

ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SONDEOS  
ELÉCTRICOS VERTICALES COMO MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DEL  
SUBSUELO EN EL ÁREA DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL

GUSTAVO ANDRÉS CHACÓN GÓMEZ  
IVÁN FELIPE PALACIOS MENDOZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2014

ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SONDEOS  
ELÉCTRICOS VERTICALES COMO MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DEL  
SUBSUELO EN EL ÁREA DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL

GUSTAVO ANDRÉS CHACÓN GÓMEZ  
IVÁN FELIPE PALACIOS MENDOZA

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo.

DIRECTORA  
MARTHA LILIANA SARMIENTO MORENO  
Geóloga

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2014

## DEDICATORIA

A Dios, a mi madre, a mi padre, a Fernando, Melissa, y a Stephania, a los cuales les dedico todos mis logros, sin ellos nada sería posible.

A mis amigos, que me dejan los mejores momentos de mi carrera.

A los profesores, en especial a Jairo Alberto Torres y Luis Eduardo Moreno, porque trabajar con ellos ha sido una experiencia llena de logros, conocimientos y buenos recuerdos.

- Iván Felipe Palacios Mendoza

A Dios, por darme tanto, guiar mis pasos y nunca dejarme solo.

A mis Padres, porque nunca dejaron de creer en mí, dieron todo para que saliera adelante y gracias a su amor me han convertido en el hombre que soy.

A mi Familia, y en especial mis padrinos, tíos y primos, por ser siempre un apoyo y mostrarme su cariño y afecto.

A mi novia, por darme tantos momentos felices y ser un apoyo incondicional; su familia, la cual me ha hecho sentir como un integrante más.

A mis amigos, los que comparten conmigo desde el colegio, porque en ellos encontré una amistad verdadera; mis amigos de la selección de fútbol, porque en mis primeros años en la universidad me enseñaron el verdadero sentido de pertenencia y la alegría de estar ahí; finalmente a mis compañeros de estudio con los que pasé momentos agradables a lo largo de toda mi carrera en especial a aquellos que vienen conmigo desde primer semestre.

A mis profesores y personal de la industria, porque me han dado las bases y el conocimiento para escoger mi camino.

Finalmente a la Universidad Industrial de Santander, de la que estoy orgulloso y con la que estoy inmensamente agradecido por haberme dado todo.

- Gustavo Andrés Chacón Gómez

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS.....	17
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
4. MARCO GEOLÓGICO.....	21
5. ESTRATIGRAFÍA .....	22
5.1. FORMACIÓN CHURUVITA (Ksch).....	22
5.2. FORMACIÓN CONEJO (Ksch).....	22
5.3. FORMACIÓN PLAENERS (Kg2) .....	24
5.4. FORMACIÓN PICACHO (Tp) .....	24
5.5. FORMACIÓN CONCENTRACIÓN (Tc) .....	24
5.6. ABANICOS ALUVIALES (Qal) .....	25
6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	26
7. MARCO TEÓRICO .....	27
7.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	27
7.2. GEOELÉCTRICA.....	27
7.2.1. SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES.....	32
7.2.2. PENETRACIÓN DE UN SEV.....	32
7.2.3. CORTE GEOELÉCTRICO .....	33
7.2.4. ANTECEDENTES.....	36
8. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.....	38
9. METODOLOGÍA .....	41
9.1. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	41
9.2. PROCESAMIENTO DE DATOS .....	42
10. RESULTADOS.....	44
11. CONCLUSIONES .....	71
12. RECOMENDACIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXOS.....	77

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica regional del municipio de Pesca, Boyacá. ....	19
<b>Figura 2.</b> Mapa Geológico de la Zona de estudio donde se muestra la distribución de los SEV adquiridos en campo. ....	23
<b>Figura 3.</b> Resistividades en diferentes materiales. ....	29
<b>Figura 4.</b> Resistividad aparente ( $\rho_a$ ) dependiendo del carácter del corte geoelectrico. Medio a) homogéneo; b) en presencia de un cuerpo buen conductor, c) cuerpo mal conductor (calizas). ....	30
<b>Figura 5.</b> Arreglos Geoeléctricos para la medición de la resistividad del suelo. ....	31
<b>Figura 6.</b> Principio de penetración de corriente en sondeos eléctricos. ....	33
<b>Figura 7.</b> Representación de las curvas de resistividades aparentes para 2, 3 y 4 capas. ....	35
<b>Figura 8.</b> Terrámetro ABEM SAS 1000/4000 utilizado en campo para la adquisición de datos. ....	39
<b>Figura 9.</b> Interfaz del programa IPI2win donde se muestra la curva de campo y su interpretación geoeléctrica. ....	40
<b>Figura 10.</b> Imagen aérea de la zona de estudio con la ubicación de los sondeos de los perfiles D, E y la calicata de la mina Santa Teresa. ....	41
<b>Figura 11.</b> Curva de SEV Da, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	45
<b>Figura 12.</b> Curva de SEV Db, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	47
<b>Figura 13.</b> Curva de SEV Dc, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	49
<b>Figura 14.</b> Curva de SEV Dd, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	51
<b>Figura 15.</b> Curva de SEV Ea, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	53
<b>Figura 16.</b> Curva de SEV Eb, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	55
<b>Figura 17.</b> Curva de SEV Ec, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	57
<b>Figura 18.</b> Curva de SEV Ed, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	59
<b>Figura 19.</b> Curva de SEV ST1, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	62
<b>Figura 20.</b> Curva de SEV ST2, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	63
<b>Figura 21.</b> Curva de SEV ST3, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	64
<b>Figura 22.</b> Curva de SEV ST4, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	65
<b>Figura 23.</b> Curva de SEV ST5, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	66
<b>Figura 24.</b> Curva de SEV ST6, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	67
<b>Figura 25.</b> Curva de SEV ST7, correlación litológica y corte geoeléctrico. ....	68
<b>Figura 26.</b> Pseudosección realizada para los sondeos adquiridos en la Mina Santa Teresa. ....	69

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Valores típicos de resistividad.....	28
<b>Tabla 2.</b> Coordenadas geográficas Origen Bogotá de cada SEV adquirido.....	42

## **ANEXOS**

A continuación se presentan los formatos de campo, con los datos adquiridos en los Sondeos Eléctricos Verticales.

**ANEXO A.** Formato de campo para el sondeo Da y los resultados obtenidos.

**ANEXO B.** Formato de campo para el sondeo Db y los resultados obtenidos.

**ANEXO C.** Formato de campo para el sondeo Dc y los resultados obtenidos.

**ANEXO D.** Formato de campo para el sondeo Dd y los resultados obtenidos.

**ANEXO E.** Formato de campo para el sondeo Ea y los resultados obtenidos.

**ANEXO F.** Formato de campo para el sondeo Eb y los resultados obtenidos.

**ANEXO G.** Formato de campo para el sondeo Ec y los resultados obtenidos.

**ANEXO H.** Formato de campo para el sondeo Ed y los resultados obtenidos.

**ANEXO I.** Formato de campo para el sondeo ST1 y los resultados obtenidos.

**ANEXO J.** Formato de campo para el sondeo ST2 y los resultados obtenidos.

**ANEXO K.** Formato de campo para el sondeo ST3 y los resultados obtenidos.

**ANEXO L.** Formato de campo para el sondeo ST4 y los resultados obtenidos.

**ANEXO M.** Formato de campo para el sondeo ST5 y los resultados obtenidos.

**ANEXO N.** Formato de campo para el sondeo ST6 y los resultados obtenidos.

**ANEXO O.** Formato de campo para el sondeo ST7 y los resultados obtenidos.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES COMO MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN EL ÁREA DE PESCA, CUENCA CORDILLERA ORIENTAL.\*

**AUTORES:** Gustavo Andrés Chacón Gómez, Iván Felipe Palacios Mendoza.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** sondeos eléctricos verticales, resistividad, acuífero, litología, pseudosección eléctrica, calicata eléctrica.

### **DESCRIPCIÓN:**

En el presente trabajo se muestra la adquisición, procesamiento e interpretación para el método geofísico denominado “Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)” con el fin de caracterizar geoelectricamente el subsuelo y relacionar este con la geología de la zona. Este estudio mejora la comprensión del modelo geológico en el municipio de Pesca, Boyacá, el cual se ve afectado en el verano por la escasez del recurso hídrico.

Durante el proyecto, se adquirieron 15 SEV's ubicados en diferentes unidades geológicas; 7 de estos sondeos se realizaron a modo de calicata eléctrica, a una distancia muy corta, de tan solo 5 metros. Lo anterior se realizó, con el fin de poder relacionar sus resultados para obtener una pseudosección.

Una vez interpretados los datos, se observa que el método arroja datos confiables al mostrar resistividades correspondientes con las litologías de las unidades geológicas donde se trabajó. En algunas zonas se pudo comparar con afloramientos de fácil acceso o incluso pozos de agua presentes en los alrededores. En otras zonas, solo se tiene la información obtenida por los SEV's. Estos datos ayudan a entender el modelo hidrogeológico presente en el municipio de Pesca, sin embargo, se recomienda la aplicación de otros métodos geofísicos para aumentar la comprensión del subsuelo en el área.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Directora: Martha Liliana Sarmiento Moreno.

## ABSTRACT

**TITLE:** ACQUISITION, PROCESS AND INTERPRETATION OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING AS A METHOD OF SUBSURFACE CHARACTERIZATION IN THE AREA OF PESCA, EASTERN BASIN RANGE.\*

**AUTHORS:** Gustavo Andrés Chacón Gómez, Iván Felipe Palacios Mendoza.\*\*

**KEYWORDS:** vertical electrical sounding, resistivity, aquifer, lithology, electric profile, electric calicata

### **DESCRIPTION:**

This thesis project shows the acquisition, process and interpretation of the geophysical method called "Vertical Electrical Sounding (VES), which characterizes geoelectrically the subsurface and correlates it to the geology of the area. This study helps to provide a better comprehension of the geological model in the town of Pesca, Boyacá, where water resources are diminished due to the summer season.

Throughout this project, 15 VES acquisitions were located in different geological units; 7 of these surveys were done by the electrical calicata mode, separated at a very short distance of only 5 meters between each other. The previous experiments were done to connect the results and to obtain a pseudosection.

Undoubtfully, after the data interpretation, it is evident that the method gives reliable results because the real resistivities correspond to the lithologies of the geological units in the area. In some areas, it was possible to compare them with accessible outcrops or shallow wells located in the surroundings. In other areas, only the VES results were analyzed. These data helps to understand the hydrogeological model present in the town of Pesca, nevertheless, the application of other geophysical methods is recommended to increase the understanding of the subsurface in the area.

---

\* Bachelor thesis.

\*\* Faculty of Physics-Chemistry Engineering. School of Geology. Director: Martha Liliana Sarmiento Moreno

## INTRODUCCIÓN

La exploración eléctrica ha sido uno de los principales métodos geofísicos para la caracterización del subsuelo. Dentro de estos métodos, existen diversas técnicas geofísicas eléctricas que miden la resistividad de los materiales u otros parámetros físicos. Algunas de estas técnicas son más modernas y precisas como las tomografías eléctricas. En este trabajo, se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), una técnica no tan precisa pero que hoy en día se sigue utilizando junto con software modernos de computación por su facilidad y relativa economía.

En el presente trabajo se mostrará la adquisición, procesamiento e interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales con el fin de caracterizar geoelectricamente el subsuelo y relacionar este con la geología de la zona.

La región de estudio comprende un área de aproximadamente de 8 Km<sup>2</sup> y se encuentra en los alrededores del municipio de Pesca, Boyacá, entre las coordenadas (con origen Bogotá, Gauss Central) X: 1'109.000 - 1'118.000 y Y: 1'090.000 - 1'114.000. Se adquirieron 8 SEV y una calicata eléctrica durante el 24 de marzo y el 12 de abril de 2014. Posteriormente se realizó el trabajo en oficina de procesamiento e interpretación.

Se analizó cada sondeo los cuales fueron realizados en puntos donde afloraban distintas unidades geológicas con el fin de caracterizar diferentes litologías presentes en la zona. Es importante el acercamiento que se hace en este estudio de entender el subsuelo en este municipio conocido por presentar actividades de minería y agricultura.

# 1. OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Caracterizar eléctricamente el subsuelo en el área de Pesca, Boyacá, a través de la adquisición, procesamiento e interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir datos en el área de interés a partir del método de Sondeos Eléctricos Verticales.
- Procesar los datos adquiridos, generar las curvas de resistividades aparentes y obtener las resistividades reales para cada SEV.
- Interpretar el comportamiento eléctrico de las rocas presentes.
- Correlacionar lateralmente los sondeos eléctricos verticales mediante pseudosecciones de resistividad aparente y verdadera.
- Analizar cualitativa y cuantitativamente los resultados a través de curvas de resistividad real y aparente para diferentes espesores y a distintas profundidades.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El estudio de prospección geoelectrica mediante Sondeos Eléctricos Verticales en los alrededores del municipio de Pesca, Boyacá, hace parte del convenio de cooperación tecnológica No. 002 de 2012 para la realización de prácticas empresariales entre la Universidad Industrial de Santander y Ecopetrol S.A.

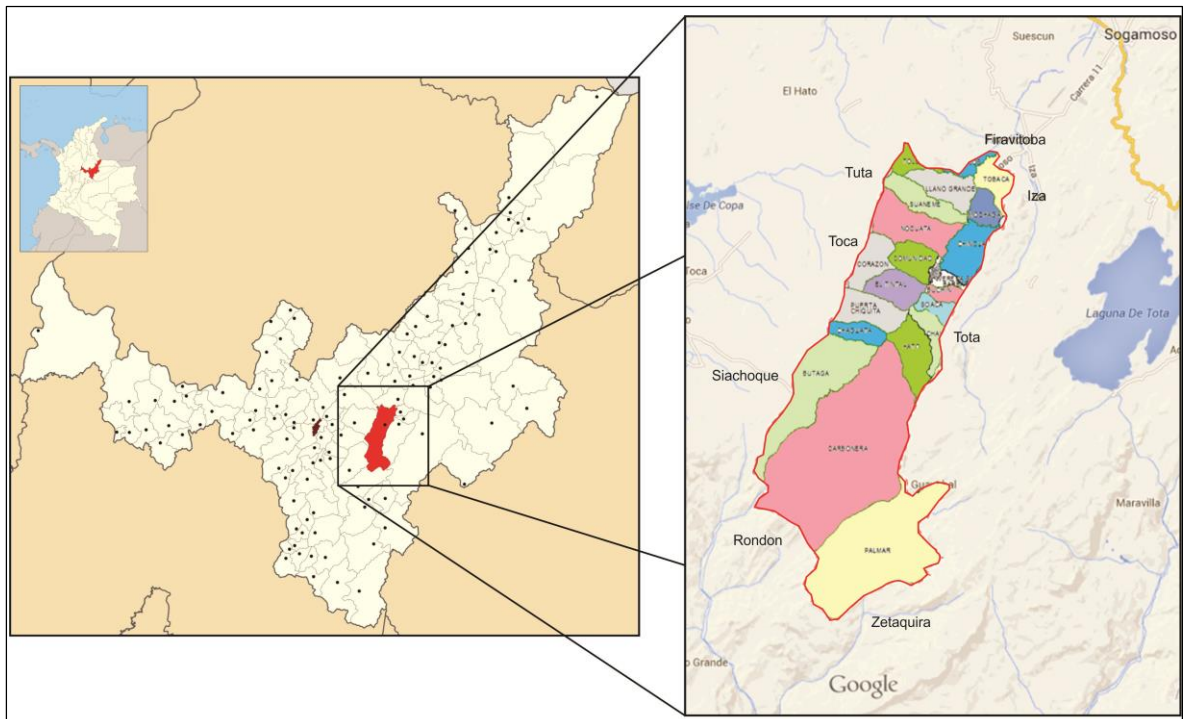
Dentro de la geoelectrica, el análisis de la respuesta resistiva de las rocas es una herramienta ampliamente utilizada en la industria de la ingeniería en usos como la determinación del nivel piezométrico, estudios geotécnicos, medio ambiente y minería. La identificación y delimitación de cortes geoelectricos y litologías presentes en el área de estudio es uno de los objetivos establecidos en el desarrollo de la práctica para la realización de proyectos internos específicos.

De esta manera se intenta generar un modelo geoelectrico del subsuelo en el sector de interés involucrando para ello las etapas implícitas en estas técnicas, como son la determinación de patrones resistivos, su comportamiento y posterior interpretación en esta zona de interés.

### 3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra localizada en los alrededores del municipio de Pesca, Boyacá (ver Figura 1). El Municipio de Pesca se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental al oriente de la capital del Departamento de Boyacá, dentro del rectángulo formado por las coordenadas aproximadas (con origen Bogotá, Gauss Central) X: 1'109.000 - 1'118.000 y : 1'090.000 - 1'114.000, dentro del cuadrante X: 1.080.000 y 1'120.000 - Hidrográficamente se encuentra entre la Cuenca del Río Chicamocha y la sub-cuenca del Río Pesca; a la primera pertenece el sector occidente del Municipio y al segundo atraviesa el territorio municipal de sur a norte; posee altitudes que van desde los 2.600 hasta los 4.000 metros sobre el nivel del mar.

**Figura 1.** Localización geográfica regional del municipio de Pesca, Boyacá.



**Fuente:** Tomado y modificado de Google Maps y de la página web del municipio de Pesca- Boyacá.

Territorialmente el departamento de Boyacá se encuentra agrupado por doce (12) provincias, Pesca se ubica dentro de la provincia de Sugamuxi. La zona rural del Municipio está dividida en veintiuna (21) veredas (Tobacá, Mochagá, Chincua, Santa Barbará, Buchín, Soacá, Chaviga, El Hato, Carbonera, El Palmar, Butagá, Chaguatá, Puerta Chiquita, Tintal, Corazón, Comunidad, Nocuata, Suaneme, Llano Grande, Toledo y Naranjos) en las cuales residen aproximadamente 6.954 habitantes del sector rural, según las estadísticas del Dane (tomado del Plan de Desarrollo Municipal, 2008).

Los límites del municipio son los siguientes:

**Por el Norte:** Con los Municipios de Iza y Firavitoba.

**Por el Sur:** Con los Municipios de Siachoque, Rondón y Zetaquirá.

**Por el Occidente:** Con los Municipios de Paipa, Tuta y Toca.

**Por el Oriente:** Con los Municipios de Cuítiva y Tota.

Durante la fase de campo, se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) los cuales se adquirieron en la zona delimitada por las coordenadas N=1'105.000 – 1'108.000; E=1'112.000 – 1'116.000 cuya ubicación se muestra en la Figura 2.

#### 4. MARCO GEOLÓGICO

La esquina noroccidental de Suramérica está localizada en un sector de triple convergencia entre las placas Caribe, Nazca y Suramérica. La Placa Caribe tiene un movimiento E-SE, mientras que la Placa de Nazca tiene un movimiento en dirección al E.

El norte de los Andes corresponde a un bloque con movimiento al NE, respecto a la Placa Suramericana. Esta convergencia de placas en el sector NW de Suramérica crea una zona de deformación continental definida por cabalgamientos en dirección NE-SE y fallas de rumbo. (Corredor, 2003 y Cortes et al. 2005).

En márgenes convergentes, la carga tectónica que se genera por el cambio de espesor y levantamiento de un cinturón montañoso induce la flexura de la corteza y genera una depresión adyacente denominada cuenca de antepaís (*foreland basin*), allí se depositan los productos de la erosión de las rocas que se levantan (Jordan et al. 1983). La Cordillera Oriental de Colombia es un cinturón orogénico bivergente cuya fase principal de levantamiento ocurrió después del Mioceno medio (Cooper et al., 1995) mediante la reactivación e inversión tectónica de fallas normales de antiguas cuencas extensionales del Jurásico superior y Cretácico inferior (Cooper et al. 1995).

La zona de estudio se encuentra ubicada en la cuenca Cordillera Oriental que equivale al "Supraterreno de la Cordillera Oriental" de Etayo-Serna (1983) en su informe del Mapa de Terrenos de Colombia. Es una provincia muy extensa pues cubre la mayor parte de la Cordillera Oriental; se encuentra limitada al occidente por el sistema de fallas de La Salina, al suroriente por el sistema de fallas del Borde Llanero o de Guaicáramo. Está constituida principalmente por rocas sedimentarias Cretácicas, Paleógenas y Neógenas, intensamente plegadas y falladas.

