

**CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE SECTORES ALEDAÑOS A LA MINA  
LA EMILIA EN EL MUNICIPIO DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL.**

**ANA MARÍA PINILLA MENDOZA  
OMAR ANDRÉS SERRANO PAREDES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE SECTORES ALEDAÑOS A LA MINA  
LA EMILIA EN EL MUNICIPIO DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL.**

**ANA MARÍA PINILLA MENDOZA  
OMAR ANDRÉS SERRANO PAREDES**

**Trabajo de grado para optar el título de geólogo**

**Directora  
MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO  
Geóloga**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2014**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. METODOLOGÍA	21
4. MARCO CONCEPTUAL	22
4.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS ROCAS	22
4.2 MÉTODO GEOELÉCTRICO	27
4.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	28
4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)	31
4.5 CALICATA ELÉCTRICA (CE)	33
4.6 RESISTIVIDAD APARENTE	33
4.7 CURVAS DE RESISTIVIDAD	37
4.8 AMBIGÜEDADES EN LA INTERPRETACIÓN	38
4.9 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA Y DE SUPRESIÓN DE CAPAS	38
4.9.1 Principio de Equivalencia	38
4.9.2 Principio de Superposición.	39
5. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO	41
5.1 LOCALIZACIÓN	41

5.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO	44
5.2.1 Descripción de las Unidades aflorantes en el área de estudio.	45
5.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	50
5.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA	52
5.5 GEOMORFOLOGÍA	55
5.6 MINA LA EMILIA	60
6. EQUIPO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	63
6.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	65
7. METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN	67
7.1 CONSIDERACIONES DE ADQUISICIÓN	71
8. SOFTWARE DE PROCESAMIENTO (IPI2WIN)	73
9. RESULTADOS	74
10. CONCLUSIONES	105
11. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	111

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Variación de la resistividad con la salinidad.....	23
Figura 2 Variación de la resistencia en un perfil estratigráfico.....	24
Figura 3 Variación de la resistividad en función del contenido de agua en arcillas.....	25
Figura 4 Variación de la resistividad con la temperatura. ....	25
Figura 5 Variación resistividad - compactación.....	26
Figura 6. Esquema generalizado de resistividad y conductividad de materiales geológicos comunes en el subsuelo .....	27
Figura 7 Esquema de un equipo de medición geoelectrica dispuesto en la configuración Schlumberger para un SEV. ....	32
Figura 8 Dependencia de $\rho_a$ del carácter del corte geoelectrico. a) Medio Homogéneo; b) incluye una roca buen conductor; c) incluye un cuerpo mal conductor (Calizas). ....	34
Figura 9 Esquema configuración de campo SEV variación del campo eléctrico producido por los electrodos AB. ....	35
Figura 10. Curvas de resistividad para diferentes estructuras resistivas. ....	37
Figura 11 A. Cuatro casos de resistencia transversal. B . Cuatro casos de conductancia longitudinal semejante. ....	39
Figura 12 Principio de Supresión.....	40
Figura 13. Ubicación geográfica del área de estudio .....	42
Figura 14. Ubicación sectores y SEVs realizados.....	43
Figura 15 Columna generalizada formación Picacho.....	47
Figura 16 Geoformas identificadas en el área de estudio.....	58
Figura 17. Geoformas identificadas en el área de estudio .....	59
Figura 18. Panorámica Mina la Emilia. ....	61

Figura 19 A .Panorámica Mina la Emilia., B y C: paquete con arena impregnada de la mina. ....	62
Figura 20 Panel Frontal de la unidad central GeoAmp 202. ....	64
Figura 21 Equipo utilizado en campo.....	65
Figura 22 Montaje inicial del equipo, con la correcta disposición de los carretes. .	68
Figura 23. Montaje inicial del equipo, ubicación de los electrodos.....	68
Figura 24 Conexión panel frontal-carretes-electrodos. ....	69
Figura 25. Conexión y configuración de los medidores en el panel frontal. ....	70
Figura 26 Inyección de corriente al subsuelo.....	70
Figura 27 Captura de datos en los medidores. ....	71
Figura 28 Ventana de procesamiento IPI2WIN. Tomada de IPI2WIN. ....	73
Figura 29 Curva generada por el software IPI2WIN .....	74
Figura 30 Panorámica mina La Emilia y calicata (ME).....	76
Figura 31 . a) .Panorámica Mina la Emilia., b) y c) paquete con arena impregnada de la mina. ....	77
Figura 32 Curva y modelo geoelectrico SEV ME1 .....	79
Figura 33 Curva y modelo geoelectrico SEV ME2 .....	80
Figura 34 Curva y modelo geoelectrico SEV ME3 .....	81
Figura 35 Curva y modelo geoelectrico SEV ME4 .....	82
Figura 36 Curva y modelo geoelectrico SEV ME5 .....	83
Figura 37 Pseudosección y corte geoelectrico - Calicata Mina La Emilia .....	86
Figura 38 Modelo geológico de la calicata realizada en la mina La Emilia. ....	88
Figura 39 Paisaje época de sequía Pesca – Boyacá.....	89
Figura 40 Perfil SEV Aa .....	90
Figura 41 Interpretación SEV Aa. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2 .....	91
Figura 42 Perfil SEV Ab. ....	93

Figura 43 Interpretación SEV Ab. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	94
Figura 44 Perfil SEV Ac .....	95
Figura 45 Interpretación SEV Ac. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	96
Figura 46 Perfil SEV Ad .....	97
Figura 47 Interpretación SEV Ad. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	98
Figura 48 Perfil SEV Gc.....	99
Figura 49 Interpretación SEV Gc. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	100
Figura 50 Perfil SEV Ha.....	101
Figura 51 Interpretación SEV Ha. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	102
Figura 52 Perfil SEV Hb.....	103
Figura 53. Interpretación SEV Hb. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2. ....	104

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Factores geométricos de los tipos de dispositivos electrónicos .....	30
Tabla 2 Ventajas y desventajas en diferentes dispositivos electrónicos. ....	36
Tabla 3. Coordenadas de los SEVs realizados.....	42
Tabla 4 Tabla de correlación de resistividades y composición litológica de las unidades geotectónicas .....	75

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A Corte geológico A-A´	111
Anexo B. Columna Especifica Formación Concentración	112
Anexo C. Columna Específica de la Mina la Emilia	113
Anexo D. Datos tomados en campo	114

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DE SECTORES ALEDAÑOS A LA MINA LA EMILIA) EN EL MUNICIPIO DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL\*

**AUTORES:** Ana María Pinilla Mendoza  
Omar Andrés Serrano Paredes\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), Calicata Eléctrica, Geomorfología, Resistividad Eléctrica, Formación Picacho,

### DESCRIPCIÓN

La caracterización geoelectrica empleada al Noreste del municipio de Pesca-Boyacá, en la vereda Mochaga, en sectores aledaños de la mina La Emilia, consta de un desarrollo gradual de las etapas de adquisición, procesamiento e interpretación de siete sondeos eléctricos verticales y una calicata eléctrica que permitieron definir once unidades geoelectricas usando el arreglo tetraelectrónico simétrico tipo Schlumberger. Los SEVs estuvieron separados cada 700 metros aproximadamente y tuvieron una apertura de 500 a 600 metros. Por otro lado, la calicata eléctrica constó de cinco sondeos espaciados entre ellos cada 5m y con apertura de 60m en total.

El procesamiento de los datos se ejecutó usando el software IPI2WIN, calculando las resistividades reales a partir de las resistividades aparentes adquiridas en campo. Estos resultados, una vez recopilados permitieron determinar la profundidad, espesor y composición de las unidades presentes. Esto con el fin de proporcionar información adicional a futuros estudios que se puedan desarrollar en la zona determinada por las coordenadas: Norte= 1°110.000, Este= 1°119.000, Oeste= 1°115.000, Sur= 1°107.750 que abarca sectores de la formación Picacho y Concentración de la cuenca cordillera oriental.

En la interpretación de los resultados se evidenció que la resistividad del terreno varia ampliamente a lo largo y ancho del subsuelo según las condiciones de composición, estratigrafía, granulometría, humedad, temperatura y compactación del suelo sondeado. Por otro lado, la correlación de la continuidad lateral tiene un alto grado de incertidumbre debido a las condiciones anteriormente mencionadas además de la variación de la profundidad alcanzada por cada sondeo.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Geología. Directora Martha Liliana Sarmiento Moreno

## ABSTRACT

**TITLE:** GEOELECTRIC EXPLORATION OF NEARBY AREAS TO MINE THE EMILIA IN PESCA MUNICIPALITY, EASTERN CORDILLERA BASIN\*

**AUTORS:** Ana María Pinilla Mendoza  
Omar Andrés Serrano Paredes\*\*

**KEYWORDS:** Vertical Electrical Sounding (VES), Electric Calicata, Geomorfology, Picacho Formation, Electric Resistivity,

### DESCRIPTION:

The geoelectric characterization used at NE of Pesca - Boyacá, in Mochaga sidewalk, in surrounding areas the mine La Emilia, consists of a gradual development of the stages of acquisition, processing and interpretation of seven vertical electrical sounding and electric calicata that allowed to define eleven geoelectric units using the symmetrical arrangement Schlumberger. The SEVS were spaced approximately every 700 meters and had an opening of 500 to 600 meters. Furthermore, were run five electrical calicata, spaced between them 5m and had an opening of 60m in total.

The data processing was performed using the software IPI2Win calculated the real apparent resistivities from the resistivities acquired field. These results, compiled it possible to determine the depth, thickness and composition of the units present. This is to provide additional information for future studies that may be developed in the area determined by the coordinates: North = 1'110.000, East = 1'119.000, 1'115.000 West = South = 1'107.750 in sectors covering the formations Picacho and concentration of the Eastern Cordillera basin.

In the interpretation of the results was evident that soil resistivity varies widely throughout the subsoil under the terms of composition, stratigraphy, grain size, moisture, temperature and soil compaction of the area sounding. Furthermore, the correlation of the lateral continuity is highly uncertain due to the conditions mentioned above plus the variation of the depth reached by each SEV.

---

\* Project of grade

\*\* faculty of engineering physical chemical, School of geology, Director: Martha Liliana Sarmiento Moreno

## INTRODUCCIÓN

El departamento de Boyacá, ubicado en la parte central de la cordillera oriental de los Andes Colombianos refleja un ambiente geotectónico cambiante y es el departamento de interés en este proyecto por sus características litoestratigráficas y geomorfológicas particulares.

Este trabajo se ejecutó en la zona Noreste del municipio de Pesca-Boyacá, sobre gran parte de la formación Picacho debido a que esta posee las mejores características de roca almacén en el área, principalmente porque casi en su totalidad los rezumaderos y las impregnaciones de petróleo observados están ligados a la arenitas de esta formación. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006).

Los métodos geoelectricos se caracterizan por trabajar con la respuesta generada por variaciones de resistividad eléctrica en profundidad, al inyectar en superficie corriente eléctrica continua de intensidad conocida en dos puntos, y medir la diferencia de potencial entre dos puntos determinados, para llevar a cabo este proceso y definir la geometría del arreglo se eligió la configuración tetraelectrónica simétrica de Schulmberger. Los datos geoelectricos recopilados son tratados con herramientas computacionales específicas (IPI2WN), con el fin de suministrar una distribución de la resistividad en el subsuelo a partir de la cual se genera una aproximación geológica.

Se procedió con técnicas geoelectricas al sector Noreste de Pesca para caracterizar mediante sondeos eléctricos verticales (SEVs) y una Calicata Eléctrica (CE) el espesor así como la profundidad de algunas de las litologías constituyentes de las formaciones Concentración y Picacho, teniendo en cuenta la

relación de la resistividad con las características geológicas y mineralógicas de la roca.

## 1. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo con modalidad en práctica empresarial hace parte del convenio 002 del 2012 entre la Universidad Industrial de Santander y Ecopetrol, con el fin de complementar y facilitar el desarrollo de un proyecto conjunto de maestría, orientado a determinar el rango de resistividad eléctrica de yacimientos someros de crudo extrapesado en el sector de Pesca, Sogamoso y sus alrededores.

En el marco del convenio, se definieron los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVS) junto con la calicata eléctrica (CE) como los métodos geoelectrónicos más apropiados para caracterizar la respuesta de la resistividad en la zona de estudio, debido al bajo costo del método, su relativa sencillez y la apropiada resolución acorde con los objetivos.

Los SEVS junto con la calicata fueron seleccionados por sobre otros métodos, al considerar que los contrastes resistivos que genera la arena impregnada de crudo extra pesado pueden ser identificados por estos de mejor forma que el potencial espontáneo y la polarización inducida más usados para la identificación de yacimientos metalíferos masivos y diseminados. Los otros métodos como tomografía eléctrica y los métodos electromagnéticos son significativamente más costosos y no son costeados por la empresa ECOPETROL para el desarrollo de esta práctica empresarial.

La técnica geoelectrónica empleada está enfocada a caracterizar la respuesta del subsuelo de sectores aledaños a la mina La Emilia, que permitan identificar y delimitar las unidades litológicas presentes usando el método geofísico de resistividad de corriente continua.

El arreglo tetraelectrónico simétrico tipo Schlumberger proporciona datos aproximados de las resistividades del subsuelo acordes a la profundidad de estudio, destacándose sobre los demás arreglos por requerir un número menor de personal para su desarrollo, por tal motivo y en busca de optimizar el trabajo en campo se adquirió la calicata y los sondeos eléctricos verticales aplicando dicha configuración electródica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar geoelectricamente el área de estudio usando técnicas geoelectricas (Sondeo Eléctrico Vertical y Calicata Eléctrica) para determinar la profundidad, espesor, resistividad y composición litológica del subsuelo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Delimitar la zona de estudio por sectores para determinar resistividades características de la formación picacho.
- Describir la metodología de desarrollo de Sondeos Eléctricos Verticales empleando el arreglo tetraelectrónico simétrico tipo Schlumberger.
- Correlacionar las resistividades calculadas con la litología en profundidad de los sectores caracterizados.
- Adquirir una calicata eléctrica en la mina la Emilia usando el arreglo tetraelectrónico simétrico Schulmberger para generar una pseudosección.
- Reconocer las geofomas presentes en el área de estudio y su influencia en el porcentaje de error ajuste.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología planteada para el desarrollo del trabajo de grado se divide en cuatro fases:

- **Fase 1:** Recopilación y revisión de la información bibliográfica disponible y necesaria (artículos, publicaciones, informes, proyectos de grado, libros y presentaciones) que facilitaron la familiarización con el área de estudio y los métodos geoelectrónicos a aplicar.
- **Fase 2:** Fase de campo en donde se realiza el reconocimiento del área de interés seguido de la toma de siete sondeos eléctricos verticales y una calicata.
- **Fase 3:** Procesamiento de los datos experimentales recolectados teniendo en cuenta conceptos teóricos, con el fin de llevar a cabo una interpretación y estimación de la información adquirida.
- **Fase 4:** Una vez realizada la fase de campo y de oficina se procede a la edición del informe final del trabajo de grado.

## 4. MARCO CONCEPTUAL

### 4.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS ROCAS

La resistividad eléctrica de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo. (Lakubovskii y Liajov, 1980).

Las relaciones entre la resistividad, porosidad y textura de la roca son fundamentales para los estudios geoelectrónicos, a su vez, la resistividad también varía de acuerdo a la movilidad, concentración y disociación de los iones presentes en el agua, contenida en los intersticios en la roca. (Ramírez, 2010).

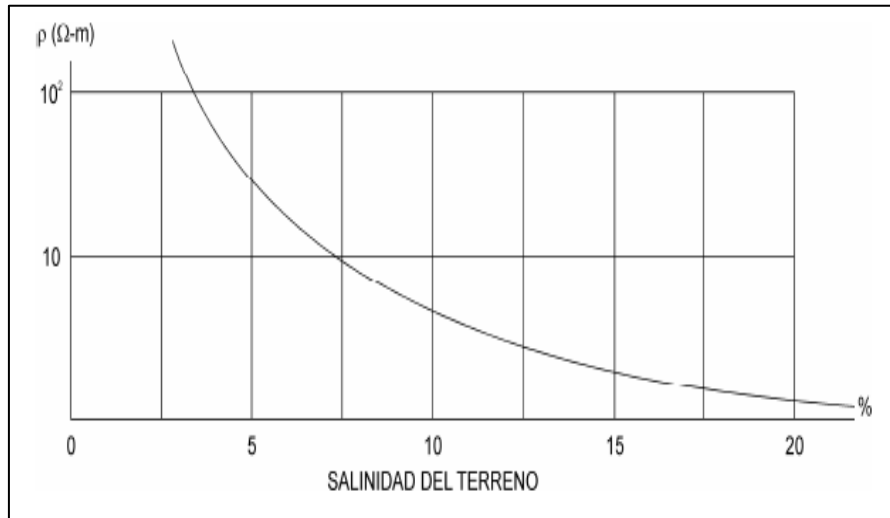
La aplicación de los métodos geoelectrónicos exige un conocimiento básico de las propiedades eléctricas de las rocas, suelos y de los minerales que las constituyen. El comportamiento físico depende de las propiedades y modo de agregación de sus minerales. Además de estas relaciones, también hay que tener en cuenta los efectos que ejercen la presión y la temperatura.

A una roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral, de líquidos y gases. La resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del subsuelo, estando determinada por:

**a) SALES SOLUBLES:** La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. Al presentarse una mayor concentración de sales disueltas

en el agua del subsuelo, la conductividad se incrementa y como consecuencia la Resistividad disminuye (Ver Figura 1).

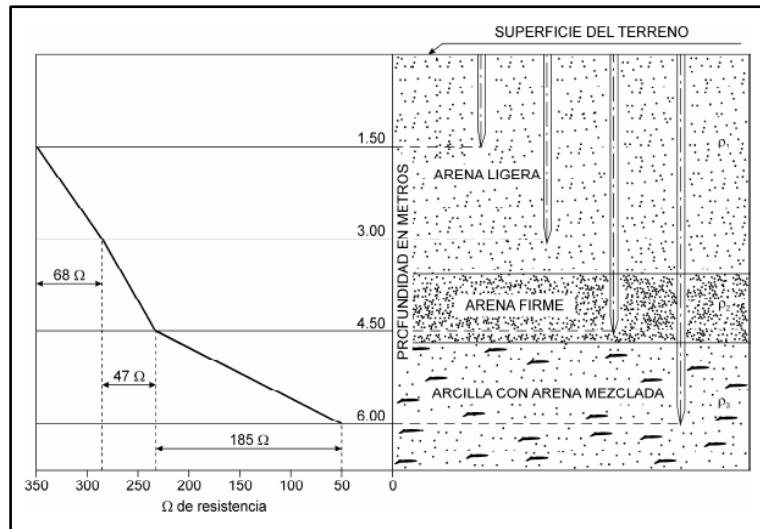
**Figura 1 Variación de la resistividad con la salinidad**



Fuente: Tomado de Pérez, et. al. 2010.

- b) COMPOSICION DEL TERRENO:** La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 1-100 ohm-m. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es mayor a 500 ohm-m.
- c) ESTRATIGRAFIA:** La naturaleza obviamente no presenta terrenos uniformes en sus capas. Las mediciones de resistividad que se llevan a cabo en el terreno por lo regular no corresponden a materiales homogéneos sino a un perfil de material heterogéneo. Por tanto, debido a que las capas no son uniformes, cuando se mide la resistividad, en realidad se mide la resistividad aparente. La Figura 2 muestra un perfil de suelo con sus respectivos valores de resistividad.

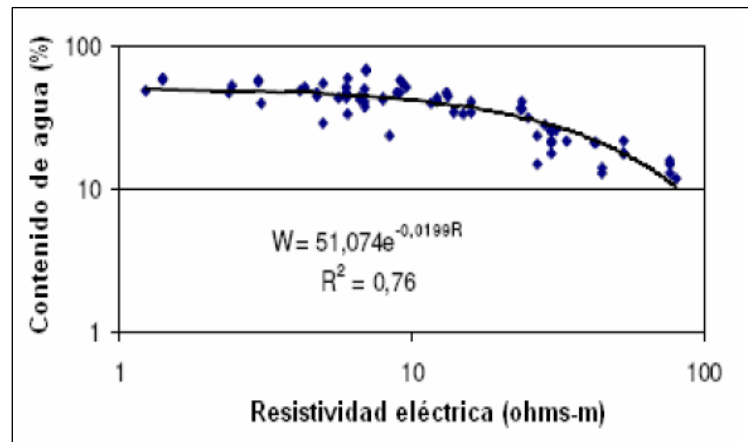
**Figura 2 Variación de la resistencia en un perfil estratigráfico.**



Fuente: Tomado de Pérez et. al, 2010.

- d) GRANULOMETRIA:** A medida que el tamaño de las partículas se incrementa, aumenta la resistividad. Esto debido a los vacíos que se generan en la estructura; si estos se rellenan con agua la resistividad será baja y si es aire la resistividad aumenta debido a que este no es conductor de energía. También influye sobre la calidad del contacto con los electrodos.
- e) HUMEDAD DE LA ROCA:** El contenido de agua y la humedad influyen de forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año y profundidad. Existe una relación exponencial entre contenido de agua y resistividad (Ver Figura 3).

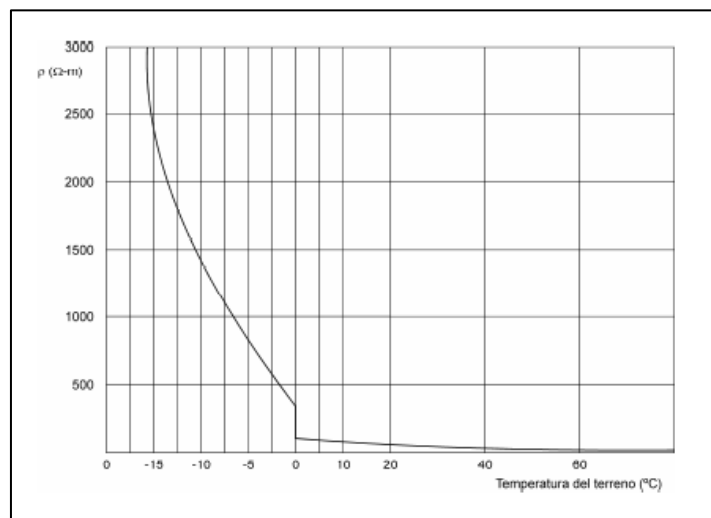
**Figura 3 Variación de la resistividad en función del contenido de agua en arcillas.**



Fuente: Tomado de Pérez, et. al, 2010.

f) **TEMPERATURA:** A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno. A medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos, estos influyen en la resistividad de la tierra (Ver Figura 4).

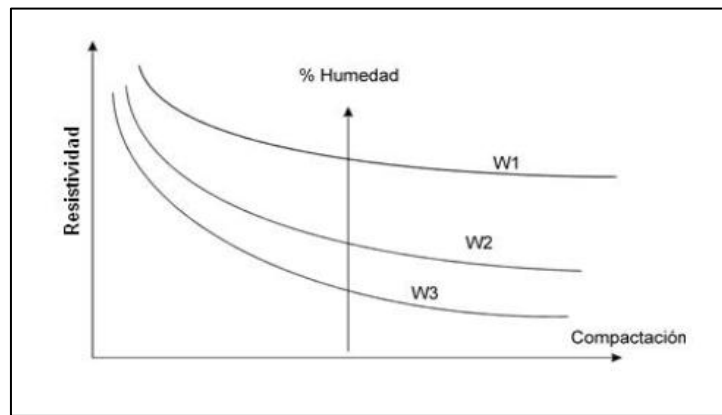
**Figura 4 Variación de la resistividad con la temperatura.**



Fuente: Tomado de Pérez, et. al, 2010.

**g) COMPACTACION:** la resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación de este. Por tanto, se procura colocar los electrodos en las zonas más compactas posibles. Cuando los suelos se compactan a una mayor energía, la relación de vacíos y la resistividad disminuyen debido a que se logra una mejor conducción a través del agua que pueda contener el suelo (Ver Figura 5).

