema de fracturas NE–SW con buzamientos al NW constituye el principal condicionante estructural de la estabilidad. Estas discontinuidades no solo debilitan el macizo, sino que funcionan como colectores de agua durante la recarga, favoreciendo la formación de perchas y la transmisión de presiones intersticiales hacia profundidad.

- ✓ La presencia de un nivel freático colgado y discontinuo sobre intercalaciones arcillosas indica que el flujo subterráneo es controlado estructuralmente. En épocas de lluvia, el aumento rápido de la saturación en estos horizontes incrementa la probabilidad de inestabilidad local.

- ✓ Procesos de inestabilidad dominantes: El conjunto de condiciones litológicas y estructurales indica que los procesos más probables en el área son: deslizamientos superficiales en saprolito y en el depósito coluvial, deslizamientos planares sobre lodolitas, desprendimiento de bloques en areniscas masivas y erosión en surcos por infiltración concentrada.

- ✓ El estado de estabilidad del terreno depende en gran medida del régimen de infiltración. En periodos secos, los materiales mantienen cierta resistencia, pero en temporadas de lluvia intensa o prolongada, la infiltración reduce la resistencia y genera presiones que pueden activar movimientos en masa.

- ✓ Los valores pueden variar de acuerdo a la época invernal en que se tomen, esto resultado de zonas con menor saturación, temperaturas, y sales disueltas en el subsuelo.

- ✓ La tomografía eléctrica resistiva resulta ser una técnica geofísica satisfactoria para la caracterización de yacimientos minerales a escala muy detallada (50 a 70 m) y evidencia las anomalías asociadas mediante zonas conductivas y disposiciones geométricas de los niveles geoelectricos. En general ayuda a reducir el grado de incertidumbre de la exposición de las estructuras geológicas en el subsuelo, y combinada con otros métodos geofísicos dan excelentes resultados para la definición del comportamiento del subsuelo.