## 5. ESTRATIGRAFÍA

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de edades que van desde el Cretácico al Paleógeno. De base a techo presenta las siguientes unidades estratigráficas:

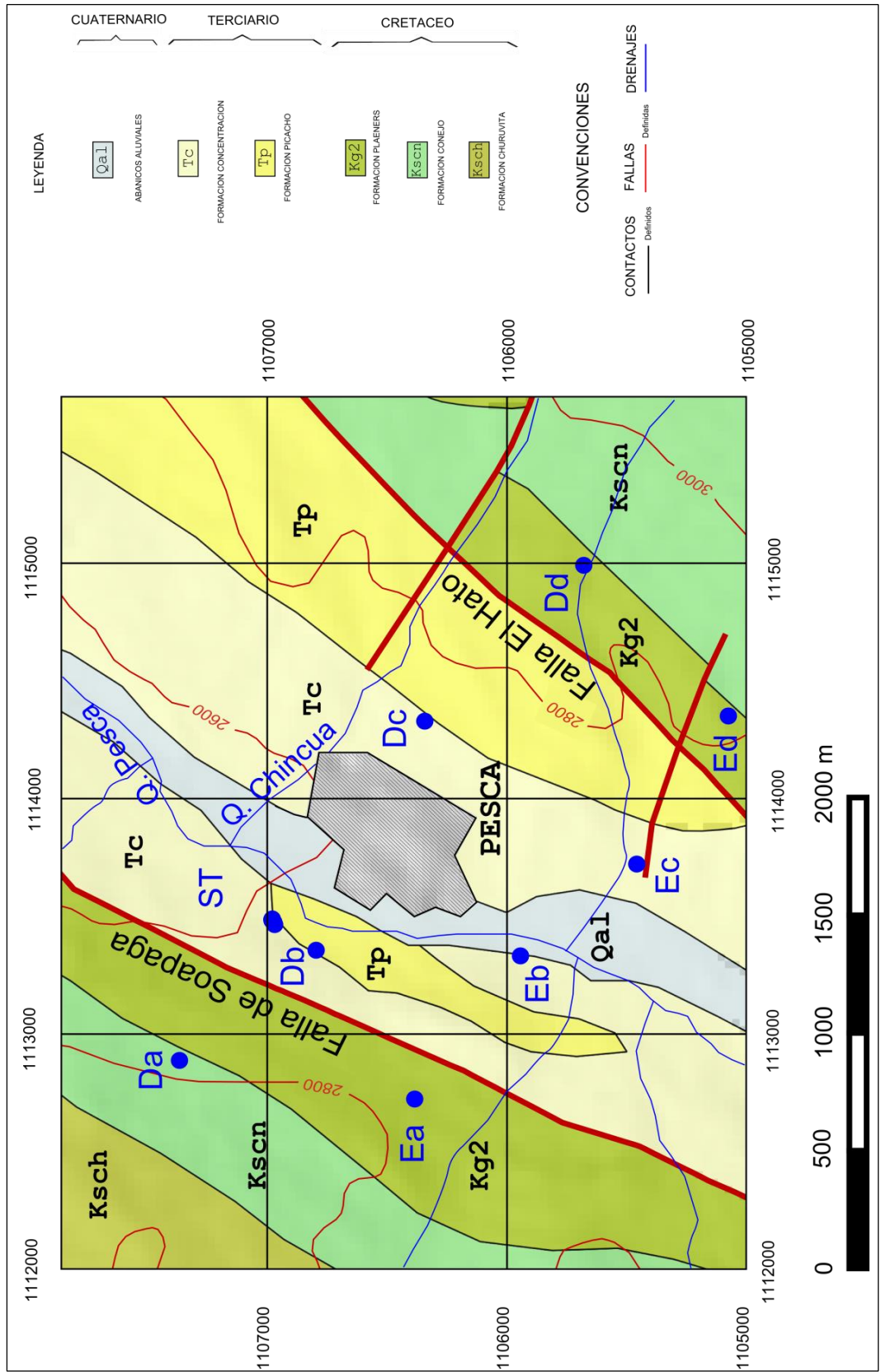
### 5.1. FORMACIÓN CHURUVITA (Ksch)

Compuesta por tres segmentos: el inferior por 105 m de una alternancia de areniscas cuarzosas muscovíticas, de color gris, calizas e intercalaciones de arcillolita y limolita. El segmento intermedio se compone de 75 m de bancos lumaquéllicos calcáreos, alternando con arcillolitas, limolitas y areniscas cuarzosas de grano angular a subangular con muscovita. El segmento superior presenta una alternancia de arcillolitas y limolitas con paquetes de areniscas de grano fino a medio, y bancos calcáreos macizos. La Formación Churuvita hace parte de lo que Renzoni (1967) y Etayo (1969) nombran como Grupo Churuvita, el cual abarca a la mencionada Formación Churuvita en la parte inferior y la Formación San Rafael en la parte superior. De edad Cenomaniano según Etayo (1969), la Formación Churuvita aflora en la zona de estudio al noroccidente del municipio de Pesca en la vía que conduce a la vereda Suaneme.

### 5.2. FORMACIÓN CONEJO (Kscn)

Según Rodríguez y Ulloa (1973), consta de base a techo de una sucesión de arcillolitas y lodolitas laminadas, a veces calcáreas, con intercalaciones de arcillolitas no calcáreas en capas delgadas a medias, limolitas de cuarzo y cuarzoarenitas de grano fino a medio, especialmente hacia el tope de la unidad. El contacto inferior se ubicó en el techo de una limolita de cuarzo de la Formación La Frontera, mientras que el superior se ubicó en la base de la capa más baja de arenita de cuarzo de la Formación Arenisca Dura. De edad Coniaciano temprano según Etayo (1969) la Formación Conejo aflora al occidente del municipio de Pesca en la vía que conduce a la vereda Carbonera.

**Figura 2.** Mapa Geológico de la Zona de estudio donde se muestra la distribución de los SEV adquiridos en campo.



### 5.3. FORMACIÓN PLAENERS (Kg2)

Está representada por arcillolitas, lilitas, limolitas y en menor proporción areniscas de grano muy fino. En general presenta una morfología suave y genera una hondonada debido a su litología fina. La Formación Plaeners descansa en contacto neto y concordante sobre la Formación Chipaque y su contacto superior también es neto y concordante con la Formación los Pinos. Pérez y Salazar (1971) le asignan una edad de Campaniano hasta Maastrichtiano, su ambiente de sedimentación fue durante un episodio de caída relativa del nivel del mar.

### 5.4. FORMACIÓN PICACHO (Tp)

Alvarado B. & Sarmiento R. (1944) designan un conjunto de areniscas y conglomerados que afloran en la región de Paz de Río, vía Chircales – Sativa. La Formación Picacho está constituida por areniscas feldespáticas de grano medio a grueso, frecuentes intercalaciones con algunos lentes conglomeráticos. Presenta estratificación cruzada y gradada. La unidad presenta algunas intercalaciones de arcillolitas de color gris y abigarrado de espesores pequeños a lo largo de su extensión. El contacto Inferior donde se observa es concordante y neto con la Formación Arcillas de Socha, en cuanto al contacto superior está marcado por la base de la Formación Concentración de manera neta y concordante. La formación Picacho según Van der Hammen (1957), pertenece al Eoceno Inferior, teniendo un origen continental y depositado en un ambiente de tipo deltaico.

### 5.5. FORMACIÓN CONCENTRACIÓN (Tc)

El nombre fue dado por Alvarado B. & Sarmiento R. (1944), esta unidad aflora en la vía que conduce a El Alto en la zona de estudio. Litológicamente esta formación se caracteriza por la presencia de intercalaciones de arcillolitas gris claro con tonalidades rojizas y algunas cuarzoareniscas de grano medio a grueso, también se encuentran areniscas feldespáticas de grano medio a grueso con presencia de conglomerados. En la parte arcillosa de la formación se encuentra presencia de hierro oolítico, característica principal de la unidad. La unidad se encuentra en

contacto inferior neto y concordante con la Formación Picacho. La edad corresponde al Eoceno medio a Oligoceno medio, según estudios palinológicos de Van der Hammen (1957). El origen de depositación de la formación es un ambiente lagunar continental a marino salobre.

#### 5.6. ABANICOS ALUVIALES (Qa1)

Están constituidos especialmente por gravas (de bloques y guijarros redondeados) que provienen de las rocas presentes en sus respaldos. Geología de la plancha 191 Tunja.

## 6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

De acuerdo a Dengo y Covey (1993) la geología estructural de la Cordillera Oriental se puede explicar a partir de dos estilos estructurales. El primero asociado a un despegue del basamento durante el Mioceno- Plioceno, dando como resultado retrocabalgamientos, y el segundo es el levantamiento de la cordillera oriental en el plioceno-holoceno generando fallas inversas. Estos dos estilos estructurales se sobre impusieron a grabenes del Jurásico y Cretácico temprano, cuyas fallas normales fueron parcialmente invertidas durante las etapas de deformación compresional.

En la zona que comprende el área de interés se ve afectada principalmente por las estribaciones de la Falla de Soapaga, una falla inversa que además de presentar cabalgamientos cerca de Firavitoba y Pesca, presenta rasgos transcurrentes con desplazamiento dextral en Sogamoso, generando una cuenca de tracción originada por una curva de relajamiento (Velandia, 2005).

El área de estudio se ve afectada tectónicamente por la falla de Soapaga, con una dirección de N45°E alinea el cauce del río Pesca, poniendo en contacto, al oriente rocas del Paleógeno y al occidente rocas del Cretácico inferior a medio. Se presenta también una falla secundaria en extensión denominada el Hato, la cual pone en contacto por el costado oriental la secuencia del Cretácico medio a superior con el Terciario del lado occidental.

## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. MÉTODOS GEOFÍSICOS

La Geofísica aplica los principios de la física para el estudio de la Tierra. Una investigación geofísica del interior de la tierra involucra la toma de medidas en la superficie terrestre o cerca de ella, la cual es influenciada por la distribución interna de sus propiedades físicas. El Análisis de estas medidas puede revelar cómo sus propiedades varían tanto vertical como lateralmente.

Operando a diferentes escalas, los métodos geofísicos pueden aplicarse a una amplia gama de investigaciones a partir del estudio de toda la tierra (Kearey et al. 1996) hasta la exploración de una región específica para usos de ingeniería u otros propósitos (Vogelsang, 1995 y McCann et al. 1997).

Un estudio geofísico, aunque algunas veces está propenso a grandes ambigüedades o incertidumbres de interpretación, proporciona un medio relativamente rápido y rentable obteniendo así información sobre la geología del subsuelo (Keary et al. 2002).

### 7.2. GEOELÉCTRICA

Es la rama de la Geofísica que trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica (Auge, 2008). Es uno de los métodos geofísicos principales para el estudio de la estructura geológica de la parte superior de la corteza terrestre (primeros doscientos metros de profundidad), principalmente usado en geotecnia y para búsqueda de acuíferos.

Cuando decimos que la geoeléctrica trata sobre el comportamiento del terreno en relación a la corriente eléctrica, nos referimos a la medición de las *resistividades* que este presenta. La resistividad del suelo está relacionada a varios parámetros geológicos como contenido mineral y fluido, porosidad y grado de saturación del agua en la roca. Una roca ígnea tendrá mayor resistividad a una roca sedimentaria, y una arcilla saturada de agua tendrá menores resistividades. En la

Tabla 1 y la Figura 3 se muestran unos valores estándares para distintos tipos de rocas.

**Tabla 1.** Valores típicos de resistividad.

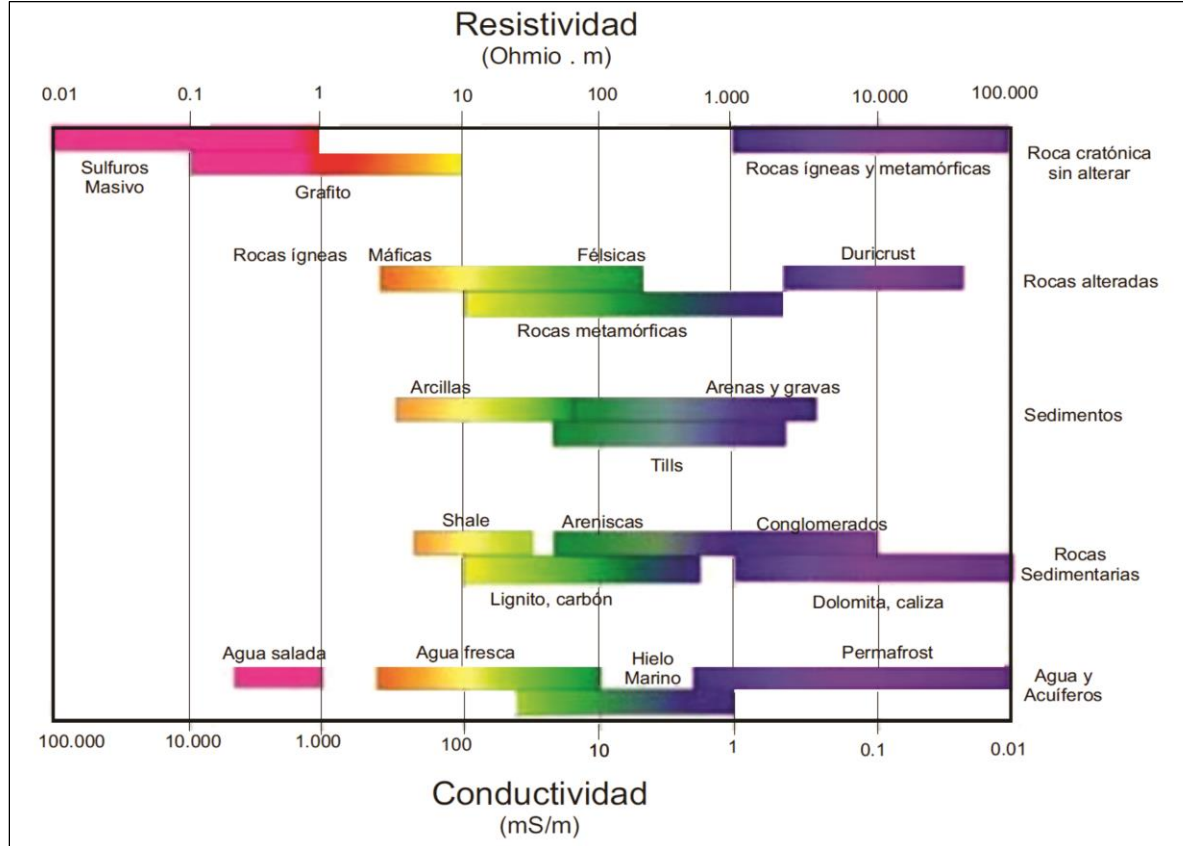
Material	Resistividad ( $\Omega m$ )
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito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

**Fuente:** Arias et al. (2000).

La resistividad se define a partir de un cubo eléctricamente uniforme, de lado de longitud  $L$  a través del cual pasa una corriente  $I$ . El material dentro del cubo resiste el paso de la corriente eléctrica a través de él, el resultado es una caída de potencial ( $V$ ) entre las caras opuestas de este (Caraballo, 2008).

Para trabajar con el método de la resistividad se usan cuatro electrodos: A, B, M y N. Los electrodos de emisión A y B, y los electrodos de medición M y N. A través de los electrodos de emisión o de *corriente* (A y B), se introduce en el terreno una corriente eléctrica de intensidad  $I$ , de cualquier fuente de corriente continua, por ejemplo de una batería de automóvil. Entre dos puntos del terreno y con ayuda de los electrodos de medición o de *potencial* (M y N) situados en estos puntos, y mediante el correspondiente instrumento de medida, se miden las diferencias de potenciales,  $\Delta V$ , que surgen.

**Figura 3.** Resistividades en diferentes materiales.



**Fuente:** Falgas (2007).

Los medidores de resistividad dan un valor a partir de la siguiente formula,

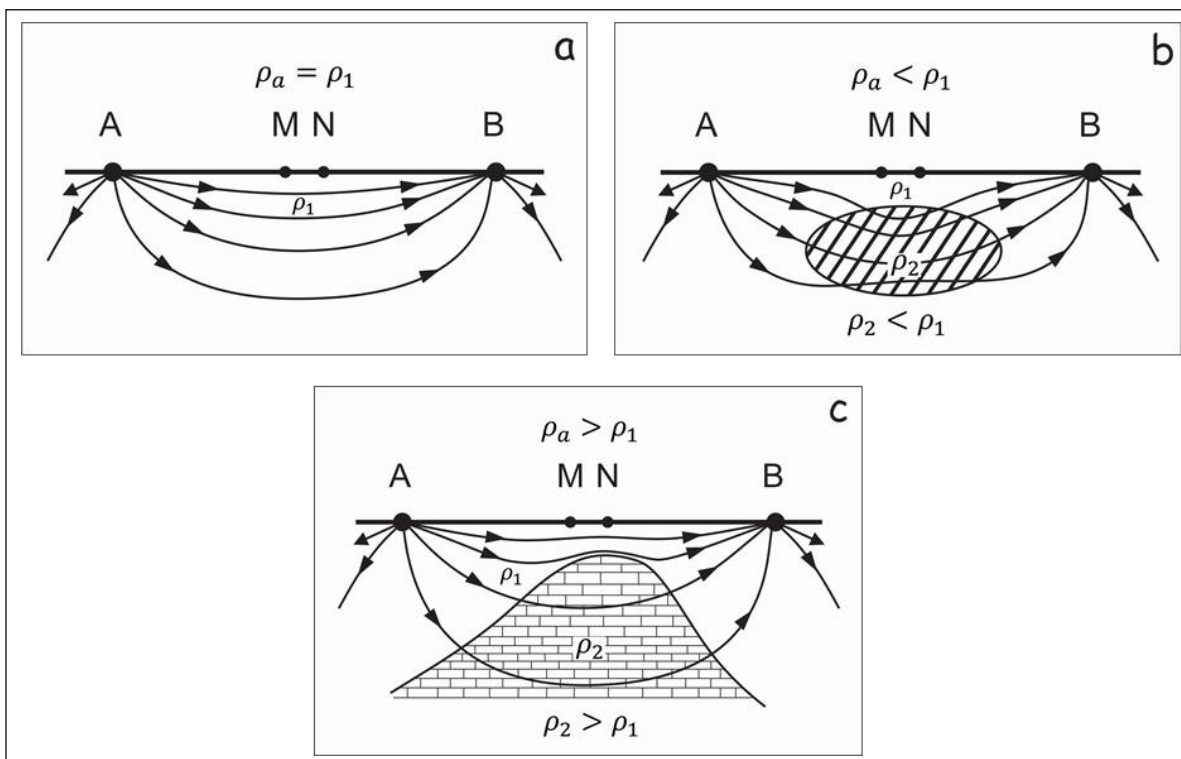
$$\rho_a = k \cdot \frac{V}{I}, \quad (1)$$

donde el valor calculado de resistividad es un valor “aparente”, que viene dado por la constante  $k$  del factor geométrico, un voltaje  $V$  y una corriente  $I$ .

Para el caso de un medio homogéneo, la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera  $\rho_a = \rho$  (2). Se puede deducir a partir de las dos fórmulas anteriores, que la  $\rho_a$  no depende de la intensidad de la corriente ( $I$ ) que se envía al terreno, ya que la variación de esta genera otra variación proporcional de la diferencia de potencial. Según Jakubovskii et al. (1980), la magnitud de la resistencia aparente depende de la estructura del corte geoelectrico, de la distribución relativa de las tomas de tierra en el dispositivo y de la situación de

este en la superficie del terreno. En la Figura 4 se explica lo anterior. En el caso del medio homogéneo (Figura 4a) la resistividad aparente será igual a la verdadera. En la Figura 4b, la corriente se concentra en el cuerpo conductor, por lo cual la densidad de corriente en la parte del medio circundante en la que están colocados los electrodos de medición disminuye y a causa de esto disminuye la diferencia de potencial entre estos electrodos. Por otro lado, en presencia de un cuerpo mal conductor (Figura 4c), la corriente contornea el cuerpo de alta resistencia y se condensa en la zona de los electrodos de medición, esto lleva a un aumento de  $V$  y por consiguiente a un aumento de  $\rho_a$ .

**Figura 4.** Resistividad aparente ( $\rho_a$ ) dependiendo del carácter del corte geoelectrico. Medio a) homogéneo; b) en presencia de un cuerpo buen conductor, c) cuerpo mal conductor (calizas).