**Figura 5 Variación resistividad - compactación.**



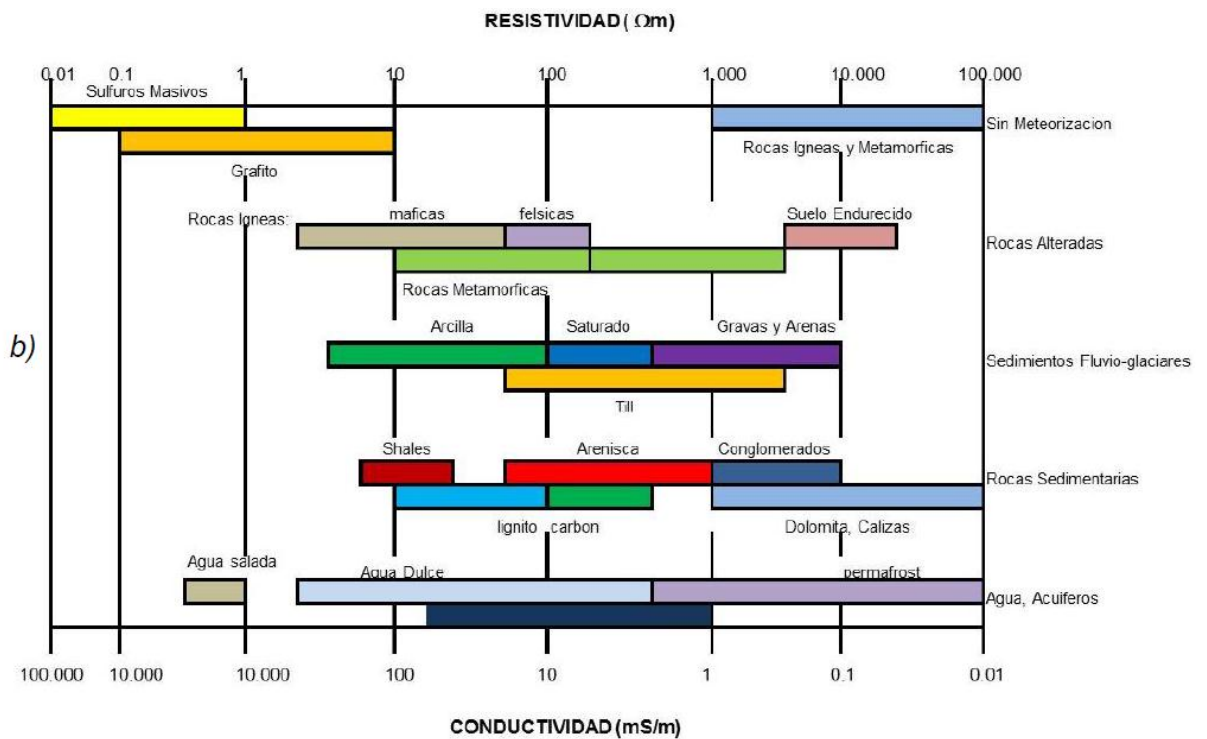
Fuente: Tomado de Pérez et. al 2010

El factor que controla en muchas rocas el valor de resistividad, sobre todo en las rocas sedimentarias y sedimentos, es el contenido de agua. Las rocas ígneas tienen en promedio los mayores valores de resistividad, los sedimentos el menor y las rocas metamórficas los intermedios. Sin embargo, existe un considerable solapamiento de los valores. Además las resistividades de ciertas rocas varían con la edad y la litología, porque la porosidad de la roca y salinidad del agua contenida varía con ambas. (Sheriff, et al. 1990).

En cuanto a las rocas sedimentarias, estas se caracterizan por valores de resistividad bajos (Ver Figura 6). Esto se explica por su gran porosidad y, en caso de ubicarse bajo el nivel de las aguas subterráneas, también por su elevado grado de saturación de agua. Sin embargo, entre las rocas de este grupo se pueden

encontrar algunas rocas que se caracterizan por una resistividad elevada. A ellas pertenecen, por ejemplo, las arenas secas y los sedimentos hidroquímicos compactos y de baja porosidad, como el yeso y la anhidrita. (Lakubovskii y Liajov, 1980).

**Figura 6. Esquema generalizado de resistividad y conductividad de materiales geológicos comunes en el subsuelo**



Fuente. Tomado de Gómez J, 2014.

## 4.2 MÉTODO GEOELÉCTRICO

Existen diversas técnicas geofísicas eléctricas o electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales. Algunas de estas técnicas son mucho más modernas y más precisas que los sondeos eléctricos verticales (SEV), pero estos

a su vez se siguen usando, por su sencillez y relativa economía del equipo necesario (Sánchez, 2011).

La metodología geoelectrica se presta perfectamente para establecer contrastes entre componentes litológicos de naturaleza diferente. En esta caracterización intervienen algunas variables: composición mineralógica, estructura interna, estado de consolidación, contenido de agua (humedad), porcentaje salino, porosidad, temperatura, etc. (Gaete, 2010). De esta manera, esta técnica geoelectrica busca evidenciar el grado de resistividad del subsuelo a diferentes profundidades y de acuerdo a las anteriores variables.

Los métodos geoelectricos se caracterizan por trabajar con campos constantes y fundamentados en el potencial eléctrico. Su respuesta obedece a variaciones de resistividad eléctrica en el subsuelo, al inyectar en superficie, corriente eléctrica continua de intensidad conocida entre dos puntos, posteriormente se mide la diferencia de potencial entre otros dos. El potencial eléctrico se define como el trabajo realizado para rechazar o atraer una carga de un Coulomb (C) a un punto dado desde el infinito, donde la diferencia de potencial entre esos dos puntos es el trabajo para mover una carga de un punto al otro, y su unidad es el Volt (V), un Volt equivale al trabajo de un Joule (J). donde las superficies equipotenciales son aquellas en las que el valor del potencial es igual en cualquier punto (Ramírez, 2010).

### **4.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

La corriente eléctrica puede propagarse a través de rocas y minerales de tres formas:

- *CONDUCCIÓN ELÉCTRICA*

La resistividad eléctrica de las rocas está dada por:

$$\rho = R \cdot A / L \quad (a)$$

Dónde:

- R es el valor de la resistencia eléctrica en Ohmios
- L es la longitud del material medida en metros
- A es el área transversal medida en metros<sup>2</sup>

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ( $\Omega \cdot m$ ).

Sabiendo que el inverso de la resistividad es la conductividad, tenemos:

$$\sigma = 1/\rho \quad (b)$$

- *CONDUCCIÓN ELECTROLÍTICA*

Teniendo en cuenta que las rocas porosas, en sus poros, usualmente contienen fluido, principalmente agua, convirtiéndolas en rocas conductoras electrolíticas, cuya resistividad efectiva está definida por la ecuación (a), donde la propagación de la corriente es por conducción iónica. Como consecuencia, la resistividad varía con la movilidad, concentración y el grado de disociación de los iones. (Pérez, 2009).

Según la cantidad de cloruros, sulfatos y otros minerales disueltos en el agua, su conductividad puede variar.

- **CONDUCCION DIELECTRICA**

Bajo la influencia de un variable de campo eléctrico externo, los electrones atómicos están desplazados ligeramente con respecto a su núcleo, esta separación relativa de cargas negativas y positivas conocidas como polarización dieléctrica del material produce una corriente denominada corriente de desplazamiento. El parámetro importante en la conductividad dieléctrica es la constante dieléctrica  $K$ . (Pérez, 2009).

El factor geométrico  $k$ , viene siendo la relación que representa los efectos de abertura entre los electrodos de corriente y con respecto a la distribución espacial de cada punto de atribución. Para cada dispositivo se tiene diferente factor geométrico ( $k$ ), resultado de modificar la geometría de sus electrodos, como se ve para cada arreglo en la tabla 1.

**Tabla 1 Factores geométricos de los tipos de dispositivos electródicos**

Nombre de dispositivo electródico	Factor geométrico ( $k$ )
Polo-Polo	$2 \pi a$
Polo-Dipolo	$2 \pi n (n+1) a$
Dipolo-Dipolo	$\pi (n) (n+1) (n+2) a$
Schlumberger	$\pi (n) (n+1) a$
Wenner alfa (Wenner)	$2 \pi a$
Wenner beta	$6 \pi a$
Wenner gamma(Enfocado)	$2 \pi a$

Fuente. Tomada de Ramírez, 2010.

#### 4.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

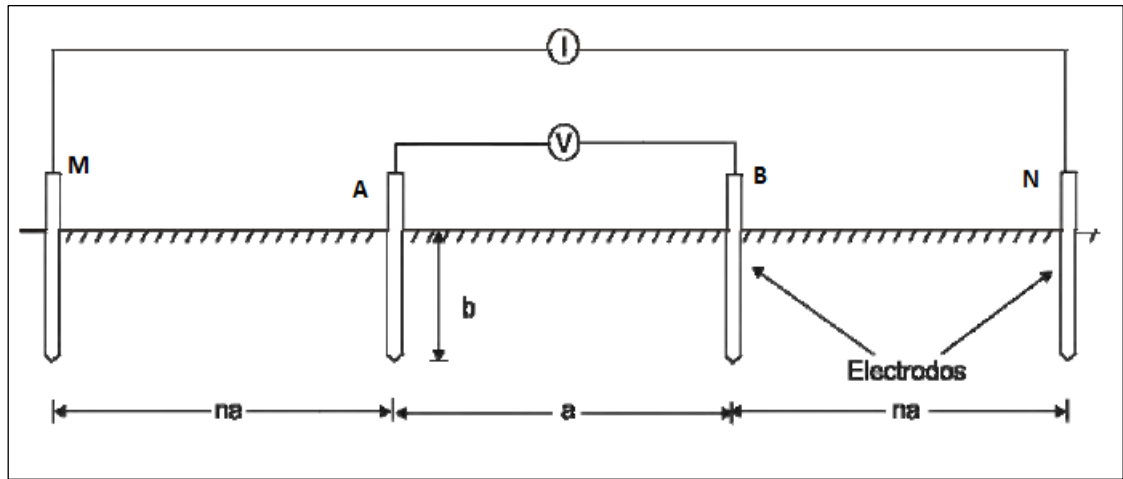
Los sondeos eléctricos verticales son una serie de determinaciones de resistividad aparente, cuya finalidad es averiguar la distribución de resistividades bajo el punto sondeado. La calidad de los datos registrados en cada sondeo aumenta si el terreno está compuesto por capas lateralmente horizontales o con una inclinación máxima de 30° (Arias, 2011).

Una gran limitante en este método geoelectrico, es la alta sensibilidad a mínimas variaciones de la conductividad cercanas a la superficie, ya sea por la humedad, vegetación, etc. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar al de la meteorización y la humedad, debido al flujo de corriente que se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías debido solo a topografía (Arias, 2011).

Durante la ejecución del SEV, los impulsos eléctricos son enviados al terreno mediante dos electrodos de emisión A y B, a través de los cuales se hace circular cierta intensidad de corriente ( $I$ ) por el subsuelo. El circuito se cierra mediante otros dos electrodos M y N denominados de potencial, en los que se percibe la respuesta del campo eléctrico generado por los primeros. De este modo se obtiene una diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) que se manifiesta mientras perdure el campo. Al realizar un SEV se mantiene un arreglo en la distribución de los electrodos, que depende del objetivo a investigar y de la profundidad que se pretende alcanzar.

Existen diferentes tipos de dispositivos empleados en los sondeos eléctricos verticales y se diferencian entre ellos por la distancia relativa entre electrodos y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En este caso se usara el dispositivo Schlumberger (Ver Figura 7)

**Figura 7 Esquema de un equipo de medición geoelectrica dispuesto en la configuración Schlumberger para un SEV.**



Fuente: Tomada de Arias, 2011.

En este método geoelectrico se usan dos electrodos M-N que son enterrados equidistantes al punto central "o", los cuales permiten medir la diferencia de potencial entre ellos. Por otra parte, las líneas de corriente producidas a través de los electrodos A-B alcanzan niveles más profundos a medida que estos se separan del lugar central de estudio. La profundidad de investigación depende de la longitud del arreglo pero también de las características del terreno. Esto implica que para distancias AB grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades (Orellana, 1982)

En la práctica no es conveniente colocar los electrodos M y N tan distantes como suelen estar los A y B, pues al ser grande la distancia entre los primeros, la medida se vería afectada por las corrientes telúricas, corrientes parásitas industriales, etc., cuyo efecto aumenta proporcional con la distancia entre M y N (Arias, 2011).

Para el dispositivo Schlumberger el coeficiente K seria:

$$k = \pi (n(n + 1) / a)$$

#### **4.5 CALICATA ELÉCTRICA (CE)**

El objetivo de las calicatas eléctricas (CE) es obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una profundidad de investigación. Esto lo hace adecuado para detectar contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad.

La zona explorada en el calicateo eléctrico se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos. (Orellana, 1982)

Experimentalmente, la Calicata Eléctrica consiste en trasladar los cuatro electrodos del dispositivo a lo largo de un recorrido, manteniendo su separación, obteniéndose un perfil de resistividades aparentes a lo largo de aquél.

#### **4.6 RESISTIVIDAD APARENTE**

Al realizar un SEV en un terreno que no es homogéneo, se va a obtener un diferente valor de resistividad cada vez que se varíe el espaciamiento de los electrodos debido a que la resistividad varía respecto a las posiciones relativas de estos. Los electrodos se ubican teniendo en cuenta las heterogeneidades del terreno. Si se conocen las distancias entre los electrodos (A, B) y además  $\Delta V$  en el voltímetro de los electrodos (M, N), en consecuencia, se puede determinar la resistividad aparente ( $\rho_a$ )

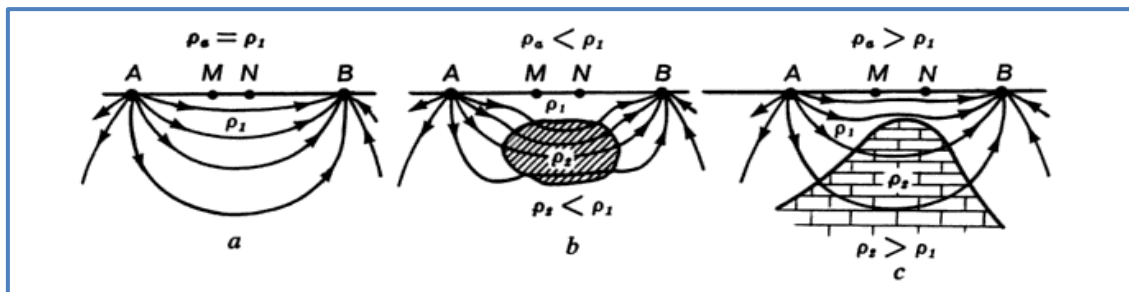
$$\rho_a = k (\Delta V / I)$$

Donde,  $\Delta V$  corresponde a la diferencia de potencial,  $I$  a la intensidad medida y  $K$  la constante del dispositivo geoelectrico

La resistividad aparente ( $\rho_a$ ) no es el promedio de los valores de resistividad obtenidos del subsuelo, sino que cada valor de resistividad es una medición individual que se asocia al punto atribuido al centro del dispositivo de electrodos y está en función del espaciamiento de los electrodos y la distribución real de la resistividad (Ramírez, 2010). Solo en el caso de un subsuelo homogéneo se obtendría la resistividad verdadera.

Como podemos ver en la Figura 8, en este arreglo tipo Schlumberger, la corriente contornea el cuerpo de alta resistencia y se condensa en la zona de las tomas de tierra de medición. Esto conlleva a un aumento de  $\Delta U$  y por consiguiente a un aumento de la resistividad aparente ( $\rho_a$ ).

**Figura 8 Dependencia de  $\rho_a$  del carácter del corte geoelectrico. a) Medio Homogéneo; b) incluye una roca buen conductor; c) incluye un cuerpo mal conductor (Calizas).**



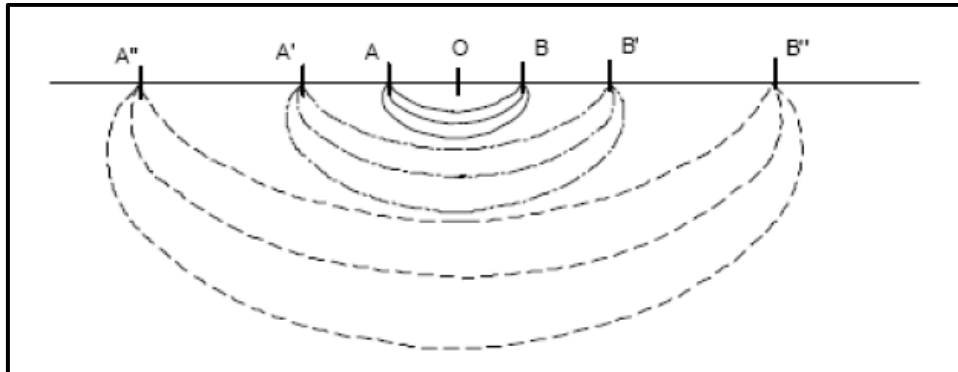
Fuente: Tomado de Lakubovskii y Liajov, 1980

El fin del dispositivo Schlumberger es utilizar una distancia  $MN=a$  muy corta, cumpliendo la condición  $AB > MN / 5$ . En teoría el error relativo de las mediciones

es muy reducido, sin embargo, la precisión de la medición geoelectrica está muy limitada por heterogeneidades del terreno. A este método no se le puede exigir gran exactitud. Cabe resaltar, que para cada equipo electrodo existen sus ventajas y desventajas, que dependen de la profundidad de investigación, sensibilidad del dispositivo, cobertura de investigación e intensidad de la señal. (Ver tabla 2).

Aunque la mayoría de las configuraciones de los electrodos pueden usarse para los Sondeos Eléctricos Verticales, el tipo Schlumberger ofrece avances importantes en cuanto a logística, en donde solo dos electrodos son movidos (Figura 9).

**Figura 9 Esquema configuración de campo SEV variación del campo eléctrico producido por los electrodos AB.**



Fuente: Tomado de Ramírez, 2010.

**Tabla 2 Ventajas y desventajas en diferentes dispositivos electrónicos.**

Dispositivo Electrónico	Ventajas	Desventajas	Relación Señal / Ruido
<b>Gradiente</b>	Efecto de topografía bajo. Rapidez en el estudio al usar dos o más receptores. Buena penetración. Menos enmascaramiento por la capa superficial conductora.	Resolución pobre con respecto a la profundidad. El factor geométrico varía dependiendo del acomodo.	Regular
<b>Dipolo-Dipolo</b>	Arreglo simétrico. Minimiza el acoplamiento inductivo entre electrodos de corriente y potencial. La profundidad de penetración no depende de la geometría, sino del contraste de resistividades.	Resolución vertical (estructuras horizontales) pobre. Sensibilidad al ruido geológico. La resistencia de contacto de los electrodos móviles es más crítica que el polo-polo.	Pobre (intensidad de la señal débil)
<b>Schlumberger</b>	Arreglo simétrico. Excelente para medios estratificados. La profundidad media de investigación es aprox. 10% mayor que el Wenner para la misma distancia entre electrodos.	Menor cobertura horizontal que el Dipolo-Dipolo, pero mayor que el Wenner. Espaciamiento de electrodos de potencial es pequeño comparado con el de corriente, significa que es muy sensible a las mediciones.	Regular (intensidad de la señal media)
<b>Wenner</b>	Sensible a las mediciones con respecto a los espaciamientos entre electrodos. Sensitiva a cambios verticales (estructuras horizontales).	Cobertura horizontal es pobre a medida que incrementan "a". Profundidad media de investigación (moderada) de aprox. 0.5 veces el espacio "a". Requiere más cable y personal.	Buena (intensidad de la señal es fuerte)
<b>Polo-Polo</b>	Mejor inyección de corriente, al ser menor número de electrodos activos, a un bajo costo. La resistencia de contacto de electrodos al infinito será despreciable. Mayor profundidad de investigación.	Mayor nivel de ruido telúrico, por esta razón no son recomendados espaciamientos demasiado grandes.	Muy grande (sensitiva al ruido telúrico)
<b>Polo-Dipolo</b>	Cobertura horizontal buena.	Arreglo asimétrico.	Buena

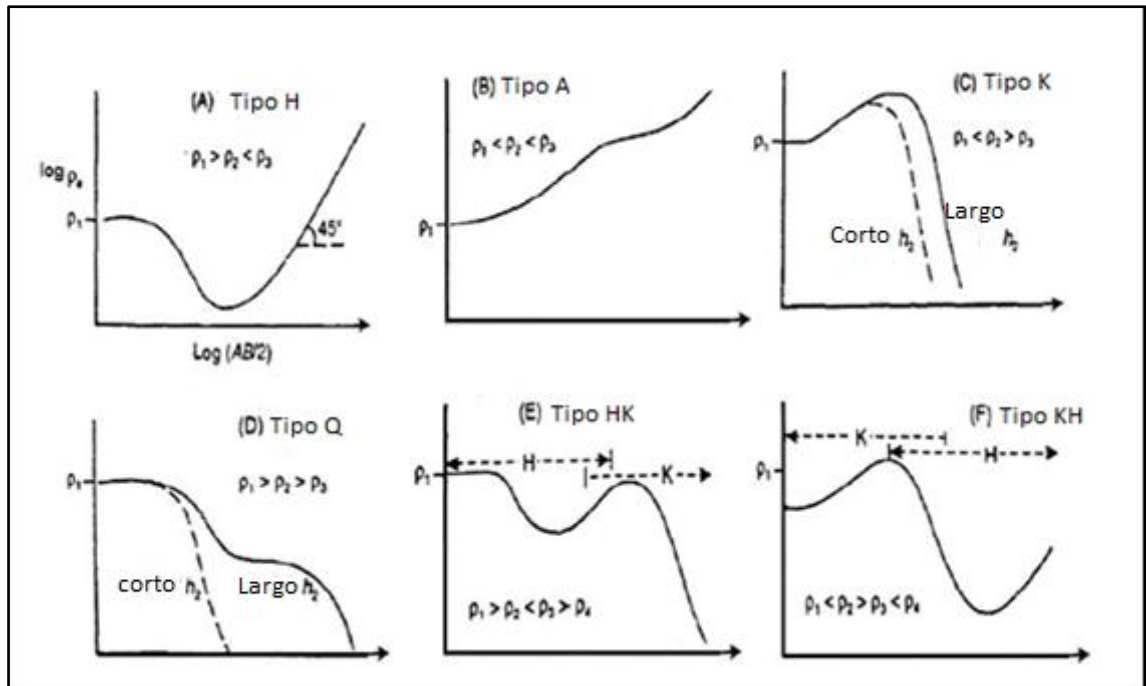
Fuente: Tomado de Ramírez, 2010.

#### 4.7 CURVAS DE RESISTIVIDAD

Las curvas de resistividad se emplean como un patrón estándar para comparar e interpretar más fácilmente las curvas obtenidas en campo. Estas curvas de resistividad aparente se acercan de forma asintótica a los valores de resistividad dados en la primera y última capa del subsuelo.

El número de capas que posiblemente tenga el terreno se determina por el número de puntos de inflexión que posee la curva de resistividad aparente, aumentando en uno. En el dispositivo Schlumberger, las resistividades aparentes se grafican en las ordenadas, y en las abscisas las distancias  $AB/2$ , con ambos ejes en escala logarítmica. En la Figura 10 se observan las gráficas que describe el comportamiento resistivo en teoría del subsuelo:

**Figura 10. Curvas de resistividad para diferentes estructuras resistivas.**



Fuente: Tomada y modificada de Reynolds, 1997.

## 4.8 AMBIGÜEDADES EN LA INTERPRETACIÓN

La interpretación para estructuras compuestas por varias capas no es sencilla y puede presentar ambigüedades como el principio de equivalencia y de supresión

## 4.9 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA Y DE SUPRESIÓN DE CAPAS

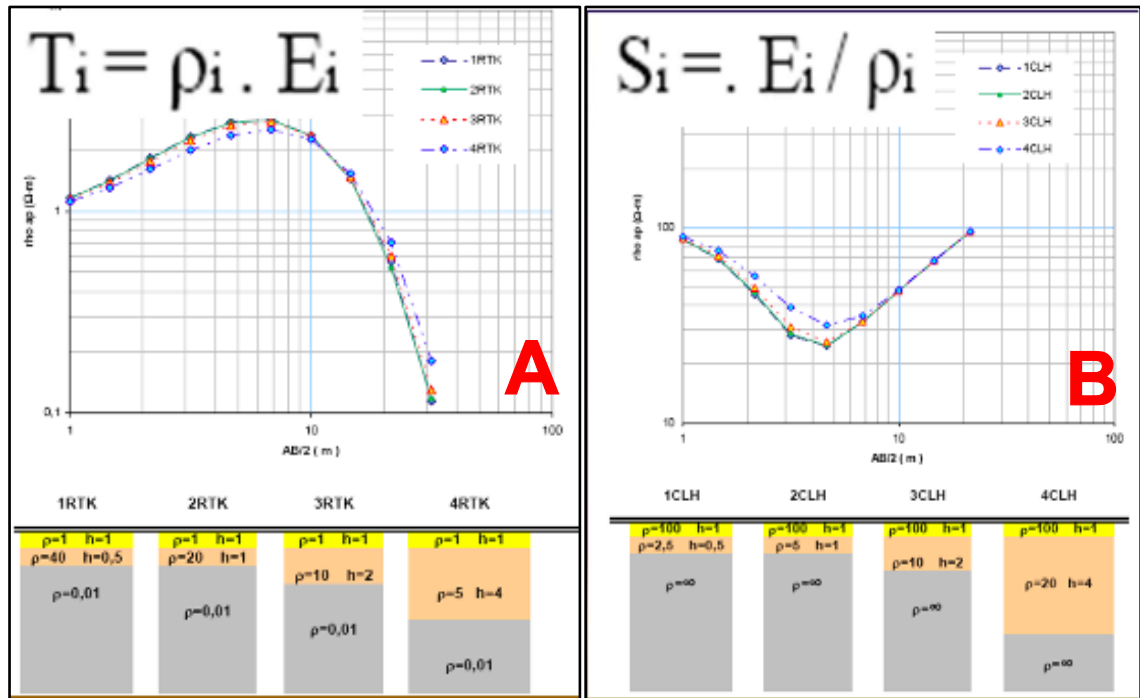
La heterogeneidad (variación lateral y vertical de la resistividad) es un sinónimo de error, y de inestabilidad en las medidas de los sondeos eléctricos verticales donde pequeños cambios en los valores de los espesores o resistividades puede ocasionar interpretaciones raras, totalmente alejadas de la realidad. La dificultad estriba en determinar con precisión las características de las capas cuyos espesores son pequeños, comparados con su profundidad. (Manilla. A, 2003).

