

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO GEOELÉCTRICO CON FINES DE PROSPECCIÓN DE AGUAS  
SUBTERRÁNEAS EN ZONAS ALEDAÑAS A LA ESTACIÓN TERRENA DE  
CONTROL DEL SATÉLITE SIMÓN BOLÍVAR, ESTADO GUÁRICO.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Ramirez C., Giselle C.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2011

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO GEOELÉCTRICO CON FINES DE PROSPECCIÓN DE AGUAS  
SUBTERRÁNEAS EN ZONAS ALEDAÑAS A LA ESTACIÓN TERRENA DE  
CONTROL DEL SATÉLITE SIMÓN BOLÍVAR, ESTADO GUÁRICO.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Nuris Orihuela

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Ramirez C., Giselle C.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2011

Caracas, noviembre 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller **Giselle C. Ramírez C.**, titulado:

**“Estudio geoelectrico con fines de prospección de aguas subterráneas en zonas aledañas a la estación terrena de control del satélite Simón Bolívar, estado Guárico”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. José Cavada  
Jurado

Prof. Jesús Gonzalez  
Jurado

Prof. Nuris Orihuela  
Tutor Académico

## DEDICATORIA

*A Dios  
A mi madre  
algún día nos abrazaremos de nuevo...*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente.

A un gran ser humano, una excelente profesional, mi tutora la profesora Nuris Orihuela, por ser no sólo para la elaboración de este trabajo, sino a lo largo de mi carrera una gran inspiración.

A mi mami Feliciano Castro, por ser la mejor madre y amiga del mundo, por enseñarme que lo más importante en la vida es ser feliz, por hacer de mí la persona que soy hoy. Siempre estás y estarás en mi corazón, te amo con toda mi alma que Dios te guarde y cuide, espero me acompañes todos los días de mi vida.

A Nelson Manuel mi amor, por ser esa persona en la cual puedo confiar y con la que puedo contar, gracias por darme fuerza para salir adelante y hacerme ver que a pesar de las tristezas la vida aún tiene cosas bellas como tú. Llegaste en el momento preciso, encantada de que estés mi vida, te amo cielo.

A mi tía Juana Castro, por apoyarme y alentarme a culminar esta etapa de mi vida; sin ti hubiese sido más difícil continuar... muchísimas gracias, no hay forma en que pueda compensarte lo que has hecho por mí.

A mi primito Elio Chávez, por siempre ser como el hermano mayor que de vez en cuando me pone los pies sobre la tierra y me enseña a enfrentar la realidad con coraje, a él y a su esposa Betzabet mi comadre mil gracias.

A mis compañeros y amigos; Adriana, Verónica, Derik, Jesús, Mauro, Luis Alberto, Abraham, Manuel, Yuniev, por apoyarme siempre no sólo en el ámbito académico sino también personal.

A mis amigos de toda la vida que a pesar de los problemas siempre han estado allí, mis mejores amigas Ale Kotlewski y Eudelyn Gonzalez las amo, Ricardo López, Marco Díaz, al Gordo, Sandra Rivera, Andreina Pardo.

A Omaira Camargo, Andrés Pérez, Yumari Alferez y Angela Nicole por querer tanto a mi mami y siempre estar ahí para ambas, se les quiere un montón.

En fin a todas aquellas personas que de una u otra forma han formado parte de mi aprendizaje en ser una mejor persona.

Ramírez C., Giselle C.

# **ESTUDIO GEOELÉCTRICO CON FINES DE PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONAS ALEDAÑAS A LA ESTACIÓN TERRENA DE CONTROL DEL SATÉLITE SIMÓN BOLÍVAR, ESTADO GUÁRICO**

**Tutor Académico: Prof. Nuris Orihuela.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2011, 96 p.**

**Palabras Claves:** MÉTODOS ELÉCTRICOS, SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL, AGUAS SUBTERRÁNEAS, ESTUDIO GEOELÉCTRICO, CORTES GEOELÉCTRICOS.

**Resumen.** Se desarrolla un estudio geoelectrico con fines de prospección de agua subterránea utilizando métodos eléctricos, en modalidad de SEV. Este estudio se realiza con la finalidad de evaluar la posibilidad de proveer agua a la estación de control del Satélite Simón Bolívar que se encuentra ubicada en el municipio Mellado, Estado Guárico. Se realiza la adquisición de un total de veintiuno (21) sondeos eléctricos verticales. Con la información derivada de estos sondeos, se generaron mapas de isorresistividades para las distancias  $AB/2$  igual a 4, 8, 16, 32 y 64 metros. Los datos obtenidos en cada sondeo eléctrico vertical, fueron procesados utilizando el programa computacional *IPI2WIN*, identificando espesores y sus correspondientes resistividades. Con los espesores y resistividades se construyeron cortes geoelectricos, con el uso del programa *Oasis Montaj* (versión 7), módulo *Gmsys*, donde se pudo correlacionar lateralmente, las resistividades del subsuelo con la información geológica, identificandose tres unidades geoelectricas predominantes en la zona de estudio. La primera unidad (unidad A); con resistividades entre 1 y 50  $\Omega m$  corresponde a lutitas marinas, lutitas gris a gris oscuro, medianamente duras, fósiles, comúnmente limosas, no-calcareas, frecuentemente glauconíticas y microfósilíferas. La segunda (unidad B); con un rango de resistividades de 128 a 1355  $\Omega m$ , correspondiente a las arenas pertenecientes al Miembro Galeras, estas aumentan de espesor hacia la zona noreste del área de estudio. Y la tercera (unidad C) corresponde con areniscas con cemento calcáreo o ferruginoso, micáceas, conteniendo localmente minerales ferromagnesianos, plagioclasa, filita y minerales opacos con resistividades que oscilan entre 17000 y 260000  $\Omega m$ . Relacionando la hidrografía y topografía en el noreste del área de estudio, con los espesores de las arenas del Miembro Galeras; se propone ésta como, de interés para realizar perforaciones de pozos que puedan abastecer de agua a la estación.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Ubicación del área de estudio.....	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO GEOLÓGICO.....	5
2.1 Llanos venezolanos.....	5
2.2 Subcuenca de Guárico .....	6
2.3 Exploración petrolera previa.....	9
2.4 Hidrografía de la región.....	10
2.5 Litología del subsuelo.....	10
CAPÍTULO III.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Hidrogeología .....	12
3.2 Almacenamiento del acuífero y porosidad .....	13
3.2.1 Porosidad .....	14

3.2.2 Permeabilidad .....	15
3.3 Geofísica superficial en estudios hidrogeológicos. ....	16
3.4 Definición y caracterización de acuíferos primarios. ....	17
3.5 Definición y caracterización de acuíferos secundarios.....	18
3.6 Acuíferos colgados .....	19
3.7 Tipos de roca como acuíferos. ....	20
3.7.1 Rocas ígneas. ....	20
3.7.2 Rocas metamórficas.....	21
3.7.3 Rocas sedimentarias .....	21
3.8 Importancia de las aguas subterráneas.....	21
3.9 Permeabilidad de las formaciones areno-arcillosas.....	22
3.10 Prospección geofísica. ....	23
3.11 Métodos geoeléctricos de prospección. ....	26
3.11.1 Métodos de campo natural.....	26
3.11.2 Métodos de campo artificial. (Corriente continua).....	26
3.11.3 Métodos de campo variable .....	27
3.11.4 Método de polarización inducida. ....	27
3.12 Aplicaciones de los métodos geoeléctricos de prospección. ....	27
3.13 Resistividad de las rocas.....	28
3.14 Medición de la resistividad de las rocas. ....	29
3.15 Resistividad aparente ( $\rho_a$ ). ....	30
3.16 Sondeo eléctrico vertical (SEV). ....	30



3.17 Sondeo Wenner.....	33
3.18 Sondeo Schlumberger.....	34
3.19 Schlumberger contra Wenner. ....	35
3.20 El sondeo eléctrico vertical en investigaciones hidrogeológicas.....	36
3.21 Curva de resistividad aparente.....	36
3.22 Curva de resistividades verdaderas.....	37
3.23 Interpretación cualitativa .....	37
3.24 Interpretación cuantitativa .....	37
3.25 Cortes geoeléctricos.....	37
3.26 Formaciones de sedimentos incoherentes.....	39
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>40</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>40</b>
4.1 Revisión y recopilación bibliográfica.....	40
4.2 Adquisición de datos geoeléctricos con el método de resistividad en la modalidad de sondeos eléctricos verticales.....	40
4.3 Cálculo de resistividades aparente y específica y espesores de capas del subsuelo.....	44
4.4. Generación de cortes geoeléctricos. ....	45
4.5 Elaboración de mapas de iso-resistividades.....	46
4.6 Interpretación de cortes geoeléctricos y mapas de iso-resistividades. ....	47
4.7 Integración de resultados y generación de recomendaciones. ....	47
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>48</b>
<b>RESULTADOS Y ANALISIS</b> .....	<b>48</b>

5.1 Localización de los perfiles .....	48
5.2 Interpretación de curvas de SEVs.....	50
5.3 Interpretación cualitativa de las curvas de resistividades.....	52
5.4 Interpretación de mapas de isorresistividad.....	53
5.5 Interpretación de los cortes geoelectricos.....	57
5.6 Integración de resultados. ....	62
CONCLUSIONES .....	65
RECOMENDACIONES .....	66
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	67
APENDICES.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio. ....	4
Figura 2. 1. Marco tectónico al norte de la Subcuenca de Guárico .....	7
Figura 2. 2. Unidades cretácicas y terciarias acuñadas gradualmente .....	8
Figura 3. 1. Volumen Poroso .....	15
Figura 3. 2. Representación gráfica de Acuíferos. ....	19
Figura 3. 3. Acuífero Colgado.....	20
Figura 3. 4: Parámetros de la Resistividad.....	25
Figura 3. 5. Relación espaciamento- profundidad de alcance.....	32
Figura 3. 6. Curva logarítmica de resistividad. ....	32
Figura 3. 7. Dispositivo Wenner en Movimiento.....	33
Figura 3.8. Dispositivo Schlumberger en Movimiento.....	34
Figura 4. 1. Tendido para realizar el SEV.....	41
Figura 4. 2. Circuito de Emisión. ....	42
Figura 4. 3. Reporte del observador. ....	44
Figura 4. 4. Corrección por empalmes. ....	45
Figura 4. 5. Curva y tabla de resistividades después de la inversión. ....	45
Figura 5. 1. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales.....	48
Figura 5. 2. Gráfico del SEV 1 de resistividad ( $\Omega.m$ ), $AB/2$ (m). Líneas: negro= curva de campo; rojo= curva teórica; azul= curva de resistividad verdadera. ....	50
Figura 5. 3. Mapa de isorresistividades $AB/2=4$ metros.....	53
Figura 5. 4. Mapa de isorresistividades $AB/2= 8$ metros. ....	54

Figura 5. 5. Mapa de isorresistividades $AB/2= 16$ metros.....	55
Figura 5. 6. Mapa de isoresistividades $AB/2= 32$ metros. ....	56
Figura 5. 7. Mapa de isoresistividades $AB/2= 64$ metros. ....	57
Figura 5. 8. Mapa geológico con la ubicación de los cortes geoelectricos. ....	58
Figura 5. 9. Corte geoelectrico A-A' de dirección NO-SE.....	59
Figura 5. 10. Corte geoelectrico B-B' de dirección O-E. ....	60
Figura 5. 11. Corte geoelectrico C-C' de dirección O-E. ....	61
Figura 5. 12. Corte geoelectrico D-D' de dirección N-S. ....	62
Figura 5. 13. Mapa hidrográfico del área de estudio.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 3. 1: Valores de resistividades de las rocas más comunes. ....	30
Tabla 3. 2: Tabla de configuración de resistividades para los diferentes tipos de cortes geoelectricos de 3 capas. ....	38
Tabla 5. 1: Localización geográfica de los sondeos eléctricos verticales. ....	49
Tabla 5. 2: Resultados generados por el programa IPI2WIN para el SEV 1. ....	50
Tabla 5. 3: Resultados generados por el programa IPI2WIN para los sondeos eléctricos verticales SEV2 al SEVCONTROL. ....	51
Tabla 5. 4: Interpretación cualitativa de las curvas de resistividades utilizando la clasificación tipo K, H, Q y A.....	52
Tabla 5. 5: Asociación de litotipos a las diferentes unidades geoelectricas.....	63

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

La situación del cambio climático en el mundo y el fenómeno del “Niño”, han venido causando, a lo largo del tiempo en Venezuela, prolongación de periodos de verano afectando, entre otros, el suministro de agua para consumo en centros poblados. Los ríos del territorio disminuyen su caudal de agua, a medida que avanza el periodo seco. En consecuencia estos ríos alimentan de manera deficiente embalses o infraestructuras de captación en referencia al volumen de agua que estos desalojan para diversos usos, ocasionan un rápido descenso del nivel de agua disponible para suministro por aducción.

Ríos como el Guárico, Chirgua, Tocuyo, Neverí, Uribante, el Caroní o cualquier otro del territorio que alimentan embalses de diversas dimensiones, dependen principalmente de la cantidad de agua que haya retenido en el periodo de lluvias las cuencas hidrográficas de estos ríos.

Un caso particular es el del Estado Guárico donde prácticamente no se registraron precipitaciones en el periodo de lluvias del año 2009, ocasionando la disminución del nivel de agua de la laguna que alimenta los tanques de almacenamiento de la estación terrena de control del Satélite Simón Bolívar; esto genera la revisión de opciones para cumplir con los estándares internacionales de agua almacenada en una instalación con estas características, por lo cual se propone la evaluación de condiciones para disponer de suministro de agua por pozo en esta estación.

En vista de lo anterior, el propósito de esta investigación es realizar jornadas exploratorias con la finalidad de identificar zonas potenciales para la ubicación de pozos para extracción de agua.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Caracterizar por medio de métodos geoelectricos el subsuelo de zonas aledañas a la estación terrena de control del Satélite Simón Bolívar, con el fin de identificar acuíferos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Revisar y recopilar información: geológica, geofísica y bibliográfica
- Adquirir datos geoelectricos con el Método de Resistividad en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales para determinar la resistividad de las capas dispuestas en el subsuelo.
- Calcular las resistividades aparente y específica del subsuelo, así como también el espesor de las capas.
- Generar cortes geoelectricos del área de estudio.
- Elaborar mapas de iso-resistividades del subsuelo.
- Interpretar cortes geoelectricos y mapas de iso-resistividades y realizar las recomendaciones correspondientes.

## **1.3 Justificación**

Este trabajo permitirá ampliar el conocimiento geológico de la zona, lo que implica tener un mayor control de la disposición de las capas en subsuelo permitiendo complementar mapas geológicos para futuros estudios. De la misma manera pretende responder a la necesidad de prospectar y explotar los posibles acuíferos en las zonas aledañas a la estación terrena de control del Satélite Simón Bolívar, a fin de cumplir

con los estándares internacionales de seguridad de instalaciones estratégicas, en lo que se refiere al suministro de agua potable.

En cuanto al aporte económico y social se tiene que de hallar un acuífero importante, la estación terrena de control mejora su autonomía en suministro de agua para consumo interno y seguridad, así como también se verán beneficiadas el resto de la comunidad que hace vida en la Base Aérea Manuel Ríos.



#### 1.4 Ubicación del área de estudio

El estudio se realizó en el Norte del estado Guárico, en las zonas aledañas al perímetro de seguridad de la Base Aérea Manuel Ríos; donde se encuentra ubicada la estación terrena de control del Satélite Simón Bolívar, comprendiendo un área de estudio de aproximadamente 84 km<sup>2</sup>; ubicada en el sector de Carrizales, (Coordenadas N009° 22.33' W 066° 55.38', sistema de referencia WGS 84) a 12 km. al este de El Sombrero, municipio Julián Mellado entre los estados Aragua y Guárico. En la figura 1.1 se ilustra la ubicación relativa de la zona de estudio por un recuadro.

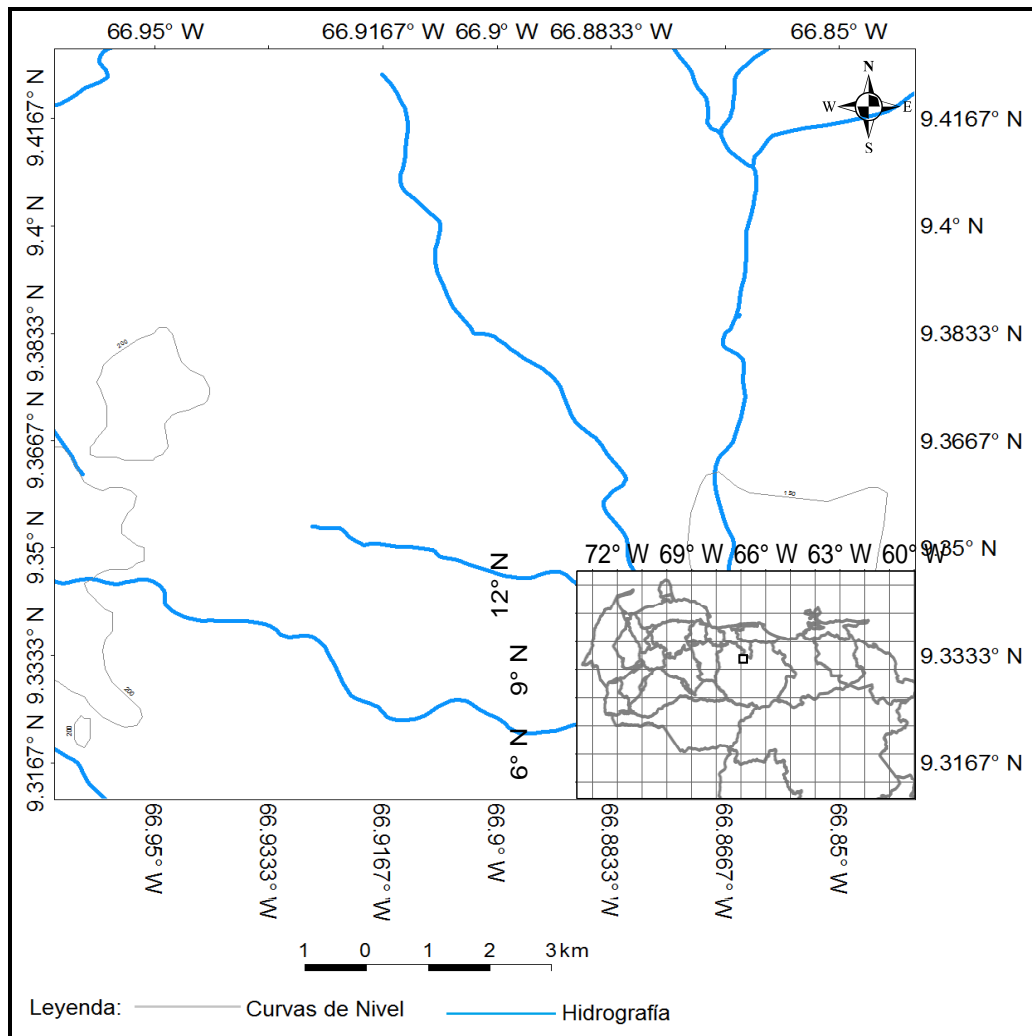


Figura 1. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (sistema de referencia WGS 84).

## CAPÍTULO II

### MARCO GEOLÓGICO

#### 2.1 Llanos venezolanos

Las mayores proporciones de estas tierras, están representadas por sabanas de muy suave ondulación con declives generales que no exceden al 1 % sus divisiones están poco definidas, la vegetación es arbustiva y herbácea, con desarrollo de morichales y palmares, y vías principales del drenaje. La unión de estos sistemas de escorrentía origina los canales mayores, contribuyentes directos del Rio Orinoco, después de atravesar zonas anegadizas y esteros en las zonas bajas.

Los terrenos de relieves más accidentados se ubican a elevaciones superiores a los 150 metros sobre el nivel del mar, en ellas se observa el contraste entre aéreas ocupadas por mesetas elevadas sobre el terreno circundante y los suelos con escarpes y ondulaciones de cimas redondeadas.