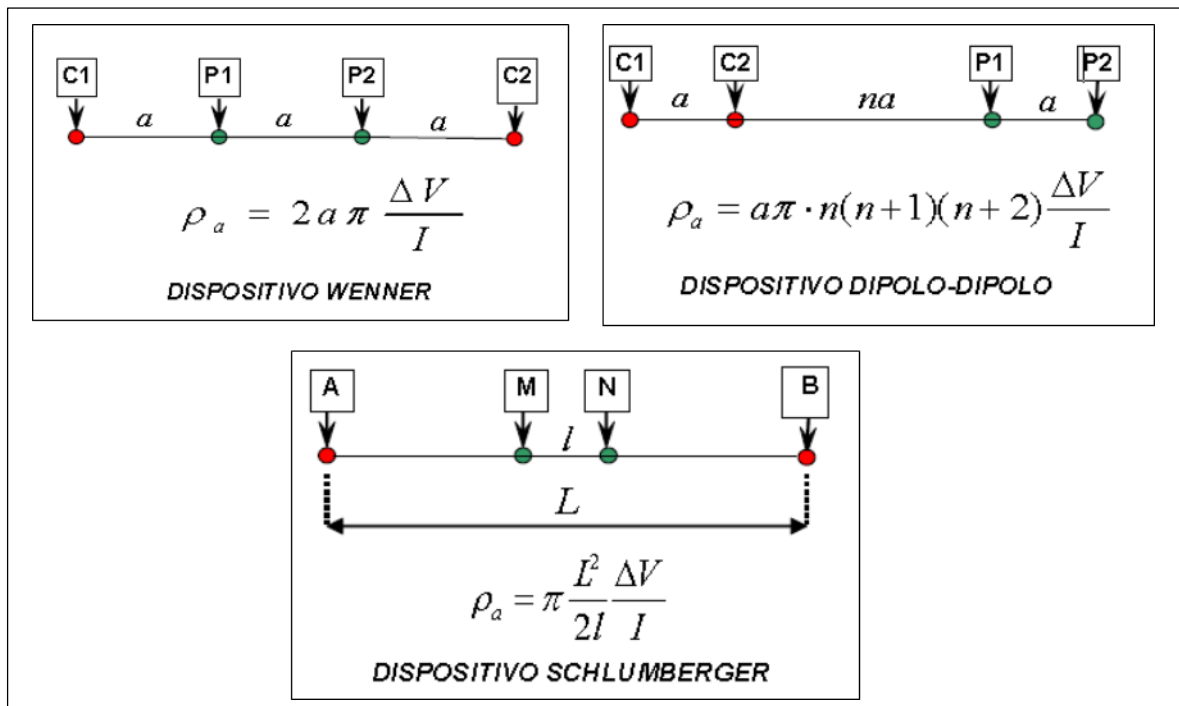


**Fuente:** Iakubovskii et al. (1980).

La disposición de los electrodos A, B, M y N o *arreglos* que forman el dispositivo tetrapuntual o 4-electrodico, se determina por el carácter geológico que se quiera

resolver (Iakubovskii et al. 1980), ya que un arreglo va a tener mayor alcance en la horizontal que otro u otro va a tener mayor alcance en la vertical. Los diferentes tipos de arreglos empleados en el método geoelectrico se diferencian entre sí por la distancia relativa entre electrodos y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial. En el gráfico que se incluye a continuación (Figura 5) se muestran los arreglos empleados con mayor frecuencia: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo.

**Figura 5.** Arreglos Geoelectricos para la medición de la resistividad del suelo.



**Fuente:** Arlandi (2005).

El arreglo o dispositivo Wenner, es un arreglo robusto, popularizado por la Universidad de Birmingham, muchos de los primeros estudios 2-D iniciaron con este arreglo (Loke, 1999). Este arreglo es bueno para usarse en zonas donde haya mucho ruido porque tiene la mayor fuerza de señal. También es muy bueno en zonas donde se conoce la presencia de estructuras horizontales, ya que es sensible a cambios en la vertical debajo del centro del arreglo; Por otro lado, su

alcance para determinar estructuras verticales estrechas es muy criticado. En el dispositivo Dipolo-Dipolo, vamos a encontrar más sensibilidad a cambios de resistividad entre los electrodos de cada dipolo. Es sensible a cambios en la horizontal pero casi insensible a cambios en la vertical. Esto lo hace bueno identificando diques y cavidades pero malo en capas sedimentarias o sills. Respecto al dispositivo Wenner, este arreglo tiene un alcance más somero. Por último, el arreglo Schlumberger, sensible tanto para estructuras horizontales como verticales es el indicado para usarse en zonas donde la geología no es muy conocida, o si se necesita buena resolución tanto en la horizontal como en la vertical. La fuerza de la señal de este arreglo es menor que la del dispositivo Wenner pero mayor que el dispositivo Dipolo-Dipolo. En este estudio, se usó el dispositivo Schlumberger.

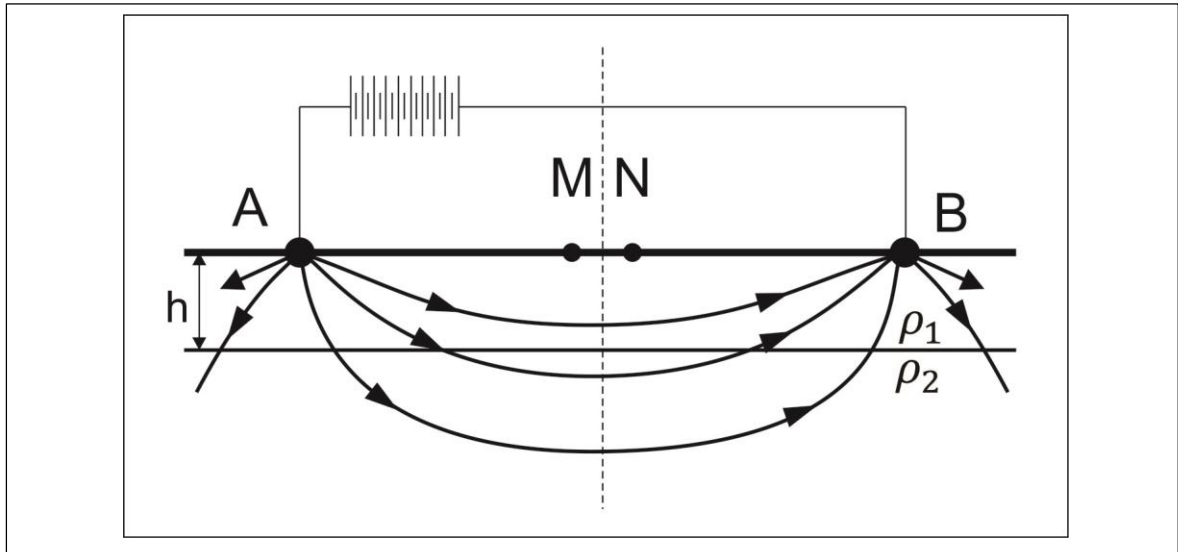
#### 7.2.1. SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

Un sondeo eléctrico vertical o SEV, es una medición de las resistividades aparentes del subsuelo, donde la magnitud de las resistencias aparentes va a variar dependiendo de cómo estén distribuidas las rocas a profundidad y también de la posición de los electrodos A y B (ver Figura 6). El SEV supone que la resistividad del subsuelo varía solo con la profundidad, y se estudian los terrenos estratificados horizontalmente, o con una inclinación menor a 30° (Caraballo, 2008).

#### 7.2.2. PENETRACIÓN DE UN SEV

Como se había mencionado anteriormente, la profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos de corriente AB, los de potencial MN y de las propiedades del suelo, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente, ya que al intercambiar de posición los electrodos de potencial con los de corriente la distribución de las líneas de corriente cambia. Sin embargo, basados en el principio de reciprocidad, la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación permanece invariante.

**Figura 6.** Principio de penetración de corriente en sondeos eléctricos.



**Fuente:** Modificado de Sharma (1997).

Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad  $AB/2$  y el 70,6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982 y Caraballo, 2008).

Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca. Podría pensarse que la penetración es proporcional a AB. Sin embargo, esto no es cierto en general puesto que lo dicho sólo es válido para un subsuelo homogéneo.

Definiendo L como la distancia entre los dos electrodos de corriente, los autores determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos electródicos de un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de  $0,35L$ , para Schlumberger de  $0,125L$  y para Wenner de  $0,11L$ . (Orellana 1987).

### 7.2.3. CORTE GEOELÉCTRICO

Los resultados obtenidos en campo se representan en forma de curvas, las cuales generan un corte geoelectrico representando las diferentes capas del subsuelo

con su respectivo espesor y resistividad. Cada corte geoelectrico se compone de  $n$  valores de resistividad y  $n-1$  espesores debido a que en la última capa no se define su espesor.

Estos cortes se clasifican dependiendo del número de capas que lo componen (Figura 7). Los cortes del mismo número de capas pueden subdividirse según el orden en que aparezcan los contactos sucesivos, resistividades mayores o menores que en la capa suprayacente (Orellana, 1982 y Caraballo, 2008). Las curvas obtenidas a partir de los resultados de campo también pueden ser representadas mediante un sistema de notación. Para el caso más sencillo donde se encuentra un corte geoelectrico de dos capas sólo pueden presentarse dos posibilidades  $\rho_1 > \rho_2$  y  $\rho_2 > \rho_1$  y no llevan una nomenclatura específica.

Cuando el subsuelo se compone de tres cortes geoelectricos se presentan cuatro posibilidades las cuales se representan de la siguiente manera:

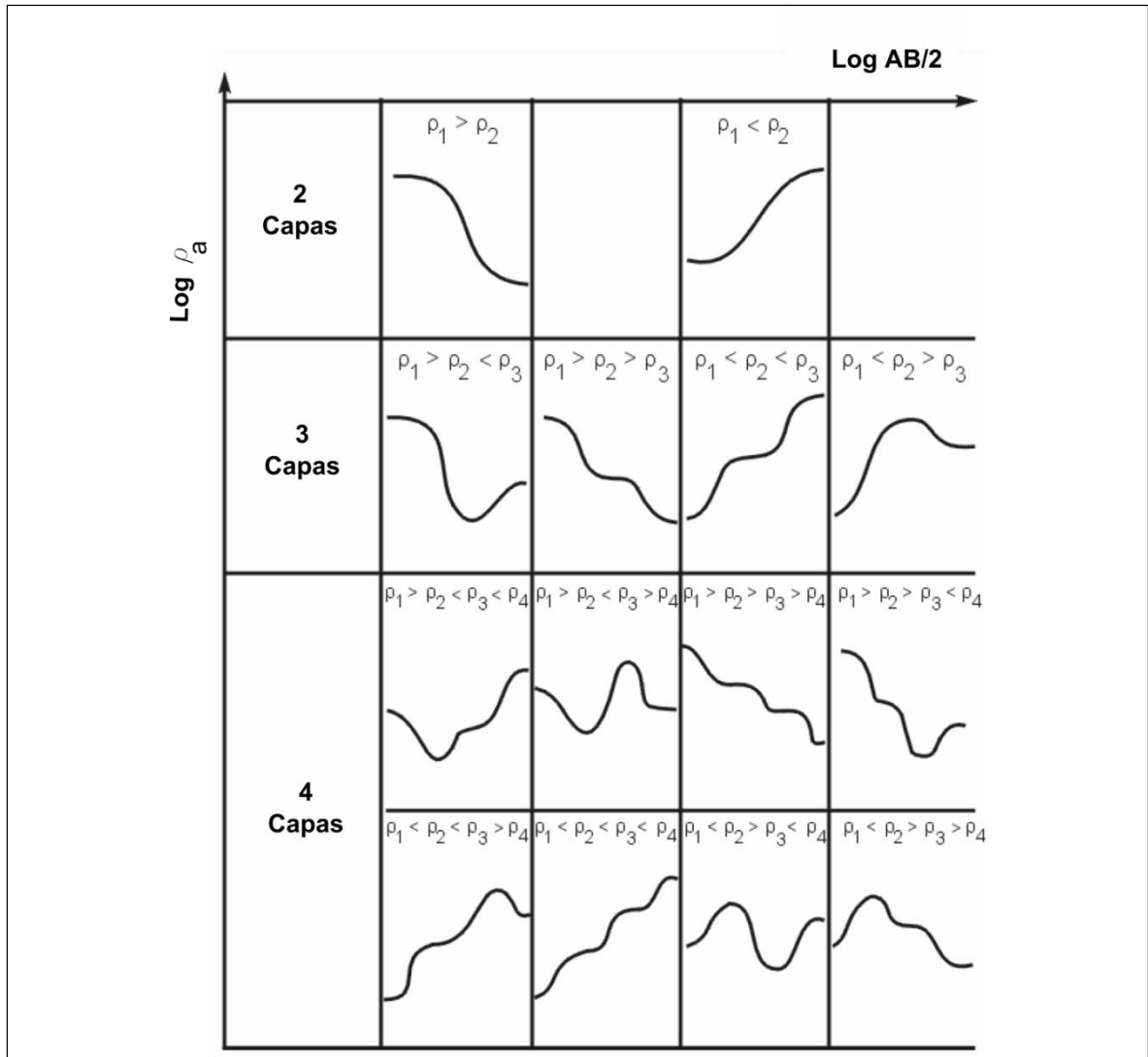
- Tipo H - La segunda capa es la menos resistiva de las tres:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ .
- Tipo K - La segunda capa es la más resistiva de las tres:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ .
- Tipo A - La resistividad aumenta en profundidad:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ .
- Tipo Q - La Resistividad disminuye en profundidad:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ .

Un corte geoelectrico de cuatro o más capas se descompone en intervalos de 3 en 3, para ello se consideran las tres primeras capas y se les asigna la letra correspondiente de la lista anterior; luego se hace lo propio con las tres últimas capas. Con base a esto, solo es posible obtener los siguientes tipos:

- Tipo HA -  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$
- Tipo HK -  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
- Tipo AA -  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$
- Tipo AK -  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$
- Tipo KH -  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
- Tipo KQ -  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$

- Tipo QH -  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$
- Tipo QQ -  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$

**Figura 7.** Representación de las curvas de resistividades aparentes para 2, 3 y 4 capas.



**Fuente:** Auge (2008).

Los tipos KK, HH, HQ, etc... Carecen de sentido, pues implican condiciones contradictorias. En la figura 7 se representan esquemáticamente las formas de las

curvas de resistividad aparente versus  $AB/2$  para 2, 3 y 4 capas y diferentes  $\rho_a$  en profundidad (Sanchez, J).

#### 7.2.4. ANTECEDENTES

Los primeros estudios geoelectricos se remontan desde mediados del siglo pasado, en el año 1829, A. Fox observo en los yacimientos de calcopirita de Cornualles (Inglaterra) un campo eléctrico natural relacionado con procesos de oxidación-reducción. A finales del siglo XIX y a comienzos del siglo XX, el avance de la física alcanzó también a los métodos de estudio de la estructura geológica de la tierra, desarrollando la geofísica aplicada y los métodos geoelectricos de exploración en particular.

En 1910 el científico francés K. Schlumberger perfeccionó el método de resistividad que ha tenido más tarde una gran aplicación en las investigaciones de geología estructural. Posteriormente en los años 1928-1929 la exploración eléctrica comenzó a utilizarse en la prospección e investigación de estructuras petrolíferas y gasíferas. En los años siguientes el volumen de estos trabajos creció de modo considerable en proporción con el aumento general del de los trabajos geofísicos para la prospección de petróleo y gas. Seguidamente en 1932 se realizaron los primeros trabajos de exploración eléctrica para la prospección e investigación de yacimientos de carbón. En este sector de las investigaciones geológicas, la exploración eléctrica encontró aplicación como método de estudio de las estructuras geológicas de las cuencas carboníferas y la prospección de capas de carbón (Iakubovskii et al. 1980).

El desarrollo tecnológico y la necesidad de solucionar situaciones del medio físico han contribuido al crecimiento y diversificación de múltiples aplicaciones en las que puede utilizarse la exploración eléctrica por corriente continua.

Mediante la ejecución e interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV) y calicatas eléctricas se han realizado un sin número de trabajos los cuales han

ayudado a solucionar tanto problemas de ingeniería como la búsqueda de fuentes de energía no convencionales.

Gracias al desarrollo tecnológico de los últimos 10 años, han aparecido nuevos métodos geofísicos de alta resolución los cuales están adaptados para suministrar información precisa sobre la profundidad, espesor y continuidad lateral de las capas del subsuelo, dando lugar a una nueva disciplina conocida con el nombre de "*Near Surface Geophysics*". Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada tomografía eléctrica, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectrónicos clásicos, como el SEV y la calicata eléctrica (Molina, 2006).

## 8. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

Se utilizó un Terrámetro SAS 1000/4000 de la marca Sueca ABEM (Figura 8) para la adquisición de datos de sondeos eléctricos verticales en campo.

El equipo cuenta con tres modos de funcionamiento (Resistividad, IP, SP) en una unidad completa y puede admitir accesorios suplementarios tales como los sistemas de electrodos ABEM MULTIMAC y el ABEM LUND para ampliar sus aplicaciones en la geofísica de superficie.

A continuación se presenta una lista de los componentes del Terrámetro:

- Batería de NiCd incorporada con un sistema de enganche
- Adaptador SAS-EBA para batería externa de 12 V
- 4 Electrodo de acero inoxidable o no polarizables
- Juegos de cable:
  - 2x750m de cable de corriente,  $0,75 \text{ mm}^2$  , en carrete
  - 2x250m de cable de potencial,  $0,75 \text{ mm}^2$  , en carrete
  - 2x2m de cable de conexión, rojo
  - 2x2m de cable de conexión, negro
  - 4 pinzas de cocodrilo

Caja de Herramientas:

- Mapas Geológicos y topográficos
- Plantilla de toma de datos
- 1 GPS Garmin
- 4 Walkie talkie
- Guantes industriales
- Cinta de enmascarar, tijeras, marcador.
- CD conversión de datos
- Martillo

**Figura 8.** Terrámetro ABEM SAS 1000/4000 utilizado en campo para la adquisición de datos.



**Fuente:** Tomado de <http://www.abem.se/resistivity/sas1000.htm> ABEM Products.

#### PROGRAMA DE CONVERSIÓN SOBRE PC-S4KCONV.EXE

Programa MS-DOS para convertir los ficheros de datos S4K del TERRAMETRO SAS 1000/4000 a formatos legibles por programas de procesamiento e interpretación.

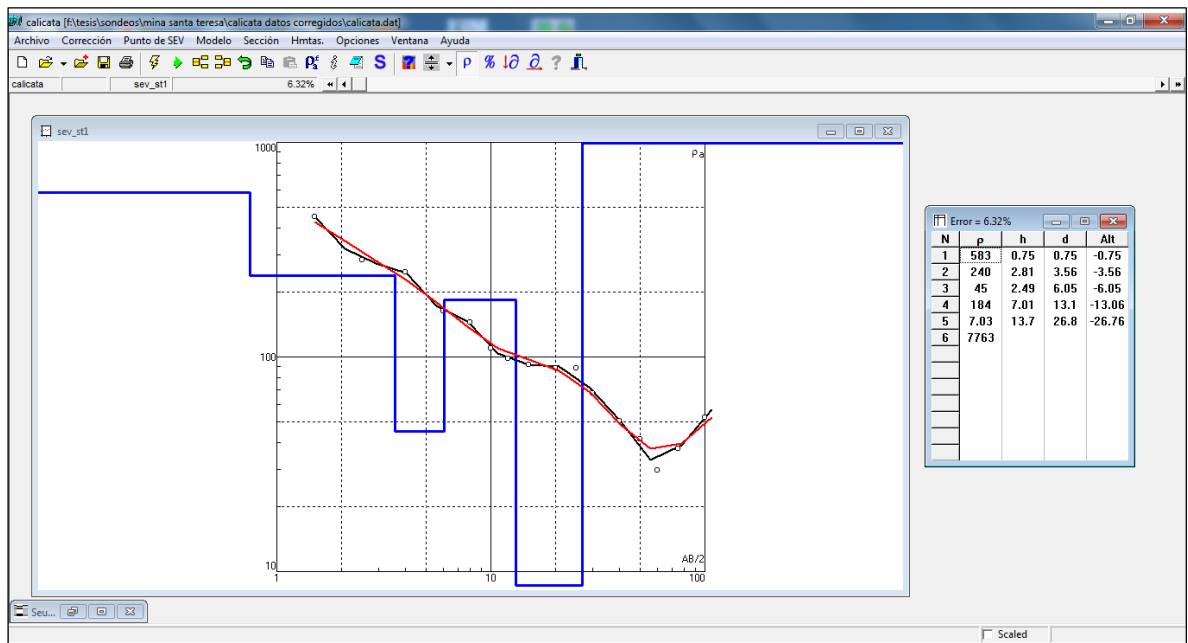
Los datos adquiridos en campo son guardados automáticamente en la memoria interna del Terrámetro en formato .S4K y son transferidos al computador vía USB utilizando el software S4Kconv.EXE el cual lee los archivos previamente guardados con las diferentes cabeceras y los convierte de acuerdo con el tipo señalado y las opciones seleccionadas. El programa no hace comprobaciones para ficheros ya existentes, por lo tanto, escribirá sobre conversiones previas si hay ficheros con el mismo nombre que los ficheros de salida de la conversión en curso. Todas las conversiones se realizan en el directorio en uso.