**4.9.1 Principio de Equivalencia.** Una capa de resistividad alta ( $\rho$ ) encajonada por aquellas de menor resistividad se manifiesta a través de su “resistencia eléctrica transversal”, que equivale al producto de su resistividad por su espesor, como se observa en la figura 11 A. donde los cuatro casos tienen valores de resistencia transversal muy cercanos, pero equivalen a cortes geoelectricos diferentes.

De manera recíproca, una capa conductora confinada por dos resistentes, se manifiesta a través de su conductancia longitudinal; que es el producto de la conductividad de la capa ( $1/\rho$ ) por su espesor.

La figura 11 B. representa cuatro capas conductoras diferentes encajonadas por capas resistentes; la conductancia longitudinal es prácticamente la misma.

Figura 11 A. Cuatro casos de resistencia transversal. B . Cuatro casos de conductancia longitudinal semejante.

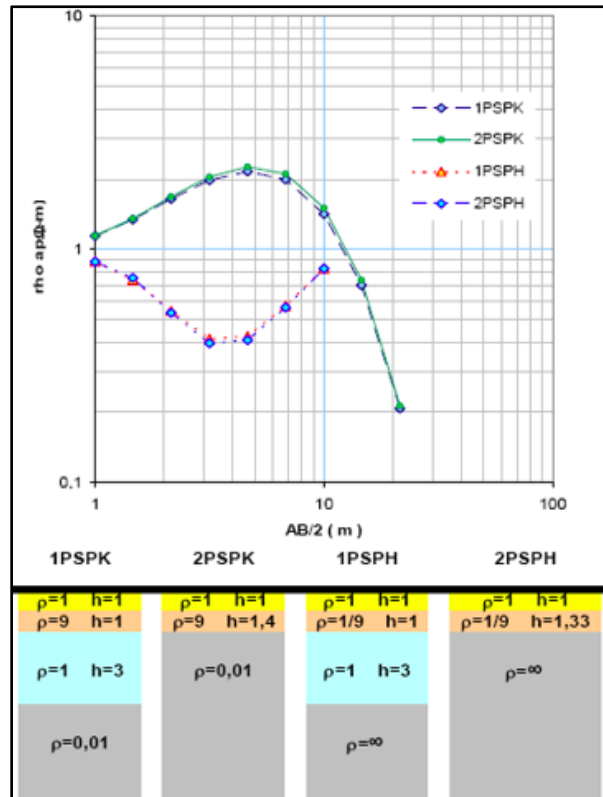


Fuente: Tomado de Manilla. A, 2003

**4.9.2 Principio de Superposición.** Este principio se relaciona con aquellas capas confinadas que no ejercen influencia sobre las curvas de la resistividad debido a que no tienen suficiente espesor.

Cuando el espesor de la capa intermedia comienza a crecer, ésta comienza a afectar la curva de resistividad; pero antes que se pueda notar, su efecto queda enmascarado por los cambios en el espesor, o resistividad de las capas encajonantes, como se muestra en la figura 12.

Figura 12 Principio de Supresión.



Fuente: Tomado de Manilla. A, 2003

## **5. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO**

### **5.1 LOCALIZACIÓN**

El área de estudio está localizada en zonas cercanas a la mina La Emilia, atravesando la formación Picacho y Concentración, en la población de Pesca y sus alrededores (ver figura 13). Estos territorios pertenecientes al departamento de Boyacá, ubicado en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, constituido por 87 litounidades que reflejan un ambiente geotectónico cambiante imprimiendo características litoestratigráficas y geomorfológicas particulares. (Rodríguez y Solano, 2000).

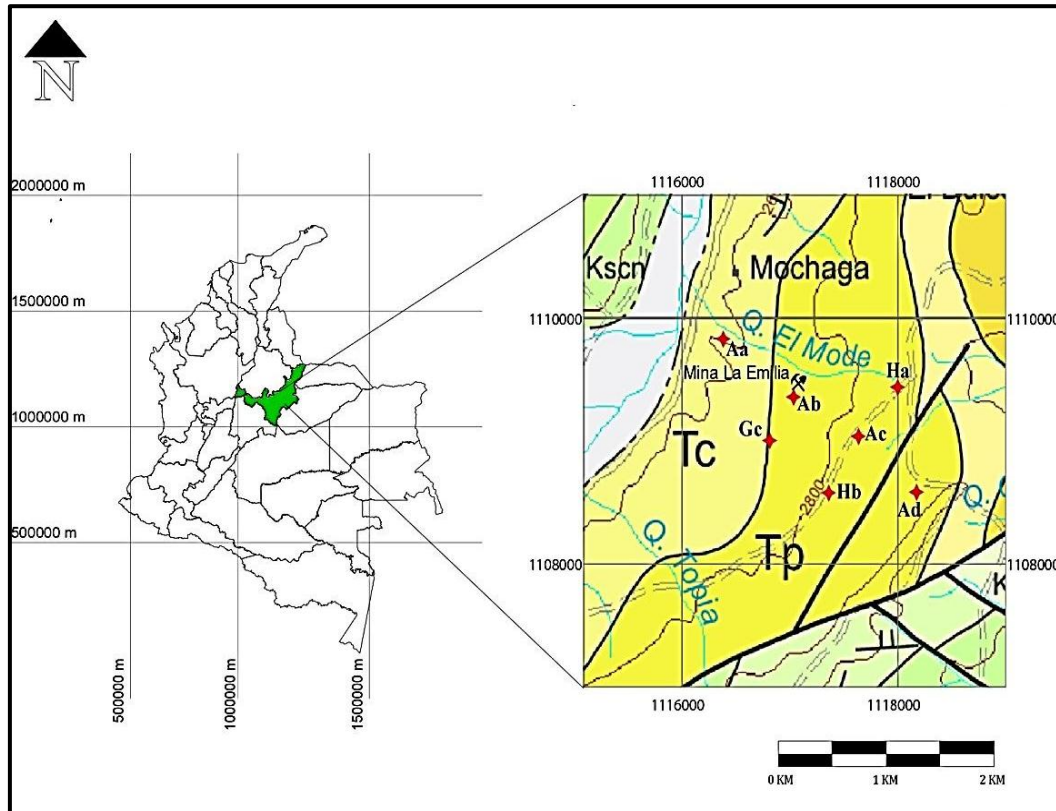
La ubicación de algunos sondeos propuestos en oficina se modificó en campo con el fin de tener un terreno más apto para la prospección y facilitar el acceso al punto de interés. Una vez ubicados los puntos en el mapa se realizó un corte geológico (A-A') para identificar la geología de la zona de estudio, detallando rasgos estructurales y estratigráficos regionales (Ver Anexo 1).

Las coordenadas UTM de los SEVs realizados se aprecian en la tabla 3 y la ubicación geográfica en la figura 13:

**Tabla 3. Coordenadas de los SEVs realizados**

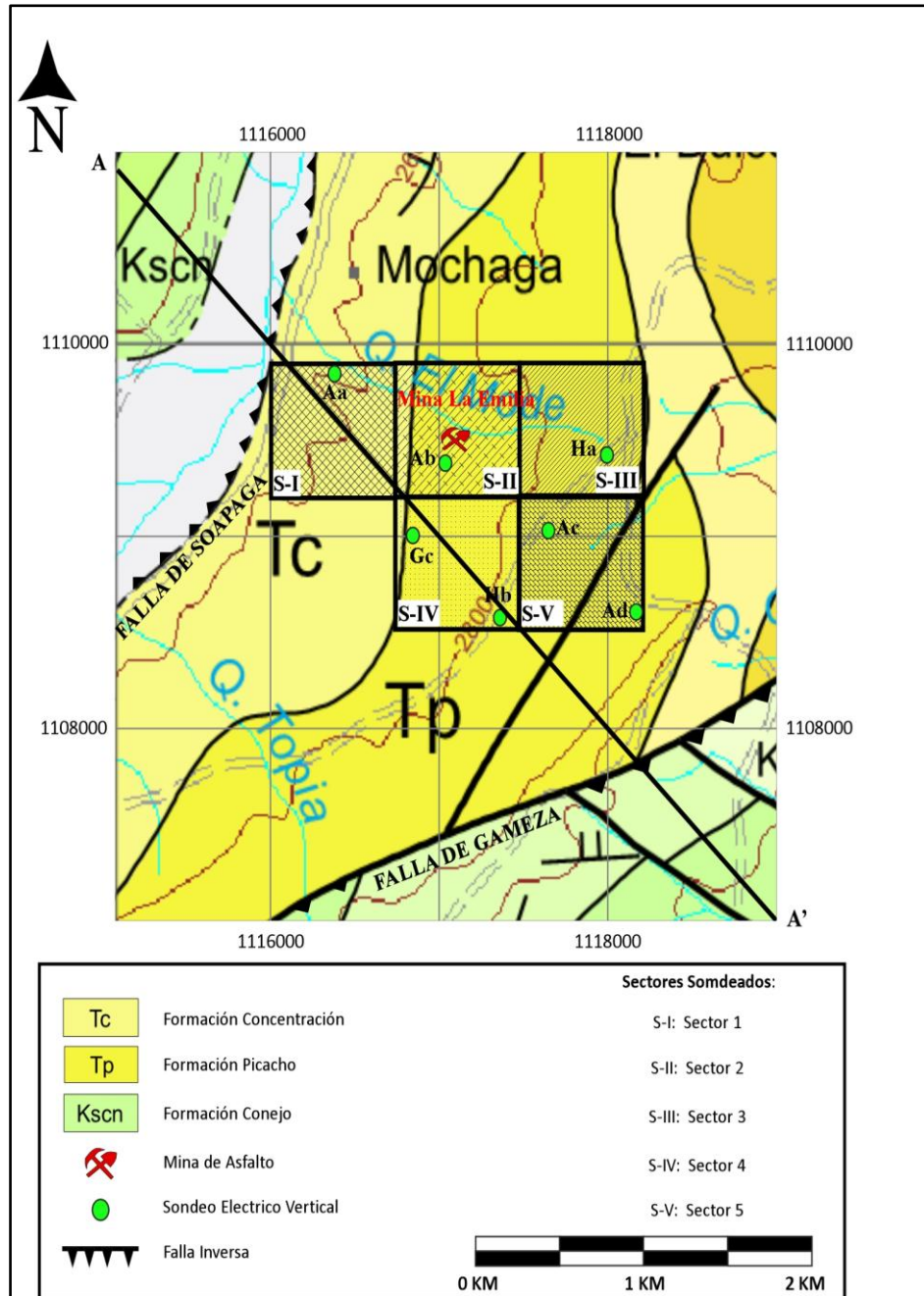
SEVs	Norte	Este	Sector	Altura (m)
<b>MINA LA EMILIA</b>	1109466	1117080	S-II	2719
Aa	1109856	1116375	S-I	2614
Ab	1109388	1117038	S-II	2745
Ac	1109040	1117632	S-V	2883
Ad	1108595	1118158	S-V	2973
Gc	1109008	1116805	S-IV	2743
Ha	1109437	1117991	S-III	2932
Hb	1108575	1117354	S-IV	2838

**Figura 13. Ubicación geográfica del área de estudio**



El área de estudio se dividió en cinco sectores, (S-I, S-II, S-III, S-IV y S-V) aledaños a la mina La Emilia debido a que este fue el punto donde se realizó la calicata que brindó información adicional para entender mejor la tendencia de las resistividades en toda el área de interés (ver figura 14).

**Figura 14. Ubicación sectores y SEVs realizados.**



## 5.2 MARCO ESTRATIGRÁFICO

El departamento de Boyacá está ubicado en la parte central de la cordillera oriental y junto con el departamento de Cundinamarca, fueron sometidos a una serie de procesos tectónicos y estructurales que definieron la alineación de pliegues y fallas dándoles una dirección preferente hacia el Noreste, hasta el Páramo de Santurbán, en donde la presencia de altos topográficos fuertes desviaron el recorrido de todo ese tren estructural hacia el Noroeste, confinando las cuencas sedimentarias de Boyacá y Cundinamarca y conformando junto con el macizo de Santander y la falla de Santa Marta-Bucaramanga, un nuevo ramal cordillerano que sigue los límites de Colombia y Venezuela, y da origen a la Serranía de Perijá (Rodríguez y Solano, 2000).

En la población de Pesca, situada en la Plancha 191 afloran rocas sedimentarias con edades del Cretácico Inferior al Reciente. El Cretácico Superior se presenta con un espesor importante de secuencias sedimentarias, y rocas sedimentarias Terciarias diferenciadas en dos subregiones (Duitama-Pesca y alrededores de Tunja), Por último, se diferencian rocas ígneas intrusivas de edad Terciaria y, un amplio registro del Cuaternario compuesto por abanicos aluviales, depósitos aluviales, y de talud principalmente. (Rodríguez y Solano. 2000).

Desde el punto de vista estructural, el área de estudio se encuentra afectada por la acción de varias fallas y estructuras de plegamiento. Los principales lineamientos de falla en la zona son: la Falla de Boyacá, la Falla de Soapaga, el Sistema de Fallas de La Laguna, la Falla de Pesca, la Falla de Tutasá, la Falla de Gámeza y la Falla de Chivatá entre otras presentes en la cartografía de los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT). (Ulloa y Rodríguez, 2006

**5.2.1 Descripción de las Unidades aflorantes en el área de estudio.** Las rocas sedimentarias más antiguas se presentan en la cobertera sur oriental del Macizo de Floresta y corresponden a las formaciones Tibasosa, Une, Chipaque, Plaeners. Al oriente de la falla de Soapaga afloran las formaciones Los Pinos, Arenisca de Labor-Tierna, Guaduas, Grupo Socha, *formaciones Picacho y Concentración*, además de los Conglomerados La Perquera y Depósitos Cuaternarios. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

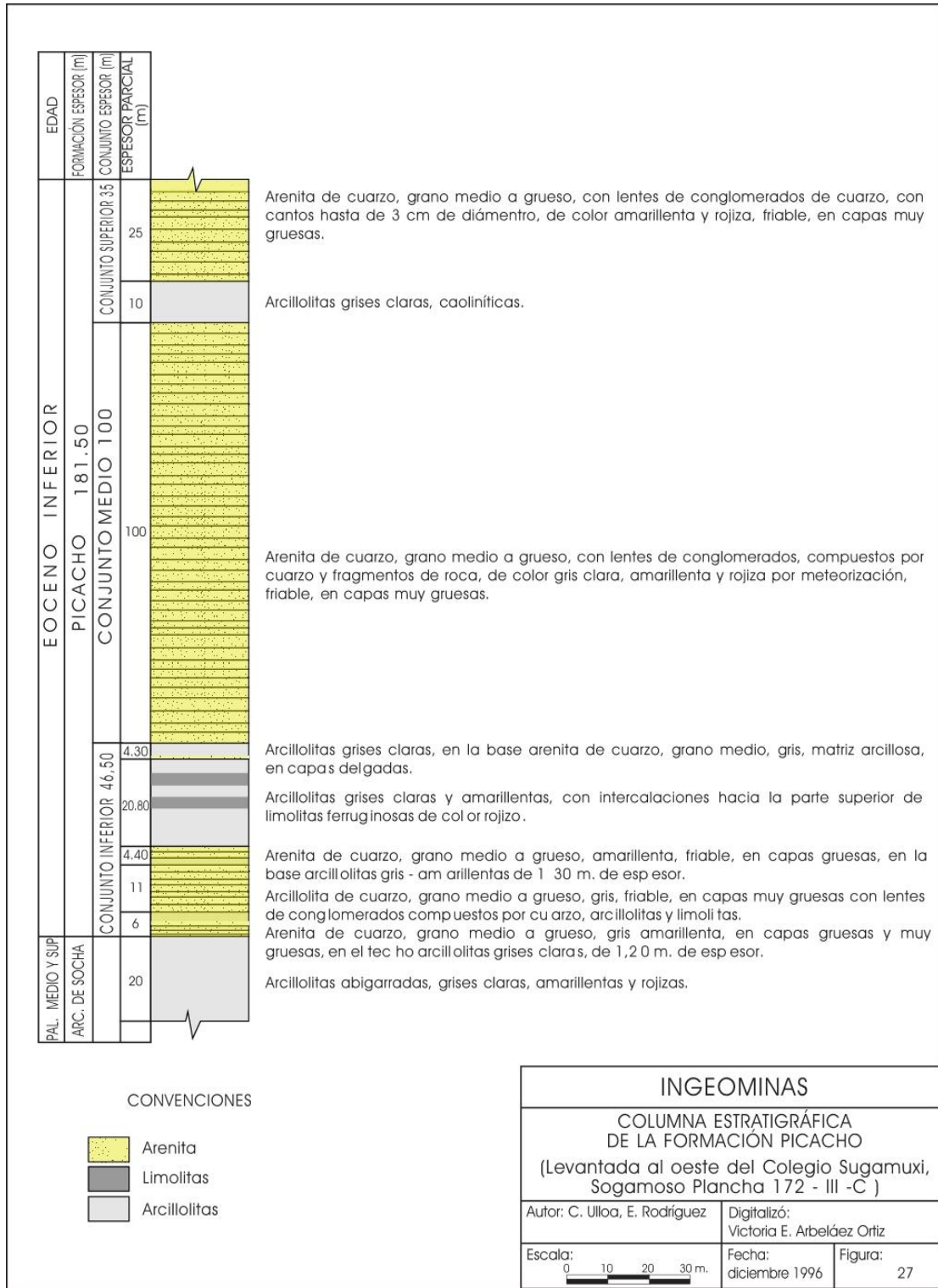
- FORMACIÓN PICACHO (Tp)

Litológicamente esta formación está compuesta por cuarzoarenitas a arenitas conglomeráticas con y sin estructuras físicas en capas medias a bancos de hasta 5 metros, con intercalaciones arcillosas y/o lodosas varicoloreadas, seguidas por capas lenticulares a subtabulares de cuarzoarenitas, subarcosas, litoarenitas conglomeráticas, líticos de cuarzo lechoso y chert. La predominancia litológica y geomorfología de la Formación Picacho conformada de base a tope por una secuencia de capas lenticulares a subtabulares de cuarzoarenitas a arenitas conglomeráticas con niveles de guijos y clastos de hasta 2 cm, redondeados, algunos sets con estratificación cruzada inclinada planar, en artesa y tangencial, mostradas por granodecrecimiento en cada set, y/o tonalidades; otras son capas sin estructuras físicas presentes, seguidas de un paquete de arcillolitas, masivas, color violetas a gris claro y blanco; continúan arenitas a arenitas conglomeráticas en capas muy gruesas tabulares, estratificación plano paralela, masivas, niveles de huevos de paloma hasta 2cm, suprayacidas por arcillolitas masivas, varicoloreadas, a las que suprayacen cuarzoarenitas muy gruesas subtabulares a lenticulares, estratificación cruzada e inclinada de bajo ángulo, capas con algo de matriz arcillosa, color blanco a crema con tonos amarillos, ocre y rojizo, grano medio a muy grueso, con gránulos y guijos, redondeados a subredondeados, guijos diseminados y en lentes. Seguidas de intercalaciones de limolitas y arcillolitas con cuarzoarenitas, muy gruesas a gruesas, color blanco, al aumentar

el espesor de finos disminuye el de las arenitas, pasando de grano grueso a fino, presentan estratificación ondulada paralela y plano paralela y no paralela. Siguen cuarzoarenitas en capas subtabulares muy gruesas, estratificación inclinada planar de bajo ángulo, friables, grano fino a muy fino, masivas, color blanco, crema y violeta a color naranja a rojizo por meteorización, gránulos de cuarzo lechoso suspendidos, costras de oxidación, suprayacidas por cuarzoarenitas de grano medio a fino, redondeados a subredondeados, con guijos de cuarzo lechoso, niveles conglomeráticos con clastos de hasta 1cm, formando un paquete de hasta 22 metros. Cerca al tope de la unidad, se observan capas masivas, muy gruesas a gruesas, subtabulares, estratificación plana no paralela de lentes de conglomerados con cuarzo, chert, sectores silíceos, masivas. (*GEOESTUDIOS LTDA, 2006*).

En el tope del Grupo Socha, se observan 8 metros de cuarzoarenitas algo arcillosas, grano muy fino, estratificación ondulada paralela y no paralela, e inclinada planar de bajo ángulo, suprayacida por 1 metro de arenitas arcillosas de grano muy fino, color gris claro con amarillo en capas medias a gruesas e inclinación planar de bajo ángulo y a la base de la Formación Picacho, se observa una secuencia de cerca de 60 metros de capas lenticulares a subtabulares de cuarzoarenitas a arenitas conglomeráticas con niveles de guijos y clastos hasta de 2cm, redondeados, infiriéndose con esto, un contacto neto a transicional, (no se observan clastos de las capas infrayacentes en las arenitas conglomeráticas). El tope de la Formación Picacho, consta de una secuencia de 18 metros, ultimo nivel, de cuarzoarenitas masivas, en capas muy gruesas a gruesas, subtabulares, estratificación plana no paralela, grano medio a fino, redondeados a subredondeados, con guijos de cuarzo lechoso, niveles conglomeráticos hasta de 1cm, lentes de conglomerado con cuarzo, chert, sectores silíceos. Esta formación tiene un espesor aproximado de 100 metros y fue acumulada durante el Eoceno temprano a medio. (*GEOESTUDIOS LTDA, 2006*). (Ver figura 15).

**Figura 15 Columna generalizada formación Picacho.**



Fuente: Tomado y modificado de GEOESTUDIOS LTDA, 2006.

- FORMACION CONCENTRACION (Tc)

La Formación Concentración incluye todos los estratos del Terciario Medio a Superior que se desarrollan concordantemente sobre las Areniscas del Picacho. Hacia la base, se depositan bancos a capas gruesas de litoarenitas masivas con cuarzo lechoso, chert y cuarzoarenitas blancas interpuestas en capas delgadas a medias de arcillolitas y/o limolitas arenosas, invirtiéndose el proceso hacia el tope. La litología de base a tope, corresponde a litoarenitas, masivas, estratificación inclinada de alto ángulo tangencial y en artesa, color crema, amarillo y lila, líticos de cuarzo lechoso hasta en un 40%, chert negro y pardo hasta 5%, cuarzo rosado y ahumado hasta 1%, granos subangulares a redondeados gruesos a gránulos, oxidada y deleznable, en contacto fallado con cuarzoarenitas a subarcosas, estratificación de bajo ángulo y en artesa, de color gris medio y moradas con materia orgánica y moscovita en trazas, algo deleznable, suprayacidas por cuarzoarenitas de grano fino, blancas, masivas, deleznales con glauconita y materia orgánica en trazas con algunos gránulos suspendidos de cuarzo lechoso e hialino; localmente, bolsones de gránulos de cuarzo hialino. También se observan capas subtabulares de cuarzoarenitas de grano fino y muy fino, interpuestas por láminas de arcillolitas de color naranja, suprayacen interposiciones de capas gruesas de cuarzoarenita a subarcosa, masivas, al tope de la capa estratificación-laminación planaparela y ondulada continua y no continua, algo compactas, color blanco a crema, trazas de materia orgánica y moscovita, oxidación. Bancos de arcillolitas a lodolitas, laminación ondulada continua y no continua, color gris verdoso medio, moscovita en trazas, muy alterada; interposición de capas muy finas a medias de subarcosas a cuarzoarenitas, masivas, al tope ondulitas de corriente bidireccionadas, líticos de opacos, trazas de glauconita, oxidadas y costras de óxidos; arenitas lodosas a arcillolitas arenosas, masivas, en capas medias a muy gruesas con materia orgánica, oxidadas, muy alteradas, moteadas, colores lila, blanco y crema, otras con color pardo y crema; arcillolitas localmente lodolitas, varicoloreadas (bioturbadas), moteados gris verdoso claro, lila, morado,

amarillo y crema y arcillolitas de color gris verdoso medio muy oxidadas. Suprayace a esta arcillolitas unas arcosas líticas muy alteradas, arcillolitas, masivas, varicoloreadas gris verdoso claro a medio, ocre, lila, moradas y crema, suprayacen gránulos, sueltos, gruesos de cuarzo lechoso. Siguen bancos de hasta 10 metros de cuarzoarenitas y arenitas arcillosas masivas, en capas muy gruesas, subtabulares a lenticulares, con niveles de conglomerados a arenitas conglomeráticas de grano muy fino a fino, con cuarzo lechoso hasta de 2cm, redondeados y matriz arcillosa, separadas por capas medias a muy gruesas de arcillolitas a limolitas y bancos de hasta 50 metros de arcillolitas abigarradas (gris, blanco con tonos rojizos, ocre, verdoso y amarillo), estratificación planaparela, en capas medias con interposiciones de cuarzoarenitas, en capas tabulares a subtabulares, masivas, grano muy fino, subredondeado, friable y arcillolitas limosas muy alteradas, color crema y tono rojizo y amarillo. Arcillolitas, color crema a gris claro a medio y tonos ocre y rojizo, por meteorización; Continúan capas macizas, muy gruesas a medias, lenticulares a subtabulares, estratificación plano paralela, ocasionales lentes de limolitas arenosas a arenitas limosas y arcillolitas color gris verdosa con niveles de limolitas, en capas muy gruesas, tabulares, estratificación ondulada no paralela y plano paralela, suprayacida por arenitas limosas a limolitas arenosas, masivas en capas tabulares medias, grano fino, color crema y amarillo. Siguen secuencias de hasta 20 metros de cuarzoarenitas, masivas en capas lenticulares a subtabulares, capas medias a gruesas, grano muy fino, algo arcilloso, colores crema a blanco. Cuarzoarenitas a subarcosas en capas delgadas y medias, subtabulares y lenticulares, con laminación ondulada paralela continua, grano fino y muy fino, abigarradas, color crema, amarillo pardo y rojo. Interpuestas, arcillolitas a limolitas, masivas en capas muy gruesas con lentes de limolitas arenosas a arenitas limosas; al tope de la unidad, bancos de arcillolitas masivas, en capas delgadas a muy gruesas, tabulares a subtabulares, color gris a crema, gris claro, tonos cafés, muy meteorizadas, intercalaciones de arenitas limosas de grano muy fino. Se encuentran 6 metros de capas subtabulares de cuarzoarenitas de grano fino y muy fino, interpuestas por capas

laminadas de arcillolitas de color naranja, infiriéndose con esto, un contacto transicional. Se observan espesores desde 605 hasta 1180 metros. A la Formación Concentración, según su contenido de polen en varios horizontes, se le asignan edades Oligoceno inferior a medio. En algunas partes está también presente el Eoceno Medio y Superior (GEOESTUDIOS LTDA, 2006). (Ver Anexo 2).