Tales formas geomorfológicas se corresponden con unidades litológicas bien diferenciadas. Las altiplanicies con terrenos denudados y acumulaciones marginales son típica de la Formación Mesa, aquellos ondulados levemente formados por argilitas y limolitas rojizas, pardas y amarillentas coinciden con la Formación Chaguaramas infrayacente y los suelos de sabanas recientemente extendidas hacia la parte Sur, costeano el arco orinoquense, se identifica con aluviones recientes. (García 1993).

La Formación Mesa se extiende sobre los llanos orientales de los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas. Consiste en depósitos horizontales deltaicos (aluviales) y palustres, con conglomerados que llegan a ser peñones a lo largo del frente de montañas, pero de textura más fina en los Llanos.

En el tiempo de depositación de la Formación Chaguaramas, el aspecto de la cuenca cambio convirtiéndose de lodos abiertos que estaban expuestos a mecanismos intermitentes y a una fuerte oxidación lo que produjo una acumulación de arcillas abigarradas. Algunos lignitos fueron depositados en las capas superiores de Chaguaramas durante intervalos de clima húmedo; alternando con los lignitos y las arcillas abigarradas, se forman depósitos de origen salobre y a veces marino (Peirson 1963).

Una parte de los Llanos venezolanos se encuentra en la Cuenca Oriental limitada al norte por La Cordillera de la Costa, al sur por el río Orinoco, al este por la plataforma del Delta del Orinoco y al Oeste por el lineamiento del Baúl; se encuentra subdividida en dos Subcuencas: la de Guárico y la de Maturín.

## **2.2 Subcuenca de Guárico**

El área de estudio forma parte de lo que se denomina subcuenca de Guárico, en la cual el flanco norte se encuentra asociado al frente de deformación donde se ubica el sistema de fallas de Guárico (Fig. 2.1), produciendo un marco geológico complejo, el cual sobre carga rocas Cretácicas y Terciarias. Hacia el sur, con depresiones estructurales en las que se conservaron rocas Jurasicas y Paleozoicas y con acuñamiento gradual de secuencias Cretácicas y Terciarias (Fig. 2.2), haciendo estructuralmente este flanco más sencillo. (Wec, 1997).

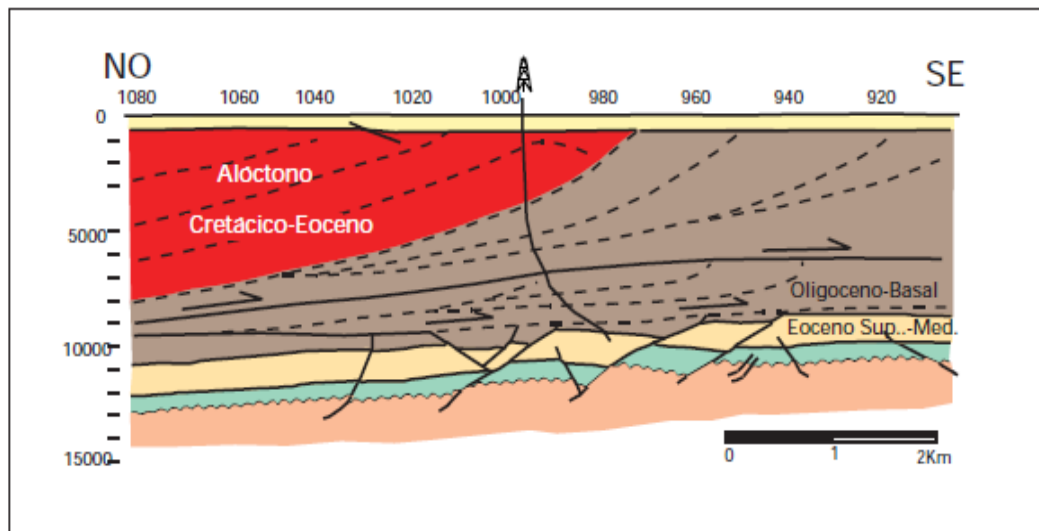


Figura 2. 1. Marco tectónico al norte de la Subcuenca de Guárico (tomado del WEC 1997)

En las zonas aledañas a la estación terrena de control del Satélite Simón Bolívar afloran las Formaciones Quebradón y Roblecito, donde la litología predominante para la primera consiste en lutitas mal estratificadas y poco resistentes a la erosión, en parte carbonáceas, con lignitos delgados intercalados localmente, interestratificadas se hallan areniscas de grano variable, formando capas de 20 a 80 cm de espesor, aunque alcanzan localmente los 10 m. Las estructuras más comunes son la estratificación y laminación cruzada, y las rizaduras en el tope de las capas de areniscas. (Evanoff, 1951). La descripción previa es ampliada por Beck (1986), quien cita de la región de Altagracia de Orituco, la frecuencia de capas de arenisca arcillosa con estructura flaser, y bioturbaciones localmente comunes; reporta además, areniscas con cemento calcáreo o ferruginoso, micáceas. La matriz puede estar presente en porcentajes suficientes, como para llamárseles subgrauvacas. Las pelitas se componen de cuarzo en fracción limo, arcilla, minerales, ferromagnesianos oxidados y muscovita. Lentillas ovoidales de limolita roja, centimétricos, son atribuidos por Beck (1986) a clastos pelíticos. Vivas y Campos (1977), describieron en el área tipo los conglomerados líticos, formando paquetes de 3 m de espesor. Están compuestos de guijarros de menos de 4 cm de diámetro de cuarzo, ftanita, carbón, etc. Dominan los clastos subredondeados (70%) sobre los subangulares (30%) y se hallan en una matriz siliceoarenáceo, localmente calcáreo. En el área occidental de los afloramientos

(estados Cojedes, Guárico noroccidental y Aragua), la formación desarrolla un miembro basal predominantemente arenoso, denominado Miembro Galera (Peirson, 1963).

La Formación Quebradón suprayace concordantemente a la Formación Roblecito, la cual Patterson y Wilson (1953) establecieron que Roblecito es una unidad que yace debajo de la Formación Chaguaramas al este del estado Guárico y la describen como un cuerpo esencialmente de lutitas siendo la continuación de la depositación iniciada por la Formación La Pascua y predominantemente, una unidad de lutita marina que es transicional con las areniscas transgresivas de La Pascua y gradacional hacia arriba con las areniscas y lutitas menos marinas de la Formación Chaguaramas. Las lutitas de la Formación Roblecito forman una gran cuña sedimentaria que aumenta de espesor uniforme y rápidamente hacia el noroeste. Estas lutitas contienen foraminíferos de ambientes marinos somero con abundantes formas calcáreas.

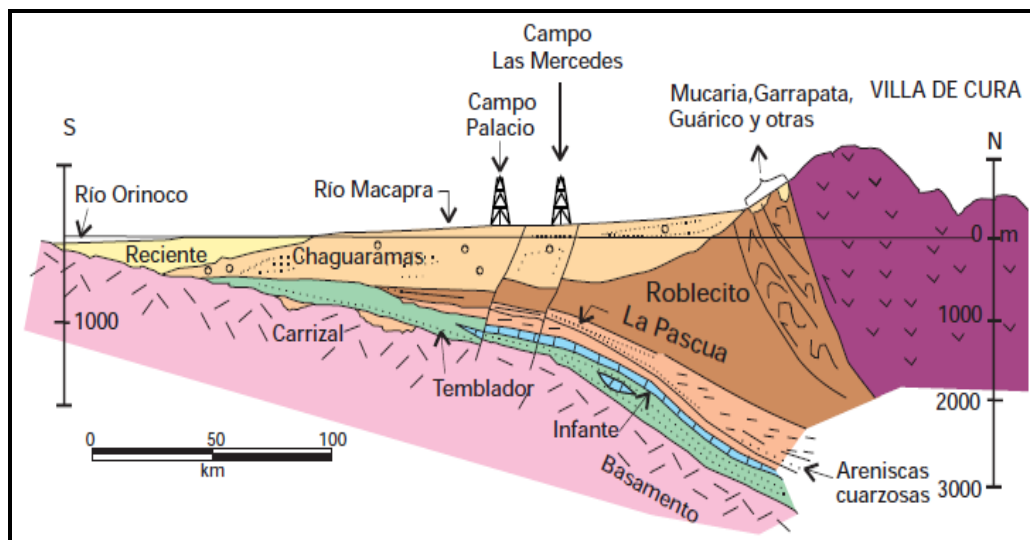


Figura 2. 2. Unidades cretácicas y terciarias acuñadas gradualmente (tomado del WEC 1997)

En el subsuelo, la formación consiste en lutitas, medianamente duras, comúnmente limosas, no-calcáreas. Los 150-160 m, tanto basales como superiores, se vuelven más limosos y finamente arenosos, gradando en muchos niveles a areniscas laminadas muy arcillosas de grano muy fino. Las lutitas limpias alternan con

numerosas capas delgadas de arcilita siderítica marrón y densa. Las lutitas, limolitas y areniscas de la parte basal muestran bioturbaciones, laminaciones onduladas, rizaduras de corriente, estratificación cruzada de torrente y estratificación de espina de pescado además de niveles de pelecípodos (Beck 1986).

Venezuela posee importantes depósitos de arenas silíceas asociadas con formaciones sedimentarias que van en edad desde el Terciario inferior hasta el Pleistoceno. La mayoría de estos depósitos se encuentran en las regiones de Los Andes, Región Oriental y los estados Lara, Falcón y Guárico. Este último posee una de las reservas potenciales de menas silíceas más importantes del país, incluyendo las arenas cuarcíticas que se asocian con el Miembro Galeras de la Formación Quebradón (Rodríguez, 1986).

En el área occidental de los afloramientos (estados Cojedes, Guárico noroccidental y Aragua), la Formación Quebradón desarrolla un miembro basal predominantemente arenoso, denominado Miembro Galera (Peirson, 1963).

### **2.3 Exploración petrolera previa**

En las décadas de los años 1940 a 1950's se llevaron a cabo las labores de exploración petrolera en toda la región. Según nos fue indicado, el lugar de la Base correspondió a las instalaciones petroleras de la empresa Creole Petroleum Co., con el nombre de Carrizal, incluyendo el aeropuerto y un campamento con oficinas y casas para los empleados.

Durante este periodo de exploración se reportaron afloramientos de lutitas de colores variados desde color marrón muy claro algo amarillento, con variaciones abigarradas, hacia el marrón oscuro con tintes grises y violáceos. La característica superficial es la de numerosas grietas de desecación.

## **2.4 Hidrografía de la región**

Uno de los aspectos más importantes de esta región es su red hidrográfica. La mayoría de los ríos de la región están orientados de norte a sur y sureste; en su mayoría pertenecen a la cuenca del Orinoco, siendo los más importantes, el Apure (600 km), Arauca (700 km), Meta (200 km), Guárico y Portuguesa (550 km). Los mismos son de gran utilidad como vías de comunicación y penetración en la región.

## **2.5 Litología del subsuelo**

La composición litológica está formada por lutitas, areniscas y calizas; las lutitas son arenosas, laminadas y quebradizas y se encuentran intercaladas con areniscas. Los suelos son de origen residual de texturas variables arcillo-arenosa, generalmente pedregosas, poco profundas (Instituto Nacional de Estadística, 2007).

Según el estudio geotécnico para la construcción de la estación de control satelital BAMARI realizado por (GEOHIDRA CONSULTORES, 2006); basándose en la clasificación visual y resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas de las perforaciones, se observa que el perfil del subsuelo está conformado por arcillas de baja plasticidad intercaladas con arena limosa de origen sedimentario en el tope y residual en la base. Como resultado de las perforaciones se obtuvieron perfiles litológicos, donde superficialmente se detectó una capa vegetal de aproximadamente 0,5 m de espesor, sobre una capa de espesor variable de entre 2,5 m y 5,0 m de una arcilla de baja plasticidad arenosa y limosa de color marrón amarillento y consistencia media dura.

Subyaciendo el estrato arcilloso se encontró una capa de arena limosa de espesor variable entre 1,0 y 6,0 m; de color amarillento, rojizo y gris. Como último estrato, se detectó una arcilla de baja plasticidad dura, con concreciones ferruginosas, trazas de azufre y fisuras llenas de óxido (GEOHIDRA CONSULTORES 2006).

Para marzo 2006, momento en el cual se realizó el estudio geotécnico para la construcción de la estación terrena de control del satélite Simón Bolívar, y hasta la profundidad explorada, el nivel frático se detectó entre los 5,0 y 7,5 m de profundidad.



## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Hidrogeología

Para el aprovechamiento o explotación de los sistemas de aguas subterráneas de un área es necesaria la realización de una secuencia de estudios que permitan caracterizar estos sistemas y así obtener una mejor comprensión y evolución del sistema acuífero estudiado. Según Castany (1975) en forma general, se distinguen tres etapas principales:

a) Estudios preliminares o de reconocimiento: su objetivo es localizar los acuíferos más importantes, estimar sus dimensiones, parámetros hidrológicos, zonas de recarga y descarga de sus aguas. Por lo general se hacen a escalas de 1:200.000 a 1:100.000, por lo que la recopilación de datos se hace con ayuda de mapas geológicos y topográficos regionales e información de fotografías aéreas e imágenes de satélite. También se estima recopilar información de pozos antiguos presentes en el área. En este ámbito la geofísica puede contribuir a través de la ejecución en los pozos existentes (activos y abandonados) de registros (tipo gamma) que permiten reconstruir la estratigrafía y las condiciones geológicas. En las zonas petroleras venezolana el uso de pozos no activos para la ejecución de diagráfias podría ofrecer excelentes informaciones regionales y locales sobre los modelos hidrológicos. Toda esta información, integrada en un sistema de información geográfica SIG puede definir ambientes aluviales con potenciales acuíferos primarios y estructuras a gran escala propicias de ser estudiadas en detalle, como pueden ser fallas o fracturas en terrenos rocosos. La definición específica de estas áreas a nivel local podría ser hecha con fotografías aéreas de detalle a mayor escala (1:25000 - 50000), mapas geológicos y observaciones de campo.

b) Estudios generales: una vez definidas las posibles zonas de interés o estructuras susceptibles de almacenar aguas, se procede a planificar un estudio de superficie, mediante la combinación de distintas técnicas de investigación geofísica. El uso de estas técnicas es legitimado por su carácter no destructivo, su compatibilidad ambiental (no afecta el entorno) y sus ventajas técnico-económicas. Se debe tener en cuenta que no tiene sentido efectuar sin más una campaña de investigación geofísica “para buscar agua” si no se ha efectuado antes un estudio hidrogeológico que haya fijado el modelo del acuífero (ocurrencia – distribución geométrica, materiales y estructuras) y se haya escogido la metodología mejor para caracterizar el modelo de acuífero esperado en la condición geológica – estructural específica del sitio investigado. No existe una metodología universal de investigación que funcione para cualquier modelo de acuífero o ambiente geológico. Para el éxito del estudio es importante una correcta planificación que considere todos los parámetros geocientíficos y el test de diferentes métodos y configuraciones. Se tiene que poner en evidencia que, a excepción de la resonancia magnética protónica (NMR - PMR), no existe método que permite la detección directa de agua en el subsuelo.

c) Estudios de detalle: al finalizar la etapa anterior, se pueden emplazar pozos exploratorios con gran precisión sobre aquellas áreas y estructuras geológicas más promisorias. De esta forma, se puede lograr una efectividad de pozos productores cercana al 80%. Todo esto tiene como principal implicación el ahorro de tiempo, de dinero y la optimización de los resultados. La existencia de una perforación en un sitio donde se conoce, a través de la integración de datos en un SIG, el entorno geológico, estructural e hidrológico, permite el monitoreo del acuífero y su clasificación en una base de datos global que permita planificar y regular la gestión de los recursos hídricos.

### **3.2 Almacenamiento del acuífero y porosidad**

El volumen de agua que un acuífero puede tener en o liberar del almacén para un cambio dado está determinado por la porosidad. La porosidad de los materiales de

la Tierra viene dada por el tamaño, forma y arreglo de sus granos. La movilidad del agua a través de un acuífero está definida por su permeabilidad o conductividad hidráulica (Weight, 2008).

### 3.2.1 Porosidad

La porosidad está representada por la fracción no sólida de los materiales geológicos; este es el lugar donde el agua puede ser almacenada. En la zona vadosa, los espacios vacíos están llenos con agua y aire. La porosidad total de los materiales geológicos se expresa en forma de porcentaje como se muestra en la ecuación 1.

$$\phi = \frac{V_t - V_g}{V_t} = \frac{V_p}{V_t} \times 100\% \quad (\text{Ecuación. 1})$$

Donde:

$\phi$  = Porosidad (%).

$V_t$  = Volumen total de la roca.

$V_g$  = Volumen ocupado por los granos

$V_p$  = Volumen Poroso.

La porosidad se divide en primaria y secundaria. La porosidad primaria es el espacio vacío que ocurre en la roca cuando ésta se forma. La secundaria se refiere a las aberturas o espacios vacíos creados después de la formación de la roca

En la Figuras 3.1a y 3.1b se representa gráficamente la relación entre el volumen poroso y el volumen total, representando la parte oscura el volumen libre, y por lo tanto a mayor parte oscura representa una mayor porosidad como se observa en la figura 3.1b, ya que se tiene mayor cantidad de espacio que ocupar (Pimienta, 1980).

Existen dos tipos de porosidades:

*Porosidad Absoluta:* es el porcentaje de espacio poroso total, con respecto al volumen total de la roca, considerando los poros que estén o no interconectados entre sí. Una roca puede tener una porosidad absoluta considerable y aun no así tener conductividad a los fluidos, debido a la falta de comunicación entre los poros.

*Porosidad Efectiva:* es el porcentaje de espacio poroso intercomunicado, con respecto al volumen total de la roca. Por consiguiente, es una indicación de la facilidad a la conductividad de los fluidos por la roca, aunque no es una media cualitativa de este parámetro, es decir, que no se utiliza como parámetro para determinar la capacidad de conductividad de los fluidos dentro del yacimiento.

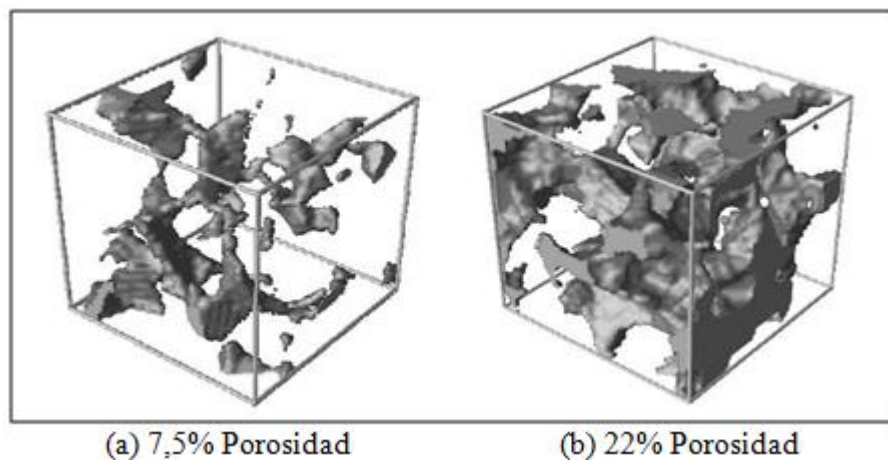


Figura 3. 1. Volumen Poroso (Villa 2006)

### 3.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad de un medio poroso dado es la habilidad que presenta éste para dejar pasar un fluido a través de sus poros interconectados y/o red de fracturas, es decir, es una característica de la roca que está determinada por la capacidad que tiene un fluido de moverse a través de sus poros interconectados. Como la permeabilidad depende de la continuidad de los poros, no existe en teoría una única relación entre la porosidad absoluta de una roca y su permeabilidad.

La permeabilidad se ve afectada por los mismos factores que la porosidad efectiva, es decir, tamaño del grano, empaque del medio, forma de los granos,

distribución de tamaño y angularidades de partículas y grado de cementación y consolidación.

Esta propiedad, se mide en Darcys, en honor al ingeniero hidráulico francés Henri Darcy, quien formula la ley que lleva su nombre, según la cual: “la velocidad del flujo de un líquido a través de un medio poroso, debido a la diferencia de presión, es proporcional al gradiente de presión en la dirección del flujo”.

En 1856, Darcy investigó el flujo del agua con un centipoise de viscosidad, a través de los filtros de arena para purificar el agua.

Darcy interpretó sus observaciones de tal forma que obtuvo resultados que correlacionó con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Q \times L \times \mu}{A \times \Delta P} \quad (\text{Ecuación. 2})$$

Donde:

K = Permeabilidad en Darcys (D).