## IPI2WIN

IPI2win es el software de procesamiento e interpretación de perfiles geoelectricos realizado por Alexei Boabachev, Igor Modin y Vladimir Shevvin en el año 2000 en Moscú, Rusia. Está diseñado para la interpretación automática o semiautomática de datos de Sondeos Eléctricos Verticales obtenidos soportando varias configuraciones de campo.

Es usado para la interpretación de curvas obtenidas en campo, en el cual se introducen los datos en forma manual o mediante un formato, posteriormente se ajustan las condiciones para el procesamiento y finalmente arroja la visualización del sondeo interpretado en el cual se muestra el número de capas que se obtuvieron y su valor correspondiente de resistividad. La principal ventaja es su interfaz amigable (Figura 9) la cual puede cambiar parámetros del modelo de diferentes maneras: En una hoja de cálculo, en la sección de resistividad o moviendo manualmente la curva de resistividad.

**Figura 9.** Interfaz del programa IPI2win donde se muestra la curva de campo y su interpretación geoelectrica.



**Fuente:** Tomado de la interfaz del programa IPI2win.

## 9. METODOLOGÍA

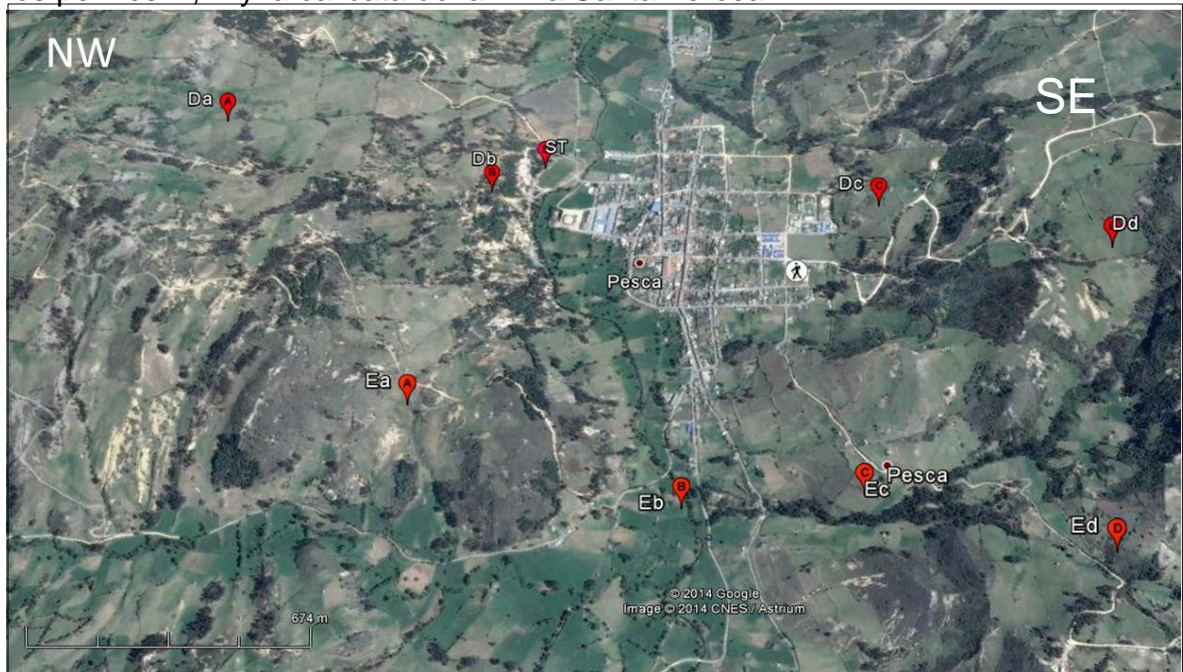
### 9.1. ADQUISICIÓN DE DATOS

La toma de datos en campo fue realizada durante el periodo comprendido entre el 24 de marzo y el 12 de abril de 2014 en los alrededores del municipio de Pesca, Boyacá.

Para la adquisición de datos, fueron asignados 8 SEV y una calicata eléctrica con coordenadas geográficas presentadas en la Tabla 2 y representadas en el mapa de la Figura 10.

Se utilizó el método de SEV para investigar las condiciones del subsuelo bajo la configuración Schlumberger ya que este método es el más sensible a la hora de localizar capas, fracturas y fallas. La máxima separación de los electrodos de corriente  $AB/2$  fue de 300 m dependiendo de las condiciones del terreno y se utilizaron 4 diferentes aperturas de MN a medida que se iba separando los

**Figura 10.** Imagen aérea de la zona de estudio con la ubicación de los sondeos de los perfiles D, E y la calicata de la mina Santa Teresa.



**Fuente:** Tomado de Gogle Earth.

electrodos AB. La apertura de los electrodos fue realizada paralela al rumbo de las capas y ocasiones en dirección a la cual las condiciones del terreno fueran favorables. Los sondeos se realizaron en días donde no hubo lluvia, esto para evitar errores en los datos.

Cada medida fue registrada en la memoria interna del equipo ABEM TERRAMETER y en un formato en Excel proporcionado por el director del proyecto para un mejor control de calidad de los datos y donde se encuentra las coordenadas del centro, dispositivo e instrumento utilizado, apertura de electrodos y su correspondiente medida de resistividad aparente (Ver Anexo 1).

**Tabla 2.** Coordenadas geográficas Origen Bogotá de cada SEV adquirido.

SEV	Coordenadas	
	Norte	Este
Da	1107366	1112888
Db	1106796	1113356
Dc	1106343	1114329
Dd	1105680	1114991
Ea	1106385	1112724
Eb	1105944	1113332
Ec	1105459	1113722
Ed	1105077	1114351
Calicata Eléctrica	1106969	1113465

## 9.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de los datos obtenidos en campo fue realizado con el software IPI2Win. Como primer paso, se introdujeron los datos de cada sondeo en el formato correspondiente (Anexo 1) y se realizó un control de calidad en el cual fueron eliminados aquellos que datos considerados “ruido” y que no seguían el patrón de la curva de campo. Cada formato de sondeo contiene la información de la apertura de los electrodos de corriente (AB), la apertura de los electrodos de potencial (MN) y su correspondiente resistividad aparente ( $\rho_a$ ) en Ohm.m.

Una vez realizado el control de calidad de los datos, se graficaron las curvas de campo y se les realizó un proceso de inversión automático para conocer sus resistividades verdaderas y el número de capas presentes. En el eje de las ordenadas se presenta cada apertura de  $AB/2$  y en las abscisas la resistividad aparente calculada. Cada SEV se clasificó de acuerdo al tipo de curva y en la interpretación cualitativa de los resultados se realizó un perfil geoelectrico con su correspondiente litología.

## 10. RESULTADOS

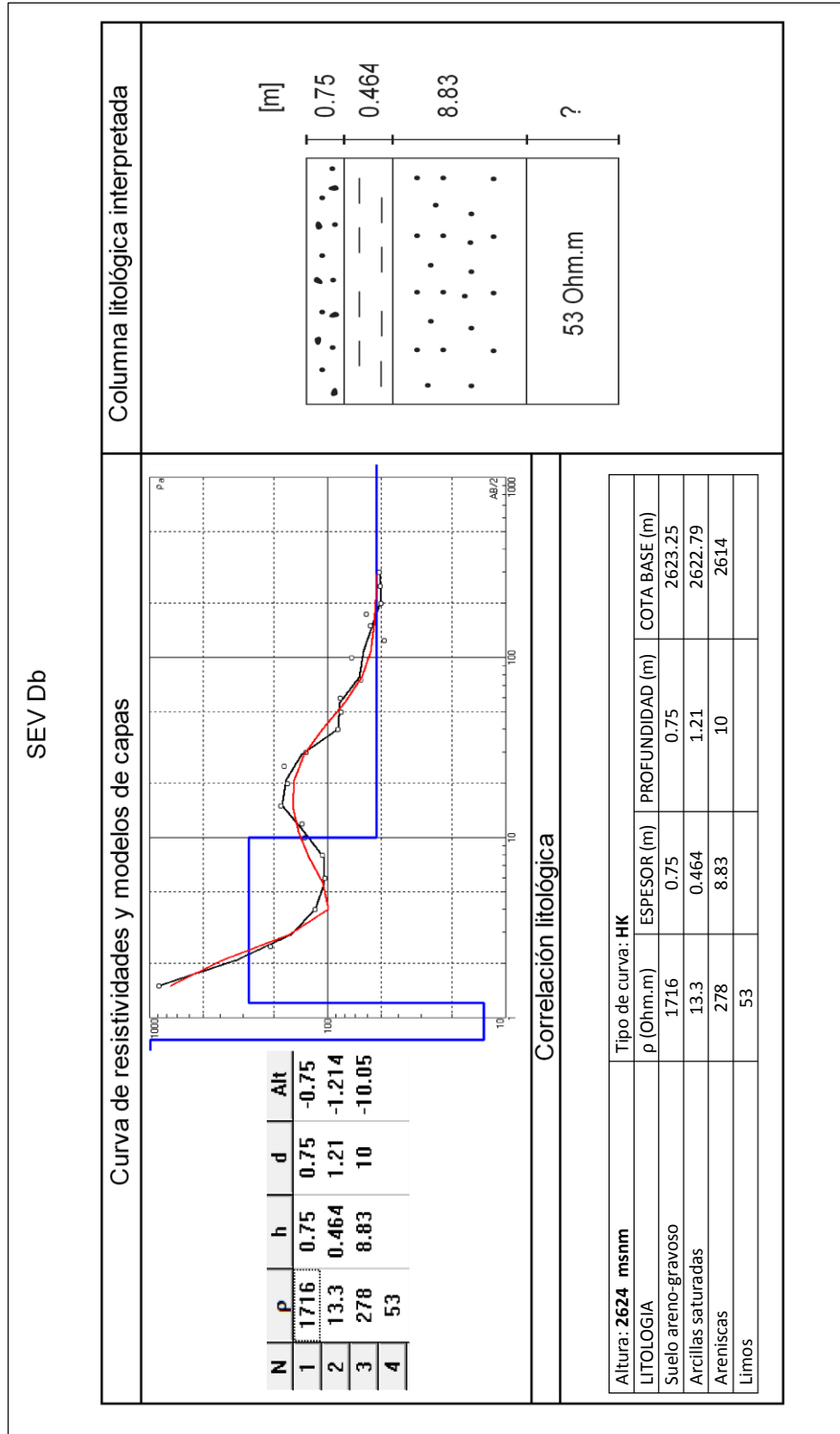
El producto final de los datos adquiridos es la interpretación cuantitativa y cualitativa. A continuación se muestra cada SEV interpretado donde se muestra la curva de resistividades y el modelo de capas, la correlación litológica y la columna litológica interpretada.



El sondeo SEV Da fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 300m y con 4 aperturas de MN y rumbo NE-SW. En la mayoría de aperturas de AB la curva de campo se ajusta muy bien a la teórica. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 24 m con un error menor al 7%. El dato de AB/2 75 se eliminó ya que su resistividad era muy diferente a las que se venían presentando en las distintas aperturas (Figura 10).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Conejo. Se obtuvieron 5 valores de resistividad: la primera con resistividad de 28.8 ohm.m que se encuentra en superficie y alcanza casi 1 m de profundidad, es considerada como el suelo orgánico debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye su valor a 12.8 ohm.m con un espesor de 5.28 m la cual está compuesta de material muy fino tipo arcilla y se considera que se encuentra saturado debido a su bajo valor de resistividad. La tercera capa incrementa a 33.7 ohm.m y llega a una profundidad de 11.1m, está compuesta por limos. La cuarta capa disminuye de nuevo su valor considerablemente a solo 3.83 ohm.m alcanzando 24m en la base, debido a su resistividad se consideran arcillas. La última capa tiene un valor de 39.4 ohm.m la cual solo podemos saber su tope y que posiblemente será un paquete de material limoso y con mezcla de arenas de grano muy fino característico de la Formación Conejo. El nivel de saturación posiblemente se encuentra a una profundidad de 1 m donde encontramos las arcillas saturadas.

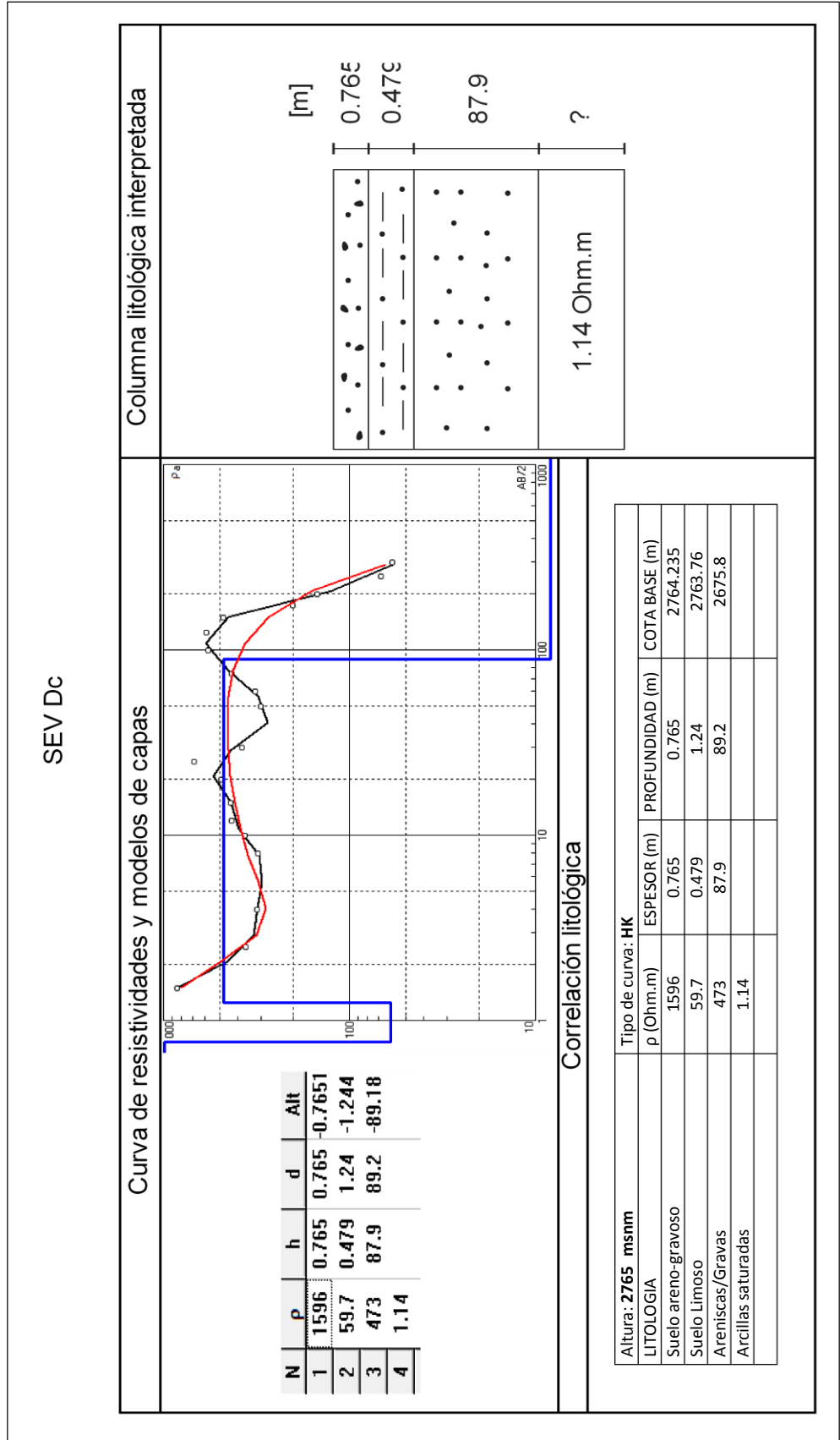
**Figura 12.** Curva de SEV Db, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Db fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 300m y con 4 aperturas de MN y rumbo N-S. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 10 m con un error de 11%. El dato de AB/2 150 se eliminó ya que su resistividad era muy diferente a las que se venían presentando en las distintas aperturas (Figura 11).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Picacho. Se obtuvieron 4 valores de resistividad: la primera con resistividad de 1716 ohm.m que se encuentra en superficie y alcanza 0.75 m de profundidad, es considerada como el suelo orgánico debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye su valor a 13.3 ohm.m con un espesor de tan solo 0.4 m la cual está compuesta de material muy fino tipo arcilla y se considera que se encuentra junto con la capa anterior, formando suelo orgánico. La tercera capa incrementa a 278 ohm.m con un espesor de 8.83 m y compuesta por areniscas. Por último, la cuarta capa disminuye de nuevo a un valor de 53 ohm.m de la cual solo podemos saber su tope y que posiblemente será un paquete de material limoso. El nivel de saturación posiblemente se encuentra a una profundidad de 0.75 m donde encontramos las arcillas saturadas.

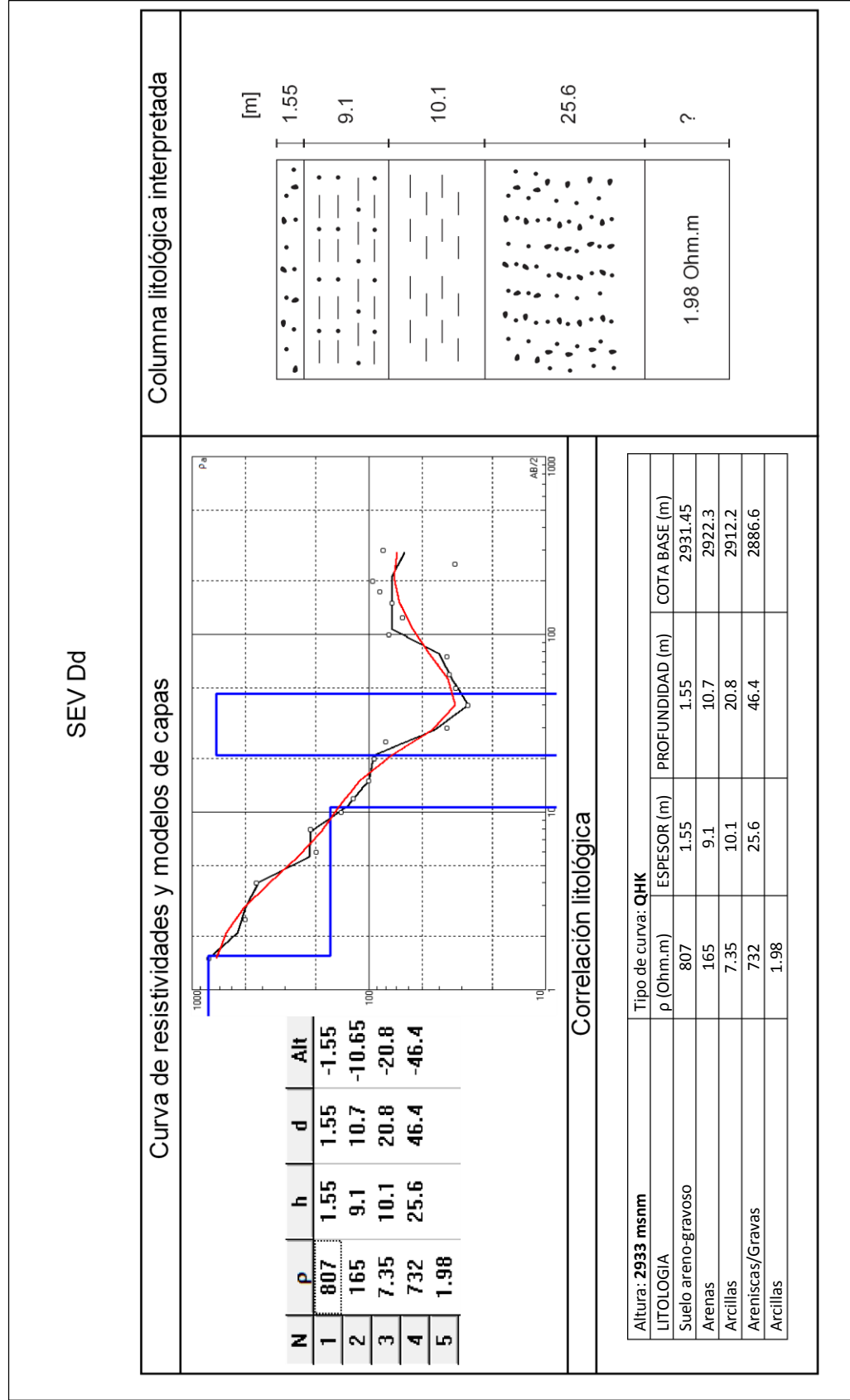
**Figura 13.** Curva de SEV Dc, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Dc fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 250m y con 4 aperturas de MN y rumbo NE-SW. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 89 m con un error de 24.6%. Tuvo un error relativamente alto, pudo deberse a la condición del terreno, el cual no era totalmente plano, sino presentaba valles con algunas pendientes mayores a 20° (Figura 12).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Picacho. Se obtuvieron 4 valores de resistividad: la primera con resistividad de 1596 ohm.m que se encuentra en superficie y alcanza 0.75 m de profundidad, es considerada como el suelo orgánico debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye su valor a 59.7 ohm.m con un espesor de tan solo 0.479 m la cual está compuesta de material tipo limo y se considera que se encuentra junto con la capa anterior, formando suelo orgánico. La tercera capa incrementa a 473 ohm.m con un espesor de 89.2 m y compuesta por areniscas. Por último, la cuarta capa disminuye de nuevo a un valor de 1.14 ohm.m de la cual solo podemos saber su tope y que posiblemente será un paquete de material arcilloso. El nivel de saturación posiblemente se encuentra en la última capa encontrada por su valor de resistividad tan bajo, pero no se puede decir con certeza. A pesar de que se alcanzó una buena profundidad con este sondeo, y encontramos un valor de resistividad real asociado a areniscas pertenecientes a la Formación Picacho, no podemos dar mucha veracidad a los datos debido a su error de 24.6%.