### **5.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

La geología que actualmente muestra el Departamento de Boyacá ha sido el resultado de un largo proceso de cambios y modificaciones tectónicas y estructurales que se han presentado a través de la Historia Geológica de la parte más septentrional de los Andes Suramericanos y que han determinado el tridente cordillerano manifiesto en Colombia. (Rodríguez y Solano, 2000)

En un análisis estructural general del área, se puede apreciar como característica más sobresaliente la orientación preferencial de las estructuras en dirección SW–NE, afectadas por fallas de tipo inverso que levantan y deforman la cobertera sedimentaria cretácica y cenozoica. En el bloque colgante de la Falla de Soapaga, la cobertera del basamento económico (Macizo de Floresta) se distingue por presentar fuerte deformación, con presencia de plegamiento y fallamiento, con vergencia sureste. El bloque yacente de la Falla de Soapaga, en el flanco occidental del Alto de Pisba, se distingue por presentar fuerte deformación posterior a las estructuras preexistentes, con presencia de plegamiento y fallamiento de vergencia noroeste y sureste. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

En el sector Occidental se involucran, principalmente, rocas cretácicas hasta rocas pre-devónicas, en profundidad, las cuales se levantan con respecto a la cobertera sedimentaria Cretácica y Paleógena del resto del área. Se interpreta como una

estructura asociada al levantamiento reciente de la Cordillera Oriental durante la Orogenia Andina, como producto de una reactivación con variación en el sentido del desplazamiento de los bloques (inversión tectónica). Representa un sector del eje y flanco oriental de una gran estructura anticlinal de forma alargada en dirección NE-SW (Anticlinal de Tibasosa), nucleada por rocas del Macizo de Floresta. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

Está limitado longitudinalmente por las fallas inversas de Boyacá y Soapaga al oriente, con rumbo NNE-SSW, las cuales constituirían la cola de caballo de la terminación sur de la Falla de Bucaramanga. La deformación sufrida por las unidades involucradas es muy fuerte como se refleja en inversiones de capas y en algunos plegamientos y fallamientos (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

El sector central del departamento de Boyacá corresponde a la sucesión cretácica y cenozoica al oriente de la Falla de Soapaga y occidente de la Falla de Gámeza, en el extremo del flanco occidental del Alto de Pisba. Estos depósitos presentan alta deformación producto de los movimientos de la Orogenia Andina y posteriores fases tectónicas cenozoicas; el solevantamiento final, posterior a la formación del Anticlinorio de Floresta, se realiza en forma de bloque, a lo largo de la Falla de Soapaga y posteriormente a lo largo de la Falla Gámeza, dando como resultado una combinación con vergencias encontradas y predominio de un homoclinal en superficie, que en profundidad, correspondería a una estructura sinforme (sinclinal) que continua el tren estructural predominante en el área, con rumbo NE-SW. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

Al oriente de la Falla Gámeza, la geología estructural se caracteriza por presentar pliegues anticlinales (Pesca, Iza o Romero y Boca de Túnel o Cuítiva) y sinclinales asociados a propagación de fallas (Mortua, El Alto, San Miguel y Cuítiva), afectados a su vez por fallas inversas con vergencia SE y lineamientos direccionales con rumbo NW-SE, generalmente dextrales, que deforman

localmente la secuencia de rocas cretácicas, paleógenas y neógenas en el bloque yacente de la Falla de Soapaga. El sollevamiento final, posterior a la formación del Anticlinorio de Floresta, se realiza en forma de bloques a lo largo de la Falla Gámeza, dando como resultado, una combinación de plegamiento y fallamiento considerable posterior a las deformaciones preexistentes (anticlinales y sinclinales), con predominio de estructuras plegadas, amplias, con expresión y extensión regional limitada, sesgadas al tren estructural, predominante en el área, rumbo NE-SW, afectando rocas de las unidades aflorantes. En este Sector es claro apreciar un estilo estructural característico, donde es común la formación de pliegues por propagación de fallas con despegues intraformacionales (algunos por efecto de propagación de falla). Por último, plegamientos como producto de fallamiento conjugado, de componente vertical inverso, con rumbo general NNE-SSW a NE-SW y vergencia al occidente, con fallas direccionales dextrales y fracturamiento con rumbo general N-S, diagonal al rumbo de los ejes de las estructuras. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

#### **5.4 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA**

El Macizo de Floresta constituye parte esencial de la evolución estructural del área y específicamente de la sedimentación sobre las áreas circunvecinas. En él se diferencian la unidad tectono sedimentaria Paleozoica, caracterizada por rocas sedimentarias, acumuladas en un margen pasivo, sobre un basamento cristalino Precámbrico (GEOESTUDIOS LTDA, 2006), para después ser deformadas debido al tectonismo producto de la Orogenia Hercínica, acompañada por intrusiones félsicas como el Stock de Otengá. Suprayaciendo dicha secuencia se encuentra la unidad tectónica jurásico-cretácica temprana, compuesta por la Formación Girón, que representa acumulaciones de rift, seguidos por la sucesión Cretácica Basal de las formación Tibasosa, Une y algunos segmentos de la Formación Chipaque, acumulada en un ambiente tectónico de post-rift. La intensa deformación de estas

unidades se refleja en inversiones de polaridad y exhumación de unidades basales. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

El macizo de Floresta, que aflora al norte del Bloque y que en el área se encuentra recubierto por la secuencia cretácica basal, está delimitado al oriente por la Falla Soapaga, de carácter normal inicialmente y cuyos movimientos cesan a partir del Aptiano. Al reactivarse dicho sistema pero en sentido inverso, afecta la secuencia preservada y las estructuras preexistentes en el norte con una deformación de tipo *Trishear*, exhibiendo en la actualidad similitudes con modelos que en el sector correspondería al Anticlinal de Tibasosa y afectaría en menor grado la deformación del tipo pliegues por flexión de falla que corresponderían al Sinclinal de Llanogrande y Anticlinal de Tobacá. Continúa la sedimentación de las unidades Cretácicas Superiores hasta la Formación Guaduas, donde se desarrollan pliegues (Anticlinales de Pesca, Iza o Romero, Boca Túnel y sinclinales de Mortua, El Alto, San Miguel) a partir de estructuras heredadas del basamento. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

Después de la sedimentación Cretácica Tardía-Cenozoica Temprana se inicia la actividad tectónica asociada al levantamiento Andino que deforma las estructuras preexistentes. Para el Paleoceno Temprano, son evidentes los efectos de la inversión tectónica, asociada a pulsos iniciales, los cuales provocan una erosión importante y se acumulan las rocas del Grupo Socha sobre la Formación Guaduas, hasta el Eoceno temprano. La Falla Soapaga, ya con carácter inverso, actúa como frente de cabalgamiento que controla la sedimentación y se inicia la deformación de los pliegues originados en un estilo de plegamiento por propagación de falla sobre el bloque yacente de dicha falla asociados a estructuras heredadas en el basamento. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

Durante el Eoceno medio, se presentan movimientos orogénicos fuertes que marcan el límite entre el techo del Grupo Socha (Formación Arcillas de Socha) y la

*Formación Picacho*, dando origen a un cambio en el régimen de sedimentación. El levantamiento se hace más fuerte evidenciado por la continuidad en el desarrollo de la Falla Soapaga y el desarrollo incipiente de la Falla Santander. Además, la generación de una secuencia de fallas generadas hacia el antepaís (*Foreland*), con vergencia occidental, en una tectónica de imbricación de fallas (*thrust sheets*) y un mecanismo de deformación con rompimiento fuera de secuencia (hacia atrás), las cuales corresponden a las fallas Gámeza, El Batán, Sunguvita, Tópaga y la Falla de Suaneme, en el bloque colgante de la Falla Soapaga. Durante esta fase se genera y desarrolla una deflexión en las unidades presentes entre la Falla Soapaga y la Falla Gámeza, haciendo que descendan de su nivel regional, lo cual conlleva a un mayor pronunciamiento de la estructura sinforme. Se infiere que en estados syn-post Falla Soapaga y pre Falla Gámeza se desarrolla una tectónica de tipo pliegues por flexión de falla (*fault-bend fold*), la cual se asocia a una falla ciega (Falla Santander) que se propaga como flat en la Formación Chipaque hasta un punto donde comienza a ascender cortando la secuencia estratigráfica hasta la Formación Guaduas donde encuentra un horizonte estratigráfico adecuado para adoptar un nuevo flat. El hecho que este sistema estructural se encuentre presente en el norte y no acá permite inferir que ha evolucionado a través del tiempo (progresivo) y no en una sola etapa (continuo) ya que se conoce que las estructuras que cambian su geometría en el rumbo son aquellas que evolucionan a través del tiempo (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

La sedimentación Paleógena finaliza con la *Formación Concentración*, depositada por fuertes efectos de la orogenia andina. Se inicia una reactivación tectónica en la que se continua el desarrollo de la tectónica de imbricación de fallas (*thrust sheets*) y se inicia el desarrollo de la Falla Tota, retrocabalgamiento de la Falla El Batán, la Falla El Chorro asociada a la Falla Sungavita y posteriormente la Falla Iza que corresponde a una estructura de rumbo dextral que afecta tanto las unidades como las estructuras entre la Falla

Soapaga y la Falla Tópaga. Esta discontinuidad se relaciona a una estructura heredada de la tectónica del basamento que utilizan suturas o zonas de debilidad preexistentes, afectando unidades suprayacentes y generando nuevas estructuras como pequeñas fallas de ajuste. Así mismo, facilita el emplazamiento del cuerpo efusivo, el cual genera ligeros replegamientos, enmascara pliegues preexistentes y afecta las discontinuidades estructurales, deformación clasificada como pliegues forzados o *forced folds*. Con este levantamiento, se inicia un proceso erosivo, depositando, discordantemente rocas recientes en la paleotopografía. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006)

## 5.5 GEOMORFOLOGÍA

Partiendo del concepto básico de la Geomorfología como el estudio de las formas del relieve terrestre y sus procesos de formación, es importante reconocer que la génesis de los rasgos geomorfológicos presentes actualmente, está estrechamente ligada a la interacción de la geología estructural de la zona con la evolución tectónica regional, definiendo de este modo estructuras morfológicas evidenciables en superficie. Recientemente y con un mayor impacto se ha perfilado la acción del hombre como agente moldeador del paisaje, al alterar directamente tanto la capa vegetal como el sustrato rocoso.

Para el caso del área de estudio se pudo apreciar siete geoformas:

- **Talúd:** Acumulación formada por los fragmentos resultantes de la meteorización mecánica de las rocas. La masa de derrubios se forma como resultado del transporte por gravedad a una distancia pequeña. (Cuervo G y Gómez J, 2012).

- **Abanicos aluviales:** Presentan pendientes suaves a moderadas, rara vez inundados, ligera a moderadamente disectados, y se ubican en la desembocadura de quebradas. (Cuervo G y Gómez J, 2012).
- **Escarpes de falla:** Forma de relieve fundamental que aparece como consecuencia de los movimientos tectónicos. Es la desnivelación topográfica entre dos bloques fallados, y que tiene una parte estructural y otra erosiva en la desnivelación topográfica (Moreno M y Fечи Y, 2013).
- **Lomos o cimas estructurales:** Lomo o abombamiento de la superficie del terreno acompañada por plegamiento y fallamiento. Las dimensiones pueden variar fuertemente de unas decenas de metros a kilómetros o más dando lugar a cerros o montañas enteras. (Cuervo G y Gómez J, 2012).
- **Laderas denudacionales:** constituidas esencialmente donde afloran unidades competentes a la erosión. Zona estable (Moreno M y Fечи Y, 2013)
- **Facetas triangulares:** morfología que corresponde a laderas relictas que aparecen en torno a relieves estructurales, con una geometría en planta triangular cuyo ápice aparece enfrentando el escarpe (Arauzo T et.al, 1996).
- **Valles en V:** Los valles con un perfil transversal en forma de v son típicos en los cursos altos de los ríos. Las dos vertientes laterales presentan fuertes pendientes, y el río erosiona verticalmente (Cuervo G y Gómez J, 2012).

En las figuras 16 y 17 se muestran las geoformas identificadas a lo largo del área sondeada. La formación Concentración y las cotas más bajas de la formación Picacho se caracterizan morfológicamente por colinas de presión y depósitos aluviales que se ubican hacia los márgenes de los drenajes principales. La geomorfología para estas formaciones gran parte son producto de la acción de

agentes erosivos y de la tectónica compresiva de la cuenca de la Cordillera Oriental.

En el municipio de Pesca, son típicas las geoformas estrechas a la erosión fluvial, dando lugar a valles en V, muy característicos de esta localidad.

Pesca tiene todos los rasgos de las diferentes pendientes. Sus geoformas van desde los abanicos aluviales que se forman en las partes bajas del río hasta escarpes, que se generan en zonas de páramos con máximas pendientes.

Las geoformas relacionadas a la falla inversa de Soápaga son las facetas triangulares y las colinas de presión que se pueden detectar en todo el límite del contacto de la formación Concentración y Picacho.

Figura 16 Geoformas identificadas en el área de estudio.

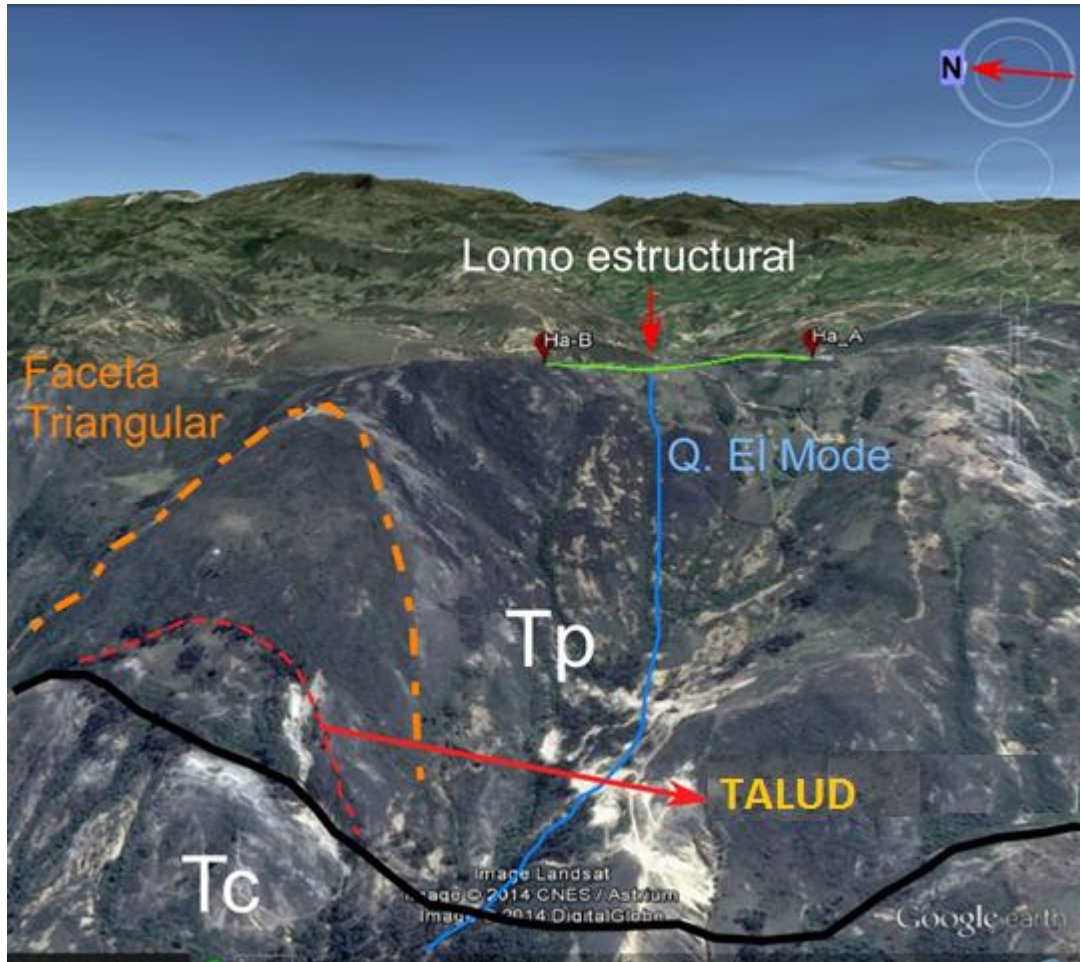
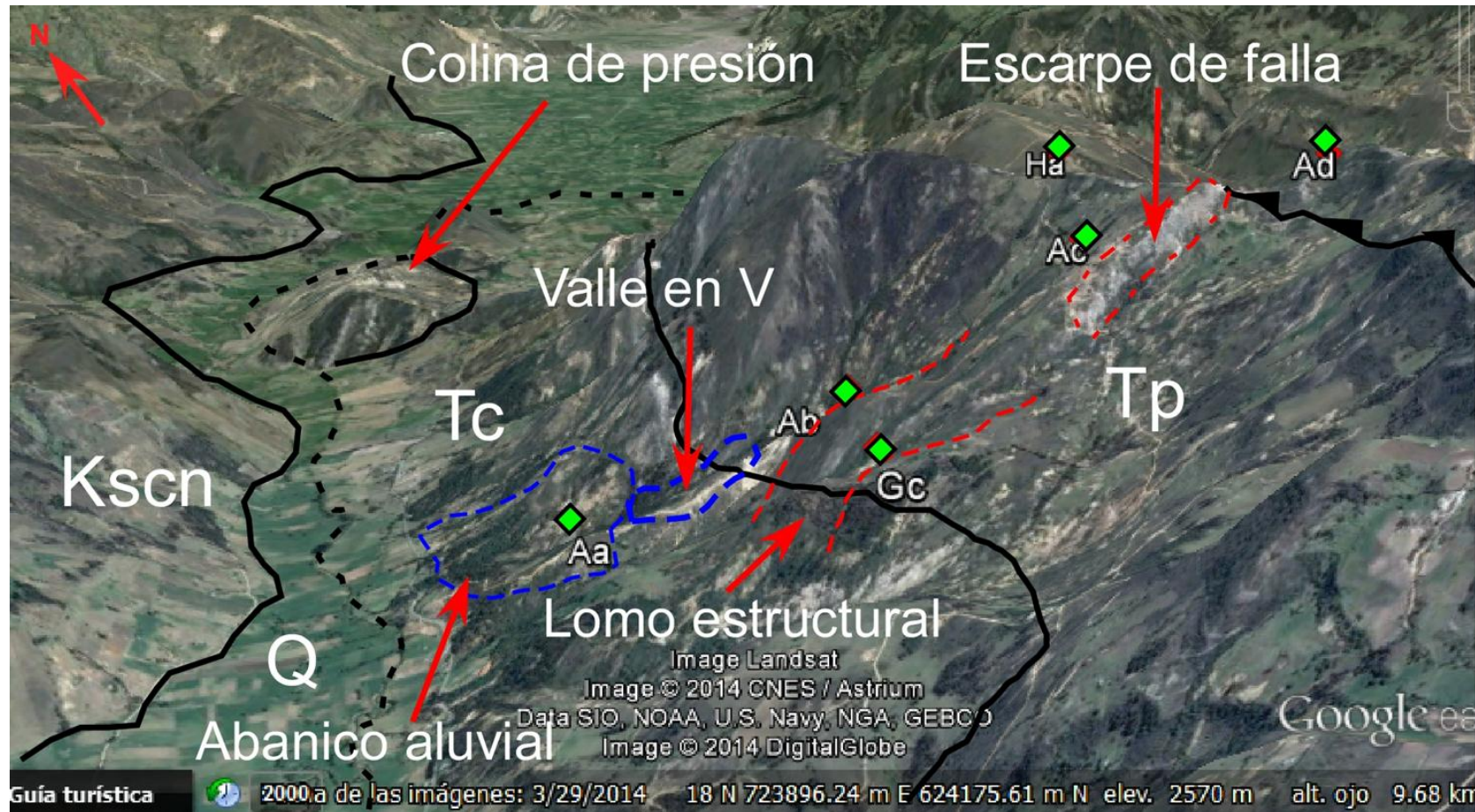


Figura 17. Geoformas identificadas en el área de estudio



Fuente. Tomada y editada de Google Earth

## 5.6 MINA LA EMILIA

La mina La Emilia, ubicada en la vereda Mochaga, del Municipio de Pesca – Boyacá, se conoce como una mina a cielo abierto, dedicada a la explotación de Asfaltita. (Ver Figuras 18 y 19)

La Asfaltita es un hidrocarburo sólido derivado del petróleo, su color es negro brillante hasta negro mate. Es un producto mineral, liviano, quebradizo, con escasas impurezas y alto poder calórico, de aspecto resinoso y fractura conoidal en las formas frescas, dotadas de un punto de fusión elevado, superior a 110° C.

Químicamente están constituidas por hidrocarburos muy pobres en oxígeno y parafinas cristalizables, siendo compuestos de alto peso molecular. En su génesis intervienen factores físicos – químicos y procesos geológicos de índole dinámica, en escala y magnitud variable. Su origen es debido a la metamorfosis de un petróleo asfáltico que, debido a cambios de temperatura y presión creciente, seguiría los pasos siguientes: Petróleo asfáltico, Asfalto blando, Asfalto duro, Asfaltitas, Pirobitúmenes asfálticos. (Gómez D. et.al, 2005)

Este tipo de material es característico de la formación Picacho debido a que esta posee las mejores características de roca almacén en el área, principalmente porque casi en su totalidad los rezumaderos y las impregnaciones de petróleo observados están ligados a la arenitas de esta formación. (GEOESTUDIOS LTDA, 2006).

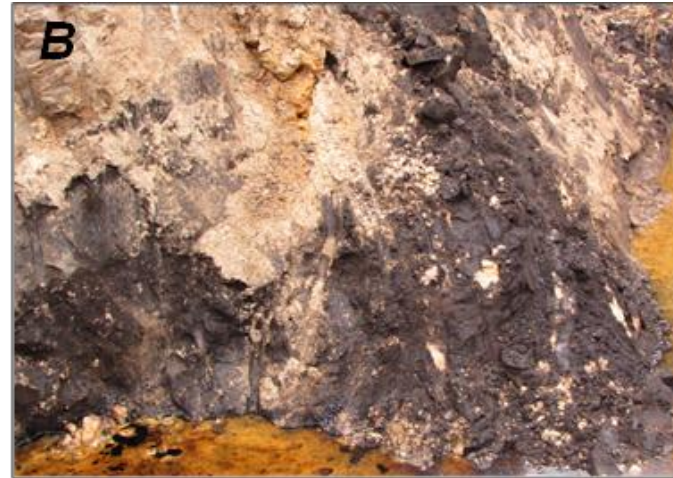
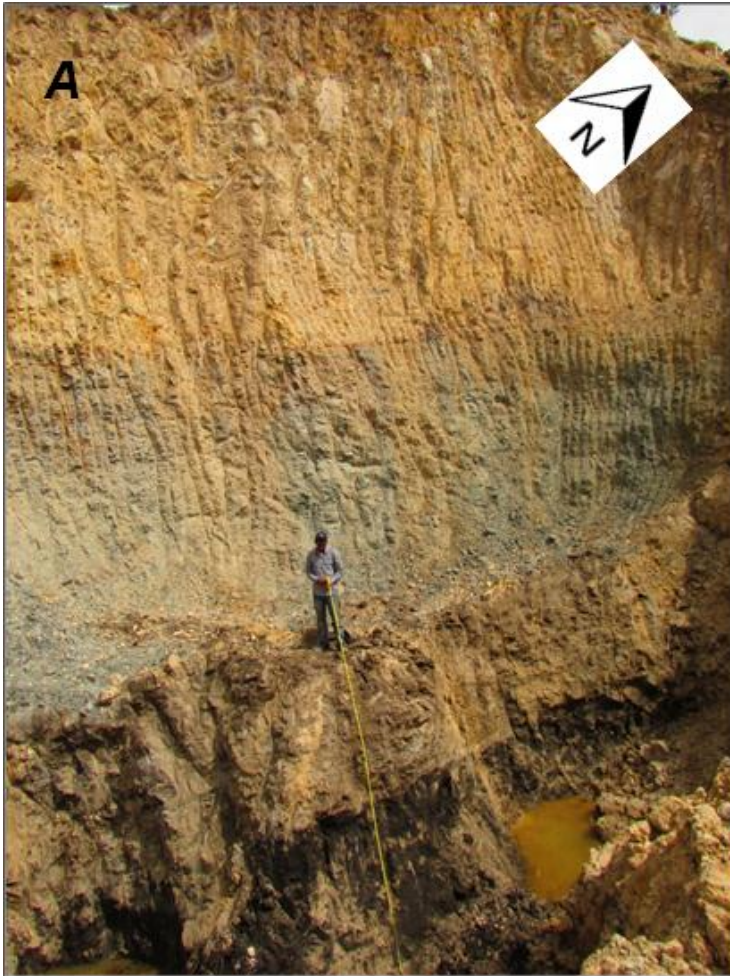
El trabajo realizado en la mina consta de la adquisición de una calicata eléctrica (CE) limitada en su extensión por la fuerte topografía presente en el área. Esta tiene como fin constatar el grado de incertidumbre del método aplicado en un sitio con las características litológicas definidas.