Q = Caudal que atraviesa el medio poroso (cm<sup>3</sup>/seg).

μ = Viscosidad del fluido (cP).

L = Longitud del medio poroso (cm).

A = Área transversal del medio poroso (cm<sup>2</sup>).

ΔP = Caída del presión (atm).

Esta ecuación se cumple para fluidos monofásicos, homogéneos, de flujo laminar y saturado un 100% el medio poroso, el cual debe no ser reactivo y el proceso debe ser isotérmico y estacionario. (Palmar, 1992)

### **3.3 Geofísica superficial en estudios hidrogeológicos.**

Las técnicas geofísicas superficiales son utilizadas para obtener información acerca de las unidades del subsuelo que controlan el almacenamiento, movimiento y

calidad de las aguas subterráneas. Castany (op. cit.) también menciona que todos los métodos geofísicos se basan en la medición de una propiedad física específica de los materiales que conforman el subsuelo, por ejemplo, la resistividad y la conductividad eléctrica, la velocidad de propagación del sonido, el campo magnético, el campo gravitacional, entre otras. Algunas de las herramientas de mayor uso y eficacia en la exploración de aguas subterráneas, tanto someras como profundas son: métodos eléctricos o galvánicos (SEV y Tomografía eléctrica), métodos electromagnéticos (FDEM, VLF, TDEM y AMT/CSAMT), sísmica de refracción/reflexión, radar de suelos (GPR y Borehole Radar) y resonancia magnética nuclear (NMR o PMR), cada una de ellas corresponde a una de las propiedades físicas anteriormente mencionadas.

El uso de la geofísica es ampliamente aceptado y usado en las comunidades y organizaciones internacionales y es, en algunos casos como Brasil, una rutina (soportada en la legislación y normativas de los estados) para la ubicación de pozos.

Las investigaciones geofísicas de este tipo generalmente alcanzan a estudiar los primeros 300 m de la superficie terrestre. Dentro de este rango de profundidades, las técnicas geofísicas han sido aplicadas con éxito en la caracterización de acuíferos de diferentes tipos, sintéticamente clasificados como: acuíferos primarios, secundarios y colgados.

### **3.4 Definición y caracterización de acuíferos primarios.**

Son formaciones subterráneas de roca permeable y material poco consolidado que pueden almacenar cantidades importantes de agua. Pueden clasificarse en *confinados*, donde el espesor efectivo del acuífero se encuentra entre dos capas impermeables y en cualquier lugar la presión es superior a la atmosférica; si se perfora un pozo a través de la capa confinante superior, el agua ascenderá por el pozo hasta que la columna de agua sea lo suficientemente grande como para contrarrestar la presión del acuífero. O *no confinados o libres*, donde su límite superior viene dado por el nivel freático y se encuentra a presión atmosférica. Estas clases de acuíferos

primarios pueden ser originados por: a) secuencias aluviales clásticas de arenas y gravas permeables alternadas a arcillas y b) formaciones sedimentarias permeables (carbonatos, calizas, areniscas). En ambos casos, las propiedades físicas de los materiales en contacto son tan diferentes, que las técnicas geofísicas permiten definir la extensión y el espesor de los depósitos, así como también permiten definir la calidad y el tipo de agua que estos almacenan (NMR). La problemática más marcada se presenta, en geofísica, para la caracterización de secuencias aluviales espesas donde se alternan capas permeables de arenas y arcillas. Este caso necesitaría la comprensión del modelo geológico y, seguramente, la integración multidisciplinaria de datos que incluyan diagráfias en pozos existentes para la calibración de los métodos. En términos generales, para la selección del método geofísico apropiado para este tipo de investigación se tiene que considerar la escala del trabajo, la profundidad de investigación necesitada y las condiciones geológicas locales que pueden limitar la aplicación de algunos de los métodos.

### **3.5 Definición y caracterización de acuíferos secundarios**

En áreas donde el substrato rocoso es somero, el flujo de agua en zonas de fracturas, fallas o cavidades (karsts en calizas) puede ser la principal fuente de aguas subterráneas. Muchas técnicas geofísicas pueden ser útiles para localizar, identificar y caracterizar estas fracturas y cavidades. Desde el inicio del siglo 20 campañas de estudios geofísicos (eléctrica – EM) han sido exitosas en la identificación de fracturas en áreas áridas y semiáridas de África. Con el progresar del tiempo la problemática de ubicación de nuevas fuentes de agua ha permitido la ampliación de la aplicación de las metodologías geofísicas para aplicaciones más profundas (AMT/CSAMT – sísmica de reflexión).

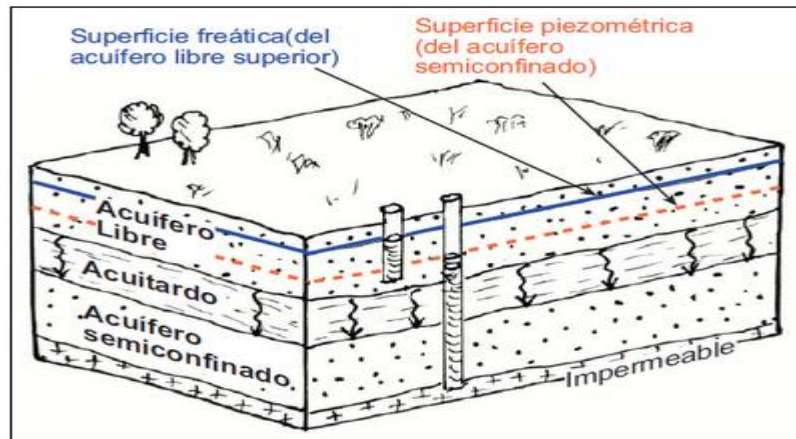


Figura 3. 2. Representación gráfica de Acuíferos (tomado de Universidad Complutense de Madrid).

### 3.6 Acuíferos colgados

Algunas veces se presentan por encima del nivel freático una o más capas de material de baja conductividad hidráulica (Figura N°3.3). El agua que se infiltra queda atrapada en esta capa para formar un lente de agua, que normalmente tiene una extensión limitada sobre la zona saturada del acuífero principal. Los acuíferos colgados son más comunes de lo que se pueda suponer, aunque quizá sólo ocupan unos pocos centímetros de grosor, o sólo se alimenten después de una gran infiltración, en otros casos pueden tener varios metros de espesor y extenderse por distancias considerables. Este tipo de acuíferos no constituyen fuentes de abastecimiento confiable para lapsos largos y frecuentemente ocurre que al perforarlos se traspasa la capa impermeable subyacente ocasionando el drenaje del agua. (Price, 2003)



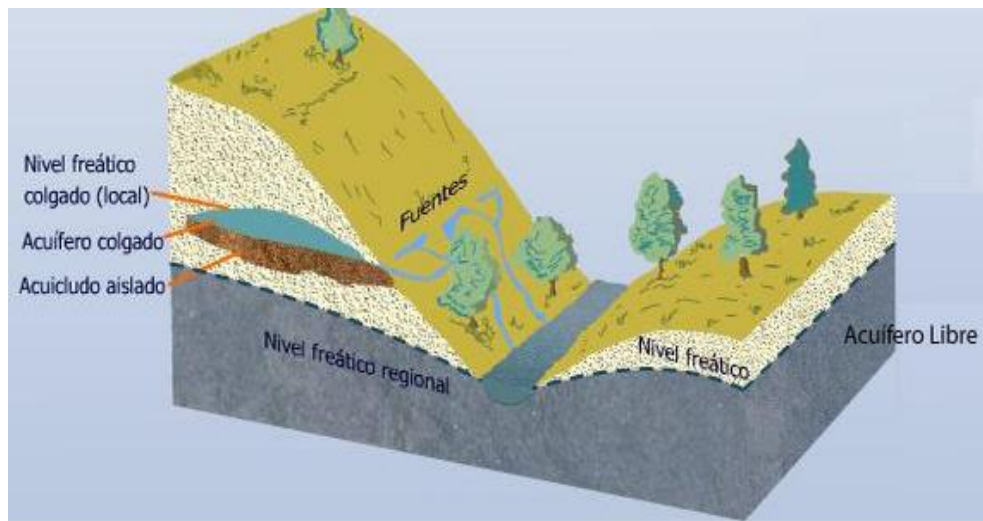


Figura 3. 3. Acuífero Colgado (tomado de Universidad Complutense de Madrid).

### 3.7 Tipos de roca como acuíferos.

Las rocas se agrupan en tres tipos principales: Ígneas, metamórficas y sedimentarias.

#### 3.7.1 Rocas ígneas.

Se forman como resultado del enfriamiento y solidificación del magma, el cual en ocasiones es forzado dentro de rocas preexistentes formando intrusiones ígneas, en otros casos el magma llega hasta la superficie y crea rocas extrusivas. En las intrusiones ígneas por la génesis de su formación, existen pocos espacios; quizás algunas cavidades o vesículas no conectadas generadas por burbujas de gas, por lo que su porosidad original es reducida. En el caso de las rocas extrusivas, es posible que contengan grandes conductos interconectados, las coladas de basaltos son conocidas por su tendencia a formar fracturas y diaclasas.

La conductividad hidráulica y la porosidad pueden aumentar después de la formación de la roca. El intemperismo o meteorización puede debilitar y remover minerales generando juntas; también por tensiones originadas por el movimiento de la corteza terrestre o por esfuerzos que se producen por la eliminación del peso de

unidades de roca que fueron erosionadas, se crean fracturas. En ambos casos se desarrolla porosidad secundaria (Price, 2003).

### **3.7.2 Rocas metamórficas.**

Se forman por la alteración de otras rocas por acción de temperatura y presión; factores que hacen que la roca se comprima tanto que los espacios existentes se cierren. Solo cuando estas rocas se exponen a los efectos de meteorización, es probable que desarrollen porosidad secundaria como las rocas ígneas. (Price, 2003)

### **3.7.3 Rocas sedimentarias**

Se forman como resultado del depósito de partículas, las cuales son a menudo derivadas de la meteorización y la erosión de otras rocas. La naturaleza del proceso significa que las partículas se depositaran con espacios entre ellas. Cuando los granos se encuentran “bien clasificados” (granos del mismo tamaño) la roca tendrá mayor porosidad que una de clasificación pobre (granos de diferente tamaño). Los sedimentos finos, como arcillas y limos o arena fina pueden tener una gran porosidad, pero por tener poros muy pequeños, la tensión superficial paraliza el movimiento del agua; por lo que se consideran materiales impermeables. Las gravas y arenas gruesas con tamaño de grano uniforme son muy permeables. Al aumentar la profundidad de soterramiento un sedimento no consolidado se convertirá en un sedimento consolidado, disminuyendo la porosidad. Al consolidarse el sedimento se puede producir fracturas en el mismo y desarrolla una porosidad secundaria como las rocas ígneas y metamórficas. (Price, 2003)

## **3.8 Importancia de las aguas subterráneas.**

Según (UNESCO, 1971); en términos de cantidad, se estima que el total de agua en la Tierra es un poco mas de 1400 millones de kilómetros cúbicos (Km<sup>3</sup>). De los cuales aproximadamente 1370 millones de Km<sup>3</sup>, cerca del 95% es agua de mar. Gran parte del resto, el 2%, se encuentra en forma solida en los glaciares y casquetes

polares. El agua de ríos y lagos, en la atmósfera y en la zona no saturada, en conjunto representan 1/50 de 1% del agua total susceptible como recurso para abastecimiento.

El volumen de agua subterránea varía de 7 millones de  $\text{Km}^3$  a unos 60 millones de  $\text{Km}^3$  aproximadamente. No toda esta agua puede ser utilizada, ya que parte está contenida en espacios porosos pequeños o en rocas que se encuentran a grandes profundidades, lo que restringe su uso como recurso.

El agua subterránea tiene ventajas sobre del agua superficial, en términos de abundancia, disponibilidad en climas áridos y esta relativamente a salvo de la contaminación.

Lamentablemente éstas no se encuentran distribuidas uniformemente en la corteza terrestre, hay áreas donde el agua subterránea no puede ser obtenida en cantidades suficientes como para justificar el gasto en perforaciones de pozos o construcciones de norias.

### **3.9 Permeabilidad de las formaciones areno-arcillosas.**

Según (Pimienta, 1980), una verificación experimental realizada con permeámetros; había confirmado que la permeabilidad de las arcillas aumentaba considerablemente cuando se encontraba en contacto con arenas de grano muy fino. Al parecer, las fuerzas de retención capilares tienden a oponerse a la presión hidrostática y a retener agua en las arcillas, sin embargo, estas fuerzas pierden su importancia cuando el paso al medio arenoso es progresivo, probablemente porque su efecto disminuye cuando el diámetro de los canales aumenta regularmente de un medio a otro. La permeabilidad relativa de las arcillas depende de las superficies que la delimitan.

Es preciso buscar y situar una captación en las zonas más arenosas; existen potentes formaciones areno-arcillosas con espesores de centenares de metros, es decir que son susceptibles a la explotación. Por lo general la arcilla es más abundante que

la arena, los tramos arenosos tienen extensión moderada y generalmente aislada en medio de capas esencialmente arcillosas; por tanto que, su alimentación en la zona de saturación es lenta (Pimienta, 1980).

### **3.10 Prospección geofísica.**

Una vez determinada la presencia de fracturas en la zona de estudio, caracterizada su importancia y concretada las zonas o puntos de interés sobre las mismas se debe proceder a situarlas espacialmente con un mayor nivel de detalle e intentar determinar alguna de sus características. La presencia de estas fracturas es observable mediante la fotografía aérea y la de satélite. No obstante la ubicación exacta de la traza de estos accidentes en campo suele presentar una cierta dificultad en la mayoría de los casos. Esta dificultad es debida a la falta de afloramientos, presencia de materiales que la enmascaran, características de la propia fractura, cambio de escala, etc. Por ello, se hace necesario complementar con una investigación geofísica. Existen numerosos métodos geofísicos capaces de detectar la presencia de fracturas dentro del macizo rocoso. Los de mayor definición suelen ser muy sofisticados, requieren un equipo muy caro y son de difícil y costoso empleo, especialmente para cubrir grandes superficies.

Si la fractura a localizar en detalle presenta una o varias de las siguientes características, mineralización metalizada, gran anchura o enfrenta materiales con litologías de diferentes propiedades físicas, el problema tiene fácil resolución mediante el empleo de cruzado de al menos dos de las técnicas geofísicas tradicionales: gravimetría, sísmica, resistividad, magnetometría, etc. Sin embargo, cuando la investigación pretende localizar una fractura estrecha, sin mineralizar y que enfrenta a rocas con propiedades físicas semejantes, como son la mayoría de las presentes en nuestra investigación, nuestra experiencia nos conduce al empleo, fundamentalmente, de métodos de resistividad por su rapidez, sencillez, facilidad de interpretación, y relativo bajo costo. Dentro de este nivel investigación pueden emplearse diferentes técnicas geofísicas.

En primer lugar, recomendamos el empleo de la prospección electromagnética en muy baja frecuencia (VLF) mediante el correspondiente detector-receptor y empleando diferentes frecuencias. Esta técnica permite detectar la presencia de fracturas en el terreno siempre que no se encuentren recubiertas por materiales terciarios-cuaternarios poco resistivos y de espesor inferior a 5 m. Esta técnica permite cubrir una gran superficie de terreno en poco tiempo y con bajo coste económico. La planificación de la investigación debe centrarse en aquellas zonas preferentes ya determinadas. Deben realizarse una serie de perfiles paralelos entre sí y transversales a su vez a la red de fracturación principal. La unión de los puntos con anomalía de los diferentes perfiles permitirá determinar la traza de las fracturas en campo con una precisión de metros (Pimienta, 1980).

Dado que la anchura de las fracturas puede no ser superior a los 2-3 metros puede convenir precisar con mayor detalle la ubicación exacta de las fracturas. Este segundo sub-nivel de investigación debe realizarse mediante métodos de resistividad (Figura 3.4). Tradicionalmente se han empleado en la determinación de masas conductoras enterradas (los rellenos de las bandas miloníticas o brechas de fallas lo suelen ser, especialmente si están saturadas de agua) o contactos litológicos no aflorantes los distintos dispositivos polo-dipolo y dipolo-dipolo.

Este método es laborioso en su ejecución, de costo relativamente alto y su interpretación es en numerosas ocasiones complicada. Sin embargo, ofrece la posibilidad de determinar el buzamiento de la fractura investigada y proporciona información sobre la anchura de la brecha de falla y del tipo de relleno. En los últimos años se ha desarrollado la técnica de tomografía eléctrica que puede ser considerada como una variación de la técnica anterior pero con un nivel de complejidad mucho mayor.

El tratamiento informático de los datos obtenidos, permite determinar claramente las zonas de fracturación, su anchura, tipo de relleno en función de su resistividad.

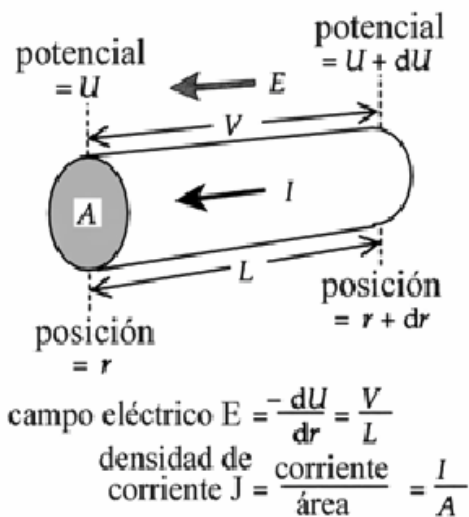


Figura 3. 4: Parámetros de la Resistividad. (Tomado de Reyes, s/f)

Pese a su bondad, esta técnica no está suficientemente extendida debido al elevado precio de los equipos de medida y programa para el procesamiento de los datos. En numerosas ocasiones también podemos emplear, dentro de los métodos georesistivos, los sondeos eléctricos verticales, en dispositivo Schlumberger tetraelectródico, que requieren un equipo de medida poco costoso, son rápidos y baratos en su ejecución y de fácil interpretación. Teóricamente no puede usarse esta técnica en este tipo de terrenos ya que se incumplen algunos de los supuestos de uso, especialmente el de horizontalidad de los estratos y la isotropía horizontal de los materiales. El comportamiento e interpretación de los S.E.V. realizados en la proximidad de una falla vertical ha sido estudiado por diferentes autores, especialmente por Kunetz, G. (1955). Normalmente se considera el caso de fracturas con salto vertical importante o que enfrenten materiales con diferente resistividad.

El perfil general del subsuelo investigado consiste en un suelo de espesor limitado a uno o dos metros. Por debajo suele encontrarse un depósito coluvial de naturaleza arcillosa y espesor comprendido entre los 10 y los 20 m de espesor.

Las curvas de SEV realizadas sobre la vertical de planos de fractura subverticales o de fuerte buzamiento. Cuando estas fracturas son de poco salto y

enfrentan el mismo tipo de materiales con altos valores georesistivos su presencia se muestra o detecta por una serie de caídas bruscas de la resistividad.

Todo lo anterior hace que algunos de los SEV realizados no puedan ser interpretados por el método tradicional cuantitativo, debido bien a que las curvas resultantes presentan inclinaciones superiores a los  $45^\circ$ . En estos casos recomendamos realizar una interpretación semicuantitativa o cualitativa, forzando la rama final de la curva para que se ajuste a las curvas patrón y/o interpretando estos dientes de sierra de fuertes caídas de la resistividad como debidos a la presencia de fracturas o discontinuidades dentro del macizo rocoso.

### **3.11 Métodos geoelectricos de prospección.**

La forma usual de clasificar los métodos geoelectricos, es según el campo electromagnético que estos estudian sea de origen natural o sea creado artificialmente para la prospección (Orellana, 1982).

#### **3.11.1 Métodos de campo natural**

- Método de potencial espontáneo.
- Método de corrientes telúricas.
- Método Magneto-telúrico.
- Método AFMAG

#### **3.11.2 Métodos de campo artificial. (Corriente continua)**

- Método de las líneas equipotenciales y del cuerpo cargado.
- Sondeos eléctricos (simétricos, dipolares, etc.).
- Calicatas eléctricas.
- Medición magnética de resistividades.