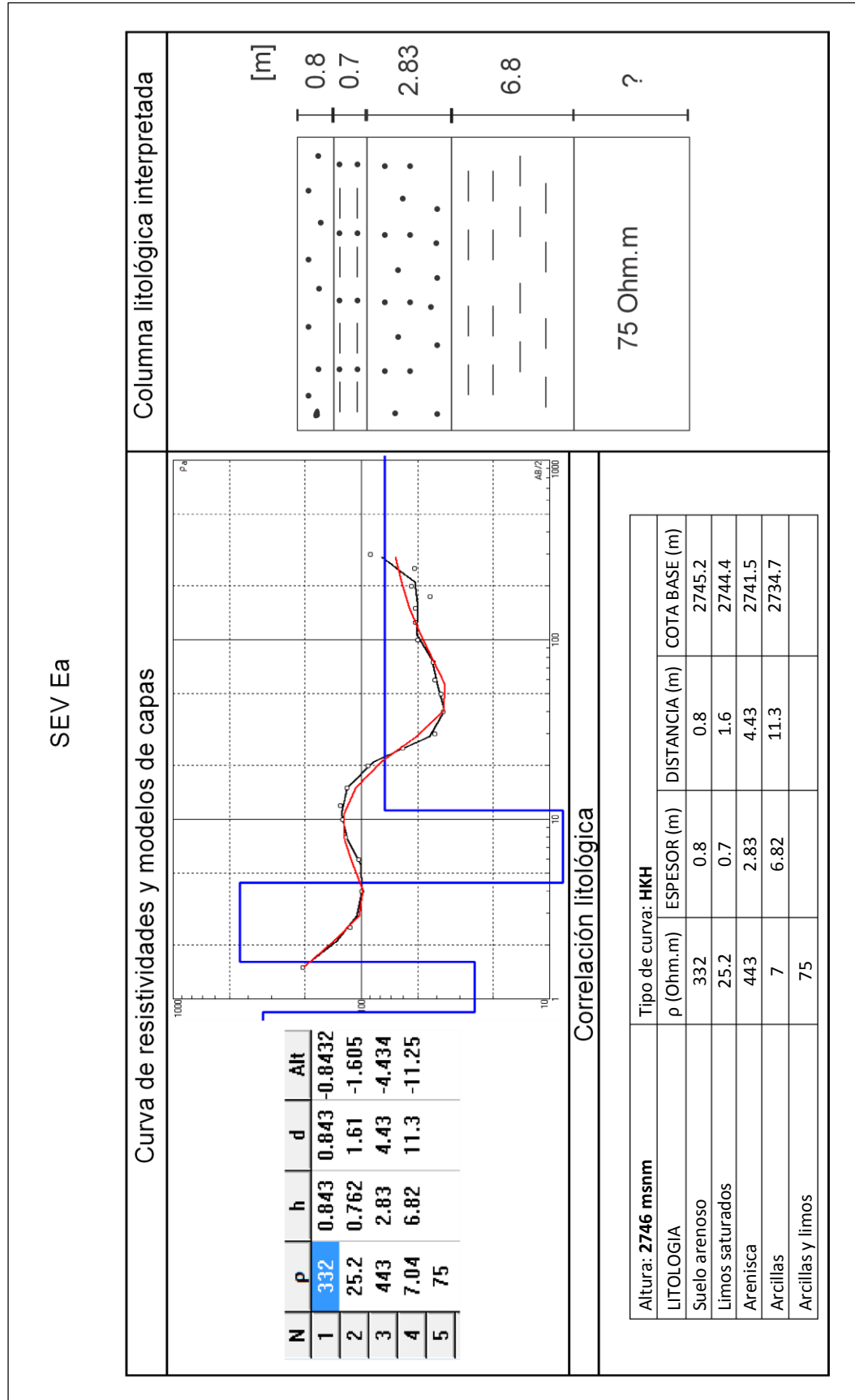
**Figura 14.** Curva de SEV Dd, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Dd fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 300m y con 4 aperturas de MN y rumbo NE-SW. En la mayoría de aperturas de AB la curva de campo se ajusta muy bien a la teórica. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 46.4 m con un error de 13.5% (Figura 13).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Plaeners. Se obtuvieron 5 valores de resistividad: la primera con resistividad de 807 ohm.m que se encuentra en superficie y alcanza 1.55 m de profundidad, es considerada como el suelo orgánico debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye a 165 ohm.m con un espesor de 9.1 m la cual está compuesta de material tipo arenisca. La tercera presenta una resistividad real de 7.35 ohm.m y llega a una profundidad de 20.8 m, está compuesta por arcillas. La cuarta capa aumenta a un valor de 732 ohm.m con un espesor de 25.6 m, debido a su alta resistividad se consideran areniscas de grano grueso o gravas. La última capa tiene un valor de 1.98 ohm.m la cual solo podemos saber su tope y que posiblemente será un paquete de material arcilloso. El nivel de saturación posiblemente se encuentra a una profundidad de 10.7 m donde encontramos la capa de arcillas saturadas.

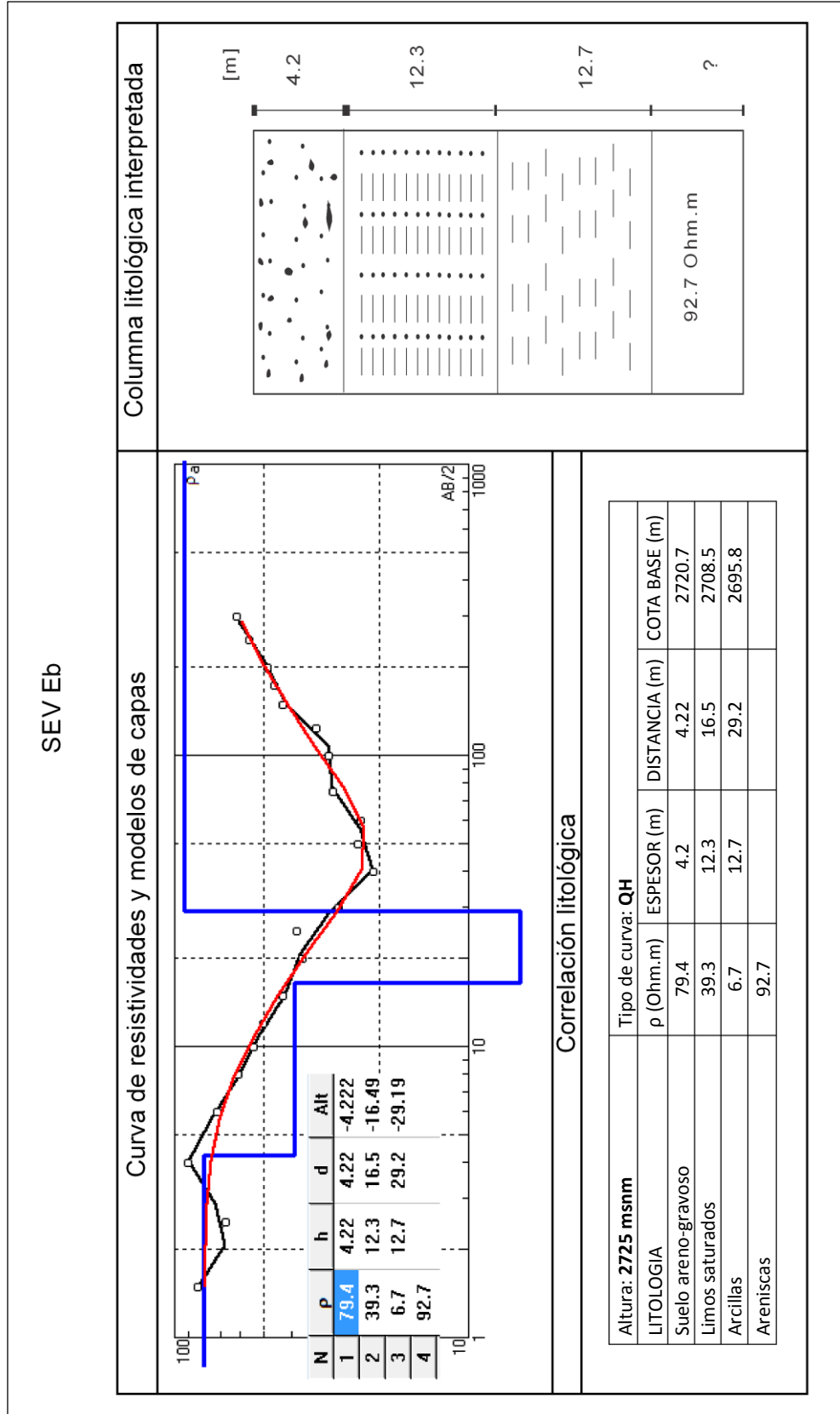
**Figura 15.** Curva de SEV Ea, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Ea fue realizado con una apertura máxima de 300m AB/2, con 4 aperturas de MN y rumbo N-S. En las primeras aperturas de AB la curva de campo se ajusta muy bien a la teórica, en las últimas aperturas se aleja un poco de ella y no se registraron datos ruidosos. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 11.3 m con un error menor al 10% (Figura 14).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Plaeners. Se obtuvieron 5 valores de resistividad, las cuales permitieron reconocer hasta 5 capas diferentes: la primera con resistividad de 332 ohm.m que se encuentra en superficie y alcanza casi 1 m de profundidad, es considerada como el suelo orgánico debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye su valor a 25.2 ohm.m con un espesor de 0.7m la cual está compuesta de material muy fino tipo limo y se considera que se encuentra saturado debido que la noche anterior había llovido y esta capa se encuentra muy cerca de la superficie. La tercera capa incrementa considerablemente su resistividad a 443 ohm.m y llega a una profundidad de 4.5m, está compuesta por arenas. La cuarta capa disminuye de nuevo su valor considerablemente a solo 7 ohm.m alcanzando 11m en la base, debido a su resistividad se consideran arcillas. La última capa de resistividad 75 ohm.m la cual solo podemos saber su tope y que posiblemente será un paquete de gran espesor es considerado de material arcilloso, limoso y con mezcla de arenas de grano muy fino característico de la Formación Plaeners. El nivel de saturación posiblemente se encuentra a una profundidad de 1.5 m donde encontramos las arcillas saturadas.

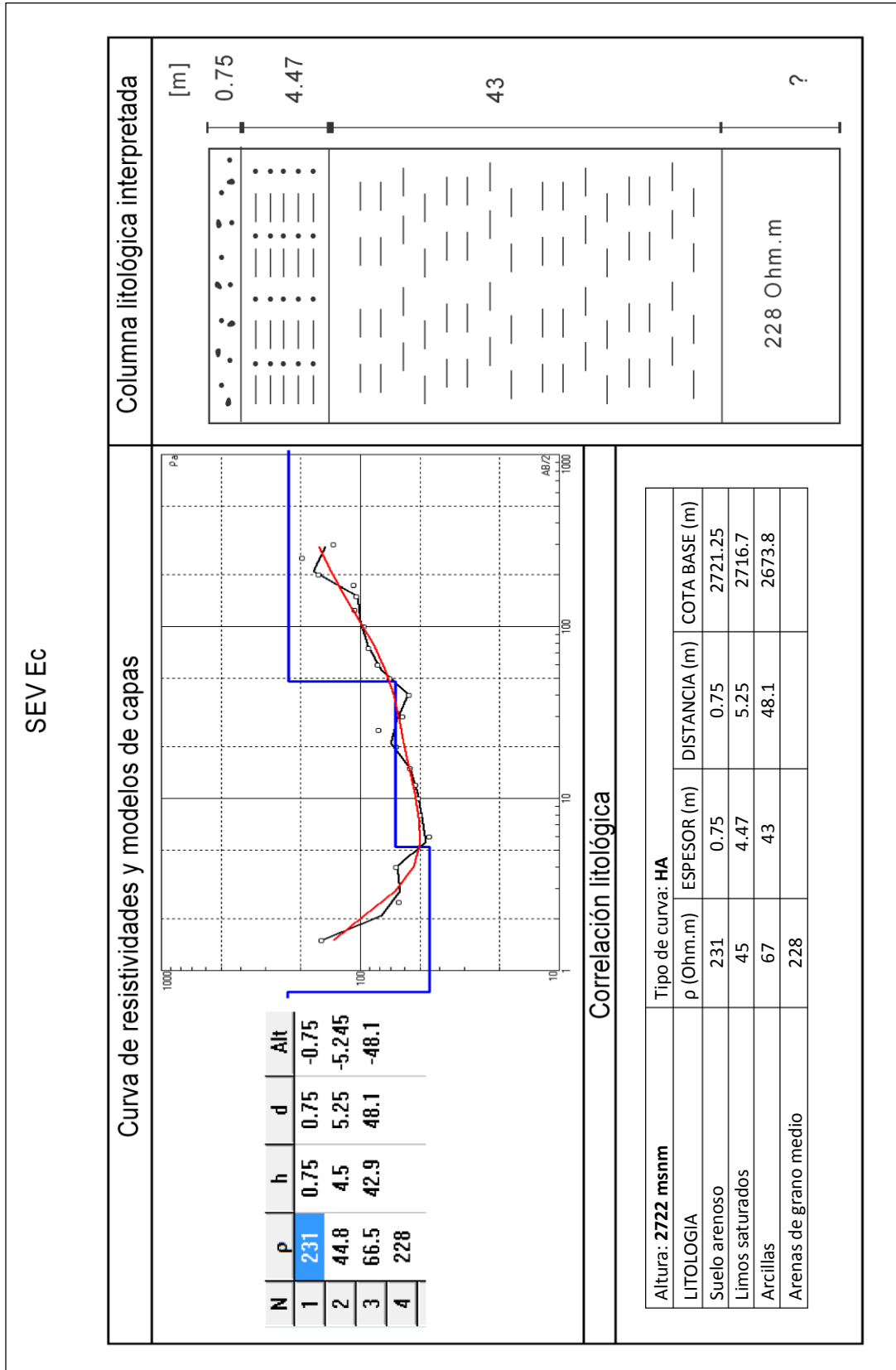
**Figura 16.** Curva de SEV Eb, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Eb fue realizado con una apertura máxima de 300m AB/2, con 4 aperturas de MN y rumbo N-S. En las primeras aperturas de AB la curva de campo no se ajusta muy bien a la teórica pero a lo largo de las medidas siguientes, se ajustó a la curva patrón y no se registraron datos ruidosos. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 30 m con un error menor al 10% (Figura 15).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre depósitos aluviales. Se obtuvieron 4 valores de resistividades, las cuales permitieron reconocer hasta 4 capas diferentes: la primera con una resistividad de 79.4 ohm.m que alcanza 4.2 m de profundidad, es considerada como un saprolito constituido de arenas y gravas debido a su resistividad. La segunda capa disminuye un poco su valor a 39.3 ohm.m con un espesor de 12m compuesto de material muy fino tipo limo considerado saturado donde posiblemente encontramos el nivel de saturación. La tercera capa sigue disminuyendo su resistividad a 6.7 ohm.m y llega a una profundidad de 30m en la base, debido a su resistividad muy baja se considera que sean arcillolitas. La última capa de resistividad 92.7 ohm.m la cual solo podemos saber su tope es considerada compuesta de arenas muy finas que irán aumentando su tamaño en profundidad según la tendencia de la curva de campo.

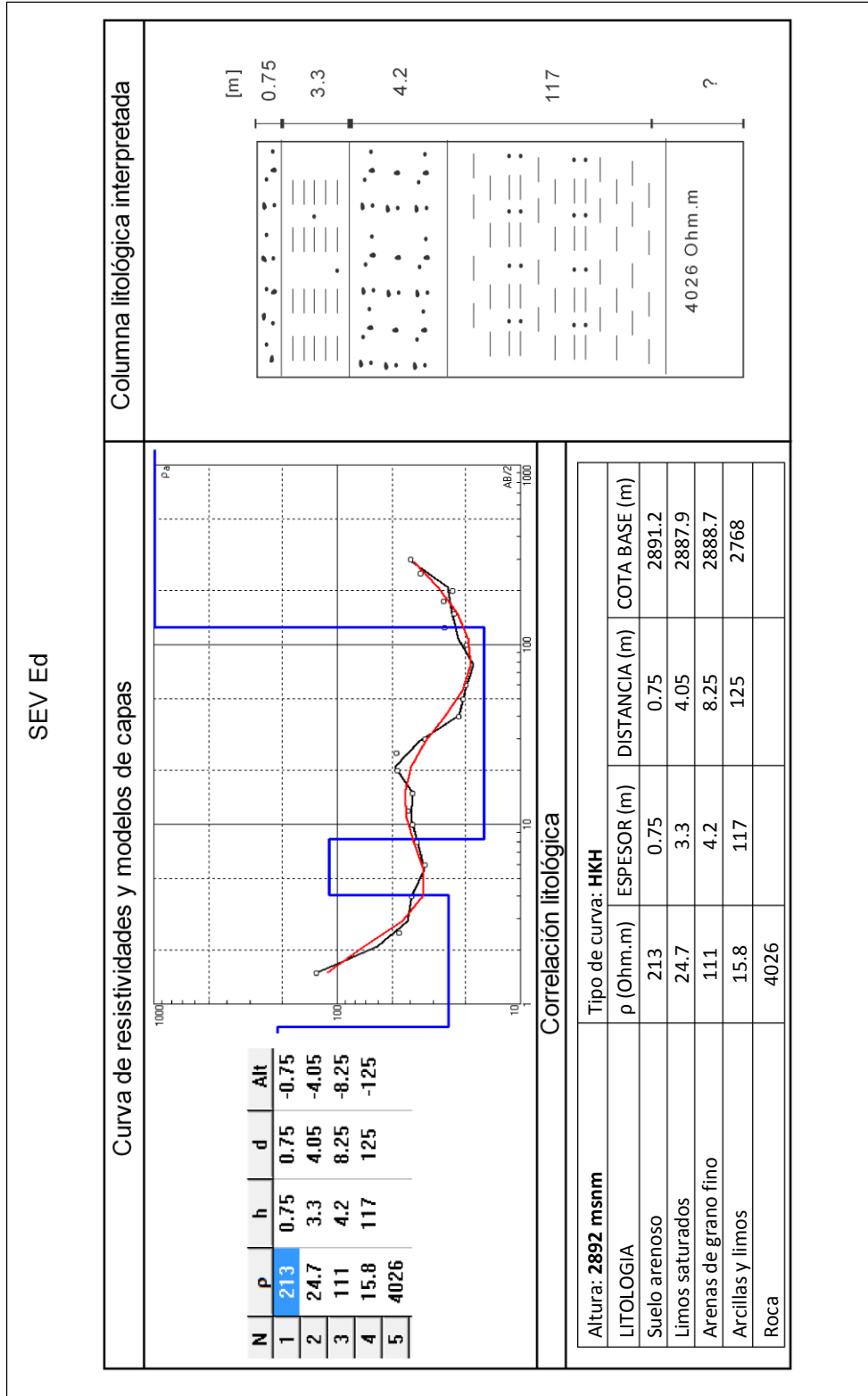
**Figura 17.** Curva de SEV Ec, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Ec fue realizado con una apertura máxima de 300m AB/2, con 4 aperturas de MN y rumbo NW-SE. Los datos adquiridos no están perfectamente ajustados a la curva patrón pero si siguen igual comportamiento y no se registraron datos ruidosos. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 48m con un error menor al 10% (Figura 16).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Concentración. Se obtuvieron 4 valores de resistividades, las cuales permitieron reconocer hasta 4 capas diferentes: la primera con una resistividad de 234 ohm.m que alcanza casi 1 m de profundidad, es considerada como el suelo arenoso debido a su resistividad y espesor. La segunda capa disminuye considerablemente su resistividad a 45 ohm.m con un espesor de 4.5m y a una profundidad de 5.4m, se compone de material muy fino tipo limo considerado saturado donde posiblemente encontramos el nivel de saturación. La tercera capa aumenta ligeramente su resistividad a 67 ohm.m y es la capa de mayor espesor con 43m alcanzando una profundidad de 48m de investigación, debido a su resistividad y profundidad se considera compuesta por material arcilloso mezclado con material particulado muy fino tipo limo. La última capa tiene una resistividad de 229 ohm.m es considerada compuesta de arenas con granos de tamaño variable.