El resultado geoelectrico obtenido se apoyó en la columna estratigráfica (Anexo 3) levantada en la mina La Emilia, en donde se aprovechó los trabajos realizados por la minería de la zona, que dejó expuesta parte de la roca, para de este modo definir las unidades geoelectricas presentes. Estas fueron corroboradas con la literatura encontrada de dicho sector.

**Figura 18. Panorámica Mina la Emilia.**



Figura 19 A .Panorámica Mina la Emilia., B y C: paquete con arena impregnada de la mina.



## 6. EQUIPO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) precisa de la utilización de un equipo de prospección geoelectrica (GeoAmp202 diseñado y de propiedad de SUBSUELO3D Figura 20 y 21) que aplica el método de resistividad DC. Este equipo consta de:

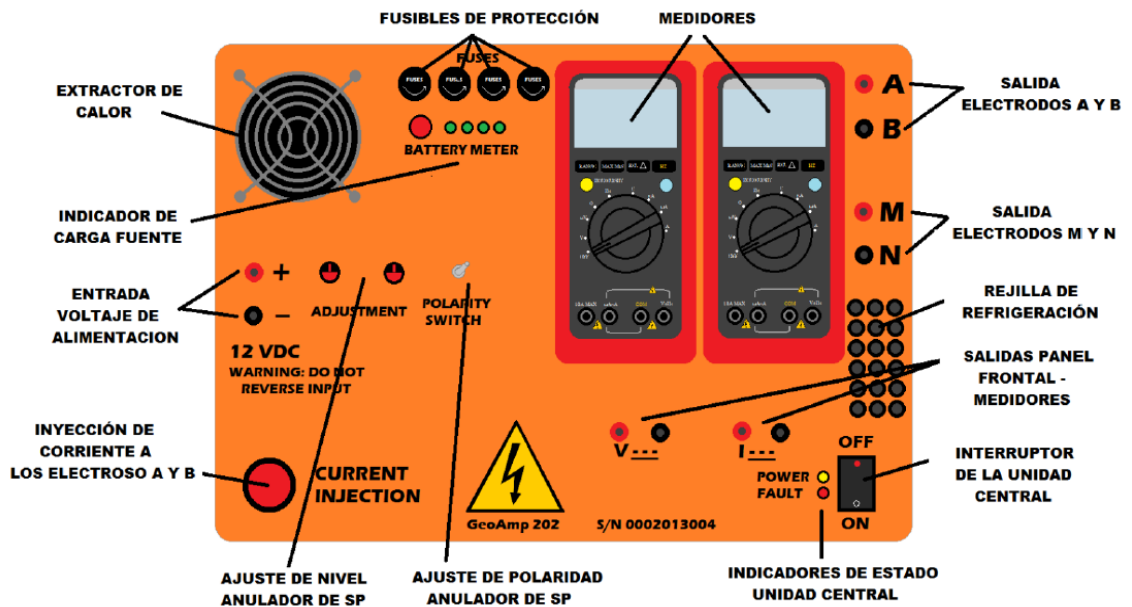
- 1 Unidad central.
- 2 Medidores para voltaje y corriente UNI-T Ref. UT61B.
- 4 Electrodo de acero inoxidable de 60 centímetros de longitud.
- 2 Carretes metálicos con 300 metros de cable Centelsa AWG 14 c/u.
- 2 Carretes metálicos con 100 metros de cable Centelsa AWG 14 c/u.
- 4 Soportes metálicos para carretes.
- 8 Conectores para el panel frontal.
- 2 Almádanas para fijar carretes y electrodos.

La unidad central genera un voltaje DC de 200 voltios con una corriente máxima de 4 amperios, Los Cuatro electrodos de acero inoxidable permiten generar el circuito con el subsuelo para inyectar corriente y medir la diferencia de potencial, los dos multímetros se encargan de registrar la corriente que circula entre los electrodos A y B, y de medir la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, los dos carretes metálicos con 300 metros de cable rojo (A, B) y los dos carretes metálicos con 100 metros de cable amarillo (M, N) permiten diseñar un arreglo electrodo para realizar SEVS de hasta 600 m de apertura máxima. (Giraldo, 2013)

El equipo geoelectrico es alimentado por una fuente de tensión de 12 voltios DC, es importante revisar siempre que el nivel de carga sea el adecuado para el

funcionamiento del equipo, de lo contrario el equipo podría no funcionar, también se recomienda evitar el contacto directo de la batería con el suelo para impedir una descarga prematura de esta.

**Figura 20 Panel Frontal de la unidad central GeoAmp 202.**



Fuente: Tomado de Giraldo, 2013.

**Figura 21 Equipo utilizado en campo.**



## 6.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La unidad central tiene unas dimensiones de 46.2 x 34.0 x 17.0 cm. con 6.5 kg de peso aproximadamente. Los rangos de temperatura de operación es de  $-0^{\circ}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  y la temperatura de almacenamiento de  $-10$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ . (Ver Figura 20) La unidad central fue instalada en una caja Pelican moldeada por inyección, impermeable, irrompible, resistente al polvo y la corrosión. Fabricada en polipropileno copolímero estructural ultrarresistente a los impactos y fatiga. (Giraldo, 2013).

En cuanto a las especificaciones técnicas el equipo tiene una potencia de salida de 800 W máximo y un voltaje de salida de 200 VDC máximo. Tiene una corriente de salida de 4 A máximo y capacidad de 4 electrodos (Giraldo, 2013).

Respecto a la fuente de tensión, esta puede ser una batería convencional de las que usan los automóviles. La capacidad de almacenamiento de la batería, la cual se mide en amperios por hora, permite estimar el tiempo remanente de operación antes de la siguiente recarga (Giraldo, 2013).

La resistividad del terreno es un parámetro específicamente ligado a la naturaleza de los materiales geológicos, y puede medirse haciendo pasar la corriente por el mismo a través de los cuatro electrodos que se encuentran cada vez a una mayor distancia entre sí, obteniendo un Sondeo eléctrico Vertical (SEV) (Lugo, et.al 2008).

## 7. METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN

En el marco del convenio 002 del 2012 se definió entre la UIS y Ecopetrol el diseño para la campaña de prospección y caracterización geoelectrica a realizar en el área de Pesca, Sogamoso y sus alrededores.

Fueron realizados 37 SEVs de los cuales siete buscan caracterizar los sectores cercanos a la mina de Asphaltita La Emilia. Estos se adquirieron con el dispositivo tetraelectrónico simétrico de Schlumberger con una apertura de la línea AB/2 entre 200 y 300 metros.

El proceso de adquisición inicia con la ubicación de las coordenadas de cada SEV y la valoración de la topografía para determinar si es apta para realizar la totalidad del tendido garantizando datos de calidad.

Una vez echa esta apreciación se procede así:

**a) *Ubicación de la unidad central y los cuatro carretes:*** La unidad central debe ir al frente de los carretes MN correspondientes al cable de color amarillo, equidistantes a estos se disponen los carretes que contienen cables rojos para los electrodos AB como muestra la Figura 22.

**Figura 22 Montaje inicial del equipo, con la correcta disposición de los carretes.**



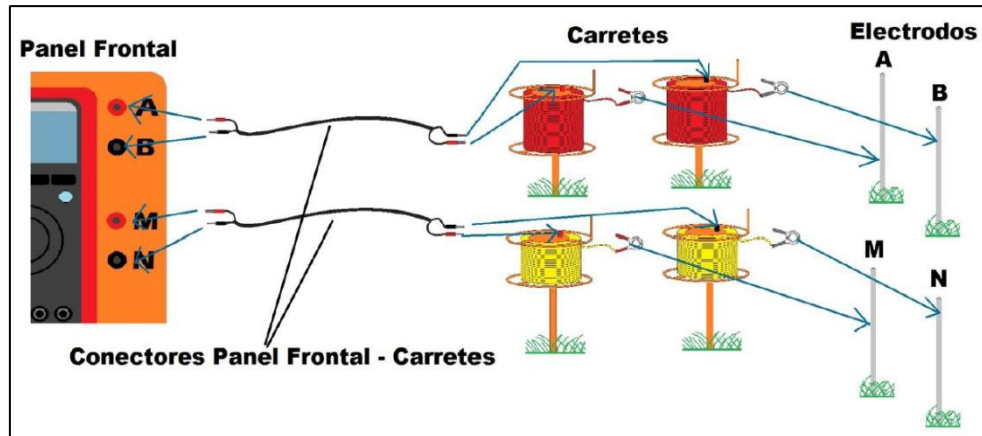
**b) *Ubicación de los cuatro electrodos:*** se clavan los electrodos a una distancia ya fijada con cintas guías, verificando el buen contacto con el suelo, preferiblemente a una profundidad mínima de 6cm. (Ver Figura 23)

**Figura 23. Montaje inicial del equipo, ubicación de los electrodos**



c) **Realizar conexiones:** Se procede a conectar las pinzas en los respectivos electrodos (cable amarillo: MN. Cable rojo: AB) procurando un buen contacto y cerciorando que en la unidad central las conexiones tengan la misma polaridad. (ver Figura 24)

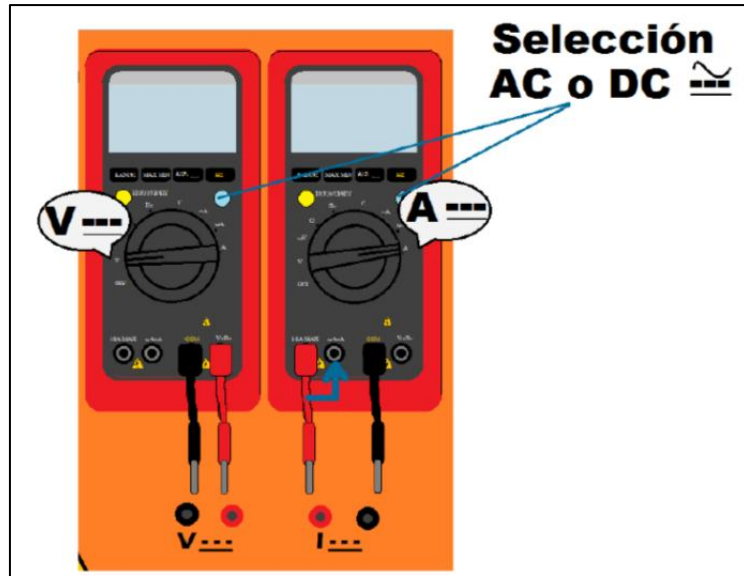
**Figura 24 Conexión panel frontal-carretes-electrodos.**



Fuente: Tomado de Giraldo, 2013.

d) **Conexión y configuración de los medidores:** Los medidores se emplean para registrar la intensidad de corriente que circula entre los electrodos A y B, así como para medir la diferencia de potencial entre los electrodos M y N. Estos se conectan directamente al panel frontal teniendo en cuenta la correspondencia entre los colores y la polaridad como se observa en la Figura 25. El medidor de la derecha registra la intensidad de corriente y se recomienda adicionalmente disponerlo en una escala menor para evitar la avería del equipo o del fusible de protección que este posee. Es importante seleccionar en los medidores el modo DC ya que el equipo trabaja con corriente continua.

Figura 25. Conexión y configuración de los medidores en el panel frontal.



Fuente: Tomado de Giraldo, 2013

e) **Energizar el equipo:** Se conecta la batería a la caja central por medio de los conectores y se le inyecta corriente al sistema empleado. Cabe recalcar la importancia de los elementos de protección ya que la diferencia de tensión empleada representa un riesgo eléctrico. (Ver Figura 26)

Figura 26 Inyección de corriente al subsuelo



Fuente: Tomado de: Manual de Operación del Equipo GEOAMP 202

f) **Captura de datos:** Luego de inyectar corriente al subsuelo a través de los electrodos A y B, se visualizan en el medidor izquierdo los valores de potencial entre los electrodos M y N y en el medidor derecho el valor de la corriente que circula por los electrodos A y B. para consignar los datos medidos se congelan las pantallas de los medidores oprimiendo los botones HOLD respectivamente, se recomienda efectuar una lectura rápida y simultánea de los valores de V e I (potencial e intensidad de corriente)

**Figura 27 Captura de datos en los medidores.**



Fuente: Tomado de Giraldo, 2013.

g) **Toma de Datos:** los datos obtenidos se consignan en la tabla (Anexo 4) suministrada por SUBSUELO3D, en la cual se encuentran definidas las aperturas de los 4 electrodos para un arreglo tipo Schlumberger.

## 7.1 CONSIDERACIONES DE ADQUISICIÓN

- Para preservar la carga de la batería es indispensable evitar el contacto directo con el terreno.

- Es importante conocer que los cambios climáticos (pluviosidad) influyen de forma directa en los valores de resistividad.

En caso de observar valores anómalos se procede a:

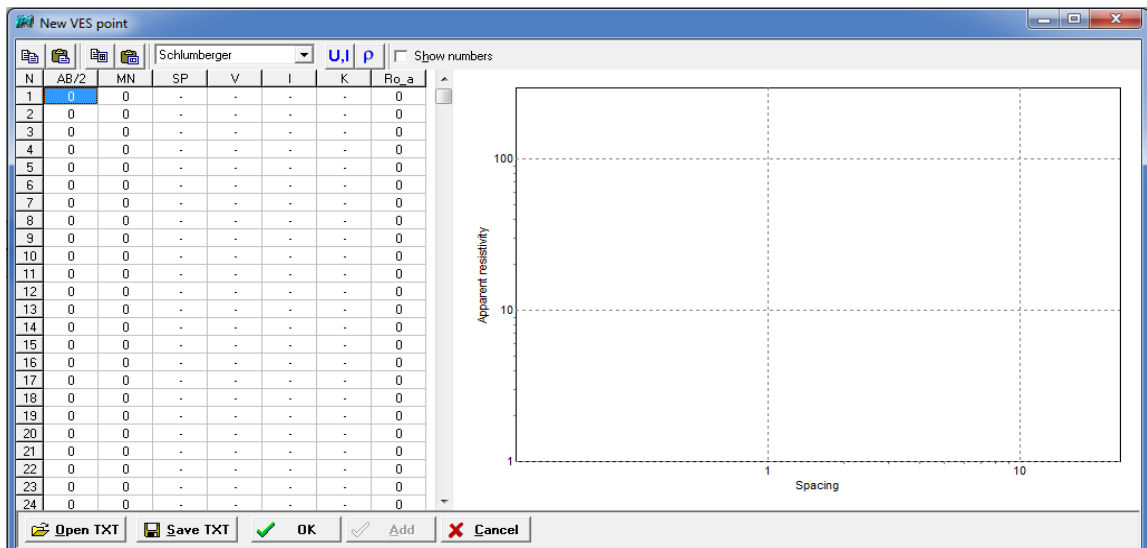
- Revisar las conexiones de los electrodos así como la conexión de la fuente de energía con el equipo central, estos deben hacer buen contacto.
- Verificar que los electrodos no estén puestos sobre relleno, ni rocas aloctonas.
- Invertir la polaridad de la corriente.
- Examinar que no existan fuentes de energía externa (líneas de tensión, alumbrados, entre otras).

## 8. SOFTWARE DE PROCESAMIENTO (IPI2WIN)

Es un programa diseñado para el procesamiento e interpretación de datos adquiridos mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Calicatas Electricas (CE), con varios de los arreglos comúnmente utilizados: Wenner, Schulmberger y Dipolo-dipolo, entre otros, la imagen 28 muestra los interfaz del software en la que se introducen los datos adquiridos en campo para un arreglo determinado. Es distribuido por Geoscan-M Ltda y fue elaborado por los profesores de la Universidad Estatal de Moscú M.V. Lomonósov: Alexei A. Bobachev, Igor. N. Modin y Vladimir A. Shevnin. (Pérez, 2009)

Este software permite realizar la interpretación de las curvas graficadas a partir de los valores de AB/2 vs. Resistividad aparente (Ver Figura 29), para generar pseudosecciones de resistividad aparente y perfiles geoelectricos donde se esquematicen en profundidad la distribución vertical y espesor de las capas resistivas interpretadas.

**Figura 28 Ventana de procesamiento IPI2WIN. Tomada de IPI2WIN.**

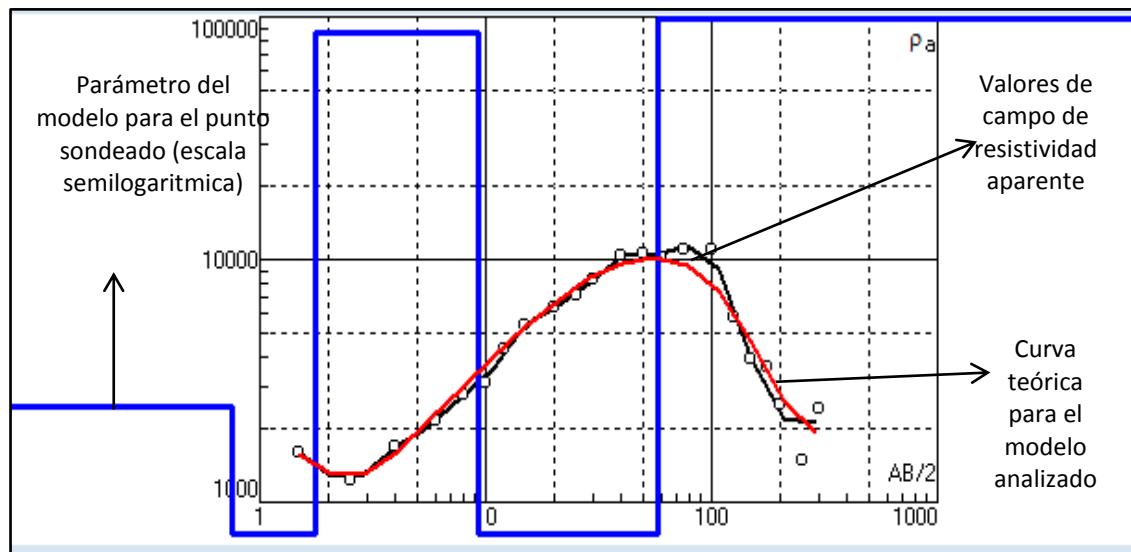


## 9. RESULTADOS

Los datos obtenidos en la ejecución de los sondeos eléctricos verticales, fueron seleccionados discriminando datos que no se ajustaban a la tendencia de la curva teórica.

Los valores de resistividad encontrados y su correlación litológica se resumen en la siguiente tabla:

**Figura 29** Curva generada por el software IPI2WIN



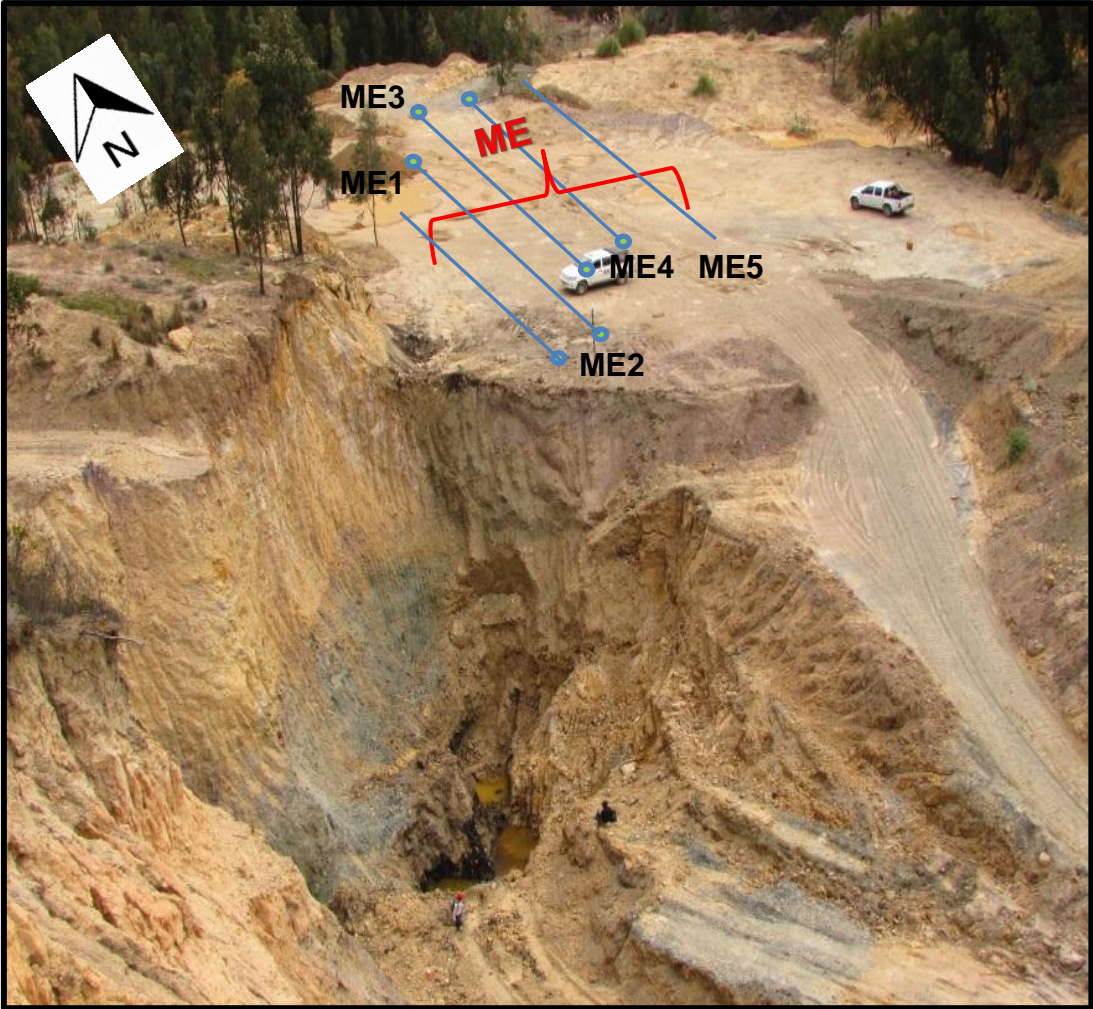
**Tabla 4** Tabla de correlación de resistividades y composición litológica de las unidades geotectónicas

<b>ESTIMACION LITOLÓGICA</b>	<b>RANGO DE RESISTIVIDAD (<math>\Omega</math>.m)</b>	<b>UNIDAD GEOELECTRICA</b>
<b>ARCILLA</b>	<b>1-100</b>	<b>I</b>
<b>LIMO Y ARCILLA</b>	<b>0-100</b>	<b>II</b>
<b>LIMO Y ARENA</b>	<b>10-500</b>	<b>III</b>
<b>ARENA ARCILLOSA</b>	<b>100-400</b>	<b>IV</b>
<b>ARENA</b>	<b>300-1000</b>	<b>V</b>
<b>ARENA Y GRAVA</b>	<b>200-5000</b>	<b>VI</b>
<b>ARENA SECA</b>	<b>80-2000</b>	<b>VII</b>
<b>ALUVION</b>	<b>100-500</b>	<b>VIII</b>
<b>GRAVA</b>	<b>1000-5000</b>	<b>IX</b>
<b>CONGLOMERADO</b>	<b>3000-10000</b>	<b>X</b>
<b>CUARZOARENITA</b>	<b>1000-200000</b>	<b>XI</b>

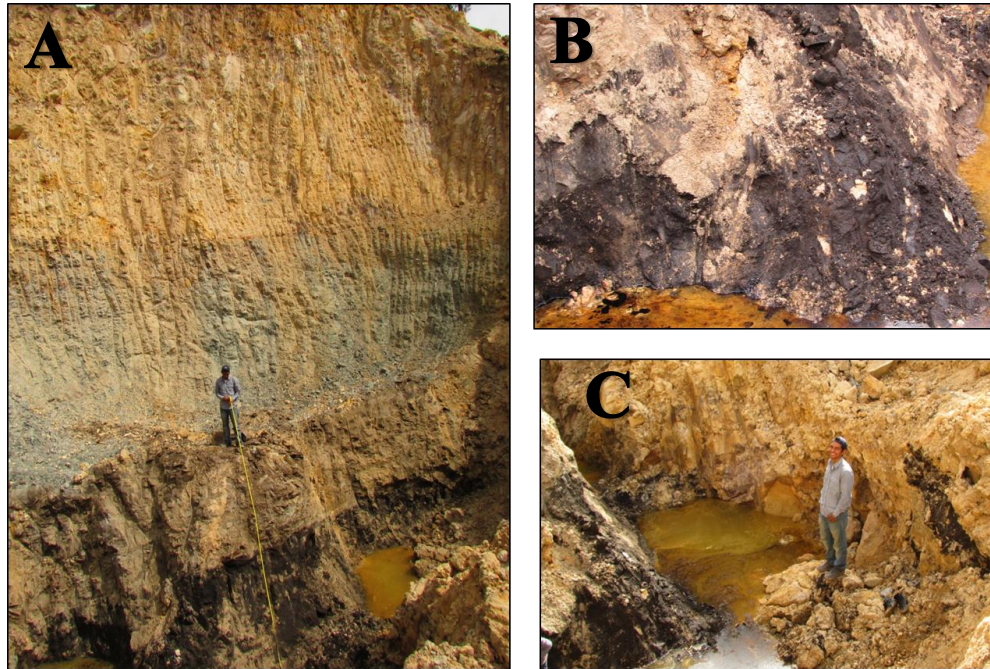
- **CALICATA MINA LA EMILIA**

En la mina de Asfaltita La Emilia se procedió con una calicata eléctrica tipo Schlumberger (Ver Figura 30) desplazando lateralmente los cuatros electrodos cada cinco metros. En la figura 31 (a) se puede observar una imagen panorámica de la mina y en la figura 31 (b y c) la arena impregnada extraída en la zona.