### **3.11.3 Métodos de campo variable**

- Sondeos de frecuencia
- Sondeos por establecimiento de campo (transitorios).
- Calicatas electromagnéticas.
- Método “Radio-Kip”.
- Método de radiografía hertziana.

### **3.11.4 Método de polarización inducida.**

Estos procedimientos suelen aplicarse por medio de observaciones efectuadas en la superficie del terreno, y algunos de ellos pueden ser empleados desde vehículos aéreos, o en la superficie del mar o lagos, o en el interior de las minas.

### **3.12 Aplicaciones de los métodos geoelectricos de prospección.**

Los métodos geoelectricos nos dan información sobre el subsuelo y pueden aplicarse con fines muy variados. De modo general, las más importantes y difundidas son las siguientes:

- Investigaciones tectónicas para la búsqueda de petróleo.
- Estudio para la localización de aguas subterráneas.
- Estudios complementarios para cartografía geológica bajo recubrimiento.
- Estudio de cuencas carboníferas.
- Localización de yacimientos de otros minerales útiles, especialmente menas metálicas.
- Investigaciones de firmes, cimentaciones y desprendimientos de tierras para ingeniería civil.
- Localización y cubicación aproximada de materiales de construcción.



- Investigaciones a profundidad muy reducida para la localización de objetos y edificaciones enterradas, como guía y ayuda para las investigaciones arqueológicas.
- Estudios en zonas muy profundas de corteza terrestre.
- Estudios geotérmicos.

### 3.13 Resistividad de las rocas

Los materiales que componen el suelo poseen cierta resistencia a la conducción de una corriente eléctrica. Existen tres maneras en que una corriente eléctrica puede ser conducida a través de, por ejemplo, una roca: conducción electrolítica, electrónica (Óhmica) y dieléctrica. La conducción electrolítica es producida por el lento movimiento de iones dentro de un electrolito, sustancia que se disocia en iones y depende del tipo de ión responsable del transporte de carga, de su concentración, de su movilidad, etc. La conducción electrónica se produce debido a la existencia de electrones libres en un material y es la forma en la que fluye la corriente en los metales. La conducción dieléctrica ocurre en materiales de baja conductividad o aislantes cuando se aplica una corriente variable en el tiempo. Las rocas son, en su mayoría, malos conductores y sus resistividades serían extremadamente altas si no fuera porque son porosas y sus poros se encuentran la conducción de corriente en las rocas se debe básicamente a los fluidos presentes en los poros que actúan como electrolitos, siendo en comparación pequeña la contribución de los granos de la roca a menos que la roca sea de un material conductor. Las rocas son, entonces, conductores electrolíticos en donde la propagación de corriente es debida a la conducción de iones. Por esto, la resistividad de las rocas varía con su volumen y su distribución espacial de poros y con la resistividad y cantidad de fluido electrolítico presente en los mismos. Archie en 1942 desarrolló una fórmula empírica Ley de Archie para la resistividad efectiva de una roca teniendo en cuenta: la porosidad ( $\phi$ ), la fracción de poros que contienen agua ( $S$ ) y la resistividad del agua ( $\rho_w$ ):

$$\rho = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \quad \text{Ecuación 3}$$

donde a, m y n son constantes que cumplen  $0.5 \leq a \leq 2.5$ ,  $1.3 \leq m \leq 2.5$ , y  $n \geq 2$ . El valor de n es en general cercano a 2 si más del 30% del espacio poral está lleno de fluido, pero puede tener valores mayores para menor contenido de agua. El valor de m depende del grado de cementación de la roca, vinculado generalmente con su edad geológica.

### **3.14 Medición de la resistividad de las rocas.**

La resistividad de una porción de roca puede medirse directamente por diversos métodos:

Por medio de mediciones geoelectricas realizadas en la superficie del terreno, como los sondeos eléctricos verticales, sondeos magnetotelúricos entre otros. Estos tipos de medida, tienen la ventaja de que la roca a medir se encuentra en estado natural y que la medición es realizada en un volumen grande de la roca, pero por otro lado se tienen las ambigüedades de que usualmente adolece la interpretación.

Por mediciones realizadas dentro de los sondeos mecánicos; dando resultados más detallados y locales dado que la roca se encuentra en estado natural, excepto por el lodo del sondeo.

En laboratorio, por medio de determinaciones realizadas a muestras extraídas de afloramientos, testigos de sondeos o labores mineras. Estas tienen en su contra que no se encuentran en estado natural, el grado de humedad esta modificado y que por solo ser una porción de roca no son representativas.

**Tabla 3. 1: Valores de resistividades de las rocas más comunes, según Coduto (1999).**

Nombre	Rango de Resistividades ( $\Omega.m$ )
Arena	10-1000
Arcilla	1-100
Arcilla Húmeda (no consolidada)	20
Arenisca	$1-6,4 \times 10^8$
Caliza	$50-10^7$
Conglomerados	$2,0 \times 10^3-10^4$
Dolomita	$3.5 \times 10^2-5,0 \times 10^3$
Lutita consolidada	$20-2,0 \times 10^3$
Gravas	200-1000

### **3.15 Resistividad aparente ( $\rho_a$ ).**

Es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectricos y la que se toma como base para la interpretación. La resistividad aparente al igual que la resistividad real es medida en ohmio-metro ( $\Omega.m$ ).

### **3.16 Sondeo eléctrico vertical (SEV).**

El sondeo eléctrico vertical genera información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoelectricas del subsuelo, este método consiste en la inyección de corriente eléctrica continua en la tierra proveniente de una fuente artificial a través de un par de electrodos de cobre o impolarizables AB. A través de otro par de electrodos de cobre o impolarizables MN colineales con AB, se mide la diferencia de potencial eléctrico entre ambos (Orellana 1982).

La interpretación de la información obtenida de los sondeos, permite determinar la profundidad y espesores de los diferentes estratos de diferentes

resistividades, al incrementarse sistemáticamente las distancias interelectródicas con el consecuente aumento en la penetración del sondeo.

Con esta técnica, usualmente pueden ser detectadas entre 3 y 5 capas, y por lo general es muy efectiva en la exploración de aguas subterráneas. La interpretación de la información generada por los sondeos, requiere de la interpretación conjunta de un geofísico y un geólogo; ya que se necesita el conocimiento del método geofísico así como también de las condiciones geológicas e hidrogeológicas.

La finalidad del SEV es conocer la distribución vertical de las resistividades, bajo un punto sondeado. La mayor eficacia del método corresponde al caso en que los sondeos, se realicen sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitadas por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado).

A partir de los valores medidos de corriente, de potencial eléctrico y del factor geométrico para cada disposición de electrodos se obtiene la respuesta de resistividad aparente  $\rho_a$ , que irá variando al aumentar la distancia entre electrodos (AB) y consecuentemente aumentando la profundidad de investigación (figura 3.5) . Por lo que según Orellana, para cada sitio de sondeo se obtiene una curva de resistividad aparente en función de la semidistancia entre electrodos de corriente (AB/2).

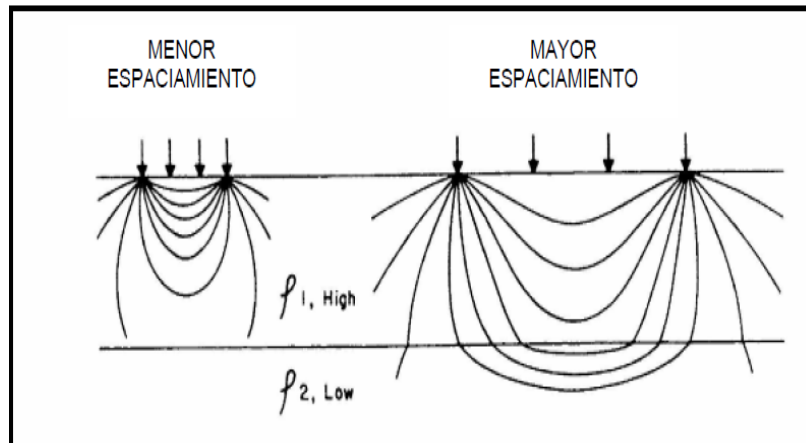


Figura 3. 5. Relación espaciamento- profundidad de alcance, tomado de Benson (1994).

Una vez calculada la resistividad aparente, ésta es graficada en función de la distancia interelectródica media  $AB/2$  en escala bi-logarítmico, como se observa en la figura 3.6.

La interpretación de las curvas se realiza mediante la inversión de los datos experimentales de  $\rho_a$ , hallando modelos de resistividad eléctrica unidimensionales (1D), o sea unidades horizontalmente estratificadas, cuya respuesta ajuste la curva experimental minimizando el error cuadrático medio.

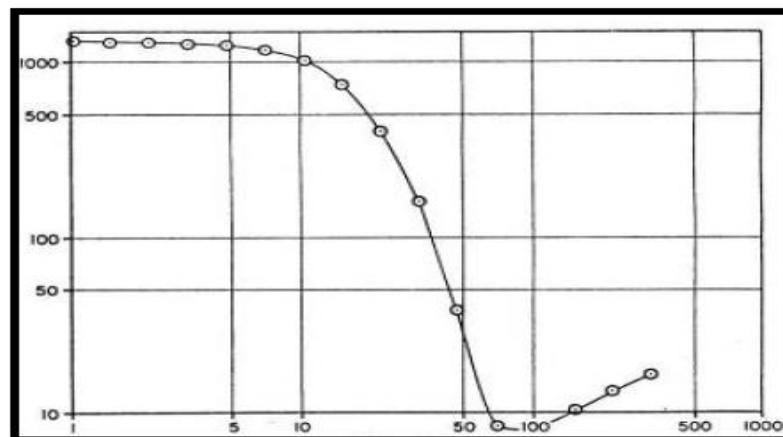


Figura 3. 6. Curva logarítmica de resistividad, tomado de Benson (1994).

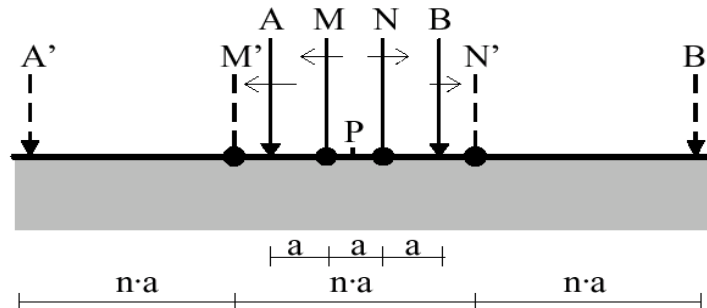
En cualquier dispositivo electródico, si se conoce el factor geométrico  $g$ , la corriente eléctrica  $I$  inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial  $\Delta V$  entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente mediante las

ecuaciones correspondientes. Los dispositivos más utilizados son los tetraelectródicos lineales, que son aquellos que emplean 4 electrodos (2 de corriente y 2 de potencial) de este tipo de dispositivos los mas utilizados son los siguientes:

### 3.17 Sondeo Wenner.

Dado el dispositivo Wenner AMNB con una separación interelectródica  $a$ , este sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de  $a$  manteniendo un punto central fijo P. Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida,  $\rho_a$  en Wm, y en abscisas el valor de  $a$  en metros para cada paso.

**Dispositivo** del estadounidense Frank **Wenner**, 1914:



**Figura 3. 7. Dispositivo Wenner en Movimiento.**

Como se aprecia en la gráfica anterior, la distancia interelectródica pasa de  $a$  (AMNB) a  $na$  (A'M'N'B'), moviendo los cuatro electrodos en cada medición sucesiva.

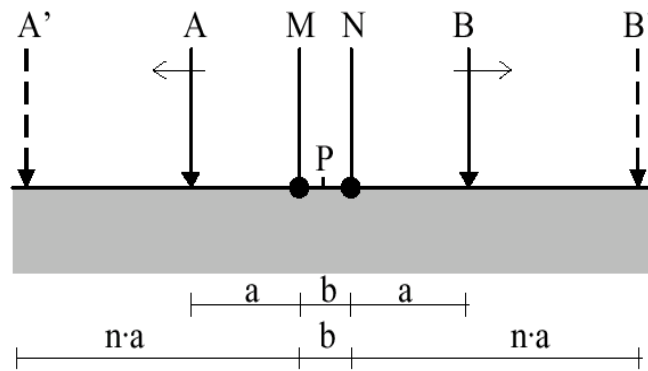
El factor geométrico del dispositivo es:  $g = 2 \cdot \pi \cdot a$  Ecuación 4

La resistividad aparente es:  $\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot g$  Ecuación 5

### 3.18 Sondeo Schlumberger.

Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con  $AB \gg MN$ , el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos en torno a un punto central fijo P. La representación de este sondeo muestra en ordenadas  $R_a$  ( $W_m$ ) y en abscisas la distancia  $AB/2$  (m). Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos. Cuando la distancia AB se hace tan grande que la diferencia de potencial MN es muy chica, entonces se mueven M y N, de modo que el intervalo b se hace suficientemente mayor -y por lo tanto también mayor la diferencia de potencial- y se recomienza a abrir A y B progresivamente, pero siempre repitiendo un par de puntos comunes a dichos empalmes. El método de cálculo es tal que da siempre resultados de  $\rho_a$  consistentes.

**Dispositivo del alsaciano Conrad Schlumberger, 1914:**



**Figura 3.8. Dispositivo Schlumberger en Movimiento.**

Composición simétrica de los electrodos AMNB en línea, donde la distancia de los electrodos de caída de potencial MN es mucho menor que la de los inyectoros AB. En la práctica,  $AB > 5MN$ .

El factor geométrico del dispositivo es:  $g = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{AB^2 - MN^2}{MN}$  Ecuación 6

La resistividad aparente es:  $\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot g$

Ecuación 7

### 3.19 Schlumberger contra Wenner.

La configuración Wenner esta inclinada hacia principios mal fundamentados, mientras que la configuración Schlumberger se apoya en bases solidas físico-matemáticas. Para el último, las curvas teóricas son más expresivas y sensibles a las características del corte geoelectrico sobre el que se efectúan.

La calidad de las curvas de campo del dispositivo Schlumberger es superior a la de Wenner; debido a que los electrodos de potencial permanecen fijos, de forma que el efecto de la zona superficial donde están clavados, es el mismo a lo largo de toda la curva hasta que sea necesario realizar un empalme. Al aumentar la distancia MN puede ocurrir que el nuevo trozo de curva no coincida perfectamente con la primera en los puntos AB común. Ahora en el dispositivo Wenner; como los electrodos de potencial MN son desplazados en cada lectura, se puede decir que en cada punto de medida se realiza un empalme y los saltos generados por éstos aparecen en toda la curva, sin posibilidad de conocerlos; cuestión que no ocurre en el dispositivo Schlumberger (Orellana 1982).

Por lo antes descrito se producen falsos máximos en la curva de resistividades en el dispositivo Wenner, sin indicaciones que permitan su eliminación, y será atribuido a equivocadamente a una capa resistiva en el subsuelo. Siendo este el primer argumento para preferir la configuración Schlumberger.

El segundo inconveniente del dispositivo Wenner, es la necesidad de mover cuatro electros en vez de dos y a distancias mayores que en el Schlumberger; exigiendo esto más tiempo y mayor cantidad de hombres, lo que indica menor productividad y mayor costo.



La mayor sencillez de las operaciones, sus ventajas económicas y mejor calidad de las curvas de campo, hacen preferible el dispositivo Schlumberger sobre el Wenner, en la mayoría de los casos (Orellana, 1982).

### **3.20 El sondeo eléctrico vertical en investigaciones hidrogeológicas.**

El hecho de que el agua contenida en las rocas sea factor decisivo en su resistividad puede llevar a la idea equivocada de que el método SEV detecta directamente el agua. No es así en general, sino que lo que suele buscarse con este procedimiento son estructuras y capas acuífera, y la diferenciación entre materiales permeables e impermeables.

En cada prospección con fines hidrogeológicos, se requiere que los objetivos sean claramente fijados en términos de resistividades. No tiene sentido efectuar sin más una campaña de SEV “para buscar agua” si no se ha efectuado antes un estudio hidrogeológico que haya fijado los materiales o estructuras que deben buscarse (Castany 1975).

Uno de los resultados más importantes es decidir la conveniencia de efectuar o no pozos o perforaciones y en caso afirmativo, la ubicación y profundidad más favorable para estas captaciones. El costo del SEV oscila entre el 1.2 y el 2 % del precio de una perforación de la misma profundidad.

### **3.21 Curva de resistividad aparente**

Esta curva es la representación gráfica, en escala logarítmica, de la serie de valores de la resistividad aparente que se obtienen con un dispositivo electródico determinado de longitud creciente. La variable independiente de estas curvas es el parámetro  $AB/2$ , que no es más que la distancia que hay entre los electrodos A o B al centro del par de electrodos MN.

### **3.22 Curva de resistividades verdaderas**

Expresa directamente la resistividad y espesor de las capas en subsuelo. Se representa en un gráfico logarítmico y es de forma escalonada, su función es discontinua en los valores de  $z$  correspondientes a los contactos.

### **3.23 Interpretación cualitativa**

Esta tiene como objetivo, obtener una aproximación a la estructura del subsuelo estudiado, sin que esto signifique determinar espesores ni resistividades en valor absoluto, sino relaciones de desigualdad; tales como zonas de profundidad máxima o mínima de algún horizonte guía, delimitación de áreas diferentes en cuanto a condiciones geológicas, etc. (Orellana, 1982)

### **3.24 Interpretación cuantitativa**

Tiene como finalidad determinar la distribución espacial de las resistividades en el subsuelo, tomando como base la resistividad aparente.

El intérprete no puede contentarse con encontrar una distribución vertical de resistividades que satisfaga la curva de campo a interpretar, sino que debe buscar entre las soluciones válidas aquella que armonice más con los SEVs y con los datos geológicos disponibles. Por lo que la interpretación requiere el empleo de juicios y criterios personales, y no puede confiarse por completo en procesos automáticos.

### **3.25 Cortes geoelectricos.**

La especificación de espesores y resistividades de cada medio estratificado del medio descrito, recibe el nombre de corte geológico. Este está compuesto por  $n$  capas, que requiere para su especificación el conocimiento de  $n$  resistividades y  $n-1$  profundidades o  $n-1$  espesores; ya que la última capa denominada sustrato tiene siempre espesor infinito.

Los cortes geológicos del mismo número de capas, según (Orellana, 1982), pueden subdividirse según el orden en que aparezcan en los sucesivos estratos, resistividades mayores o menores que en la capa suprayacente.

Para el uso de esta clasificación, se establece el siguiente sistema de notación. Los cortes de dos capas, en los cuales se tienen dos resistividades ( $\rho_1 > \rho_2$  y  $\rho_1 < \rho_2$ ), no llevan símbolos especiales. Las letras H, K, Q y A, significan los cuatros tipos de cortes geológicos posibles de tres capas, en la tabla 3.2 se muestra las configuraciones de resistividades para los distintos tipos de cortes geoelectricos.

**Tabla 3. 2: Tabla de configuración de resistividades para los diferentes tipos de cortes geoelectricos de 3 capas, Orellana (1982).**

Tipo de Corte	Configuración de resistividades
H	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
K	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
Q	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
A	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

Para los cortes de cuatro capas se tienen 8 tipos, que no es más que la combinación de los anteriores; para clasificarlos, se consideran las tres primeras capas y se le asigna la letra que corresponde con su clasificación y luego de la misma forma con las tres últimas. Así el tipo AA corresponde a la combinación de resistividades  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$  y el HK  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ . Solo son posible los siguientes tipos, HK, HA, KH, KQ, QQ, QH, AK, AA. Los tipo KK, HH Y HQ carecen de sentido, puesto que implican condiciones contradictorias. Los cortes de cinco o más capas se clasifican siguiendo la misma metodología.

### **3.26 Formaciones de sedimentos incoherentes.**

Estas formaciones están constituidas por una serie de materiales cuyo tamaño de grano crece desde las arcillas a las gravas, aumentando en el mismo sentido la permeabilidad y la resistividad. El problema hidrogeológico correspondiente, que es el de buscar materiales permeables (arenas y gravas) con suficiente continuidad lateral, se traduce en términos geofísicos en la búsqueda de zonas resistivas.