**Figura 18.** Curva de SEV Ed, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV Ed fue realizado con una apertura máxima de 300m AB/2, con 4 aperturas de MN y rumbo NE-SW. Los datos adquiridos se ajustan perfectamente a la curva de campo excepto en la mitad donde varía un poco. Se eliminó el dato de apertura AB/2=75 considerado un dato ruidoso. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 125m con un error menor al 10% (Figura 17).

La adquisición de este sondeo fue realizada sobre la Formación Plaeners. Se obtuvieron 5 valores de resistividad, las cuales permitieron reconocer hasta 5 capas diferentes: la primera con resistividad de 213 ohm.m que se encuentra en superficie y con un espesor de 0.7m, es considerada como suelo arenoso debido a su resistividad y la profundidad alcanzada. La segunda capa disminuye su resistividad considerablemente a 24.7 ohm.m con un espesor de 3m, está compuesto de material muy fino tipo limo y se considera que se encuentra saturado debido a su baja resistividad donde posiblemente a esta profundidad se encuentre el nivel de saturación. La tercera capa incrementa considerablemente su resistividad a 111 ohm.m y llega a una profundidad de 8.2m, debido a su resistividad lo consideramos arenas de grano muy fino. La cuarta capa disminuye de nuevo su valor de resistividad a 15.8 ohm.m alcanzando una profundidad de investigación de 124m, debido a su resistividad y gran espesor interpretamos como material arcilloso con leves intercalaciones de limos. La última capa aumenta de resistividad considerablemente a 4026 ohm.m; no podemos interpretar esta resistividad debido a que ya se alcanzó una gran profundidad de investigación y este cambio tan abrupto a un valor tan elevado de resistividad podría ser un error, se necesitaría seguir aumentando la distancia de los electrodos AB y así corroborar si sigue dando el mismo resultado de resistividad.

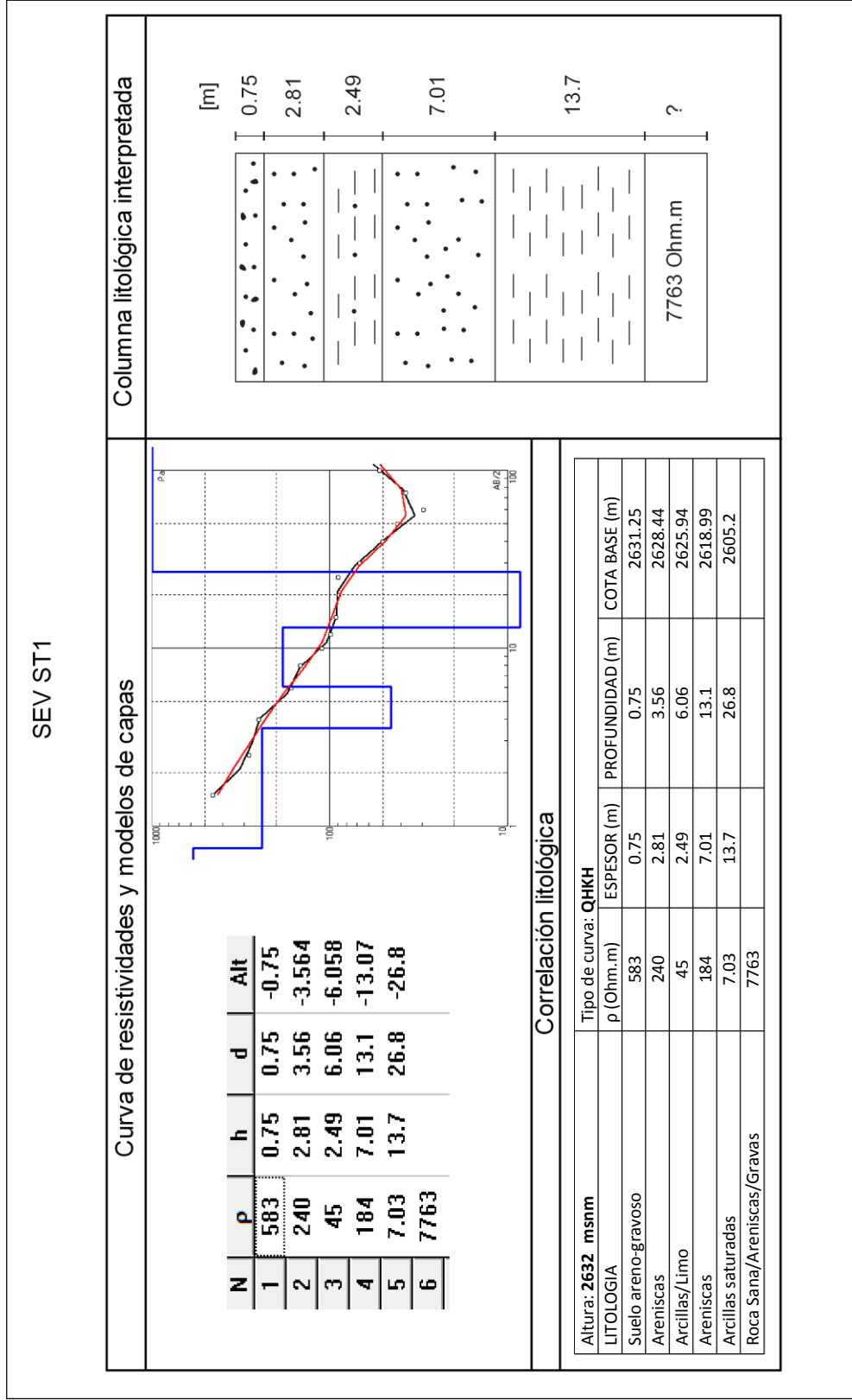
## Calicata ST

Los sondeos, ST1 a ST7, son los sondeos realizados junto a la mina Santa Teresa. Esta es una mina de arenas bituminosas, donde utilizan el método de forma tecnificada para su explotación. Las rocas aflorantes en este sector pertenecen a la Formación Concentración.

Estos sondeos se realizaron a una distancia de 5 metros entre ellos para poder realizar un estudio de la variación lateral de las resistividades, a esto se le denomina Calicata eléctrica, con el fin de lograr un buen amarre del resultado de estos sondeos y obtener una pseudosección como resultado final. La apertura de los electrodos de corriente  $AB/2$  fue de 100 m para cada sondeo y con un rumbo NE-SW.

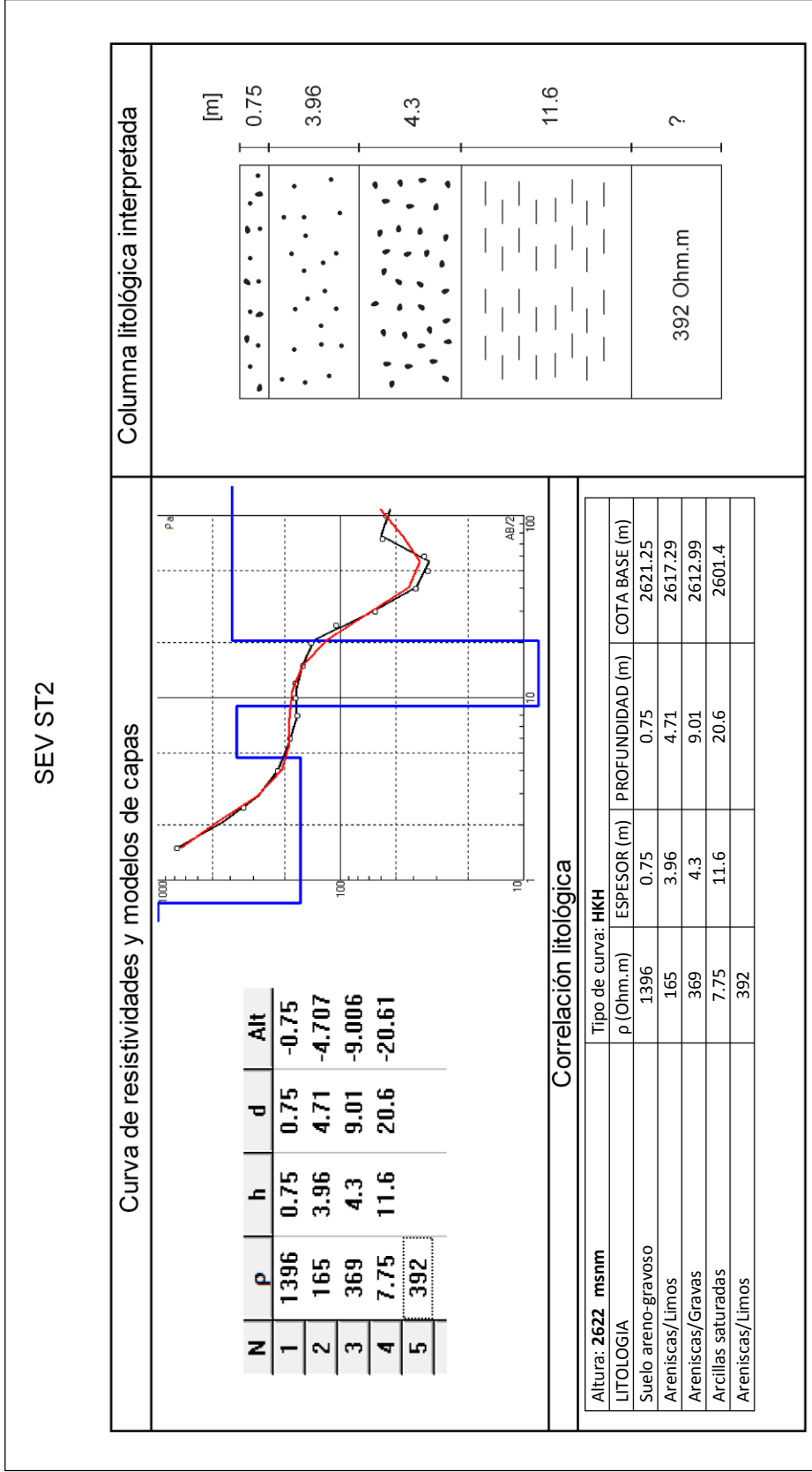
A continuación se describe cada sondeo y por último la pseudosección.

**Figura 19.** Curva de SEV ST1, correlación litológica y corte geoelectrico.



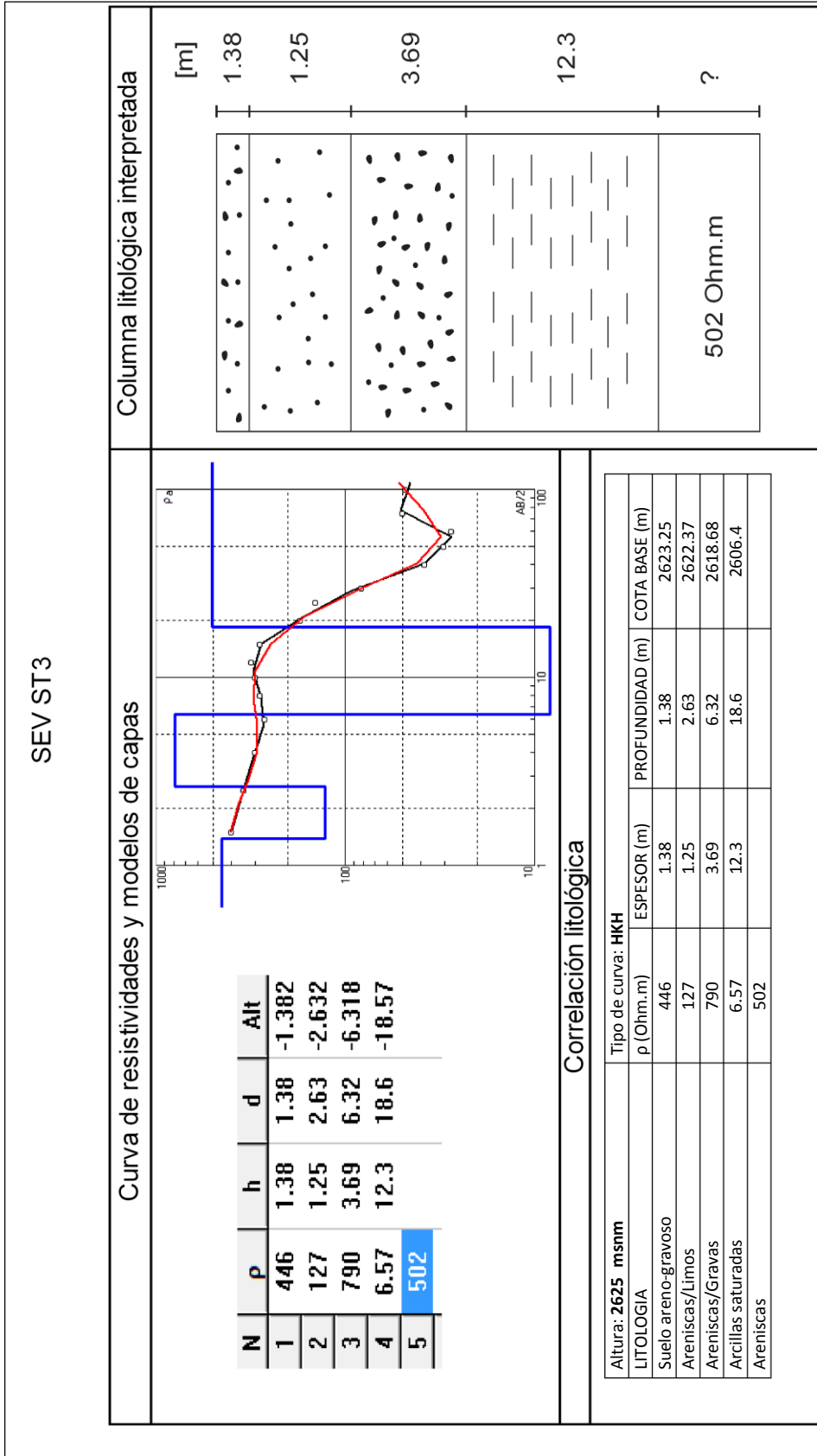
El sondeo SEV ST1 (Figura 18) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 6 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 26.8 m con un error de 6.32%.

**Figura 20.** Curva de SEV ST2, correlación litológica y corte geoelectrico.



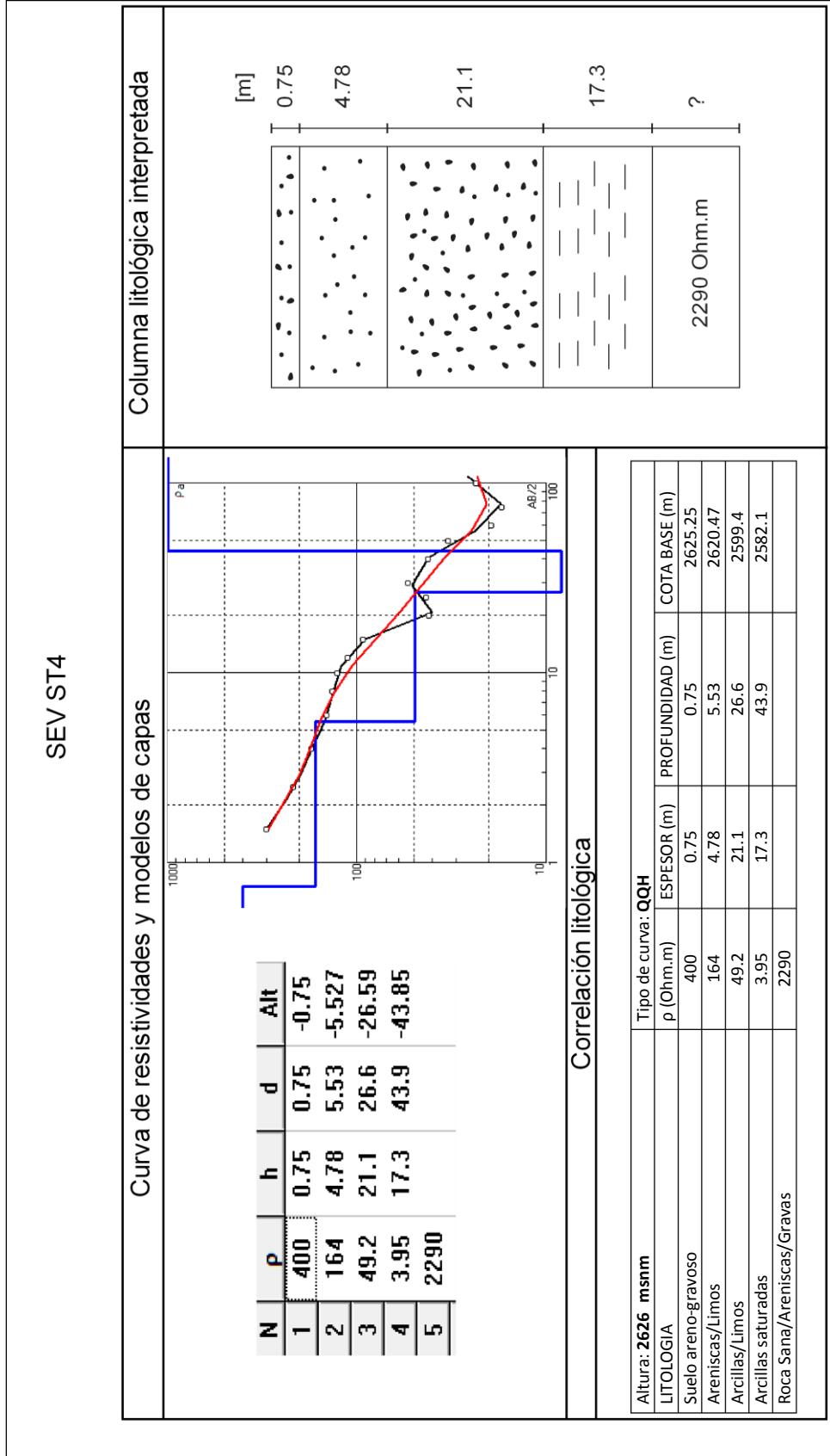
El sondeo SEV ST2 (Figura 19) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 20.6 m con un error de 10.8%. Se eliminó la apertura de AB/2=75 m debido a que la resistividad aparente era negativa.