Figura 30 Panorámica mina La Emilia y calicata (ME).



**Figura 31 . a) .Panorámica Mina la Emilia., b) y c) paquete con arena impregnada de la mina.**



En el sondeo ME1 se logró alcanzar muy poca profundidad, aun así se establecieron tres unidades geoelectricas; la primera con un espesor de 0.75m de arena seca y una resistividad de 484.9  $\Omega$ .m que desciende a 210.8  $\Omega$ .m al pasar al segundo horizonte compuesto de arena y grava con 2.729m de espesor. La tercera capa de arena y arcilla registró una resistividad de 102.8  $\Omega$ .m. Este sondeo tuvo un error de ajuste de 0.87%. (Ver Figura 32)

El sondeo ME2 alcanzó mayor profundidad que el sondeo anterior y reporto espesores más grandes de las capas igualmente encontradas en el sondeo ME1. Para la capa de arena seca el espesor fue de 1.587m y 19.38m para la capa de arena y grava que se mostró más resistiva con un valor de 306  $\Omega$ .m. el tercer horizonte con resistividad de 10.4  $\Omega$ .m fue atribuido a una capa de arena y limo. (Ver Figura 33)

El sondeo ME3 logró registrar cuatro capas con resistividades descendientes a mayor profundidad. El primero horizonte con espesor de 0.75m y resistividad de 538  $\Omega$ .m se correlacionó con una capa de arena. Al profundizar se encontró un espesor de 1.81m de arena y grava que alcanzó 2.55m de profundidad. La tercera unidad geoelectrica, correspondiente a 21.6m de arena arcillosa con resistividad de 136  $\Omega$ .m, alcanzó una profundidad máxima de 24.14m y superando esta profundidad se halló una capa de arcilla con 4.52  $\Omega$ .m de resistividad. (Ver Figura 34)

Al sondeo ME4 lo definieron cuatro unidades geoelectricas; la primera corresponde a arena seca con 1940  $\Omega$ .m de resistividad. El segundo horizonte se encontró a una profundidad de 7.81m, arrojando una resistividad de 719  $\Omega$ .m para una arena de 7.06m de espesor. La tercera capa evidenció la unidad geoelectrica III con 9.68m de espesor y 93.8  $\Omega$ .m de resistividad. Superando los 17.48m de profundidad se encontró una capa altamente resistiva con conglomerado de resistividad de 4434  $\Omega$ .m. (Ver Figura 35)

El sondeo ME5 evidenció cuatro unidades geoelectricas; la resistividad para las arenas secas fue de 367  $\Omega$ .m con 0.79m de espesor. La segunda capa que se halló tuvo un espesor de 2.97m y descendió su resistividad a 185  $\Omega$ .m correlacionándola con una composición de arena arcillosa a 3.75m de profundidad. Este cambio lateral puede ser debido a las características estructurales medidas en este punto de levantamiento de la calicata perteneciente a la formación Picacho que presenta pendientes que oscilan de 30 a 40°. El tercer horizonte de arena y limo encontrado a 10.48m reportó un espesor de 6.73m y resistividad de 34.9  $\Omega$ .m. La última unidad encontrada evidenció un Conglomerado con 9210  $\Omega$ .m de resistividad. (Ver Figura 36)

Figura 32 Curva y modelo geoelectrico SEV ME1

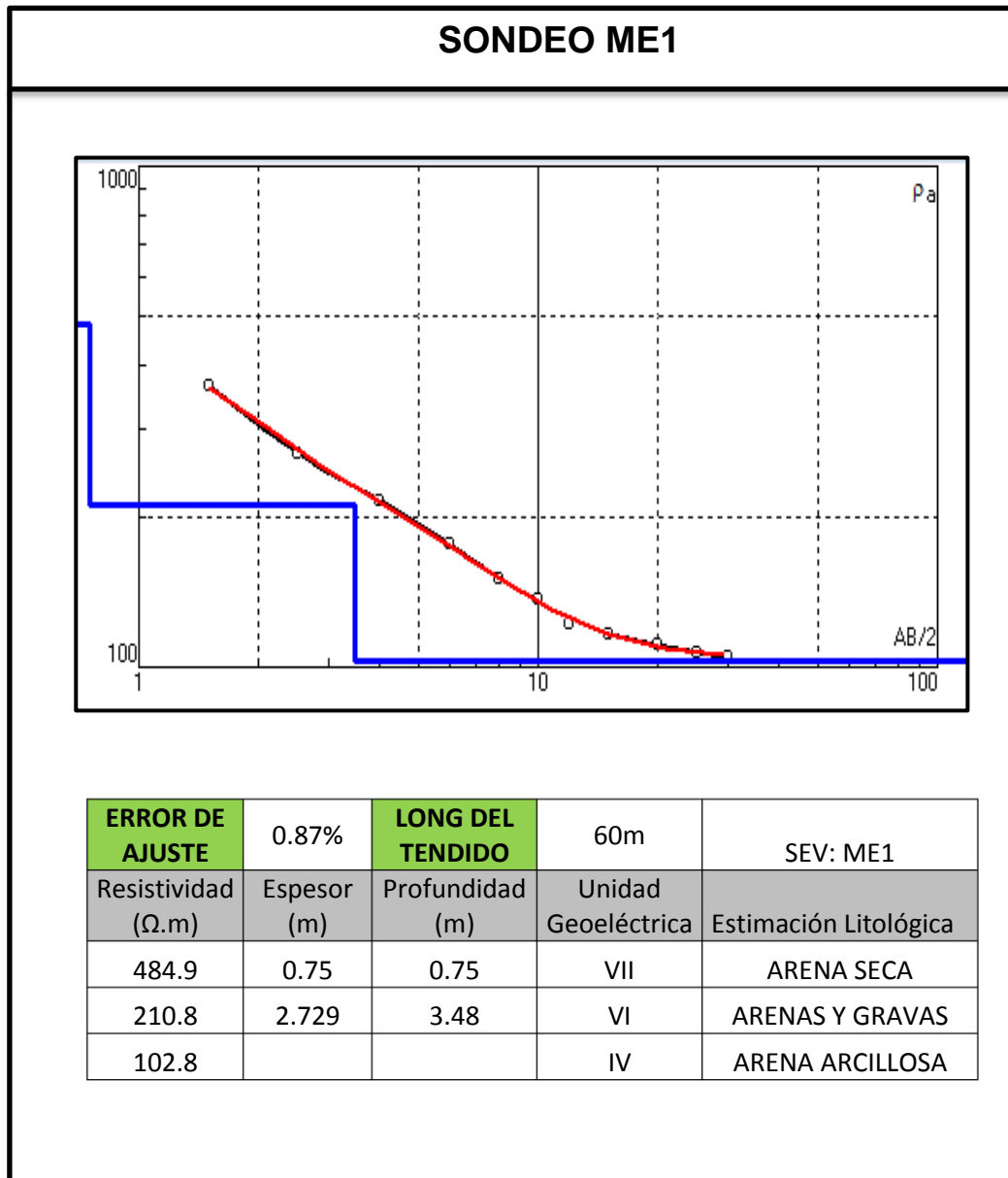


Figura 33 Curva y modelo geoelectrico SEV ME2



Figura 34 Curva y modelo geoelectrico SEV ME3

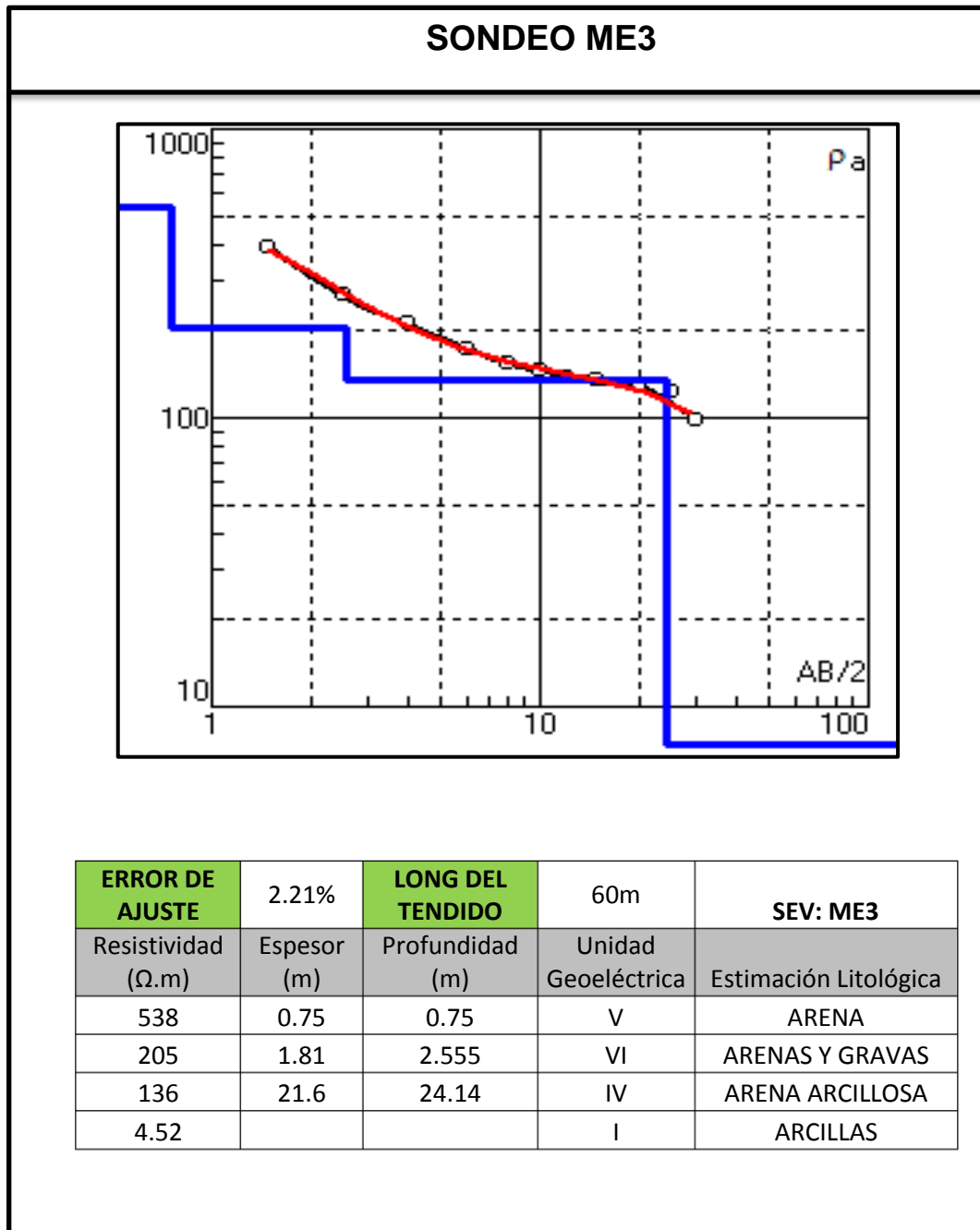


Figura 35 Curva y modelo geoelectrico SEV ME4

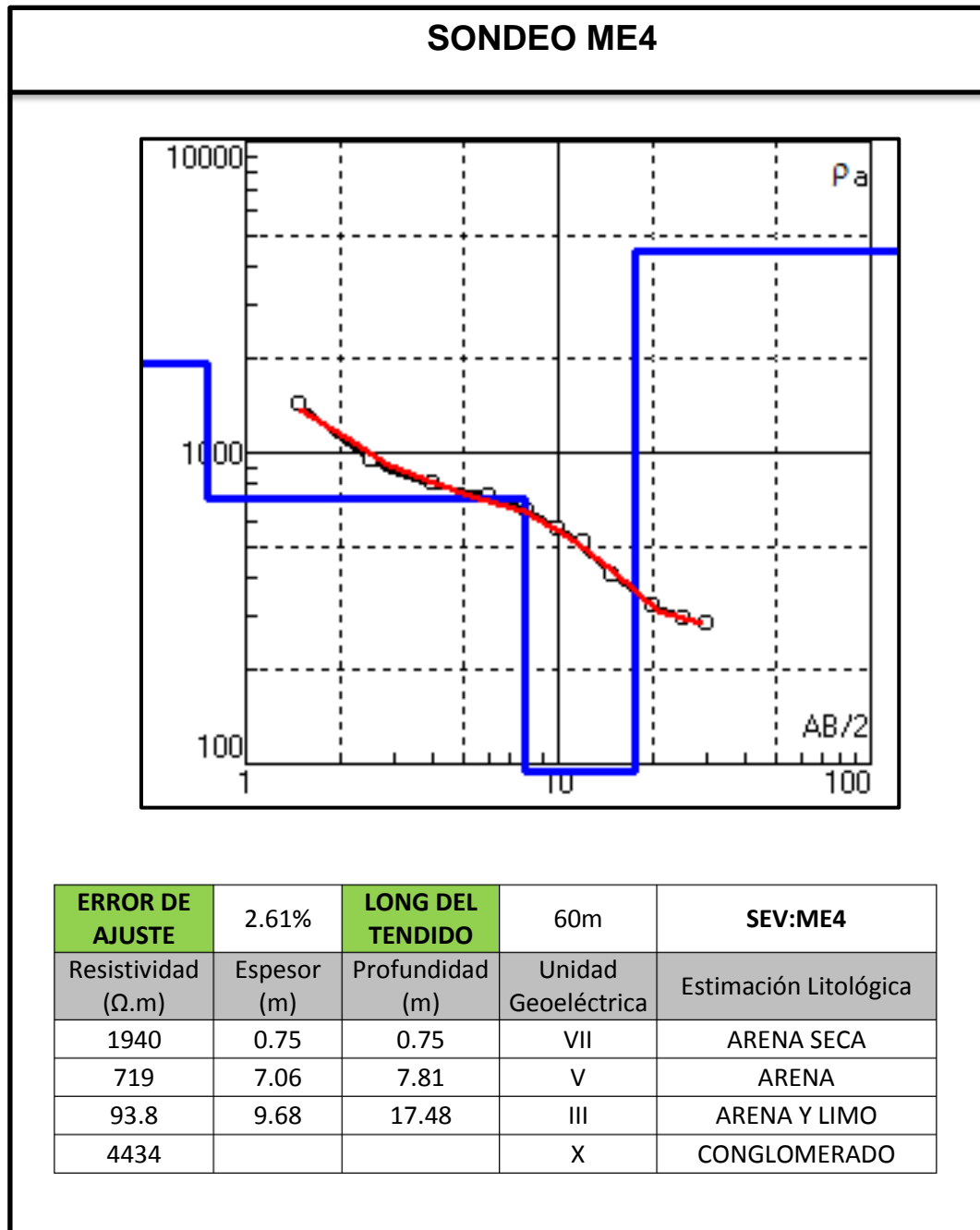
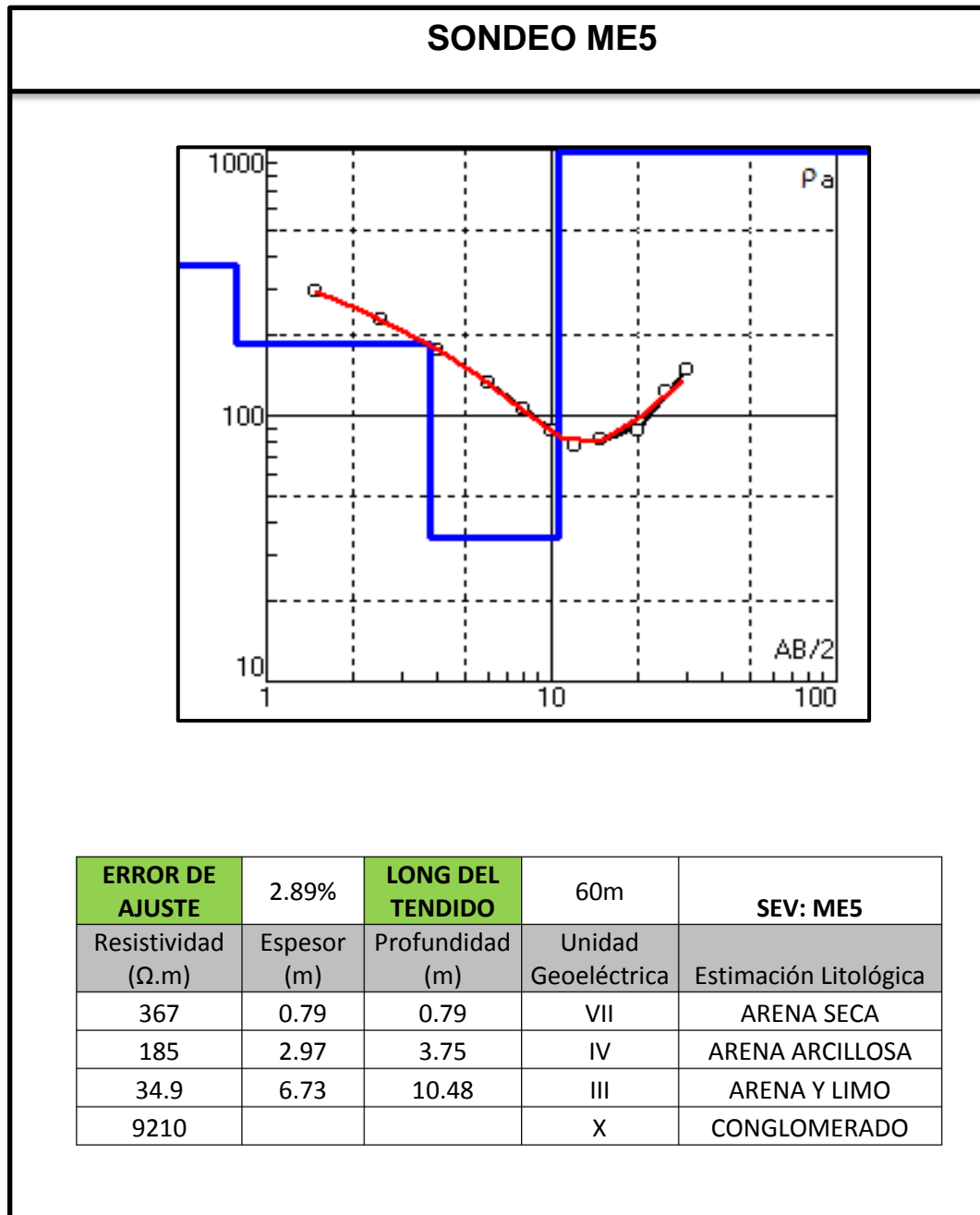


Figura 36 Curva y modelo geoelectrico SEV ME5



Una vez procesado cada SEV se puede visualizar la pseudosección. Para facilitar su interpretación se redujo a nueve (9) la cantidad de colores en la escala (Ver Figura 37).

La pseudosección muestra las resistividades aparentes idealizadas por el software (IPI2Win), mostrando un plegamiento característico de un ambiente compresivo. Por otro lado, en el corte geoelectrico donde se muestran las resistividades reales, se puede evidenciar el número de capas pero no su espesor, puesto que la última capa que siempre apreciamos con un valor infinito en su espesor, en cada sondeo se idealiza como sustrato.

La continuidad lateral en el corte geoelectrico también tiene un alto grado de incertidumbre, teniendo en cuenta que las profundidades alcanzadas en cada sondeo no son constantes y que las resistividades no son correlacionables lateralmente.

Algunos de los factores que influyeron en la calidad de los resultados es la meteorización a causa de la minería, debido que esta puede tener un efecto similar al que muestra una topografía accidentada.

La temperatura y la precipitación también afectaron los datos arrojados. El municipio de Pesca se caracteriza por tener un rango de temperatura que oscila entre los 12 y 18°C (Moreno M y Fечи, 2013). Para la etapa de campo, Pesca presentaba temperaturas más altas que las establecidas en su rango y con precipitaciones nulas desde un periodo de tiempo extenso como se vio reflejado en el paisaje (Ver Figura 39).

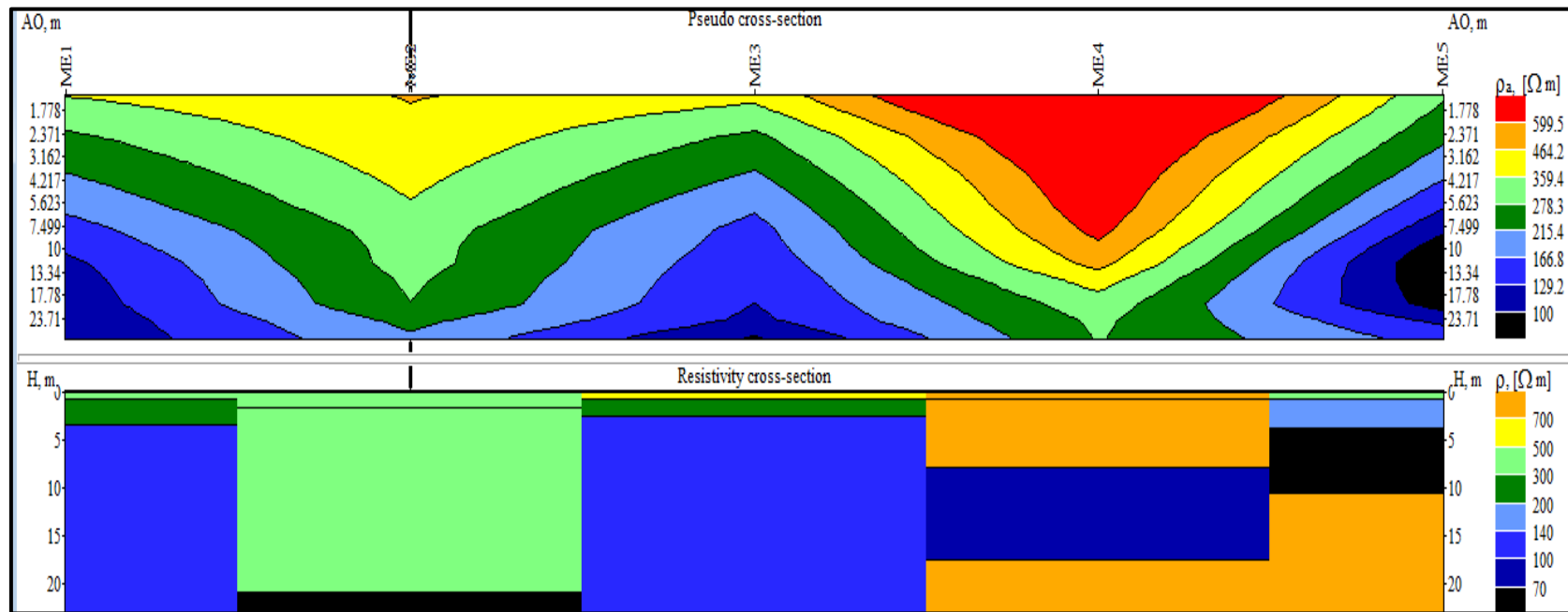
Esta condición disminuyo la compactación del terreno e hizo que la calidad del contacto del electrodo con el subsuelo fuera pobre.

También cabe resaltar el principio de supresión en los resultados de la CE. Hay una alta posibilidad de que las capas más delgadas o de bajo contraste de resistividad no hubieran sido detectadas por el método. Basados en la columna estratigráfica específica de la mina La Emilia, la secuencia de litologías, de techo a

base, es arena seca, arena, arena y grava, limo y arena, arena arcillosa y conglomerado. Coinciden perfectamente con las composiciones encontradas en cada sondeo que compone la calicata pero con supresiones de algunas litologías.