## CAPÍTULO IV

### MARCO METODOLÓGICO

#### 4.1 Revisión y recopilación bibliográfica

Se refirió a la revisión y selección de la bibliografía, geología y geofísica necesaria para apoyar el buen desempeño de labores de adquisición, procesamiento e interpretación de datos. Con la finalidad de validar desde el punto de vista geológico y técnico la interpretación de los resultados que se obtengan. Fue necesario antes de realizar jornadas de adquisición, verificar la ubicación de pozos en el área y datos hidrológicos asociados.

#### 4.2 Adquisición de datos geoelectricos con el método de resistividad en la modalidad de sondeos eléctricos verticales.

Para investigación se empleó SEV dispositivo Schlumberger. Se desarrollaron campañas exploratorias para identificar las áreas de interés, en las cuales se concentraron los SEVs destinados a dar cumplimiento a los objetivos de este estudio.

Los materiales requeridos para la adquisición son los siguientes:

- Veintiún (21) cabillas de cobre (electrodos), donde una fue más corta y se utilizó para fijar el punto medio de referencia.
- Cuatro (04) mandarrias pequeñas para fijar electrodos.
- Una (01) planta eléctrica de 110 voltios marca Porter Cable.
- Una (01) fuente de intensidad variable entre 5 y 3 Amperios.
- Cuatro (04) carretes de cables de baja resistividad.
- Dos (02) multímetros, uno en función de voltímetro y el otro en función de amperímetro (Unit 33A).
- Dos (02) cintas métricas de 30 y 50 m.

- Un (01) equipo con sistema de posicionamiento global (GPS) marca Magellan modelo explorist 210.

La separación de los electrodos AB para el dispositivo Schlumberger se distribuyó de forma logarítmica (2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 16, 20, etc.) y la separación de los electrodos de potencial respecto a los electrodos de corriente se mantuvo menor o igual a 1/5.



**Figura 4. 1. Tendido para realizar el SEV.**

Se comenzó por fijar en el terreno el punto elegido para ser el centro del SEV, en el que se colocó una estaca. Se tendieron dos cuerdas, con marcas numeradas que indican las sucesivas posiciones de los electrodos A y B o cintas métricas (Figura 4.1). En el centro del tendido, donde previamente se clavó la estaca; se colocó la planta eléctrica, la fuente eléctrica de corriente continua, los dos (02) multímetros (uno en función de voltímetro y el otro en función de amperímetro). Se conectó la fuente eléctrica a la planta eléctrica; luego se procedió a conectar los electrodos M y N, electrodos de potencial, a la fuente de corriente continua y de ahí en paralelo al voltímetro; los electrodos A y B, llamados electrodos de corriente, a los carretes, los

que también fueron conectados a la fuente de intensidad variable y luego en serie el amperímetro (Figura 4.2).



**Figura 4. 2. Circuito de Emisión.**

Luego de colocarse la geometría de adquisición en superficie, se realizó la prueba de fuga; para lo que se desconectó el cable de uno de los electrodos de corriente, manteniendo su extremo aislado del suelo; se activó la inducción de corriente y se observaron, tanto el amperímetro como el voltímetro y las lecturas deben ser nulas, de lo contrario existe una fuga en el circuito. Después de comprobado un extremo se hizo lo mismo con el otro.

Terminada la prueba de fuga, se anuló el potencial espontáneo presente en los electrodos de potencial con la perilla que se encuentra en la fuente de corriente. Posteriormente, se introdujo corriente continua al subsuelo, a través de los electrodos A y B. El potencial generado en el subsuelo es recibido por el par de electrodos M y N. La cantidad de energía introducida en subsuelo y la diferencia de potencial fueron registradas por el amperímetro y el voltímetro respectivamente, datos que fueron anotados en la libreta de campo.

Seguidamente se desplazaron los electrodos A y B, a la segunda posición, prosiguiendo así en todas las posiciones hasta la distancia AB o AB/2 que se quería para los diferentes SEV's.

A medida que se avanzó en la adquisición, los valores de  $\Delta V$  disminuyeron rápidamente de posición a posición; por lo que cuando el operador indicó que la diferencia de potencial  $\Delta V$  sería muy pequeña, se realizó un empalme; esto no es más que el paso a un valor mayor de la distancia MN, se efectúa la lectura con el primer MN y después, sin mover los electrodos A y B se realiza la segunda, con la nueva apertura de MN; la cual se mantendrá para el resto de las medidas, hasta que sea necesario realizar un nuevo empalme.

El operador fue verificando la calidad de los resultados que se iban obteniendo, calculando y dibujando la curva de resistividades aparentes. Por otro lado, las comprobaciones de fugas se realizaron periódicamente, para garantizar la calidad de las medidas.

Hubo oportunidades donde fue necesario disminuir la resistencia al contacto regando el lugar donde estaban clavados los electrodos A y B con agua salada y clavar los electrodos más profundamente, para disminuir la resistencia de contacto. La resistencia al contacto es el factor que limita en la práctica el valor de la intensidad  $I$ .

Es necesario mencionar, que a lo largo de estas campañas de adquisición se cuidaron todas las medidas de seguridad necesarias; como el uso de guantes de goma al manipular los electrodos de corriente luego de estar conectados; así como también se comunicó por radio cada vez que se iba a realizar una medición, para que las personas encargadas de mover los electrodos se separaran.



### 4.3 Cálculo de resistividades aparente y específica y espesores de capas del subsuelo.

Se elaboró una tabla con los siguientes datos: distancia media entre los electrodos A- B, distancia entre electros M – N, diferencia de potencial, intensidad de corriente, resistividad.

Se realizó un reporte del observador en el programa computacional Excel con la tabla de datos y se generó la curva de resistividades aparentes del subsuelo correspondiente a cada sondeo eléctrico vertical (Figura 4.3).

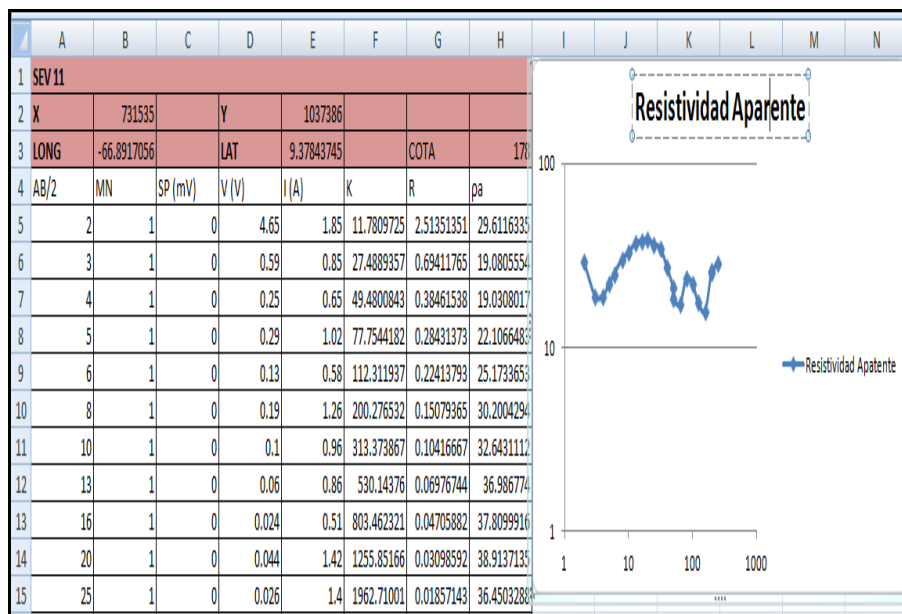


Figura 4. 3. Reporte del observador.

Al procesar los datos en el programa de procesamiento IPI2WIN, se corrigieron los saltos en la grafica producidos por los empalmes realizados en el trabajo de campo (Figura 4.4); con el fin de obtener curvas continuas. Esta corrección consistió en desplazar verticalmente los trozos correspondientes a diferentes MN hasta que coincidieron con el resto de la curva; mayormente estos desplazamientos se hicieron a los de mayor MN.

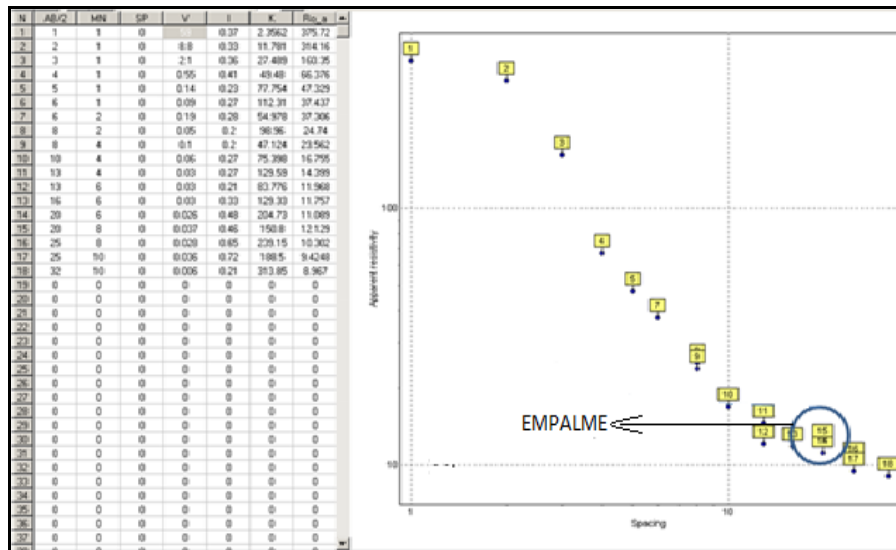


Figura 4.4. Corrección por empalmes.

Luego de realizar las correcciones por empalmes, se procedió a ejecutar la inversión eléctrica, que generó la curva de mejor ajuste, conjuntamente con los espesores, profundidad y resistividades específicas correspondientes a cada capa invertida (Figura 4.5).

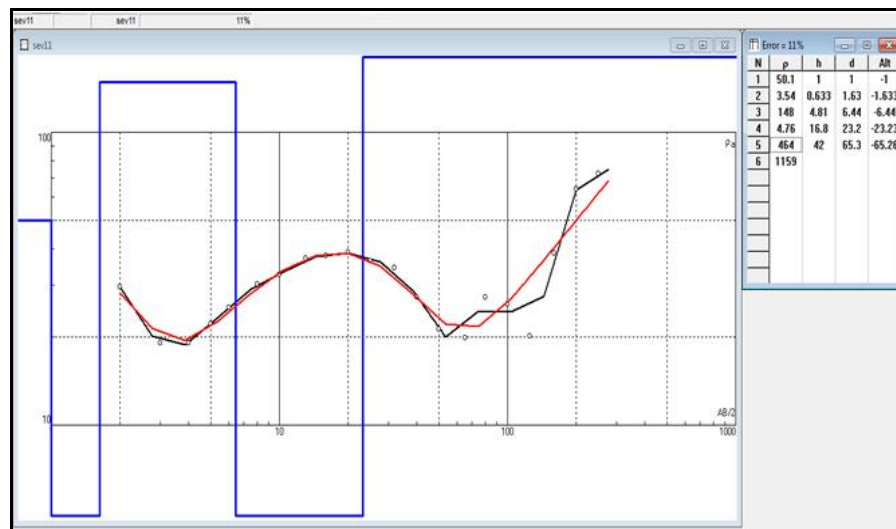


Figura 4.5. Curva y tabla de resistividades después de la inversión.

#### 4.4. Generación de cortes geoelectricos.

Para la elaboración de los cortes geoelectricos, se utilizó el programa *Oasis Montaj* (versión 7), módulo *Gmsys*, en el cual se agregaron los datos de cada SEV;

estos fueron cargados según su posición geográfica de forma ordenada dependiendo del transepto lineal que se quiso visualizar.

Después de cargar los SEVs; se colocó tope y base de las capas invertidas por el programa de procesamiento *IPI2WIN* y se modeló los posibles contornos entre ellos. Para cada sondeo se agregó, la resistividad correspondiente a esa capa.

Cada unidad geoelectrica fue correlacionada lateralmente, en base a un rango de resistividades correspondiente a un litotipo con características texturales parecidas. Para establecer estos rangos, se utilizó, la información geológica de la zona, la tabla 3.1 y los perfiles geotécnicos realizados por la empresa Geohidra (Véase apéndices A1, A2, A3, A4, A5 y A6).

#### **4.5 Elaboración de mapas de iso-resistividades.**

Para la elaboración de los mapas de iso-resistividades, se utilizaron los valores de las resistividad adquiridos en cada sonde eléctrico vertical. En el programa *Surfer* (versión 10), se cargaron los datos de posición geográfica de cada SEV y el valor de resistividad observado a las distancias  $AB/2 = 4, 8, 16, 32$  y  $64$  m; a fin de hacer una evaluación cualitativa de zonas de baja y alta resistividad aparente a diferentes niveles.

Se utilizó el método de interpolación “inverso de la distancia a una potencia” para interpolar los valores de resistividad, y así generar cada mapa de curvas de iso-resistividades. Se decidió utilizar este método de interpolación, porque toma en cuenta, que cuanto más apartados estén dos puntos más diferentes serán sus valores de  $Z$ .

Se realizó el análisis estadístico y diagramas de burbujas de los datos utilizados para la generación de los mapas de iso-resistividades, para garantizar la su confiabilidad.

#### **4.6 Interpretación de cortes geoelectricos y mapas de iso-resistividades.**

Esta etapa de la metodología permitió visualizar variaciones laterales de la resistividad en los cortes geoelectricos. Estas generaron información sobre zonas o cuerpos “más” o “menos” resistivos, donde los valores de resistividad estuvieron asociados a tipos de litología y posible contenido de fluidos.

Por otro lado los mapas de iso-resistividades permitieron identificar el comportamiento de las resistividades en planta, donde estas están asociadas de igual forma a tipos de litologías y posible contenido de fluido.

#### **4.7 Integración de resultados y generación de recomendaciones.**

En esta fase de la metodología se refirió a la evaluación del comportamiento de los resultados obtenidos en los cortes geoelectricos en conjunto con los observados en los mapas de iso-resistividades; se correlacionaron las variaciones laterales y en profundidad de las resistividades del subsuelo, para poder disminuir la incertidumbre en cuanto a la identificación de posibles acuíferos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se realizó las recomendaciones destinadas a la posible perforación de un pozo productor de agua contando con respuestas geoelectricas que lo respaldan.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS Y ANALISIS

### 5.1 Localización de los perfiles

Se realizaron 21 sondeos eléctricos verticales, aplicando el dispositivo Schlumberger, en diferentes zonas del área de estudio. La longitud y distribución areal de los mismos dependió de las respuestas obtenidas y del acceso disponible para realizar los tendidos. La ubicación geográfica de los tendidos eléctricos se muestra en la figura 5.1 y en la tabla 5.1

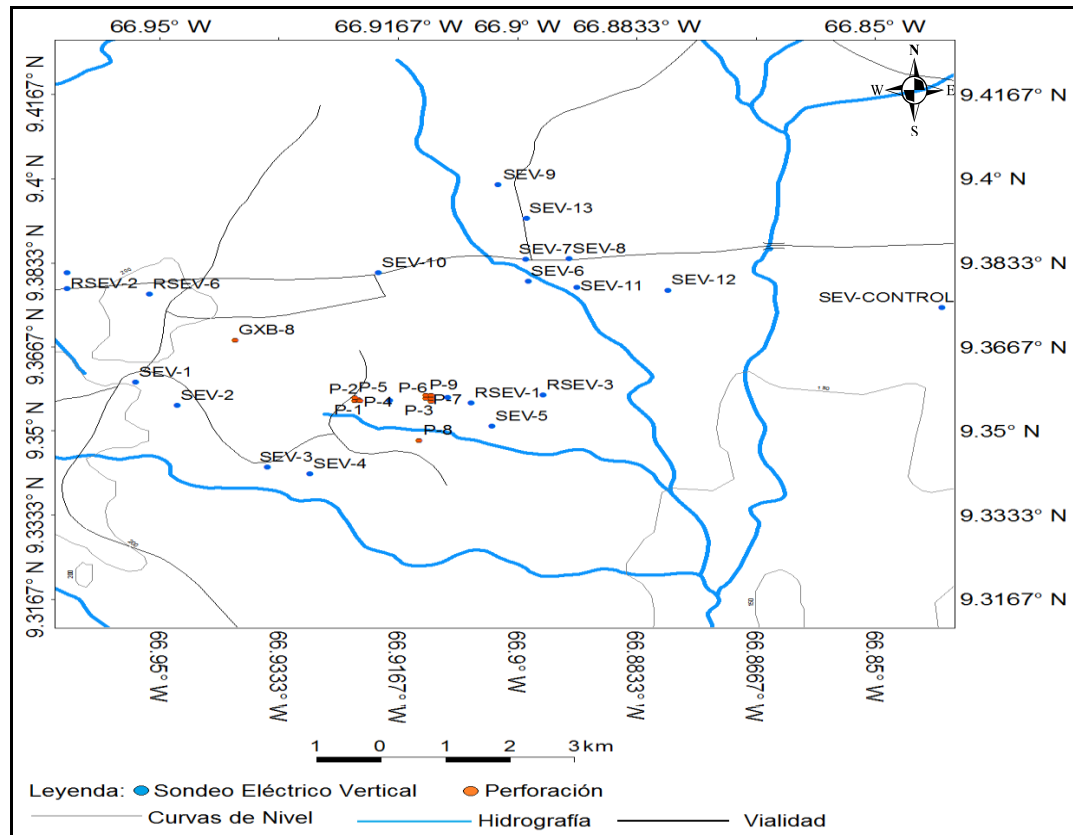


Figura 5. 1. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales (sistema de referencia WGS 84).

**Tabla 5. 1: Localización geográfica de los sondeos eléctricos verticales (sistema de referencia WGS 84).**

SEV	LONGITUD	LATITUD
1	-66.9533453	9.35959961
2	-66.9475383	9.354965
3	-66.9349774	9.34277039
4	-66.9290425	9.34140706
5	-66.9035943	9.35083928
6	-66.8985426	9.3796984
7	-66.8989119	9.38405644
8	-66.8927186	9.38409787
9	-66.9026008	9.3987387
10	-66.919458	9.381396
11	-66.8917056	9.37843745
12	-66.8804863	9.3779004
13	-66.898823	9.39206555
CONTROL	-66.8407789	9.37448776
RSEV 1	-66.9064966	9.35556582
RSEV 2	-66.9629662	9.37821853
RSEV 3	-66.8964583	9.35700312
RSEV 4	-66.9097577	9.35661551
RSEV 5	-66.9179326	9.35592202
RSEV 6	-66.9514307	9.37712293
RSEV 7	66.9629348	9.38125272

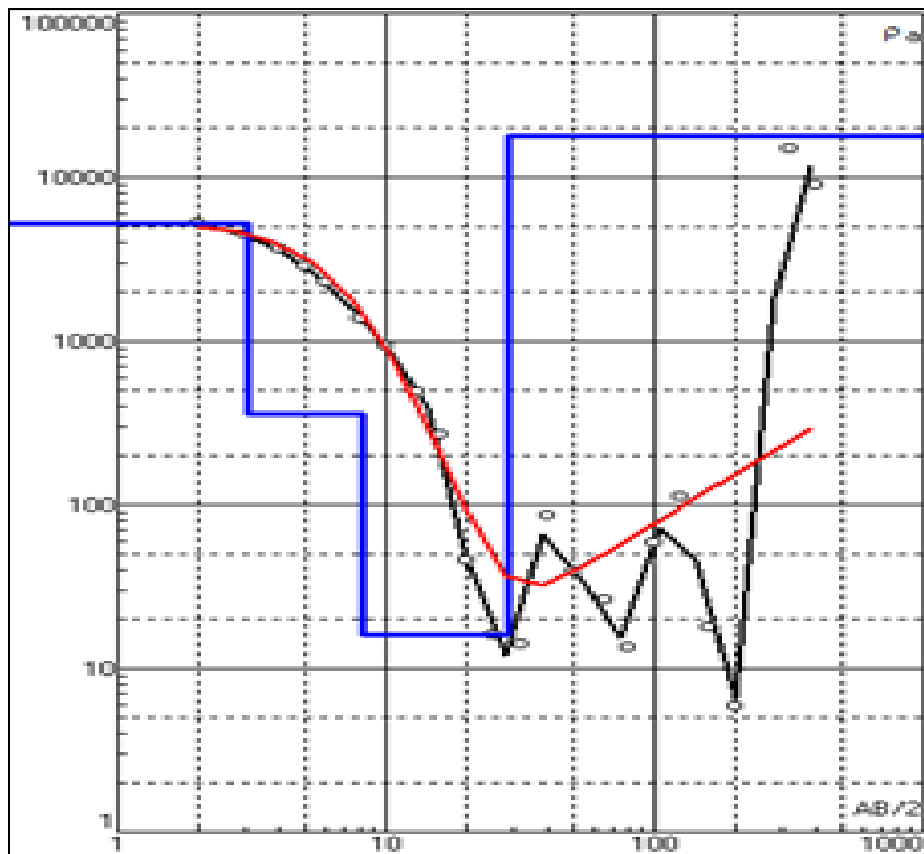
La obtención de los resultados de los SEVs se realizó utilizando el programa computacional *IPI2WIN*. Para los SEVs 1-5, 7, 8, 10, R1-R4, R6, CONTROL, el programa interpreto 4 capas. Para los SEVs 9, 12, 1, R5, R7, 5 capas; para el SEV 6, 3 capas y para el SEV 11, 6 capas. Para cada sondeo eléctrico vertical, las

interpretaciones se muestran en las tablas 5.2 y 5.3 y en las figuras 5.2 (véase apéndices B1 al B20).