**Figura 21.** Curva de SEV ST3, correlación litológica y corte geoelectrico.



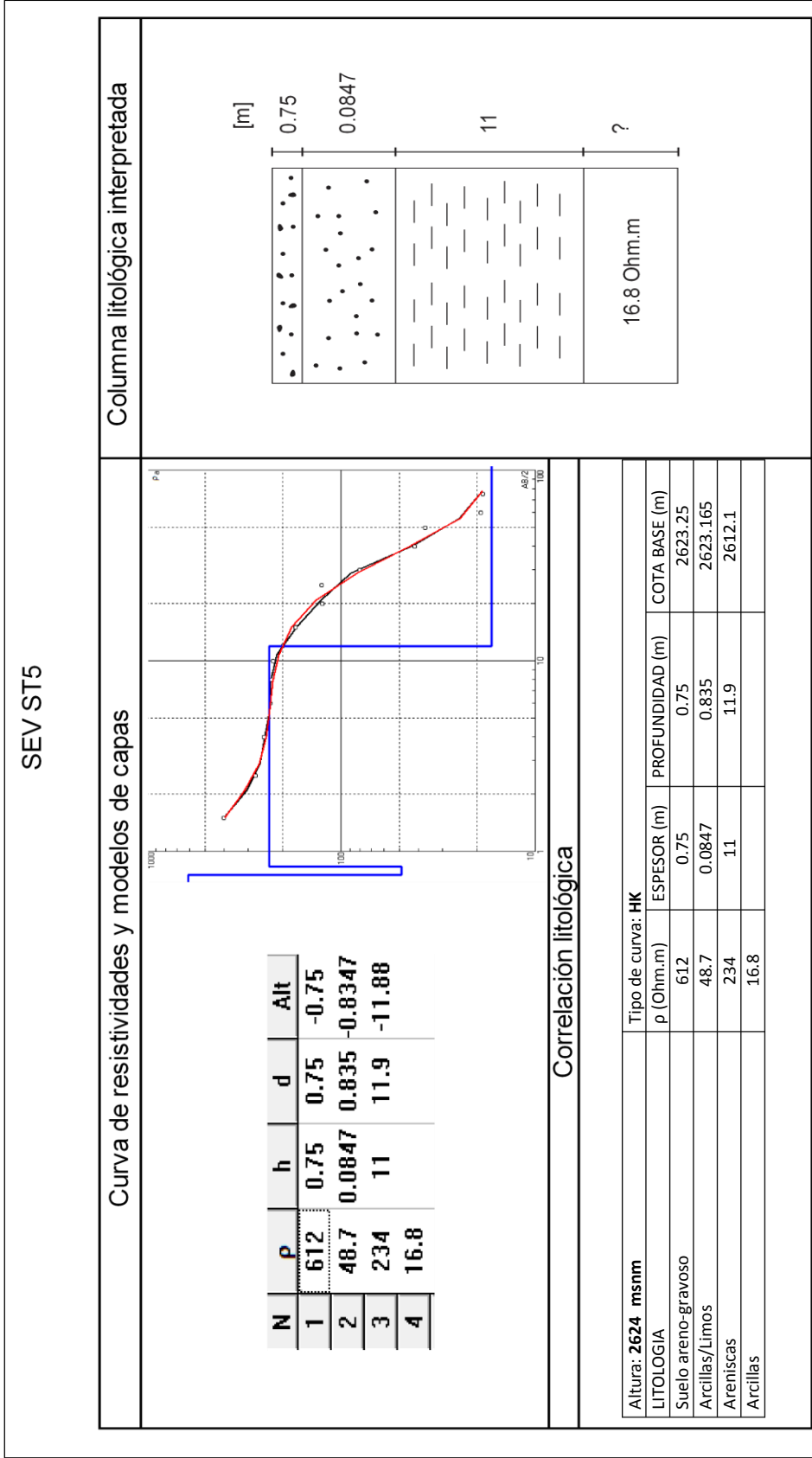
El sondeo SEV ST3 (Figura 20) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 18.6 m con un error de 10.6%. Se eliminó la apertura de AB/2=75 m debido a que la resistividad aparente era negativa.

**Figura 22.** Curva de SEV ST4, correlación litológica y corte geoelectrico.



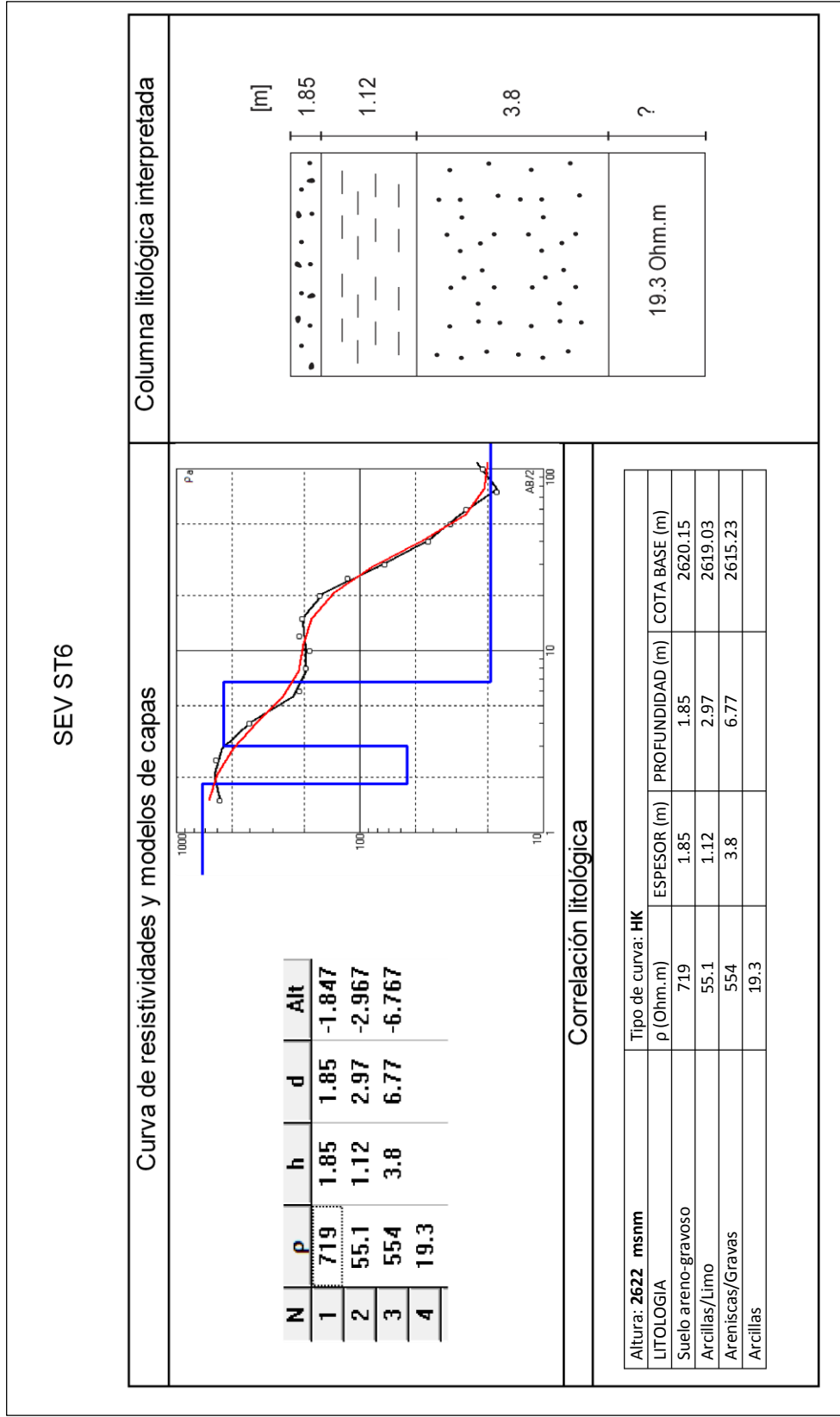
El sondeo SEV ST4 (Figura 21) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 43.9 m con un error de 14.4%. Se eliminó la apertura de AB/2=75 m debido a que la resistividad aparente era negativa.

**Figura 23.** Curva de SEV ST5, correlación litológica y corte geoelectrico.



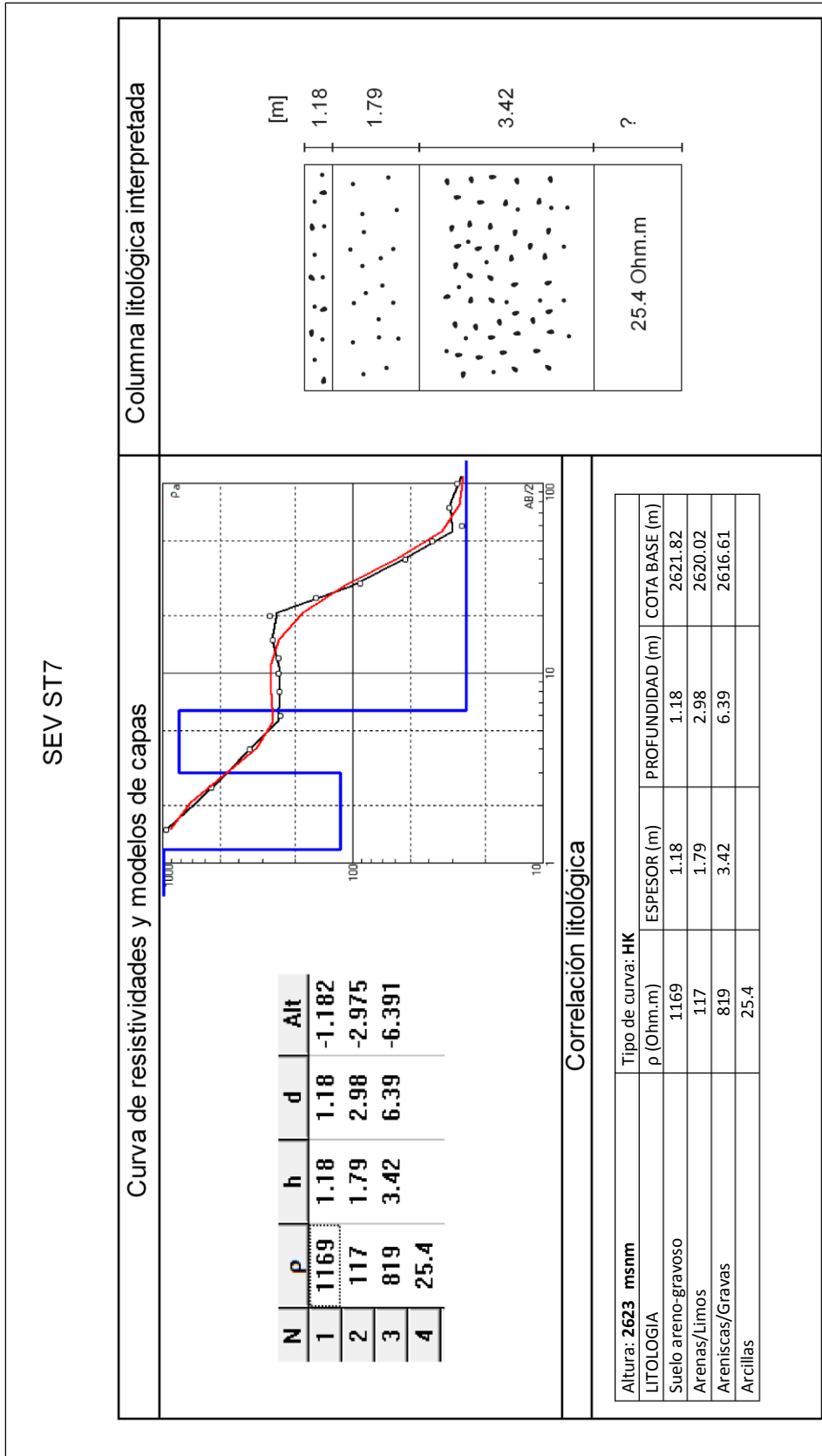
El sondeo SEV ST5 (Figura 22) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 5 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 11.9 m con un error de 3.27%. Como se puede ver en los resultados, este sondeo muestra una capa de tan solo 8 cm, lo cual no se debería observar geoelectricamente, esto puede ser debido a un error en el programa.

**Figura 24.** Curva de SEV ST6, correlación litológica y corte geoelectrico.



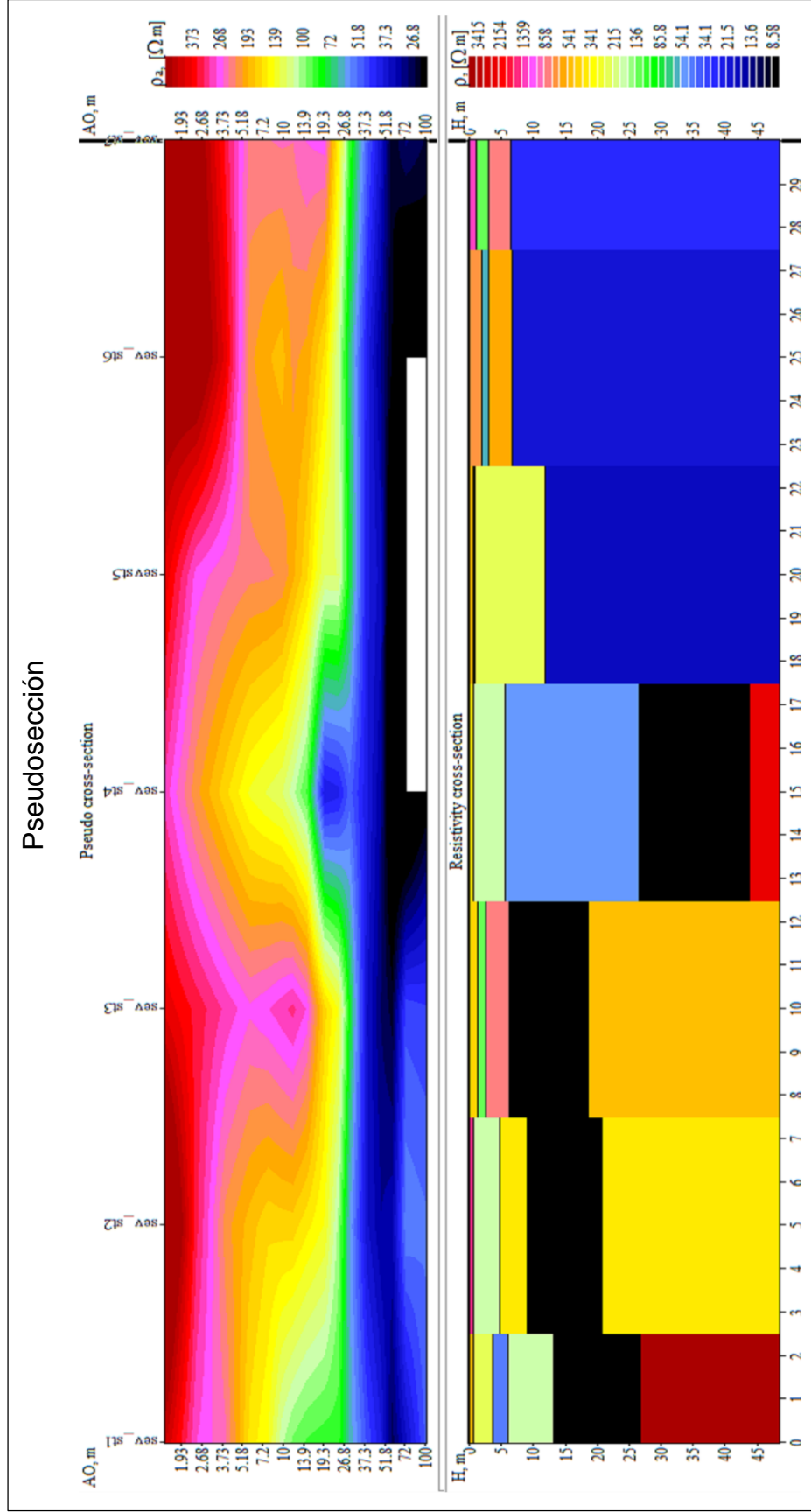
El sondeo SEV ST6 (Figura 23) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 6.77 m con un error de 10.8%.

**Figura 25.** Curva de SEV ST7, correlación litológica y corte geoelectrico.



El sondeo SEV ST7 (Figura 24) fue realizado con una apertura máxima AB/2 de 100m y con 3 aperturas de MN. El modelo arrojó un corte de 4 capas y se alcanzó una profundidad de investigación en la penúltima capa de 6.39 m con un error de 11.6%.

**Figura 26.** Pseudosección realizada para los sondeos adquiridos en la Mina Santa Teresa.



El perfil (Figura 25) está compuesto por los sondeos eléctricos ST1, ST2, ST3, ST4, ST5, ST6 y ST7. La longitud total de este perfil es de 35 m aproximadamente. La profundidad máxima alcanzada es de 43.9 m del sondeo SEV ST5. Los resultados son confiables debido a que el error de ajuste de todos los sondeos es menor del 15%.

La realización de la pseudosección nos permite visualizar la correlación horizontal de la calicata eléctrica realizada en la mina Santa Teresa. En la Figura 25, en el rectángulo superior podemos observar las resistividades aparentes y en el rectángulo inferior las resistividades reales (este fue el interpretado ya que a nosotros nos interesan las resistividades reales). En la primera capa de la pseudosección se mantiene constante una relación horizontal, y es considerada como suelo y su espesor no es mayor a 1 m. La segunda capa está compuesta de material arcilloso como se puede ver por su baja resistividad, su espesor no supera los 10 m y horizontalmente en algunas partes es menor su espesor. Las capas siguientes aumentan su resistividad y mantienen una relativa continuidad lateral, estas se pueden interpretar como areniscas; como se puede observar en los resultados de los sondeos las cuales aumentan su tamaño de grano en profundidad. Es importante destacar en la pseudosección, como se puede observar en la Figura 25, los primeros cuatro sondeos tienden a ser más parecidos entre ellos, y los otros tres sondeos se relacionan más entre sí; cuando decimos que se parecen, nos referimos a que los valores de resistividad son más similares, sin embargo, los espesores de las capas obtenidos varían y no se ve una asociación, lo cual no nos permite dar un corte geoelectrico para relacionar estas litologías. ¿Cuál fue el error? A pesar de tener una buena adquisición, porque las condiciones del terreno fueron las mejores para esta, hicimos la adquisición sobre un relleno sedimentario que los operarios de la mina habían construido para una carretera. Este terreno por lo tanto tenía diferente material por lo menos en sus primeros 4 metros de profundidad, lo cual me va a afectar directamente las resistividades reales del subsuelo.

## 11. CONCLUSIONES

- El uso de Sondeos Eléctricos Verticales resultó un método eficaz para caracterizar geoelectricamente el área de estudio, y definir las litologías presentes en las zonas aledañas del municipio de Pesca, Boyacá.
- Realizado el procesamiento de los datos, se obtuvo un porcentaje de error para las curvas de campo bastante confiables, en la mayoría de los casos el error fue inferior al 20%; sin embargo donde se presentaron errores superior a este porcentaje fue probablemente por los cambios bruscos en la topografía que se presentan en la zona de estudio.
- El comportamiento eléctrico de las rocas estuvo marcado generalmente en los primeros 15 metros por resistividades relativamente bajas, correspondiente a rocas tamaño limo y arcillas, y a mayor profundidad se obtuvo resistividades de más de 200 ohm.m interpretadas como rocas de tamaño de grano más grueso asociadas a areniscas y gravas.
- La calicata realizada en la Mina Santa Teresa permitió correlacionar lateralmente la litología donde se evidenció un cambio lateral entre los primeros cuatro sondeos y los últimos tres sondeos asociado a presencia de diferente material, ya que el terreno es un relleno realizado por los operarios de la mina.
- El nivel de saturación en los sondeos se puede interpretar a partir del corte geoelectrico para los sondeos Db y Eb, a 1 m de profundidad, esto corroborado por pozos artesanales presentes en las fincas donde se ubicaron estos sondeos. Para los otros sondeos el nivel de saturación puede presentarse a profundidades mayores de los 50 m, los cortes geoelectricos no dan una información muy exacta en los primeros metros de profundidad.