## Pseudosección y corte geoelectrico de la calicata de la Mina La Emilia

**Figura 37 Pseudosección y corte geoelectrico - Calicata Mina La Emilia**

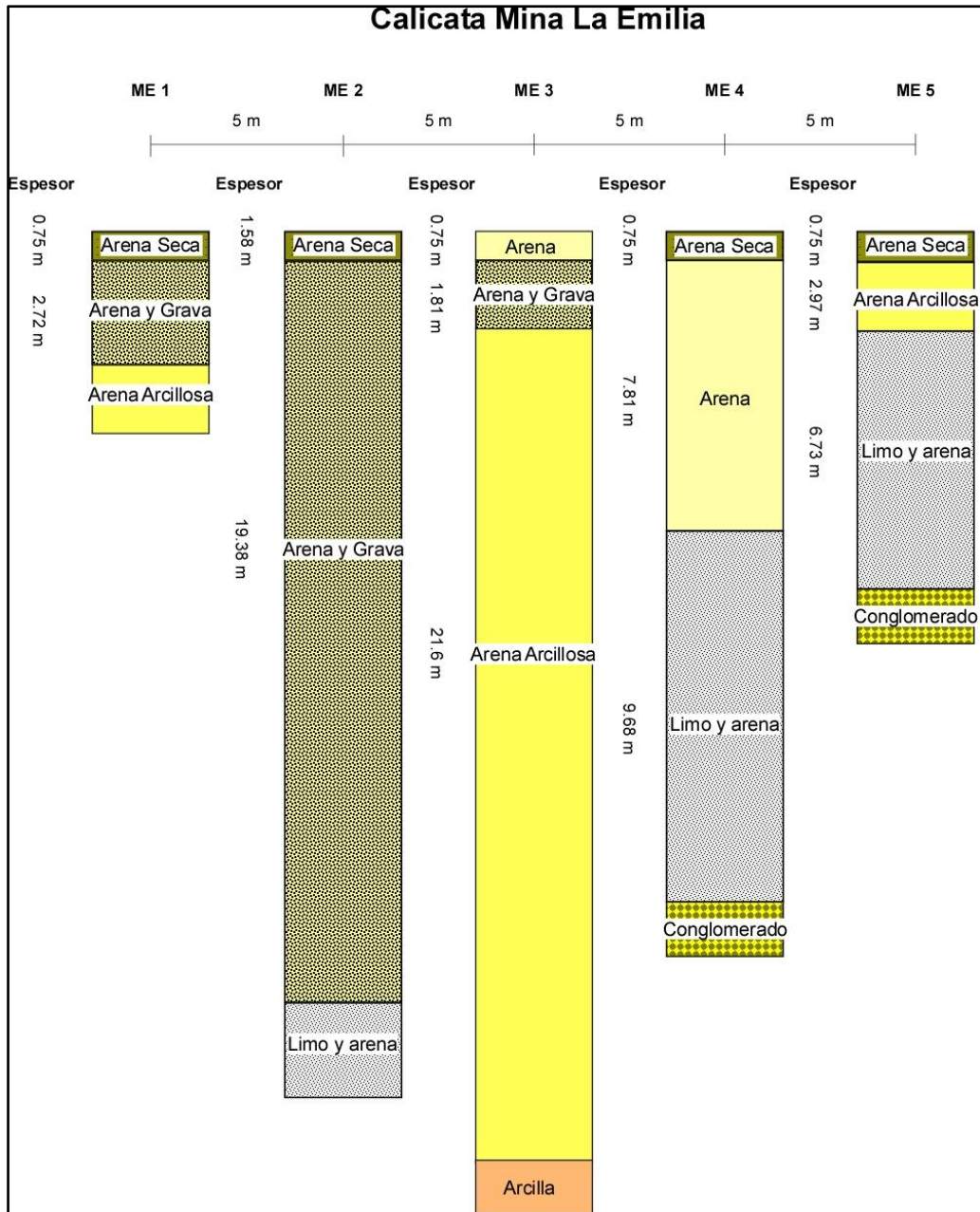


Basados en la integración de los datos que arrojó la técnica, se realizó un modelo geológico para visualizar mejor los resultados obtenidos.

Como se observa en la figura 38, las profundidades alcanzadas no fueron constantes ni significativas y hubo una variación lateral bastante notoria, imposibilitando una correlación a pesar que la distancia entre cada adquisición fue de 5 metros. Este resultado, no satisfactorio, teniendo en cuenta el fin de una CE, se lo atribuimos a la acción de la explotación minera que se desarrolla en ese sector. Es posible que el terreno escogido para desarrollar la calicata tenga material de relleno acumulado por la maquinaria. De esta forma la distribución de las capas en el subsuelo se vio alterada por acción del hombre, dando resultados no coherentes e imposibles de interpretar y correlacionar lateralmente.

En cuanto a la poca profundidad alcanzada, hay diversos factores que pudieron haber influido en esta limitante. La erosión por acción del hombre fue uno de ellos. Quizás bloques muy resistivos presentes en el subsuelo fueron rodeados por la corriente limitando su alcance vertical.

Figura 38 Modelo geológico de la calicata realizada en la mina La Emilia.



**Figura 39 Paisaje época de sequía Pesca – Boyacá**



Para cubrir los sectores aledaños a la mina La Emilia y caracterizar la zona NE del municipio de Pesca se establecieron distancias aproximadas de 700 metros, para realizar los SEVs Aa, Ab, Ac, Ad, Gc, Ha y Hb.

Para iniciar, el SEV Aa, ubicado sobre la formación Concentración y con coordenadas Norte: 1'109.856; Este: 1'116.375 y altura de 2614 msnm. La

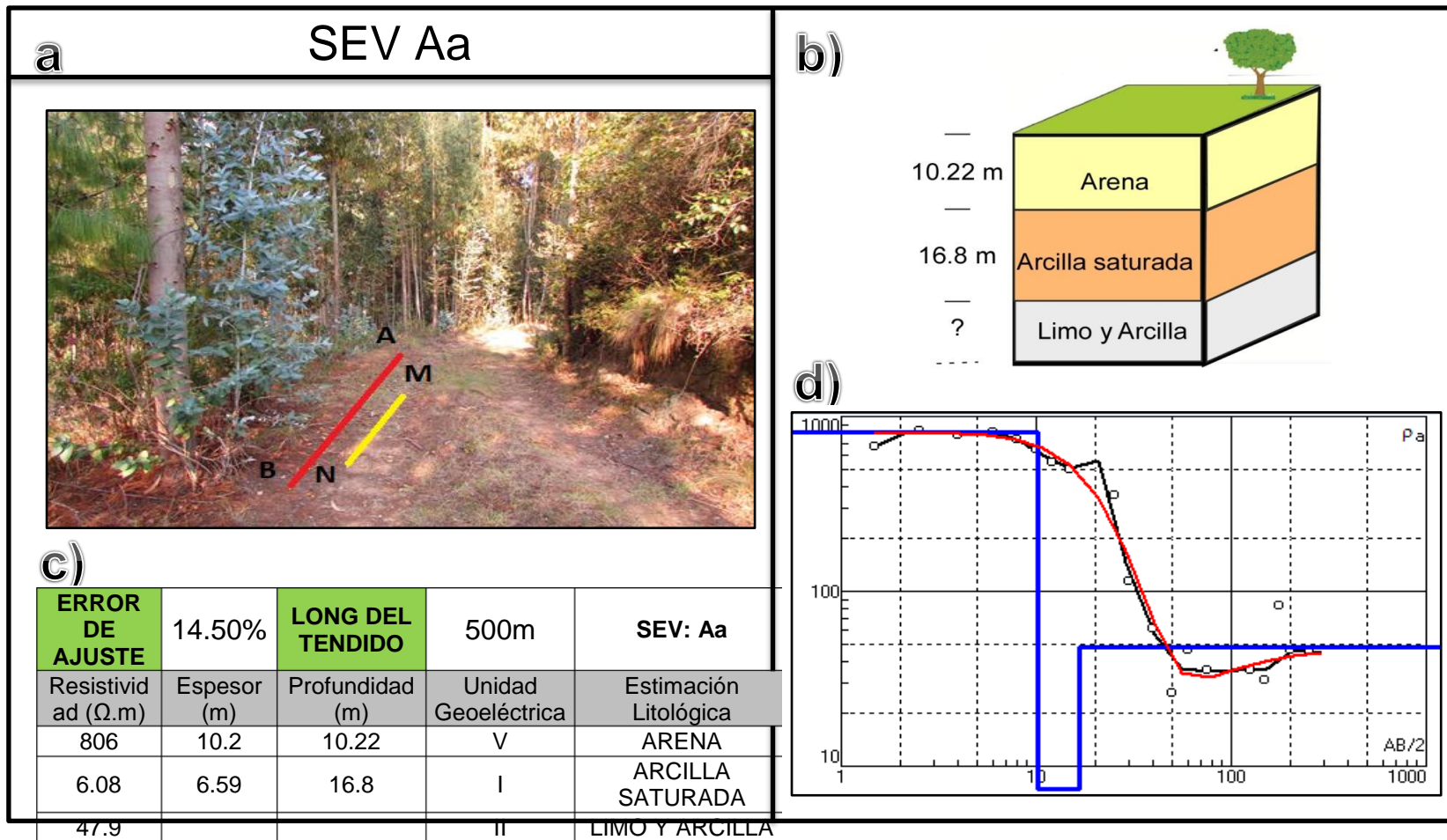
longitud del tendido fue de 500m ubicando el equipo a 2518 m de altura (Ver Figura 40) sobre valles en V y en parte de un abanico aluvial. A estas condiciones se le atribuyó el 14.50% de error de ajuste puesto que la alta sensibilidad del método a mínimas variaciones de la conductividad, ya sea por humedad, vegetación y/o topografía distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías. Este sondeo se realizó en una zona con alta vegetación (pinos) (Ver Figura 41-A).

En total se evidenciaron tres unidades geoelectricas (Ver figura 41-b y d); la primera corresponde a 10.2 m de espesor de arena y resistividad de 806  $\Omega$ .m. El segundo horizonte corresponde a la unidad geoelectrica I. A esta se le atribuye un nivel de saturación debido al bajo valor de la resistividad entre el rango establecido para las arcillas (1-100  $\Omega$ .m). Esta capa de arcillas saturadas alcanza una profundidad de 16.8m y tiene un espesor de 6.59m. El tercer horizonte arroja una resistividad de 47.9  $\Omega$ /m indicando la presencia de Limos y Arcillas (Ver Figura 41-c). Este sondeo tiene una curva característica tipo H, en donde  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ .

**Figura 40 Perfil SEV Aa**



Figura 41 Interpretación SEV Aa. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2



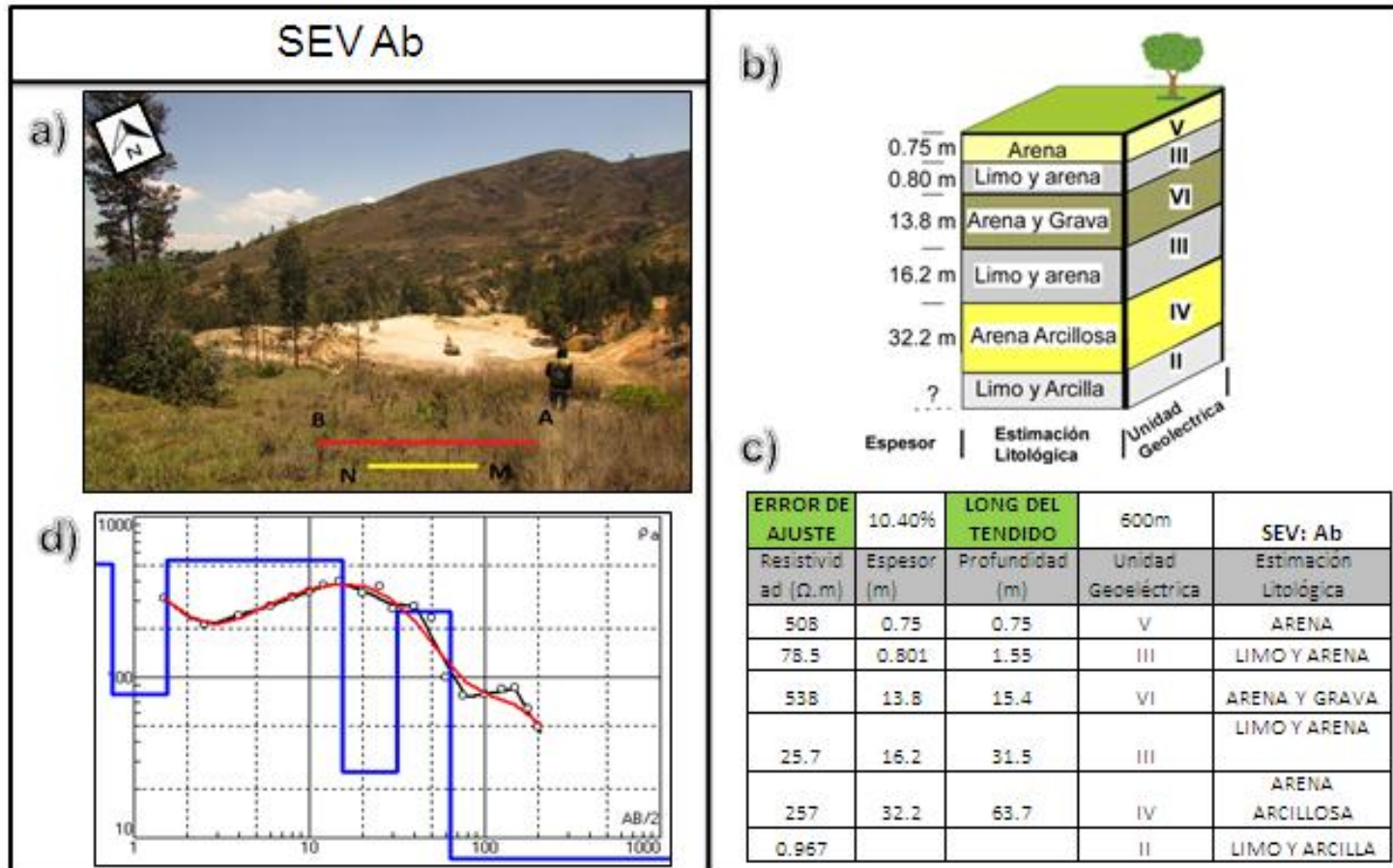
El sondeo Ab se ubicó en la parte superior de la mina La Emilia, en un lomo o cima estructural (Ver Figura 43-a), con coordenadas, Norte: 1`109.388, Este: 1`117.038 y altura de 2745 msnm. La ubicación de este sondeo permitió corroborar la composición del subsuelo gracias a la columna levantada en el afloramiento expuesto en la mina. (Ver anexo 3). El error de ajuste fue de 10.4% debido a que la apertura del arreglo alcanzó una pendiente media de 23.2%. (Ver Figura 42) haciendo que las depresiones se asimilen a cuerpos aislantes y las elevaciones a cuerpos conductores porque el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas.

La longitud del tendido fue de 600m sobre la formación Picacho definiendo seis unidades geoelectricas (Ver Figura 43-b y d). La primera corresponde a la unidad geoelectrica V con una resistividad de 508  $\Omega/m$  y profundidad de 0.75m. El segundo horizonte alcanzó una profundidad de 1.55m reportando un espesor de 0.801m y resistividad de 78.5 $\Omega/m$  correlacionándola con una composición de Limo y Arena. La tercera capa reportó Arenas y Gravas con espesor de 13.8m y profundidad de 15.4m. Registró una resistividad de 538 $\Omega/m$ . El cuarto horizonte evidenció un espesor de 16.2m de limo y arena a una profundidad de 31.5m y resistividad de 25.7 $\Omega.m$ . El quinto horizonte data arenas arcillosas con una resistividad de 257  $\Omega.m$  y un espesor de 32.2m alcanzando una profundidad de 63.7m. El ultimo horizonte con resistividad de 0.97  $\Omega.m$  corresponde a la unidad geoelectrica II, Limo y Arcilla (Ver Figura 43-c). La variación de las resistividades aparentes describe un comportamiento resistivo tipo HK.

Figura 42 Perfil SEV Ab.



Figura 43 Interpretación SEV Ab. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



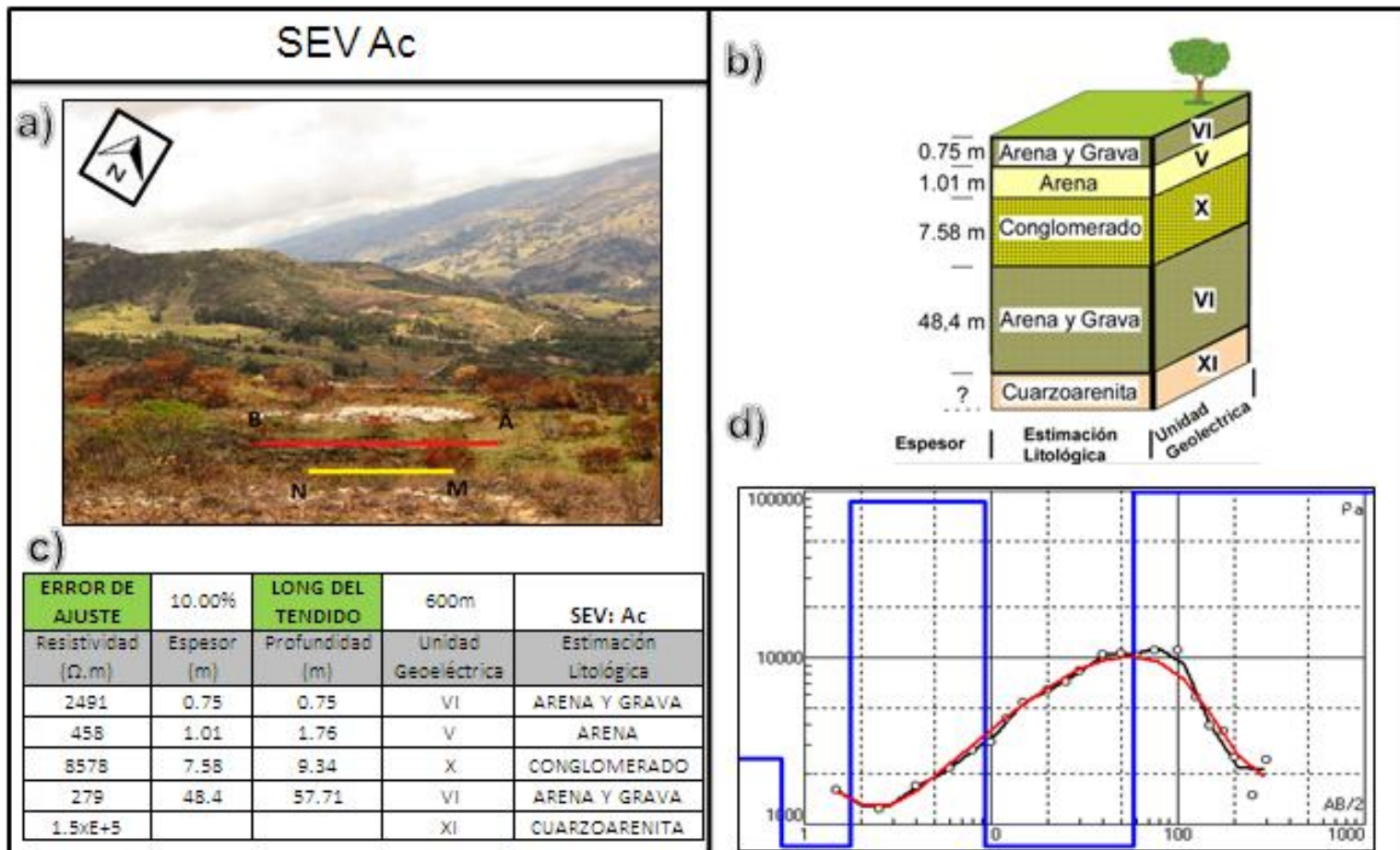
El SEV Ac ubicado sobre la formación Picacho, en las coordenadas Norte: 1'109.040, Este: 1'117.632 y altura: 2883 msnm, sobre una ladera denudacional, define cinco unidades geoelectricas (Ver Figura 45-b y d) con resistividades que varían de forma característica al modelo de la curva tipo HK. Se profundizó a 57.71m en total y tuvo un error de ajuste del 10% respecto a la curva teórica. Este porcentaje lo atribuimos a la aridez del sector (Ver Figura 45-a) y las condiciones de erosión que dieron origen a la geofoma constituida primordialmente por arena con intercalaciones de gravas. En la figura 44 se observa el perfil de la zona donde se hizo el tendido alcanzando una altura máxima de 2878m con el electrodo A y a 2843m se logró descender con el electrodo B.

El primer horizonte corresponde a Arenas y Gravas con resistividad de 2491  $\Omega$ .m alcanzando una profundidad de 0.75m. El segundo horizonte evidenció a una profundidad de 1.76m una capa de arena con 1.01m de espesor y 458  $\Omega$ .m de resistividad. El tercer horizonte se correlacionó con la unidad geoelectrica X a una profundidad 9.34m dando un dato de resistividad de 8578  $\Omega$ .m con un espesor de 7.58m. El cuarto horizonte corresponde a Arenas y Gravas con espesor de 48.4m dando una resistividad de 279  $\Omega$ .m a una profundidad de 57.71m. El quinto horizonte arrojó una resistividad de 1.5E+5  $\Omega$ .m, equivalente una capa de cuarzoarenita (Ver Figura 45-c)

**Figura 44 Perfil SEV Ac**



Figura 45 Interpretación SEV Ac. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



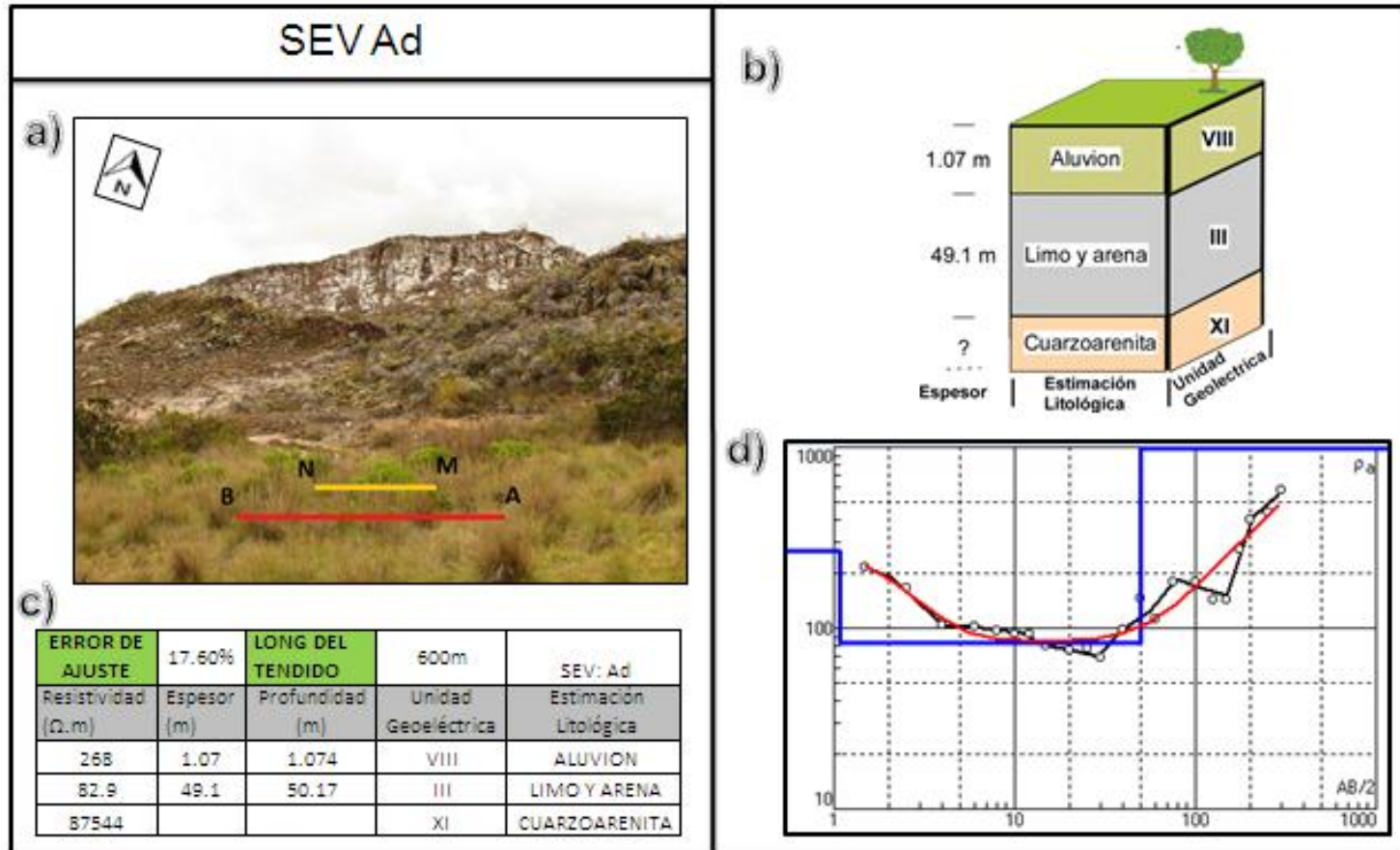
SEV Ad ubicado en la formación Picacho, en las coordenadas Norte: 1´108.595, Este: 1´118.158 y altura de 2973 msnm. El tendido del arreglo de este sondeo se ubicó sobre un depósito coluvial (Ver Figura 47-a) y alcanzó una pendiente máxima de 15.9% (Ver Figura 46) dando un error del arreglo de 17.60%. Se alcanzó a profundizar hasta 57.71m. La secuencia de las resistividades fue  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$  para un modelo de curva tipo H.