## 5.2 Interpretación de curvas de SEVs.

**Tabla 5. 2: Resultados generados por el programa IPI2WIN para el SEV 1.**

Capa N°	$\rho$ (ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)
1	5230	3.06	3.06
2	358	5.12	8.18
3	16	20.4	28.6
4	17758		



**Figura 5. 2. Gráfico del SEV 1 de resistividad ( $\Omega$ .m), AB/2 (m). Líneas: negro= curva de campo; rojo= curva teórica; azul= curva de resistividad verdadera.**

**Tabla 5. 3: Resultados generados por el programa IPI2WIN para los sondeos eléctricos verticales SEV2 al SEVCONTROL.**

SEV 2				SEV 7				SEV 12				SEV R4			
Capa N°	$\rho$ (ohm.m)	Espesor (m)	Prof. (m)	Capa N°	$\rho$ (ohm.m)	Espesor (m)	Prof. (m)	Capa N°	$\rho$ (ohm.m)	Espesor (m)	Prof. (m)	Capa N°	$\rho$ (ohm.m)	Espesor (m)	Prof. (m)
1	6604	0.229	0.229	1	4.37	0.559	0.559	1	9.39	1	1	1	837	1.8	1.8
2	223	0.7	0.886	2	559	1.73	2.29	2	1.94	4.97	5.97	2	12.9	2.62	4.42
3	3	17.4	18.3	3	1912	13.7	16	3	3.35	41.9	47.9	3	2252	3.2	7.62
4	140			4	2.60E+07			4	70.7	151	198	4	1.77		
								5	128						
SEV 3				SEV 8				SEV 13				SEV R5			
1	444	4.13	4.13	1	852	2.66	2.66	1	485	3.47	3.47	1	773	1	1
2	277	1.42	1.42	2	93.5	4.6	7.25	2	94.8	10.3	13.8	2	20.1	0.187	1.19
3	26	20	20	3	3162	17.6	24.9	3	6.01	63.8	77.5	3	3818	0.592	1.78
4	34887			4	2.80E+07			4	442	84.4	162	4	259	16.8	18.6
								5	150000			5	0.502		
SEV 4				SEV 9				SEV R1				SEV R6			
1	214	0.132	0.132	1	1.38	0.448	0.448	1	922	0.95	0.95	1	349	1	1
2	2033	0.373	0.505	2	11.1	1.03	1.47	2	19.6	3.57	4.52	2	1315	1.55	2.55
3	4.6	35.6	36.2	3	4.25	1.77	3.25	3	1681	6.07	10.6	3	145	16.8	19.4
4	76516			4	425	52.2	55.5	4	2061			4	74.8		
				5	24522										
SEV 5				SEV 10				SEV R2				SEV R7			
1	1067	0.84	0.84	1	6.34	0.863	0.863	1	26.18	5.433	5.433	1	19.4	1	1
2	2.6	5.92	6.76	2	2.09	3.38	4.25	2	30.51	10.19	15.63	2	17	2.59	3.59
3	67.6	25.6	32.3	3	570	48.3	52.6	3	4.912	17.1	32.72	3	2.63	1.52	5.12
4	8779			4	17784			4	50.16			4	10.4	25.5	30.6
												5	2083		
SEV 6				SEV 11				SEV R3				SEVCON			
1	1113	0.473	0.473	1	50.1	1	1	1	217	1.67	1.67	1	3.64	5.63	5.63
2	8.29	1.64	2.12	2	3.54	0.633	1.63	2	5.93	1.57	3.24	2	49.9	7.42	13.1
3	28413			3	148	4.81	6.44	3	1355	7.25	10.5	3	1.22	9.34	22.4
				4	4.76	16.8	23.2	4	2.68			4	31.8		
				5	464	42	65.3								
				6	1159										



### 5.3 Interpretación cualitativa de las curvas de resistividades.

La interpretación consiste en la identificación del tipo de curvas asociadas a el tipo de capas pertenecientes a cada uno de los sondeos eléctricos verticales, dentro de la clasificación K, H, Q o A; y las longitudes máximas de AB/2 para visualizar la máxima penetración de los mismos.

**Tabla 5. 4: Interpretación cualitativa de las curvas de resistividades utilizando la clasificación tipo K, H, Q y A**

SEV	AB/2	Tipo de Curva
1	400	QH
2	500	QH
3	400	QH
4	500	KH
5	500	HA
6	80	H
7	500	AA
8	320	HA
9	320	KHA
10	160	HA
11	320	HKHA
12	500	HAA
13	320	QHA
R1	20	HA
R2	32	KA
R3	80	HK
R4	80	HK
R5	50	HKQ
R6	80	KQ
R7	50	QHA
CONTROL	320	KH

#### 5.4 Interpretación de mapas de isorresistividad.

Estos mapas muestran la variación de resistividades con el aumento de la profundidad ( $AB/2$ ). Se generaron mapas de isoresistividades, para las distancias  $AB/2$  igual a 4 m, 8 m, 16 m, 32 m y 64 m (figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7). A fin de realizar una mejor interpretación los mapas, primero se observó el comportamiento del conjunto de datos utilizado para generarlos, análisis que se puede observar en los histogramas de frecuencia y diagramas de burbujas (veáse apéndices C1 a C5 y D1 a D5).

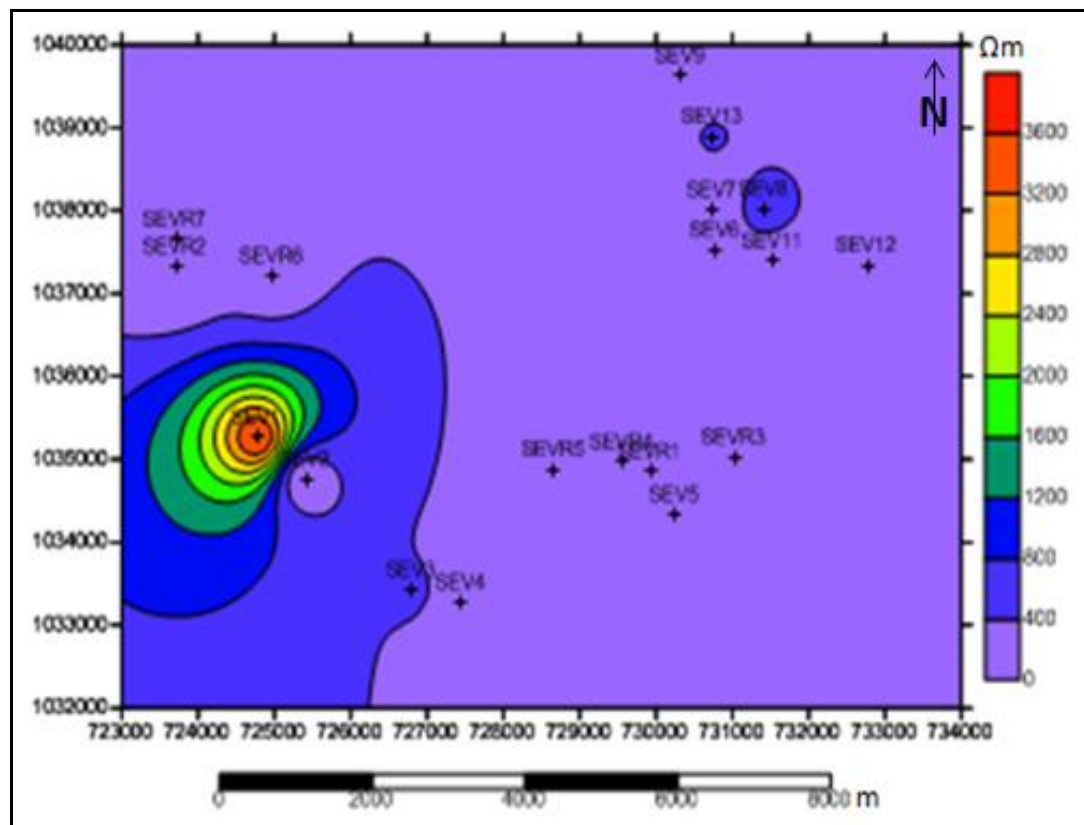


Figura 5. 3. Mapa de isorresistividades  $AB/2=4$  metros.

El mapa de isorresistividades  $AB/2$  igual a 4 metros (Figura 5.3), muestra que las resistividades varían entre 0 y 400  $\Omega.m$  en casi su totalidad; excepto por la zona oeste donde se observan resistividades más altas, posiblemente asociadas a un relleno con material de préstamo para acondicionar una carretera

Mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 8 metros:

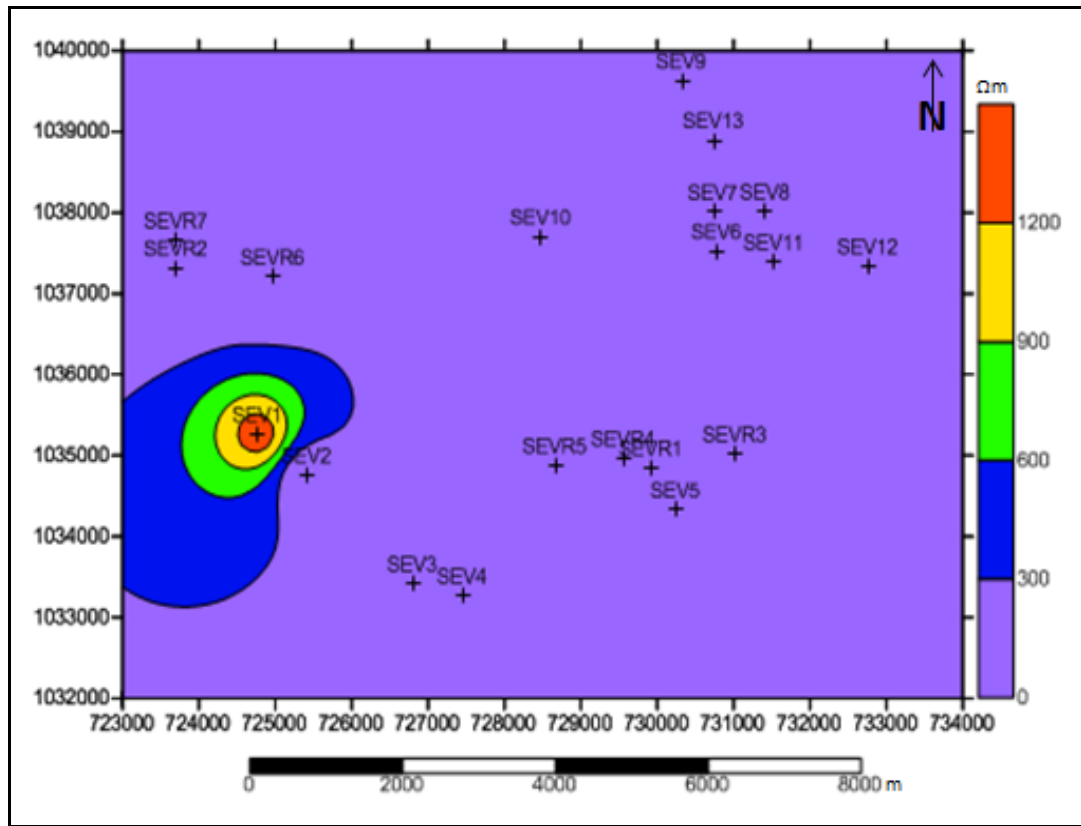


Figura 5. 4. Mapa de iso-resistividades AB/2= 8 metros.

El mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 8 metros (Figura 5.4), muestra un comportamiento similar al mapa de iso-resistividades AB/2=4 m (Figura 5.3), se encuentra dominado por resistividades entre 0 y 300 Ω.m, lo que podría indicar alto contenido de arcilla a este nivel; la zona oeste; por el contrario refleja resistividades más altas; respuesta que puede estar relacionada, al igual que en el mapa anterior, a un relleno con material de préstamo para acondicionar una carretera.

Mapa de isoresistividades AB/2 igual a 16 metros:

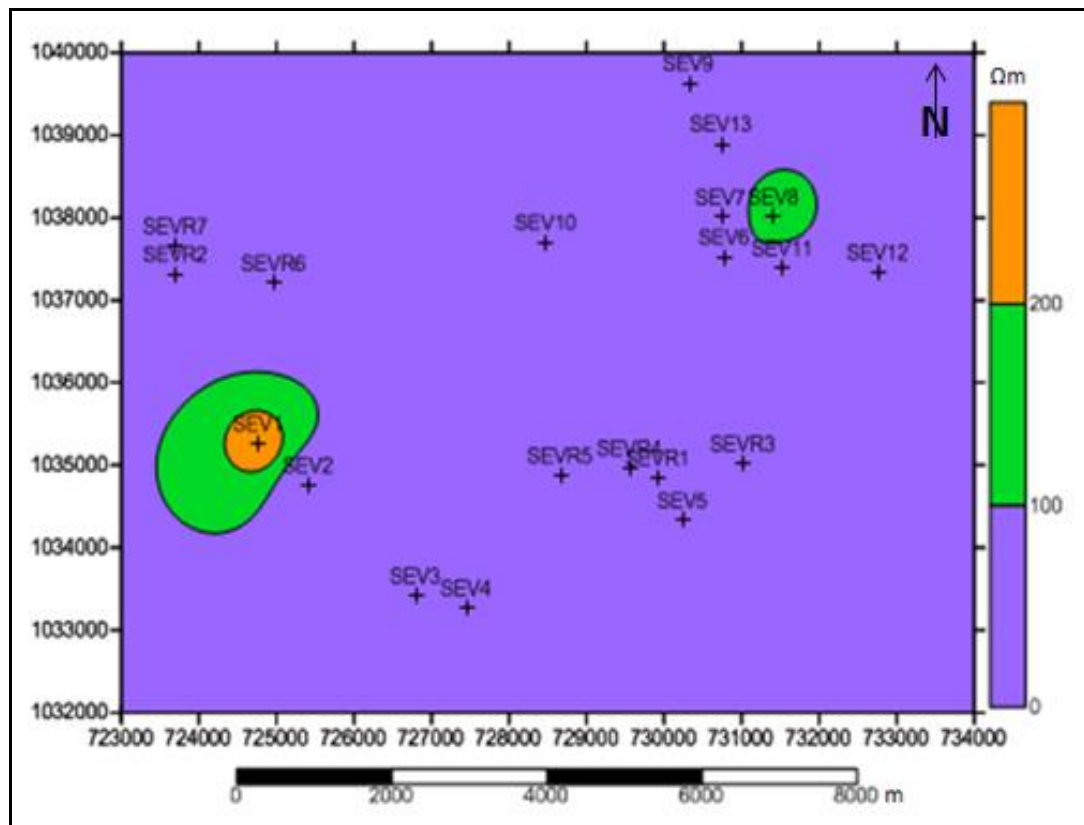


Figura 5. 5. Mapa de isoresistividades AB/2= 16 metros.

El mapa de isoresistividades AB/2 igual a 16 metros (figura 5.5), muestra que las resistividades también oscilan entre valores de 0 y 100  $\Omega m$ , probablemente indicando, al igual que en la figura 5.4 un alto contenido de arcilla a este nivel en casi toda el área de estudio. Hacia el oeste se mantiene el alto de resistividades, anteriormente asociado material de relleno.

Mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 32 metros:

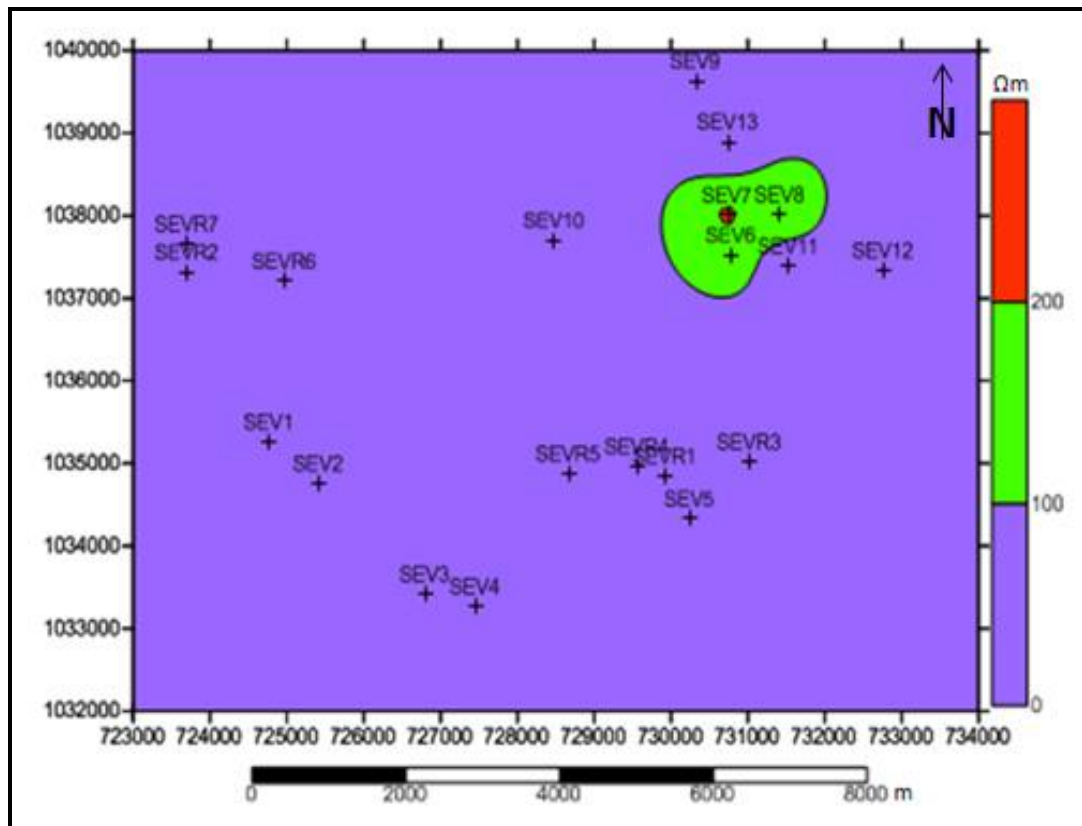


Figura 5. 6. Mapa de iso-resistividades AB/2= 32 metros.

En el mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 32 metros (Figura 5.6), este nivel se visualiza que el alto de resistividad que se observó al oeste en los mapas AB/2 igual a 4 m, 8 m, y 16 m desaparece; indicando posiblemente que ya a este nivel no se tiene el efecto producido por el material de relleno. Al noreste, se aprecia un alto en las resistividades posiblemente asociado a las arenas que conforman a la Formación Quebradón.

Mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 64 metros:

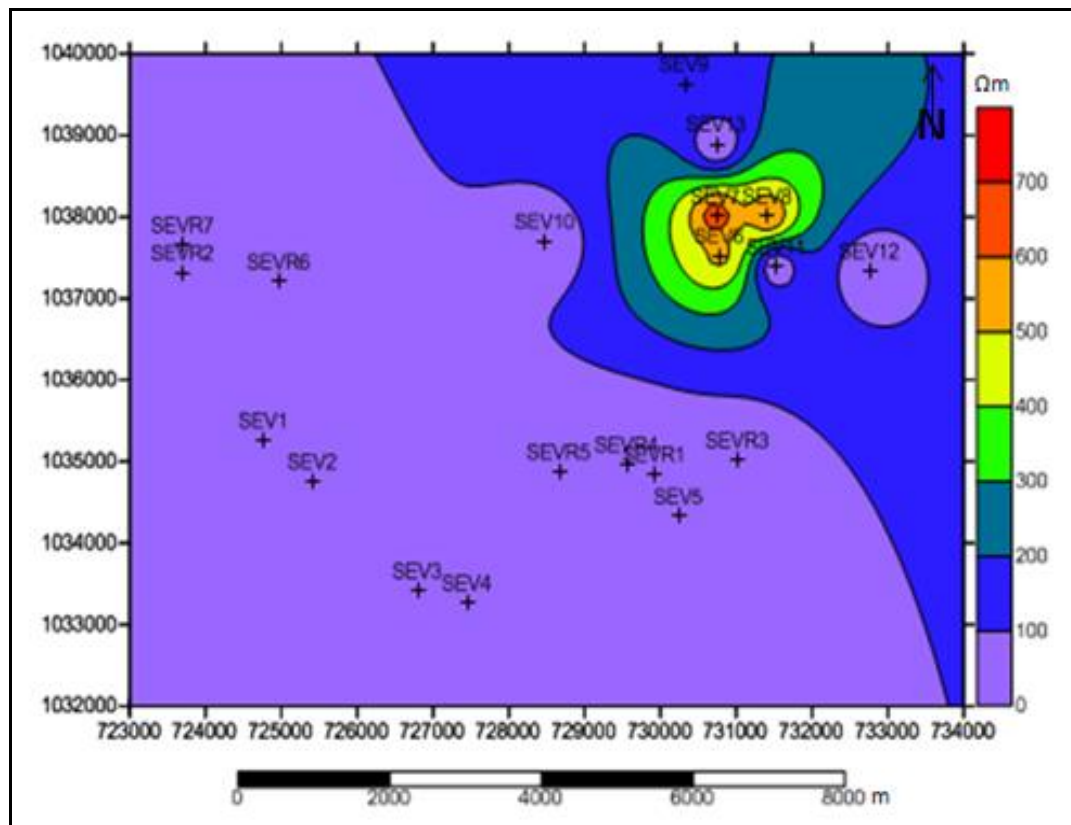


Figura 5. 7. Mapa de iso-resistividades AB/2= 64 metros.

En el mapa de iso-resistividades AB/2 igual a 64 metros (Figura 5.7), se observa al noreste, resistividades que oscilan entre 200 y 700  $\Omega.m$ , lo que podría estar asociado las arenas y gravas que conforman a la Formación Quebradón.

### 5.5 Interpretación de los cortes geoelectricos.

Con los resultados del procesamiento de las curvas de resistividades, se generaron cuatro cortes geoelectricos. La dirección preferencial de estos, se tomo de acuerdo a la alineación de los sondeos eléctricos verticales

En la figura 5.8 se muestra la dirección de los cortes geoelectricos elaborados, geología, vialidad, hidrogeología y topografía del área de estudio

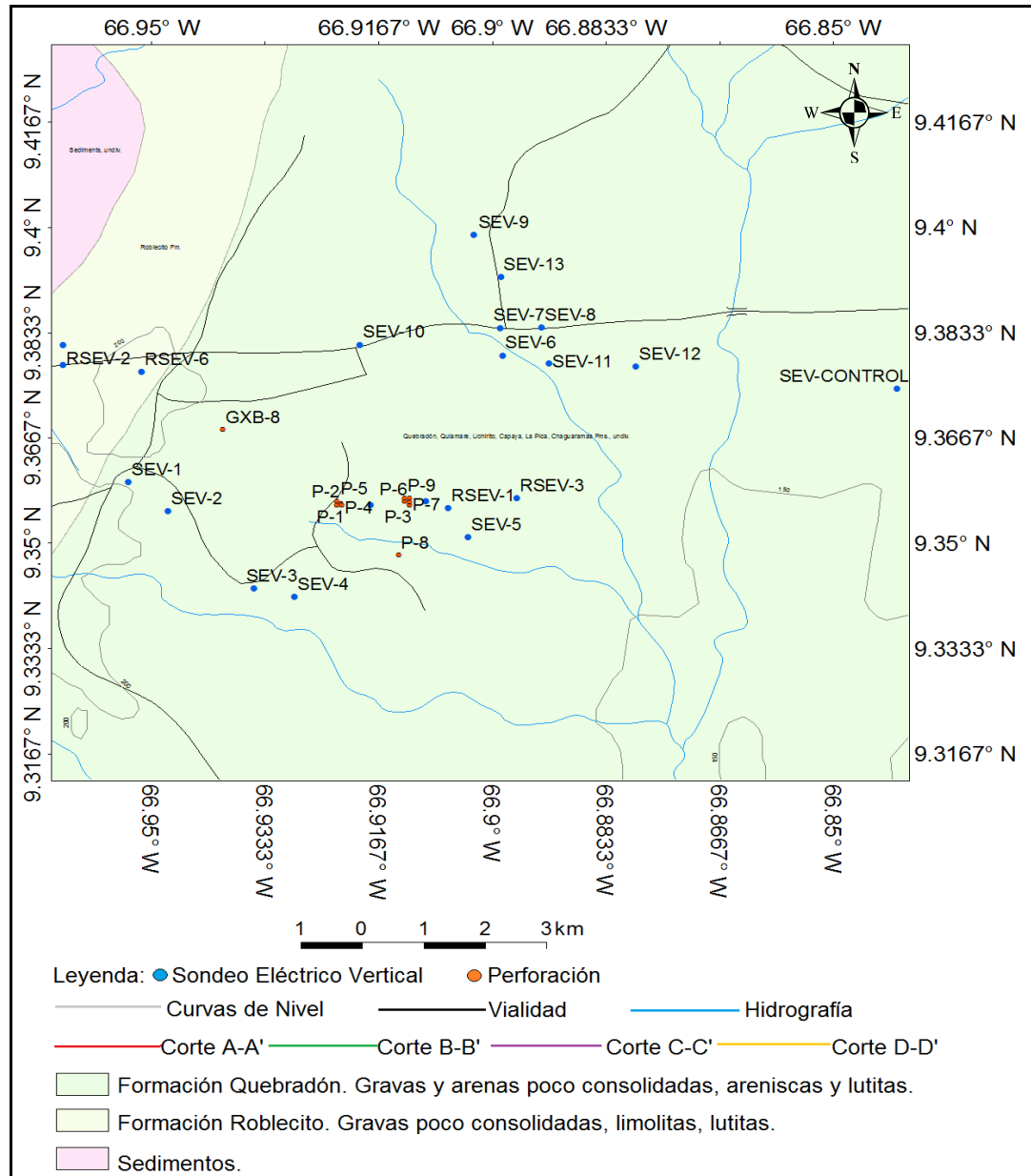


Figura 5. 8. Mapa geológico con la ubicación de los cortes geoelectricos (sistema de referencia WGS 84).

El corte geoelectrico A-A', contiene la interpretaci3n de los sondeos el3ctricos verticales 1, 2 ,3 y 4 y una longitud de 3.5 Km direcci3n NO-SE (figura 5.9).

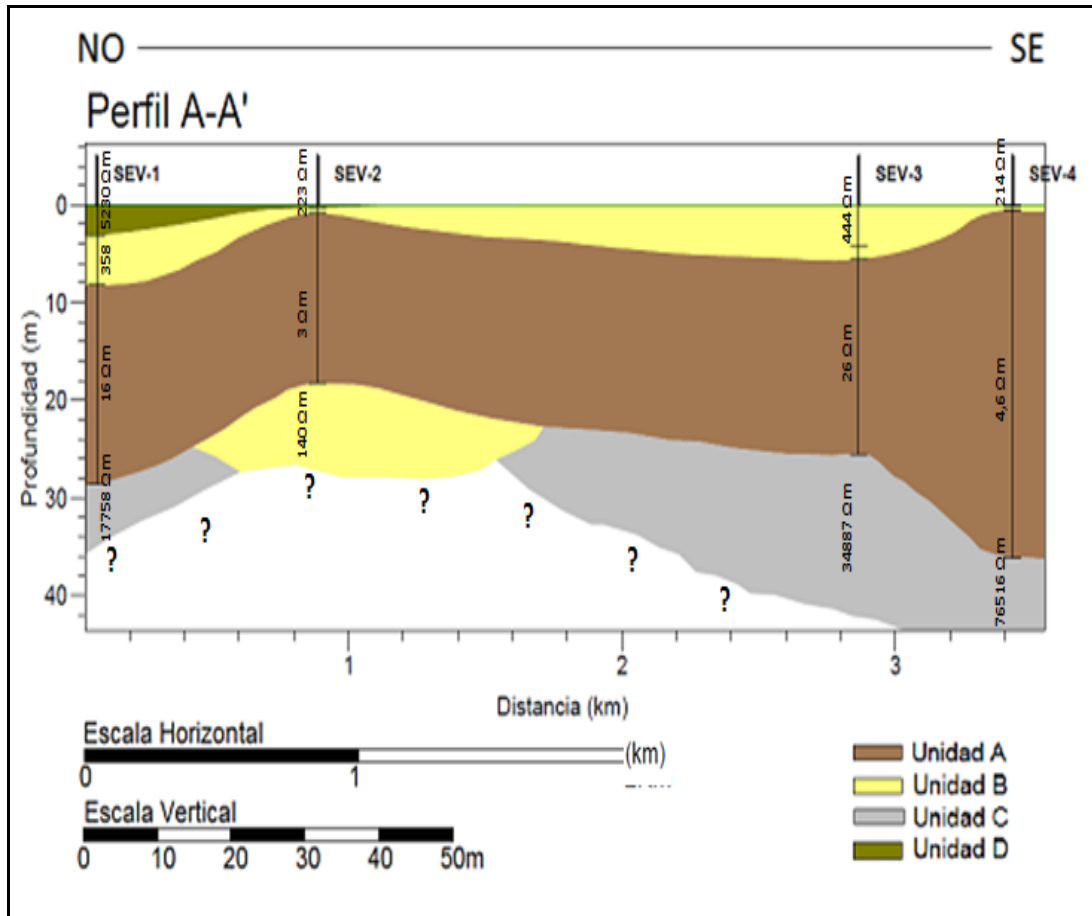


Figura 5. 9. Corte geoelectrico A-A' de direcci3n NO-SE.

Para este corte geoelectrico, se interpretaron 3 unidades diferentes. En la superficie, hacia la parte m3s NO, se tiene una capa de aproximadamente unos 4 metros de espesor y con una resistividad de 5230 Ω.m, respuesta que puede estar relacionada a un relleno con material de pr3stamo para acondicionar una carretera. Por debajo de esta capa se observa una de espesor variable a lo largo del perfil con resistividades que van de los 214 Ω.m a 444 Ω.m que est3n asociadas a un mismo tipo de unidad geoelectrica. Subyacente se encuentra un estrato de resistividades muy bajas que oscilan entre 3 Ω.m y 26 Ω.m y de espesor de 20 m a 65 m, en direcci3n NO-SE.



El corte geoelectrico B-B', contiene la interpretaci3n de los sondeos el6ctricos verticales 10, 6, 11 y 12 y una longitud de 4.65 km direcci3n O-E (figura 5.10).

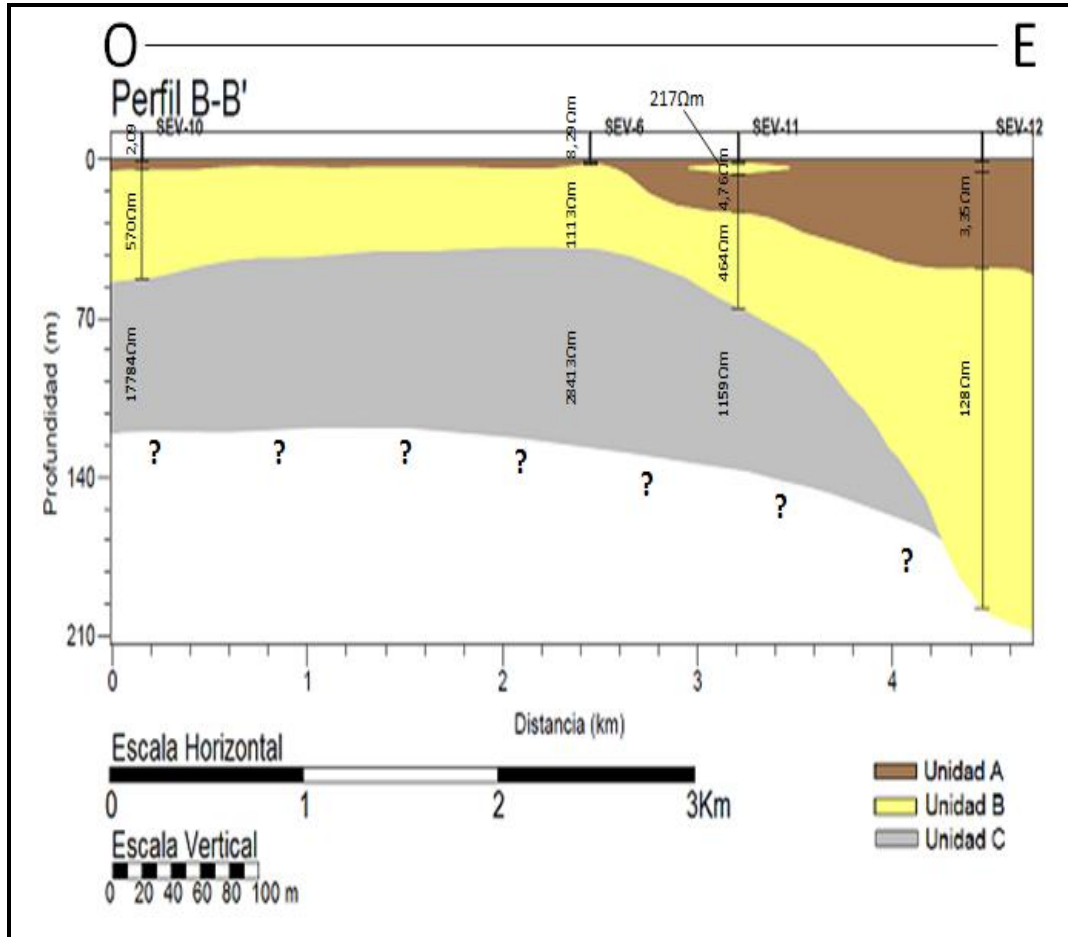


Figura 5. 10. Corte geoelectrico B-B' de direcci3n O-E.

En la figura 5.10, se interpretaron 3 unidades diferentes. En la parte m1s somera del perfil se tiene una capa de resistividades bajas (2,09  $\Omega\cdot m$ - 8,29  $\Omega\cdot m$ ), de peque1o espesor en los primeros 2,5 km direcci3n O-E; luego engros1ndose progresivamente hasta aproximadamente unos 35 m. Subyacente se tiene un estrato de gran espesor y aumentando hacia el este con resistividades entre el orden de 128  $\Omega\cdot m$  y 1113  $\Omega\cdot m$ . Por debajo de esta se tiene una capa de elevadas resistividades probablemente indicando mayor grado de compactaci3n o un aumento considerable en el tama1o de grano respecto a la unidad suprayacente.

El corte geoelectrico C-C', contiene la interpretación de los sondeos eléctricos verticales 2, R5, R1 y R3 (en este orden) y una longitud de 6.5 Km dirección O-E (figura 5.11).

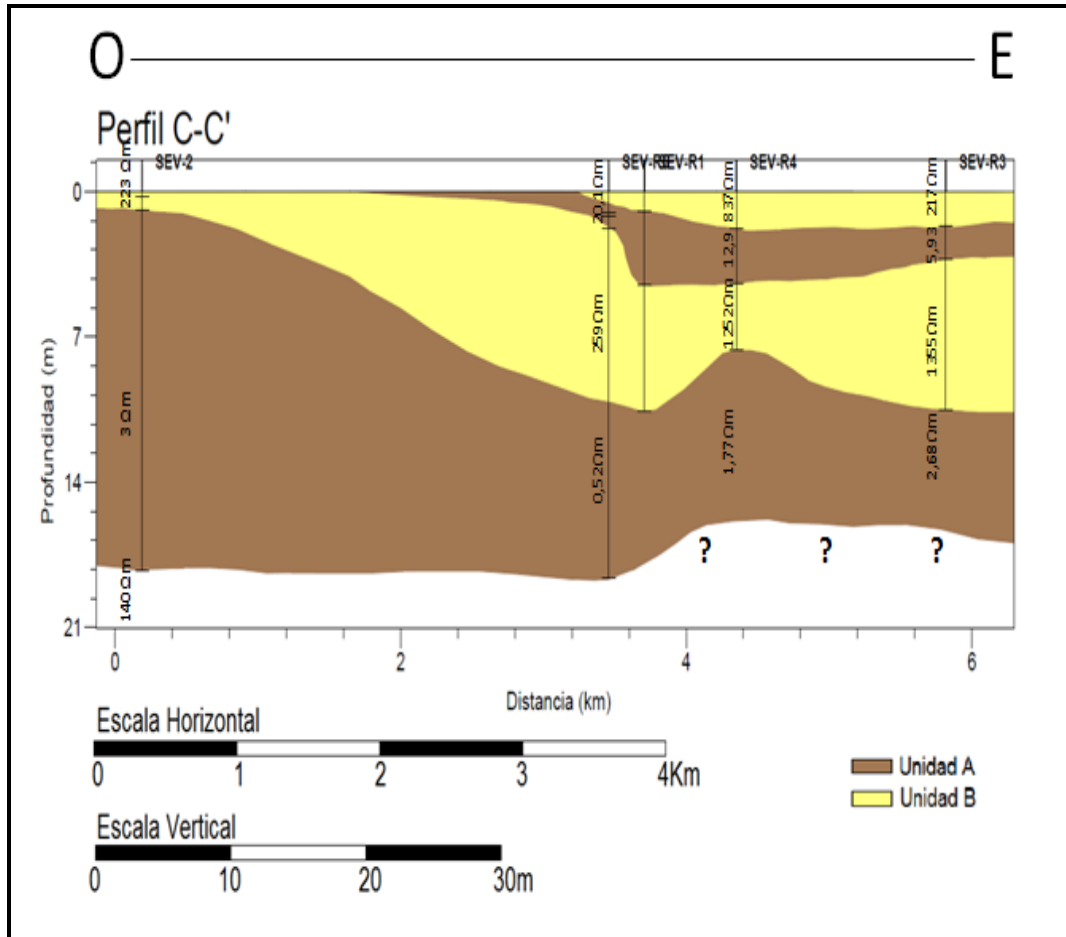


Figura 5. 11. Corte geoelectrico C-C' de dirección O-E.

Este corte geoelectrico (Figura 5.11), fue el de menor penetración vertical; la profundidad máxima del mismo es de aproximadamente unos 17 metros. En general se observan capas delgadas de todas las unidades interpretadas y estas de características similares a las del perfil B-B' (Figura 5.10). Al ser subparalelos se espera tal similitud, sin embargo, la gran diferencia en penetración obliga a dar sentido a la variación lateral.

El corte geoelectrico D-D', contiene la interpretaci3n de los sondeos el3ctricos verticales 9, 13, 7, 6 y R3 y una longitud de 5 Km direcci3n N-S (figura 5.12).