## 12. RECOMENDACIONES

- Realizar sondeos electricos verticales a una distancia corta, separados el uno al otro a una distancia no mayor a 100 m, esto va permitir un mejor amarre de datos y caracterización del subsuelo.
- Utilizar otros métodos geofísicos, con el fin de correlacionar las respuestas obtenidas y dar una mejor interpretación.
- Realizar la geología completa de la zona de estudio y levantar una columna estratigráfica donde sea posible realizar un sondeo inicial y comparar los datos con las litologías presentes para determinar una mayor precisión y confiabilidad en los datos.
- Si el estudio es para determinar acuíferos, en las zonas de mayor altura del municipio de pesca, donde el nivel de saturación está a mayores profundidades, realizar sondeos en zonas planas donde se pueda extender el cable 500 m para alcanzar una suficiente profundidad vertical; también buscar un método que logre profundidades mayores.
- Realizar mapas de resistividades aparentes, reales y de tipo de curva que permitan dar otro punto de vista a la hora de la interpretación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Pesca, Boyacá. En: Mapas. [en línea]. [Consultado el 25 de Junio de 2014]. Disponible en [http://www.pesca-boyaca.gov.co/mapas\\_municipio.shtml](http://www.pesca-boyaca.gov.co/mapas_municipio.shtml).
- Alvarado, B., Sarmiento, R. (1944). Informe geológico sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz de Río, Departamento de Boyacá. Servicio Geológico Nacional. Informe 468, inédito., 132 p. Bogotá.
- Arias, D.E., Ramirez, O.E. & Hoyos, F. (2000). The Geoelectrical Relations On the Geotechnical Exploration. Universidad Nacional de Medellin. Facultad de Minas.
- Arlandi, M. (2005). Geofísica aplicada a la obra civil. Método Geoeléctrico y Sísmica de Resonancia. Casos prácticos. GEOCONSULT. Madrid.
- Auge, M. (2008). Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea. Buenos Aires.
- Caballero, V., Parra, M., Mora, A. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío - Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de geología, Bucaramanga, v. 32, n. 1, jun.
- Caraballo, N. (2008). Caracterización Geoeléctrica del subsuelo en el área de Puerto Cumarebo, Edo. Falcón. Sartenejas, Abril. Proyecto de Grado Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., y Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79 (10): 1421-1443.
- Corredor, F. (2003). Eastward Extent of the Late Eocene-Early Oligocene Onset of Deformation across the Northern Andes: Constraints from the Northern Portion of the Eastern Cordillera Fold Belt, Colombia, and Implications

- for Regional Oil Exploration. In: ACGGP (Ed.), VIII Simposio Bolivariano de Exploración en las Cuencas Subandinas,
- Cortés, M., Angelier, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics* 403, 29–58.
  - Dengo, C.A., Covey, M.C. (1993). Structure of the eastern Cordillera of Colombia: implications for trap Styles and regional tectonics. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 77 (8).
  - Etayo-Serna, F. (1969). Contorno sucesivo del mar Cretáceo en Colombia. *Congreso Colombiano de Geología* 1. Bogotá.
  - Etayo-Serna, F. (1983). Mapa de Terrenos Geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas especiales de Ingeominas. no. 14,235 p.
  - Falgas, E. (2007) Hydrogeophysics as a Multidiciplinary Tool on Aquifer Appraisal: Focus on AMT Capabilities. *Universitat de Barcelona*, p. 233.
  - Google Maps. En: Pesca, Boyacá. [En Linea]. [Consultado el 25 de Junio de 2014]. Disponible en <<https://www.google.es/maps/place/Pesca,+Boyac%C3%A1,+Colombia/@5.49698,-73.080145,11z/data=!3m1!4b1!4m2!3m1!1s0x8e6a5e7129146dff:0x44729e0dcf4b793f>>.
  - Iakubovskii, I., & Liajov, L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Editorial Reverté. Versión española de la tercera edición Rusa. Traducido por: Juan González Montero.
  - Jordan, T. E., B. L. Isacks, R. W. Allmendinger, J. A. Brewer, V. A. Ramos, and C. J. Ando. (1983). Andan tectonics related to geometry of subducted Nazca plate: *GSA Bulletin* v. 94, p. 341–461.
  - Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Editorial Blackwell Science, Third Edition.
  - Kearey, P., & Vine, F. (1996). *Global Tectonics*. Oxford: Blackwell Science. Second Edition. 333 pp.
  - Loke, M. (1999). *Electrical Imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Malasia.

- McCann, D.M., Eddleston, M., Fenning, P.J., & Reeves, G.M. (1997). Modern Geophysics in Engineering Geology. Geological Society Engineering Geology Special Publicación 12.
- Molina, W. (2006). Comparación de los Métodos 1-D Y 2-D de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD Y RES2DINV. Venezuela.
- Orellana, E. (1982). Prospección eléctrica en corriente continua. Paraninfo, segunda edición, Página 523.
- Pérez, G., Salazar, A. (1971). Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. U. Nal., Geol. Col., 10:7-85. Bogotá.
- Plan de Desarrollo Municipal (2008). Alcaldía de Pesca, Boyacá. Alcalde Fernando Tirano Millán. Mayo, 2008 – 2011.
- Renzoni, G. (1982). Geología del cuadrángulo J-12. Ingeominas Bogotá. Informe 1546: 17p
- Sánchez, J. Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España.
- Sharma, P. (1997). Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press.
- Ulloa, C. y Rodríguez, E. (1973). Mapa Geológico de la Plancha 172, Paz de Río, INGEOMINAS, inédito, Bogotá.
- Ulloa, C., Rodríguez, E., Renzi, G. (1976). Geología de las planchas 171 Duitama, 191 Tunja, 211 Tauramena y 203 Monterrey cuadrángulos J-12 y K-13. Boletín Geológico, volumen 24 N° 2. Bogotá.
- Van der Hamment, T. (1957). Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá Cordillera Oriental de Colombia. Instituto Geológico Nacional. Boletín Geológico 5(2):189-203. Bogotá.
- Velandia, F. (2005). Interpretación de transcurrencia de las fallas Soapaga y Boyacá a partir de imágenes Landsat TM. Boletín de Geología Vol. 27, No. 44, Enero-Junio.

- Vogelsang, D. (1995). Environmental Geophysics, a Practical Guide, Springer Verlag, Berlin.

## ANEXOS

### Anexo A. SEV Da

<b>Práctica empresarial</b> <b>Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander</b> <b>Sondeos Eléctricos Verticales</b>				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Da</b>		Zona: <b>Pesca</b>	Fecha: Abril 4 de 2014	
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>Subsuelo 3D</b>	
Coordenadas del centro: <b>1107366 N</b> <b>1112888 E 2784 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales: El Punto se trasladó de su ubicación inicial para poder satisfacer los 600 m y debido a que en el punto inicial la topografía tampoco lo permitía				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	21.7
2	2.5	1	18.85	16.9
3	4	1	49.48	14.2
4	6	1	112.35	14.8
5	8	1	200.28	15.4
6	10	1	313.37	15.8
7	12	1	451.6	13.1
8	15	1	706.07	14.4
9	20	1	1256	16.4
10	25	1	1963	16.1
11	30	1	2827	23.9
12	30	20	125.66	8.9
13	40	20	235.62	9.7
14	50	20	376.99	11.9
15	60	20	549.78	13.4
16	75	20	867.86	14.1
17	75	50	314.16	5.8
18	100	50	589.05	17.4
19	125	50	942.48	18.9
20	150	50	1374	20.9
21	150	100	628.32	19.0
22	175	100	883.57	24.0
23	200	100	1178	25.3
24	250	100	1885	26.7
25	300	100	2749	28.1

### Anexo B. SEV Db

<b>Práctica empresarial</b> <b>Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander</b> <b>Sondeos Eléctricos Verticales</b>				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Db</b>		Zona: <b>Pesca</b>	Fecha: Abril 4 de 2014	
Orientación: <b>N-S</b>			Instrumento: <b>Subsuelo 3D</b>	
Coordenadas del centro: <b>1106796 N</b> <b>1113356 E 2629 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	883.1
2	2.5	1	18.85	209.4
3	4	1	49.48	116.7
4	6	1	112.35	103.3
5	8	1	200.28	107.3
6	10	1	313.37	134.4
7	12	1	451.6	137.7
8	15	1	706.07	183.4
9	20	1	1256	168.4
10	25	1	1963	175.5
11	30	1	2827	182.4
12	30	20	125.66	94.6
13	40	20	235.62	86.9
14	50	20	376.99	83.8
15	60	20	549.78	84.6
16	75	20	867.86	76.1
17	75	50	314.16	55.1
18	100	50	589.05	73.2
19	125	50	942.48	47.8
20	150	50	1374	107.7
21	150	100	628.32	57.0
22	175	100	883.57	60.2
23	200	100	1178	49.8
24	250	100	1885	50.6
25	300	100	2749	51.2

### Anexo C. SEV Dc

<b>Práctica empresarial</b> <b>Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander</b> <b>Sondeos Eléctricos Verticales</b>				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Dc</b>		Zona: <b>Pesca</b>	Fecha: Abril 5 de 2014	
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1106343 N</b> <b>1114329 E 2765 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales: El punto se desplazó un poco de las coordenadas iniciales porque atravesaba la carretera.				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	842.5
2	2.5	1	18.85	360.2
3	4	1	49.48	313.7
4	6	1	112.35	233.3
5	8	1	200.28	309.8
6	10	1	313.37	365.0
7	12	1	451.6	426.0
8	15	1	706.07	433.1
9	20	1	1256	486.9
10	25	1	1963	679.1
11	30	1	2827	642.2
12	30	20	125.66	220.0
13	40	20	235.62	259.1
14	50	20	376.99	299.9
15	60	20	549.78	320.8
16	75	20	867.86	347.8
17	75	50	314.16	529.9
18	100	50	589.05	574.9
19	125	50	942.48	583.9
20	150	50	1374	651.3
21	150	100	628.32	344.6
22	175	100	883.57	200.0
23	200	100	1178	149.3
24	250	100	1885	67.4

### Anexo D. SEV Dd

<b>Práctica empresarial</b> <b>Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander</b> <b>Sondeos Eléctricos Verticales</b>				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Dd</b>		Zona: <b>Pesca</b>	Fecha: Abril 5 de 2014	
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1105680 N</b> <b>1114991 E 2933 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	800.4
2	2.5	1	18.85	501.6
3	4	1	49.48	429.7
4	6	1	112.35	198.8
5	8	1	200.28	213.9
6	10	1	313.37	143.3
7	12	1	451.6	121.8
8	15	1	706.07	100.1
9	20	1	1256	92.6
10	25	1	1963	79.9
11	30	1	2827	45.5
12	30	20	125.66	28.5
13	40	20	235.62	27.5
14	50	20	376.99	32.2
15	60	20	549.78	34.8
16	75	20	867.86	33.5
17	75	50	314.16	39.1
18	100	50	589.05	76.6
19	125	50	942.48	64.1
20	150	50	1374	59.5
21	150	100	628.32	92.2
22	175	100	883.57	86.6
23	200	100	1178	95.2
24	250	100	1885	32.5
25	300	100	2749	82.4

### Anexo E. SEV Ea

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Ea</b>		Zona: <b>Pesca</b>		Fecha: <b>Abril 6 de 2014</b>
Orientación: <b>N-S</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1106385 N 1112724 E 2746 msnm.</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales: (Abril 5) - La noche anterior había llovido				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	204.1
2	2.5	1	18.85	114.7
3	4	1	49.48	99.2
4	6	1	112.35	102.8
5	8	1	200.28	120.3
6	10	1	313.37	125.4
7	12	1	451.6	128.8
8	15	1	706.07	118.6
9	20	1	1256	92.0
10	25	1	1963	59.7
11	30	1	2827	52.7
12	30	20	125.66	31.2
13	40	20	235.62	36.6
14	50	20	376.99	37.7
15	60	20	549.78	40.6
16	75	20	867.86	49.0
17	75	50	314.16	34.9
18	100	50	589.05	50.1
19	125	50	942.48	51.5
20	150	50	1374	60.3
21	150	100	628.32	43.6
22	175	100	883.57	43.2
23	200	100	1178	54.0
24	250	100	1885	52.1
25	300	100	2749	89.1

### Anexo F. SEV Eb

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Eb</b>		Zona: <b>Pesca</b>		Fecha: <b>Abril 6 de 2014</b>
Orientación: <b>N-S</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1105944 N 1113332 E 2725 msnm.</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	ρa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	82.9
2	2.5	1	18.85	66.8
3	4	1	49.48	89.6
4	6	1	112.35	71.3
5	8	1	200.28	60.6
6	10	1	313.37	53.5
7	12	1	451.6	49.8
8	15	1	706.07	42.5
9	20	1	1256	36.7
10	25	1	1963	38.3
11	30	1	2827	38.3
12	30	20	125.66	20.0
13	40	20	235.62	21.1
14	50	20	376.99	23.8
15	60	20	549.78	23.2
16	75	20	867.86	29.8
17	75	50	314.16	27.7
18	100	50	589.05	29.8
19	125	50	942.48	32.9
20	150	50	1374	42.0
21	150	100	628.32	43.0
22	175	100	883.57	45.8
23	200	100	1178	48.3
24	250	100	1885	55.3
25	300	100	2749	61.5

### Anexo G. SEV Ec

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Ec</b>		Zona: <b>Pesca</b>		Fecha: <b>Abril 7 de 2014</b>
Orientación: <b>NW-SE</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1105459 N 1113722 E 2722 msnm.</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	$\rho_a$ ohm.m
1	1.5	1	6.28	157.7
2	2.5	1	18.85	64.9
3	4	1	49.48	66.3
4	6	1	112.35	45.0
5	8	1	200.28	50.2
6	10	1	313.37	51.1
7	12	1	451.6	53.9
8	15	1	706.07	56.7
9	20	1	1256	66.6
10	25	1	1963	81.5
11	30	1	2827	89.4
12	30	20	125.66	42.1
13	40	20	235.62	57.6
14	50	20	376.99	71.1
15	60	20	549.78	82.2
16	75	20	867.86	96.9
17	75	50	314.16	86.9
18	100	50	589.05	96.7
19	125	50	942.48	107.5
20	150	50	1374	107.1
21	150	100	628.32	101.2
22	175	100	883.57	108.5
23	200	100	1178	162.6
24	250	100	1885	195.5
25	300	100	2749	136.6

### Anexo H. SEV Ed

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>Ed</b>		Zona: <b>Pesca</b>		Fecha: <b>Abril 7 de 2014</b>
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
Coordenadas del centro: <b>1105077 N 1114351 E 2892 msnm.</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	129.4
2	2.5	1	18.85	45.7
3	4	1	49.48	39.2
4	6	1	112.35	33.0
5	8	1	200.28	36.7
6	10	1	313.37	38.6
7	12	1	451.6	40.8
8	15	1	706.07	38.5
9	20	1	1256	46.9
10	25	1	1963	47.1
11	30	1	2827	51.0
12	30	20	125.66	21.5
13	40	20	235.62	21.7
14	50	20	376.99	20.4
15	60	20	549.78	19.7
16	75	20	867.86	12.2
17	75	50	314.16	10.2
18	100	50	589.05	19.6
19	125	50	942.48	26.0
20	150	50	1374	22.9
21	150	100	628.32	22.7
22	175	100	883.57	26.1
23	200	100	1178	23.4
24	250	100	1885	34.8
25	300	100	2749	39.6

## Anexo I. SEV ST1

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST1</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106969 N 1113465 E 2632 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	449.94
2	2.5	1	18.85	244.09
3	4	1	49.48	248.49
4	6	1	112.35	162.85
5	8	1	200.28	145.43
6	10	1	313.37	109.77
7	12	1	451.6	98.23
8	15	1	706.07	91.85
9	20	1	1256	88.61
10	25	1	1963	88.97
11	30	1	2827	71.23
12	30	20	125.66	63.87
13	40	20	235.62	50.3
14	50	20	376.99	41.5
15	60	20	549.78	29.65
16	75	20	867.86	5.82
17	75	50	314.16	55.612
18	100	50	589.05	52

## Anexo J. SEV ST2

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST2</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106972 N 1113470 E 2622 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	773
2	2.5	1	18.85	316
3	4	1	49.48	218.2
4	6	1	112.35	187.6
5	8	1	200.28	163.7
6	10	1	313.37	174.08
7	12	1	451.6	174.8
8	15	1	706.07	160.47
9	20	1	1256	154.3
10	25	1	1963	128.85
11	30	1	2827	95.02
12	30	20	125.66	42.89
13	40	20	235.62	38.6
14	50	20	376.99	29.42
15	60	20	549.78	29.53
16	75	20	867.86	-1.6
17	75	50	314.16	61.01
18	100	50	589.05	56.22

### Anexo K. SEV ST3

<b>Práctica empresarial</b> <b>Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander</b> <b>Sondeos Eléctricos Verticales</b>				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST3</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106973 N 1113476 E 2625 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	400.9
2	2.5	1	18.85	344.7
3	4	1	49.48	299.3
4	6	1	112.35	266.8
5	8	1	200.28	280.9
6	10	1	313.37	297.3
7	12	1	451.6	320.9
8	15	1	706.07	282.4
9	20	1	1256	172.8
10	25	1	1963	143.6
11	30	1	2827	171.8
12	30	20	125.66	39.54
13	40	20	235.62	37.97
14	50	20	376.99	26.73
15	60	20	549.78	14.9
16	75	20	867.86	-3
17	75	50	314.16	51.97
18	100	50	589.05	48.24

### Anexo L. SEV ST4

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST4</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106976 N 1113478 E 2626 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	297.4
2	2.5	1	18.85	215.12
3	4	1	49.48	172.2
4	6	1	112.35	143.2
5	8	1	200.28	139.7
6	10	1	313.37	136.8
7	12	1	451.6	120.7
8	15	1	706.07	103.19
9	20	1	1256	38.17
10	25	1	1963	42.9
11	30	1	2827	73.08
12	30	20	125.66	46.89
13	40	20	235.62	41.63
14	50	20	376.99	32.56
15	60	20	549.78	16.52
16	75	20	867.86	-14.2
17	75	50	314.16	1.29
18	100	50	589.05	23.3

### Anexo M. SEV ST5

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST5</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106980 N 1113482 E 2624 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	400.9
2	2.5	1	18.85	275.3
3	4	1	49.48	247.5
4	6	1	112.35	230.5
5	8	1	200.28	229.2
6	10	1	313.37	222.6
7	12	1	451.6	198.8
8	15	1	706.07	170.6
9	20	1	1256	124.7
10	25	1	1963	125.3
11	30	1	2827	118.3
12	30	20	125.66	53.9
13	40	20	235.62	41.7
14	50	20	376.99	36.8
15	60	20	549.78	19.04
16	75	20	867.86	17.8
17	75	50	314.16	19.28
18	100	50	589.05	15.58

### Anexo N. SEV ST6

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST6</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106981 N 1113486 E 2622 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	579
2	2.5	1	18.85	621.4
3	4	1	49.48	439.02
4	6	1	112.35	202.8
5	8	1	200.28	197
6	10	1	313.37	188.2
7	12	1	451.6	222.9
8	15	1	706.07	204.56
9	20	1	1256	182.9
10	25	1	1963	116.06
11	30	1	2827	74.9
12	30	20	125.66	64.215
13	40	20	235.62	42.51
14	50	20	376.99	32.11
15	60	20	549.78	26.24
16	75	20	867.86	7.4
17	75	50	314.16	16.9
18	100	50	589.05	21.26

### Anexo O. SEV ST7

Práctica empresarial Ecopetrol - Universidad Industrial de Santander Sondeos Eléctricos Verticales				
Operador: <b>Gustavo Chacón - Felipe Palacios</b>				
SEV: <b>ST7</b>		Zona: <b>Mina Santa Teresa</b>		Fecha: Abril 8 de 2014
Orientación: <b>NE-SW</b>			Instrumento: <b>ABEM TERRAMETER</b>	
coordenadas del centro: <b>1106979 N 1113489 E 2623 msnm</b>			Arreglo: <b>Schlumberger</b>	
Observaciones Generales:				
N°	AB/2	MN	K	pa
				ohm.m
1	1.5	1	6.28	957
2	2.5	1	18.85	551.1
3	4	1	49.48	345.8
4	6	1	112.35	237.9
5	8	1	200.28	242.93
6	10	1	313.37	246.07
7	12	1	451.6	243.71
8	15	1	706.07	263.13
9	20	1	1256	272.47
10	25	1	1963	211.19
11	30	1	2827	141.75
12	30	20	125.66	58.867
13	40	20	235.62	45.526
14	50	20	376.99	38.263
15	60	20	549.78	23.01
16	75	20	867.86	34.08
17	75	50	314.16	32.79
18	100	50	589.05	28.07