Los resultados definen tres unidades geoelectricas, VIII, III y XI respectivamente (Ver Figura 47-b y d); La primera corresponde a un aluvi3n con 1.07m de espesor y 268  $\Omega$ .m de resistividad. La segunda unidad geoelectrica evidencia una capa de Limo y Arena con un espesor de 49.1m a 50.17m de profundidad dando una resistividad de 82.9  $\Omega$ .m. El tercer horizonte registro una resistividad de 87544  $\Omega$ .m, definiendo de este modo una capa de Cuarzoarenita bastante resistiva. (Ver Figura 47-c)

**Figura 46 Perfil SEV Ad**



Figura 47 Interpretación SEV Ad. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



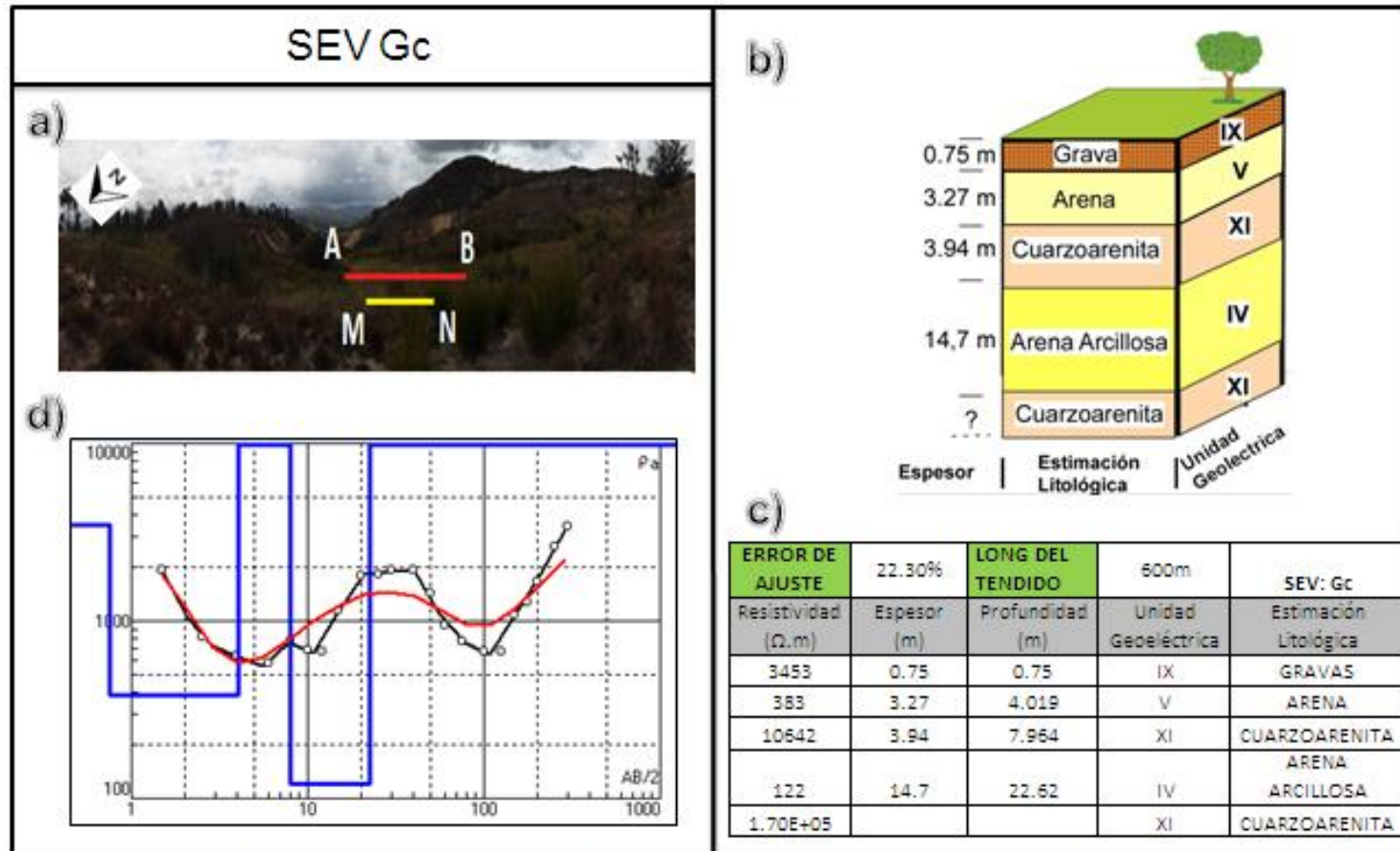
Las coordenadas para el sondeo Gc son, Norte: 1'109.008, Este: 1'116.805 a una altura de 2743 msnm. Ubicado en el sector S-IV cerca al límite de la formación Picacho, sobre un lomo o cima estructural (Ver Figura 48). El error de este sondeo fue de 22.3%, respecto a la curva teórica (Ver Figura 49-d). Este error tan alto posiblemente fue debido a la topografía accidentada y a la alta vegetación del área (Ver Figura 49-a). La pendiente media alcanzada en este sondeo fue 13.2%. Los valores de resistividad variaron bastante a medida que se profundizaba representando estos cambios en el modelo de curva tipo HH.

La primera unidad geoelectrica corresponde a gravas con un espesor de 0.75m y 3453  $\Omega$ .m de resistividad. El segundo horizonte resistivo se encontró a 4.02m de profundidad con 3.27m de espesor de arenas con resistividad de 383  $\Omega$ .m. El tercer horizonte se correlacionó con cuarzoarenitas de 10642  $\Omega$ .m de resistividad a una profundidad de 7.964m. Esta unidad geoelectrica (XI) tiene un espesor de 3.94m. El cuarto horizonte hallado a 22.62m de profundidad corresponde a arenas arcillosas con un espesor de 14.7m y 122  $\Omega$ .m de resistividad. El último dato de resistividad se le atribuyó nuevamente a cuarzoarenitas con resistividad de 1.70E+05  $\Omega$ .m (Ver Figura 49-b y c)

**Figura 48 Perfil SEV Gc.**



Figura 49 Interpretación SEV Gc. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



El sondeo Ha ubicado en la formación Picacho en el sector S-III con coordenadas, Norte: 1'109.437, Este: 1'117.991 y altura: 2932 msnm. Como se aprecia en la Figura 51-a, el terreno evidencia la fase final de una época de sequía y cambios topográficos característicos de un lomo o cerro estructural. Razón por la cual suponemos el motivo del porcentaje de error (17.10%). El modelo de la curva resistiva para este sondeo es la tipo H donde  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ . Este sondeo solo alcanzó una profundidad de 22.21m debido a la presencia de colinas y valles en el recorrido de la apertura del arreglo (Ver Figura 50).

Los resultados definen tres unidades geoelectricas, VII, III y VI (Ver Figura 51-b y d); La primera corresponde a Arenas secas con 1.07m de espesor dando una resistividad de 164  $\Omega$ .m. El segundo horizonte a 22.21m de profundidad, muestra un espesor de 21.1m de limo y arena. El tercer horizonte tiene una resistividad de 620  $\Omega$ .m e indica la presencia de arenas y gravas (Ver Figura 51-c).

**Figura 50 Perfil SEV Ha**

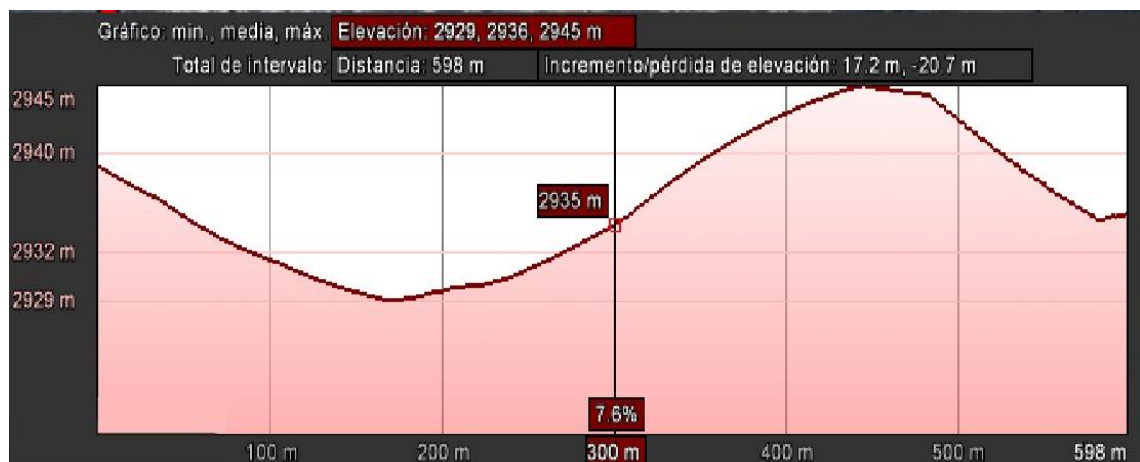
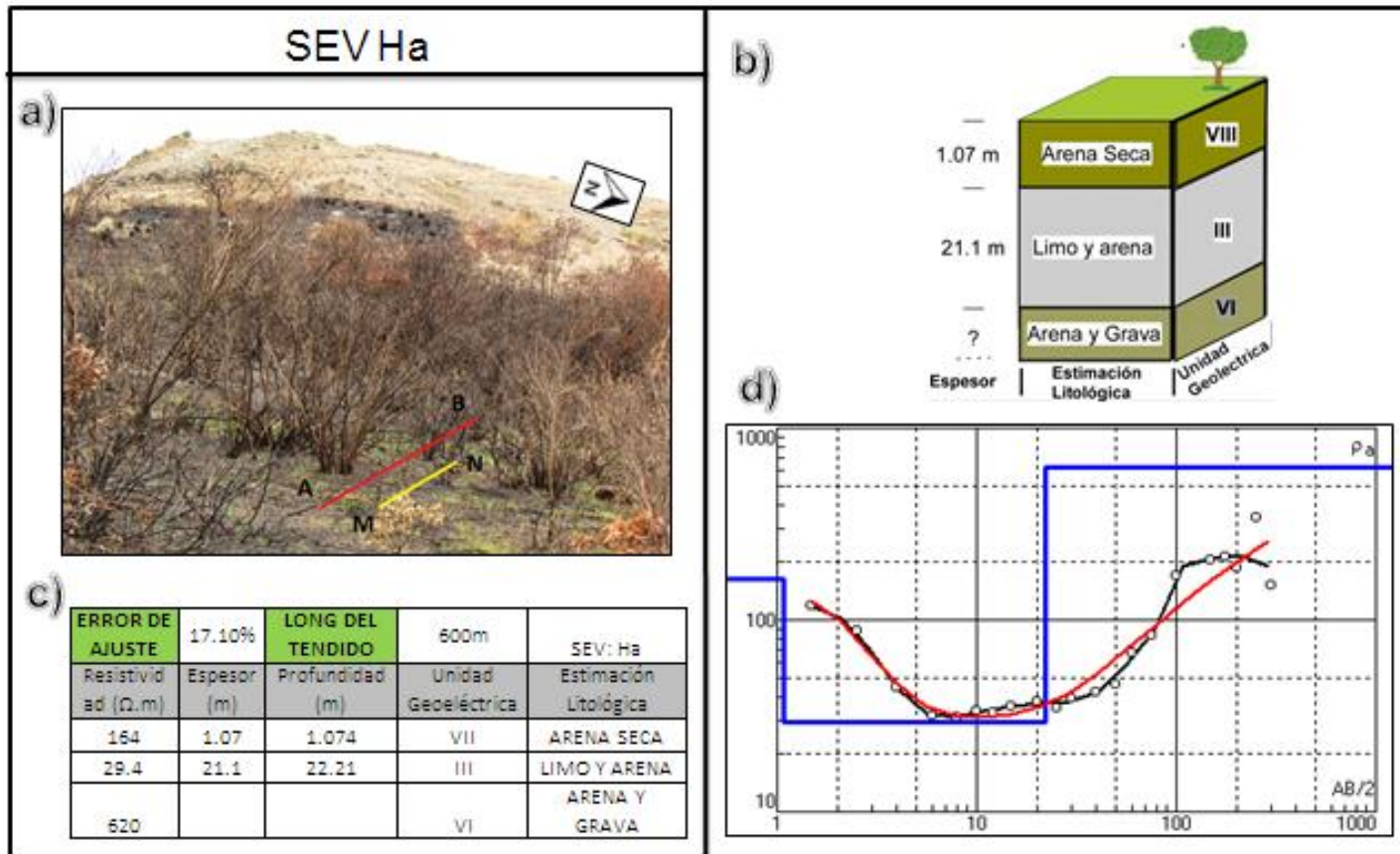


Figura 51 Interpretación SEV Ha. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



El sondeo Hb con coordenadas, Norte: 1'108.575, Este: 1'117.354 y altura 2838 msnm, ubicado sobre un lomo o cima estructural de la formación Picacho (Ver Figura 53-a).

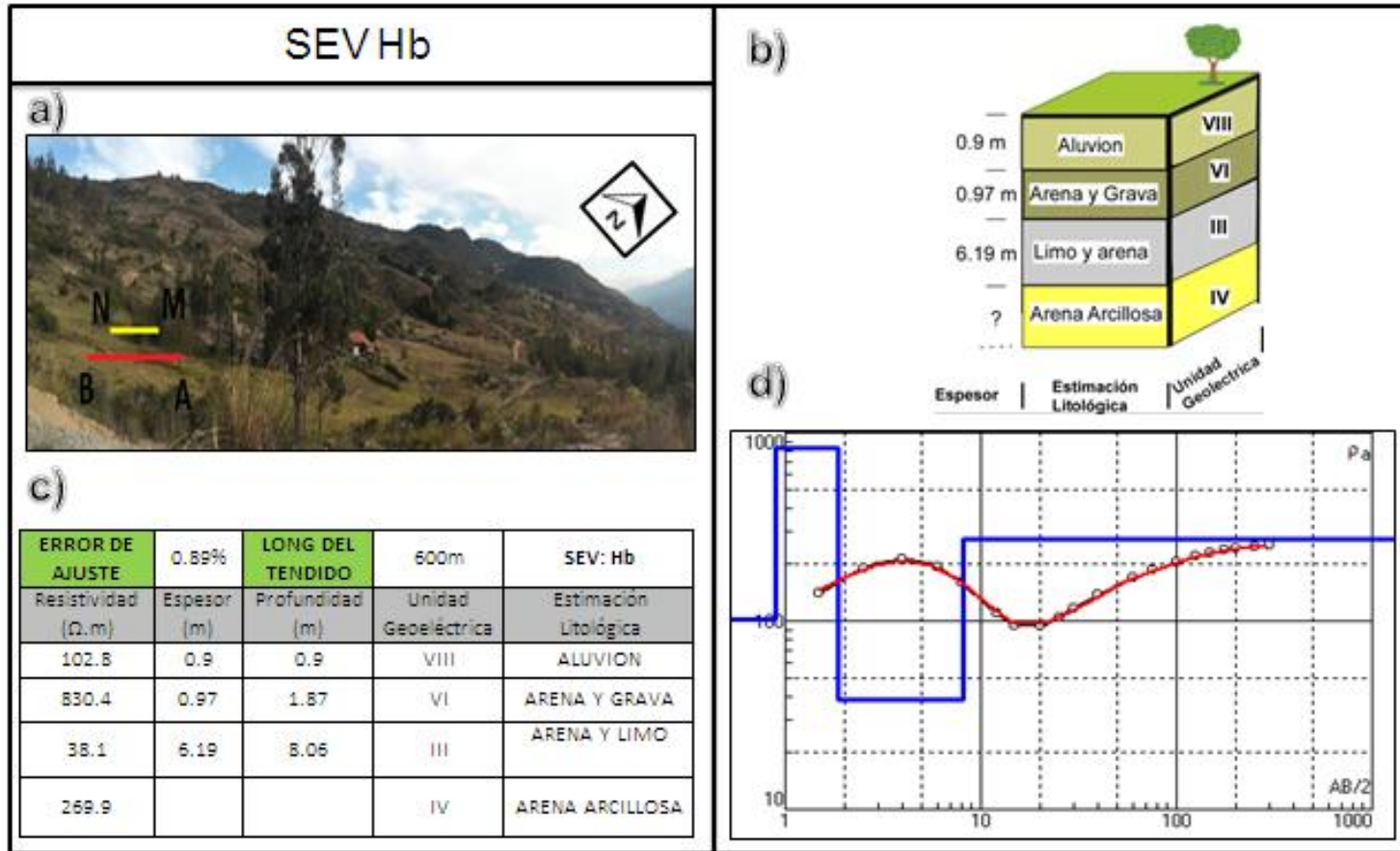
Este sondeo arrojó un error de ajuste de 0.89%. El error se redujo al eliminar datos que no se ajustaban a la tendencia de la curva (Ver Figura 53-d), quizás por mal contacto del electrodo con el subsuelo en el momento de la toma del dato, por fuentes externas de energía o mala conexión en la unidad central. Estos motivos anteriormente nombrados también tuvieron consecuencias en la profundidad alcanzada. Para este caso, solo se llegó a 8.06m de profundidad (Ver Figura 53-c). El modelo de curva característico para este sondeo es el tipo KH.

Se definieron cuatro unidades geoelectricas (Ver Figura 53-b); la primera corresponde a 0.9m de Aluvi3n con 102.8  $\Omega$ .m de resistividad. La unidad geoelectrica VI con un espesor de 0.97m y 830.4  $\Omega$ .m de resistividad se hall3 a 1.87m de profundidad. El tercer horizonte con resistividad de 38.1  $\Omega$ .m corresponde a una capa arena y limo de 6.19m de espesor y alcanzando 8.06m de profundidad. El cuarto horizonte report3 una arena arcillosa con resistividad de 269.9  $\Omega$ .m.

**Figura 52 Perfil SEV Hb**



Figura 53. Interpretación SEV Hb. a) Imagen ubicación y orientación del arreglo. b) Modelo geológico. c) Modelo geoelectrico. d) Curva de resistividad aparente vs AB/2.



## 10. CONCLUSIONES

En el desarrollo de siete sondeos eléctricos verticales y una calicata eléctrica, usando el arreglo tetraelectródico simétrico de Schlumberger se corroboró las ventajas que éste dispositivo tiene para la caracterización de las capacidades resistivas de las rocas y minerales, ya que proporciona información de manera eficiente, con una fácil adquisición y rápida operación con el mínimo número de personal.

Calculadas las resistividades reales se pudo determinar la variación litológica en profundidad y sus espesores mediante los SEVS adquiridos. De esta forma se determinaron once unidades geoelectricas, con espesores que oscilan entre 0.75 m y 49.1 m. comprobando que la presencia de arenas está estrechamente ligada a las capas de mayor espesor.

El sondeo Aa, ubicado en el sector S-I, sobre la formación Concentración tiene una variación similar de los valores de resistividad que presenta la formación Picacho. Esto se comprobó con los modelos de curva de resistividad para diferentes estructuras. Ambas formaciones tuvieron en todos sus sondeos el modelo tipo H o estuvieron compuestas por él.

La calidad de los SEVs estuvo en parte regida por la geomorfología de Pesca. Para los sectores con pendientes fluctuantes el error fue más alto, el caso de los sondeos Ab, Gc y Hb ubicados sobre lomos o cimas estructurales. Con ellos se comprobó que para lograr valores que se aproximen notablemente a la curva teórica y reducir el error, el terreno debe tener una mínima y/o constante pendiente a lo largo del recorrido sondeado. Adicionalmente, se reconoció que el

arreglo debe estar dispuesto perpendicular a la pendiente para mantener valores mínimos en la altura máxima y media alcanzada.

Se sectorizó el área de estudio para facilitar la ubicación geográfica en la zona delimitando cotas que permitieron asociar las resistividades, concluyendo que en el sector IV se tienen las resistividades más altas para el sondeo Gc.

## 11. RECOMENDACIONES

Para lograr una estimación con menor incertidumbre de la continuidad lateral de las capas a partir de las técnicas geoelectricas empleadas, es necesario generar una grilla con SEVs espaciados entre ellos a una distancia menor que la planteada en este proyecto (700m) , se propone una distancia entre sondeos que no supere los 100 m.

Los resultados mejoran y son más efectivos cuando se utilizan datos adicionales, tales como datos sísmicos o tomografías eléctricas. Por tanto, se recomienda implementar otra técnica geofísica que acerque más a la realidad los resultados adquiridos.

Se alcanza la profundidad esperada y un porcentaje de error menor cuando la toma de los datos se realiza sobre capas con una inclinación máxima de 30°. En el caso de la geomorfología de Pesca se recomienda desarrollar este tipo de técnicas sobre geoformas con pendientes suaves como los depósitos aluviales (terrazas aluviales y abanicos aluviales).

En el caso de los terrenos secos que por sus características se convierten en menos compactos, es ideal humedecer el lugar donde se pondrá el electrodo para garantizar un mejor contacto con el subsuelo.

## BIBLIOGRAFÍA

ARAUZO T, GUTIÉRREZ-Elorza y SANCHO C,. Facetas triangulares de la ladera como indicadores paleoclimáticos en ambientes semiáridos (Depresión del Ebro). Departamento de ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Plz. San Francisco. 1996

ARIAS Daniel Eduardo, *Exploración geotécnica - relaciones geoeléctricas*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2011

CUERVO G Y GÓMEZ J,. *Estudio geológico enfocado a la caracterización paisajística de la Mesa de los Santos, Santander, Colombia*. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. 2012

GAETE, *Declaración del impacto ambiental, geofísica ambiental y método de resistividad*. Municipalidad de Puchuncavi, Valparaíso. 2010

GEOESTUDIOS LTDA. *Cartografía geológica Cuenca Cordillera Oriental - Sector Soapaga*. Contrato N° 085, Informe Final Área Soapaga. Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH. 2006

GIRALDO H.F, *Manual de operación del equipo geoamp 202-v1*. SUBSUELOS 3D S.A.S. 2013

GÓMEZ D, MARTÍN T, CRESPO S, VELÁZQUEZ M, *Characterization of volcanic materials using shallow geophysical techniques: 1. electrical resistivity imaging*. GEOGACETA 2005.

GÓMEZ J.. *Caracterización geoelectrica del subsuelo en el sector de Floreña NW 6,, Yopal-Casanare*. Trabajo de grado, Página 23. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisico-quimica. 2014

LAKUBOVSKII y LIAJOV, *Exploración Eléctrica*, versión española de la 3º edición rusa, editorial reverté, s.a. 1980

LUGO E, PLAYA E, RIVERO LI,. *Aplicación de la Tomografía Eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas*. GEOGACETA 2008.

MANILLA ACEVES alfonso Álvarez,. *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Secretaria de comunicaciones y transportes. Publicación Técnica No. 229. Sanfandila, Qro 2003

MORENO M y FECHI Y. *Formulación del plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca alta del río Chicamocha – Geología y Geomorfología*. Corporación autónoma regional de Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Universidad Nacional de Colombia- Instituto de Investigaciones Ambientales. 2013

ORELLANA, *Prospección eléctrica de corriente continua*. Paraninfo. 2da edición. 1982

PÉREZ N, GARNICA P, DELGADO H, LANDAVERDE N, . *Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos*. Publicación Técnica No. 325. Sanfandila, México. 2010

PÉREZ, *Caracterización Geoelectrica del subsuelo para exploración de aguas subterráneas al norte de Cojedes*. Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. 2009

RAMÍREZ. *Caracterización de fallas y fracturas mediante tomografía eléctrica*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2010

REYNOLDS. *An introduction to applied an environmental geophysics*, section 3 electrical methods. UK 1997

RODRÍGUEZ y SOLANO. *Mapa geológico del departamento de Boyacá*. Memoria Explicativa Ingeominas, Ministerio de Minas y Energía. 2000

SÁNCHEZ, *Prospección Geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Dpto. de Geología Universidad de Salamanca, España. 2011

SHERIFF R.E, TELFORD V.M, GERALD L.P, *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. 2da edición. V: 283-292, VIII: 522-576. 1990

ULLOA y RODRÍGUEZ. *Informe de Gestión, Plancha 191 y 192*. Dirección de Servicio Geológico. INGEOMINAS, Bogotá 2006

## **ANEXOS**

### **Anexo A Corte geológico A-A´**

(Ver documento adjunto)

## **Anexo B. Columna Especifica Formación Concentración**

(Ver documento adjunto)

**Anexo C. Columna Específica de la Mina la Emilia**

(Ver documento adjunto)

**Anexo D. Datos tomados en campo**

(Ver documento adjunto)