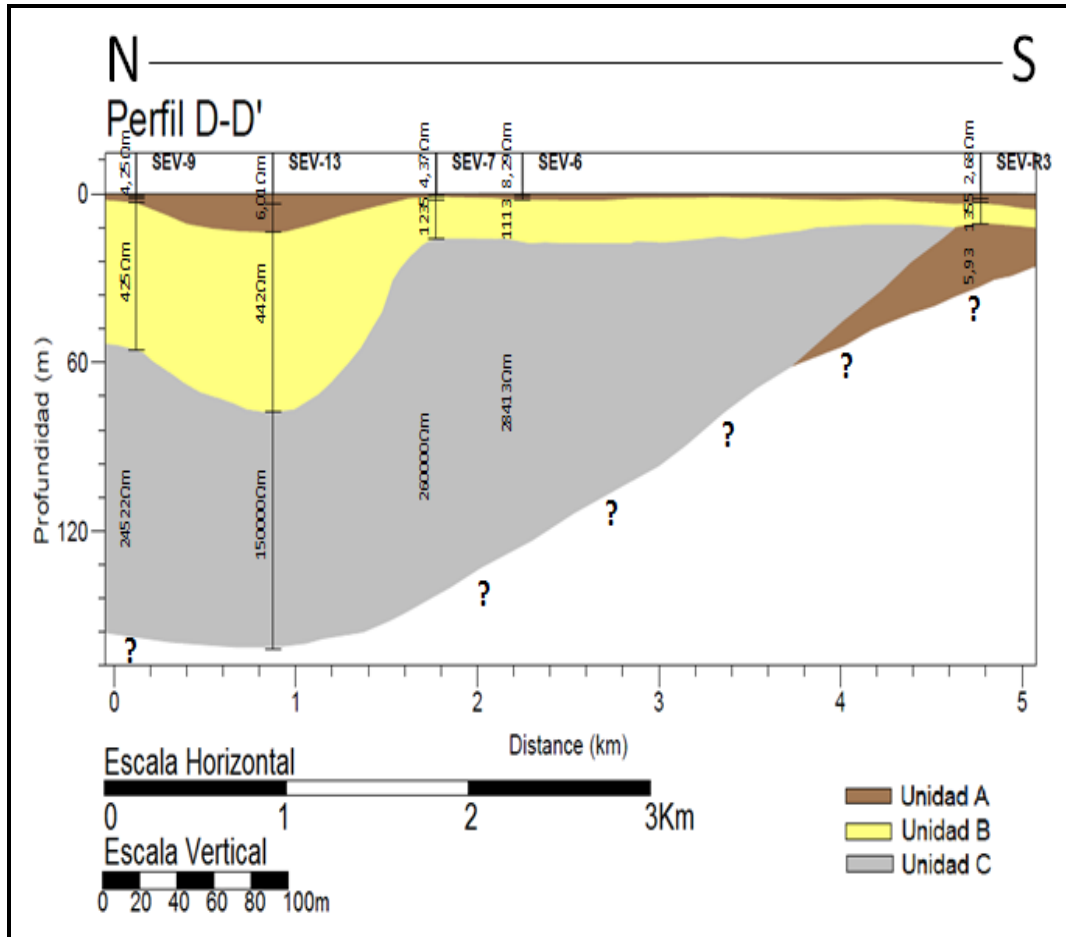


Figura 5. 12. Corte geoelectrico D-D' de direcci3n N-S.

En el perfil D-D (Figura 5.12), se observa un espesor de aproximadamente 75 metros de la unidad B, entre los SEVs 9 y 7; disminuyendo 3sta a unos 5 metros aproximadamente, a medida que se avanza hacia el sur del corte. Subyacente se tiene una capa de espesor desconocido de resistividades altas, probablemente asociadas alas areniscas que conforman a la Formaci3n Quebrad3n.

## 5.6 Integraci3n de resultados.

La informaci3n generada por los mapas de iso-resistividades y cortes geoelectricos, nos da una visi3n general de las zonas con posibles acuíferos.

Las unidades A y B se presentan en todos los cortes geoelectricos la unidad C en tres de estos (Figuras 5.9, 5.10 y 5.12).

Los resultados de cortes geoelectricos, fueron correlacionados con las perforaciones geotecnicas realizadas por la empresa Geohidra (véase apéndices A1, A2, A3, A4, A5 y A6). De esta forma se pudo asociar un rango de resistividades para determinado tipo de litología.

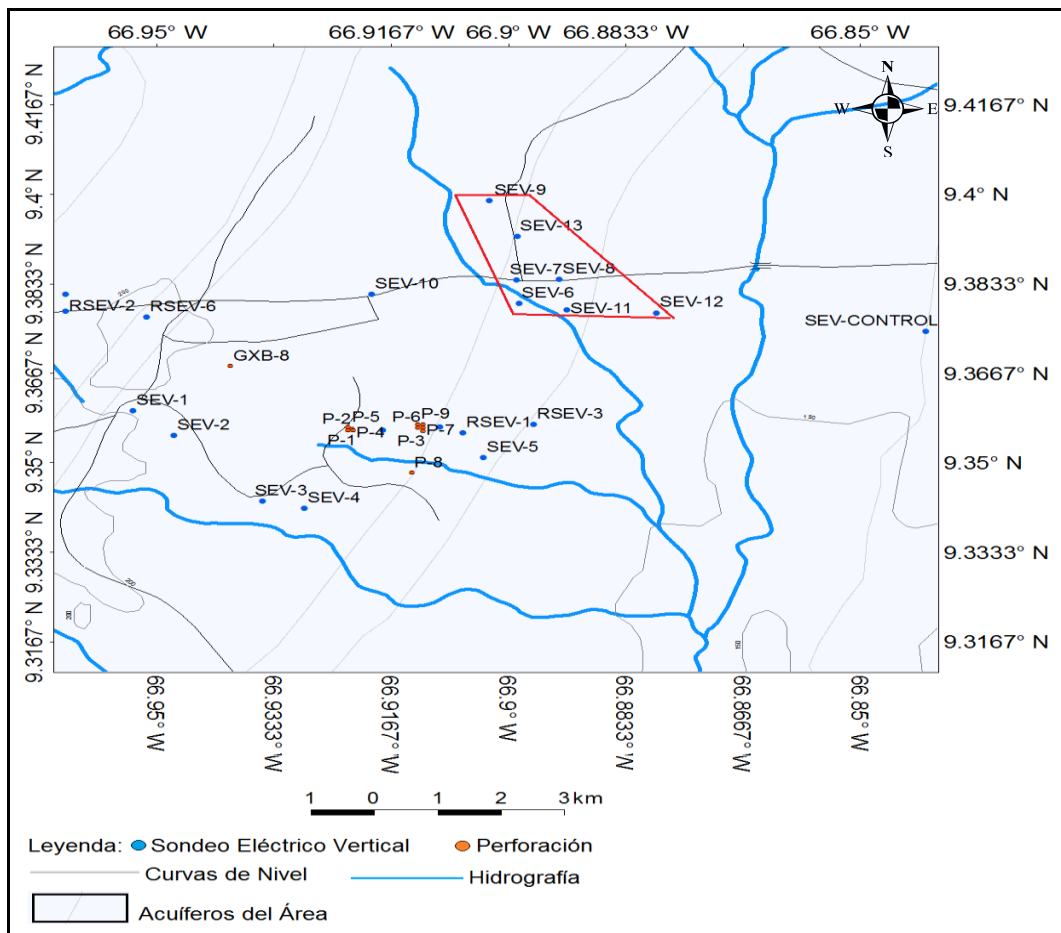
Según la geología de la zona y los perfiles geotecnicos se tiene que, las unidades geoelectricas predominantes, correspondan a los siguientes litotipos:

**Tabla 5. 5: Asociación de litotipos a las diferentes unidades geoelectricas.**

Unidad Geoelectrica	Resistividad ( $\Omega.m$ )	Litotipo
A	1-50	Lutitas marinas. lutitas gris a gris oscuro, medianamente duras, físiles, comúnmente limosas, no-calcáreas, frecuentemente glauconíticas y microfossilíferas.
B	128-1355	Arenas poco consolidadas del miembro basal denominado Miembro Galeras.
C	17000-260000	Areniscas con cemento calcáreo o ferruginoso, micáceas, conteniendo localmente minerales ferromagnesianos, plagioclasa, filita y minerales opacos. Matriz siliceoarenáceo.

Por lo observado en el mapa de isorresistividades de AB/2 igual a 64 (Figura 5.7) y los cortes geoelectricos (Figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12); se ve como en general las resistividades aumentan a medida que se alcanza mayor profundidad, particularmente hacia la zona noreste del área de estudio.

Las posibles arenas del Miembro Galeras; aumentan su espesor hacia el noreste, hacia esta misma área la hidrografía mostrada en el mapa geológico (Figura 5.8), podrían garantizar la recarga de los acuíferos que posiblemente puedan estar ubicados en esta zona. Con esto y lo mencionado en el párrafo anterior, se puede designar el noreste del área de estudio; donde se realizaron los SEVs 6, 7, 8, 9, 11,12, 13 (área demarcada con línea roja en la figura 5.13); como la zona con mayores posibilidades de perforación de pozos para la obtención de agua.



**Figura 5. 13. Mapa hidrográfico del área de estudio (sistema de referencia WGS 84).**

## CONCLUSIONES

De lo expuesto anteriormente, se puede concluir lo que sigue:

- Los mapas de iso-resistividades muestran cómo, a medida que se aumenta la distancia AB/2 las resistividades aumentan hacia la zona noreste de el área estudiada.

- Las resistividades comprendidas entre los  $128\Omega.m$  y  $1355\Omega.m$ , fueron asociadas a las arenas del Miembro Galeras.

- Los cuatro cortes geológicos, generados a partir de las curvas de resistividades permiten definir tres unidades litológicas dominantes en la zona, con espesores que variables.

- Con los cortes geoelectricos se pudo definir, las litologías correspondientes a las unidades geoelectricas. La unidad A, corresponde a lutitas marinas; la unidad B a la arenas poco consolidadas del miembro basal denominado Miembro Galeras y la unidad C, a areniscas de matriz siliceoarenácea.

- Las arenas correspondientes al Miembro Galera, aumentan significativamente de espesor, hacia la parte noreste del área de estudio, estas se consideran potenciales receptoras de aguas subterráneas.

- Se definió la franja de coordenadas:  $-66.908W \ 9.4N$ ;  $-66.900W \ 9.378N$ ;  $-66.898W \ 9.4N$ ;  $-66.878W \ 9.378N$ . como el área potencialmente prospectiva para la perforación de un pozo exploratorio, con fines de producción de agua.

- Se recomienda la perforación de un pozo en la ubicación del SEV13, ya que el espesor de las arenas del Miembro Galeras es de aproximadamente 75 metros y la hidrografía mostrada en el mapa geológico (Figura 5.8), garantizarían la recarga del mismo.

## **RECOMENDACIONES**

Extender el estudio geoelectrico, utilizando el método geofísico Audio Magnetotelúrico, para determinar los rangos de resistividades a mayor profundidad.

Estudiar la zona noroeste, a fin de poder evaluar si existe una correlación, en cuanto a los espesores de las arenas del Miembro Galeras.

Estudios geoelectricos futuros; deben estar acompañados por secciones parciales y toma de muestra de mano, que deben ser analizadas mediante el uso de una lupa binocular.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Beck, Ch., 1986. Geologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas. Thèse doctorat d'Etat, Société Géologique du Nord.
- Benson, R. et al (1994). Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration. Editorial National Ground Water Association. Nevada. USA.
- Castany, G. 1975. Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- Coduto, D.P (1999). Geotechnical Engineering Principles and Practices. New Jersey. Upper Saddle River. Prentice Hall.
- Evanoff, J., 1951. Geología de la región de Altigracia de Orituco, Bol. Geol. (Venezuela), 1(3).
- García, L. 1993. Prospección geoelectrica para la ubicación de áreas promisoras con fines de aprovechamiento de aguas subterráneas en el desarrollo agrícola de la hacienda Las Mercedes, Estado Guárico.
- GEOHIDRA CONSULTORES, C. (2006). Estudio Geotécnico para la Construcción de la Estación de Control Satelital Bamari, Municipio Mellado, Estado Guárico. Venezuela. Caracas.
- Kunetz, G. 1955. Einfluss vertikaler Schichten auf elektrische Sondierungen. Zeitschrift für Geophysik, num. 1.
- Orellana, E. 1982: Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. Paraninfo, S. A., Madrid.



- Palmar, J. (1992). *Automatización de la Prueba de Recuperación de Petróleo por Inyección de Vapor*. Instituto Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales.
- Patterson, J. M. y J. G. Wilson, (1953). Oil fields of Mercedes region, Venezuela. Bull., Amer. Assoc. Petr. Geol.
- Peirson III, A. L., 1963. Galera Member of the Quebradón Formation. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról., Bol. Inform.
- Pimienta, J. (1980). *La Captación de Aguas Subterráneas*. Barcelona: Editores Técnicos y Asociados S.A.
- Price, M. (2003). *Agua Subterránea*. Mexico, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.
- Prospección de Aguas Subterráneas (2005). Guárico: Ministerio de Ciencia y tecnología.
- Rodriguez, S. (1986). *Recursos Minerales de Venezuela*. Caracas: Boletín del Ministerio de Energía y Minas.
- Telergia. (2007). <http://telergia.blogs.com>. Recuperado el 2011
- UNESCO. (1971). Scientific framework of world water balance. *Technical papers in hydrology* .
- Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Universidad Complutense de Madrid, Dpto. Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Recuperado el 16 de octubre de 2011, de [//www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc\\_sub\\_acuifero.html](http://www.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/esc_sub_acuifero.html)
- Villa, J. (2006). *Fundamentos de ingeniería de yacimiento*. PDVSA - Intevep: 11 – 23.

Vivas, V. y V. Campos, 1977. Geología del área de Batatal, Estado Miranda. V Congr. Geol. Ven.

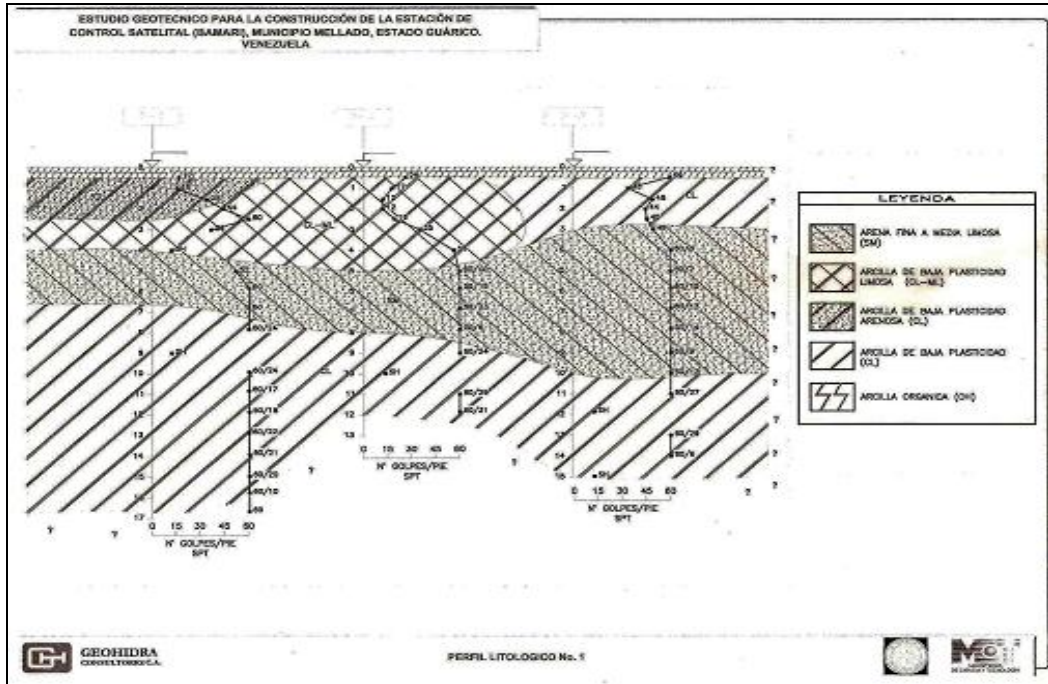
WEC Evaluación de Pozos. 1997. Schlumberger

Weight, W. D. (2008). *Hydrogeology field manual*. United States of America: The MacGraw-Hill Companies, Inc.

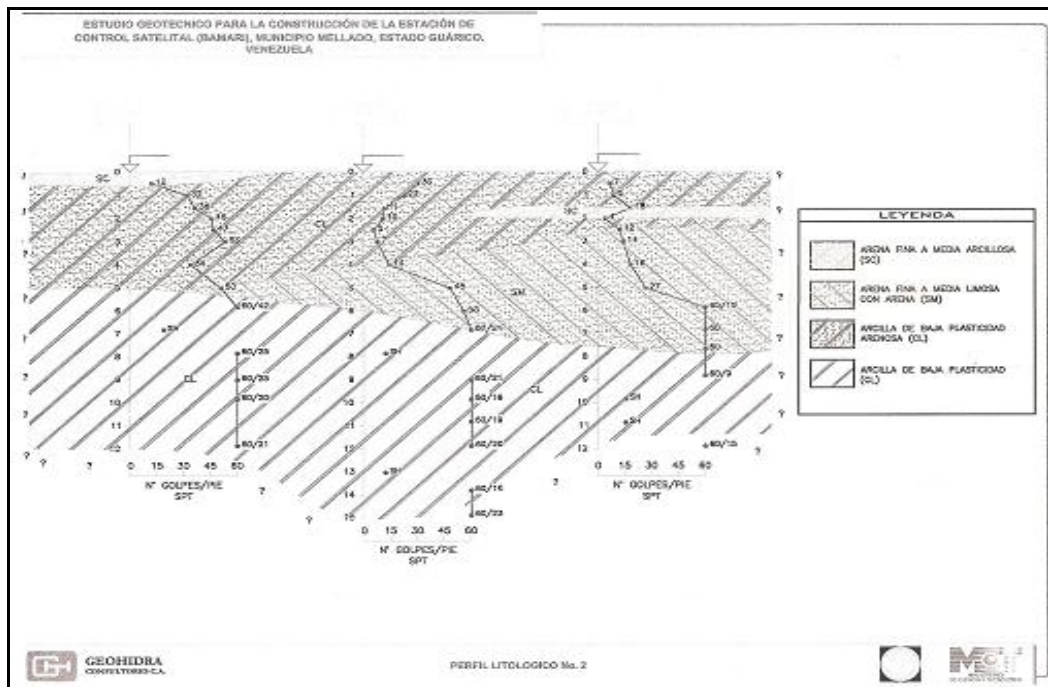
# APENDICES

## A. Perfiles Geotécnicos.

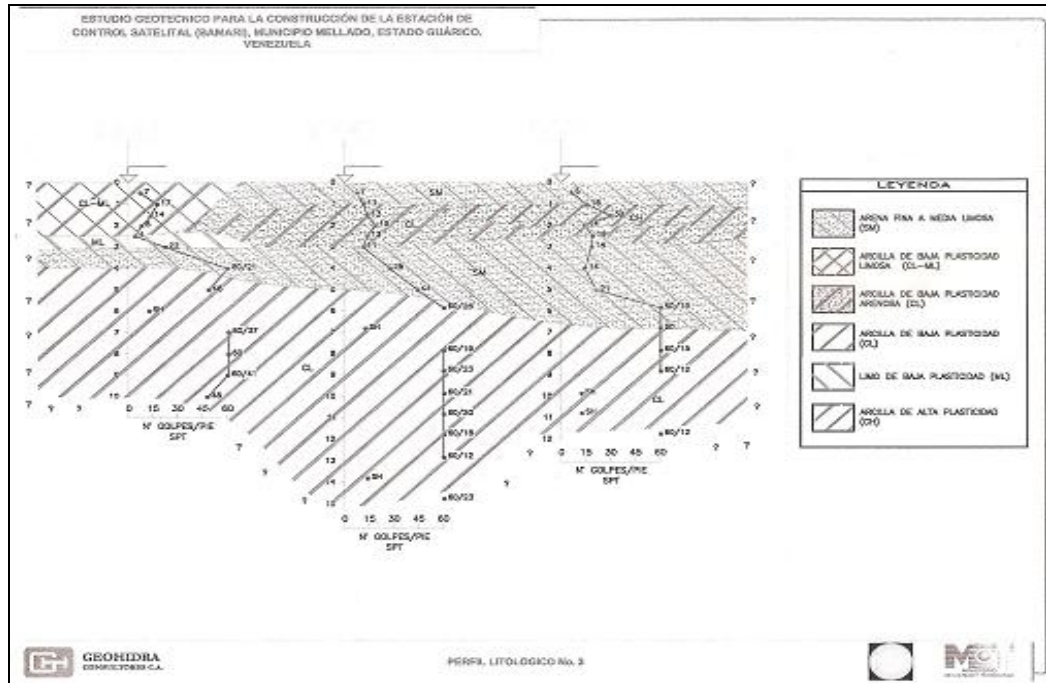
### Apéndice A1. Perfil Litológico 1



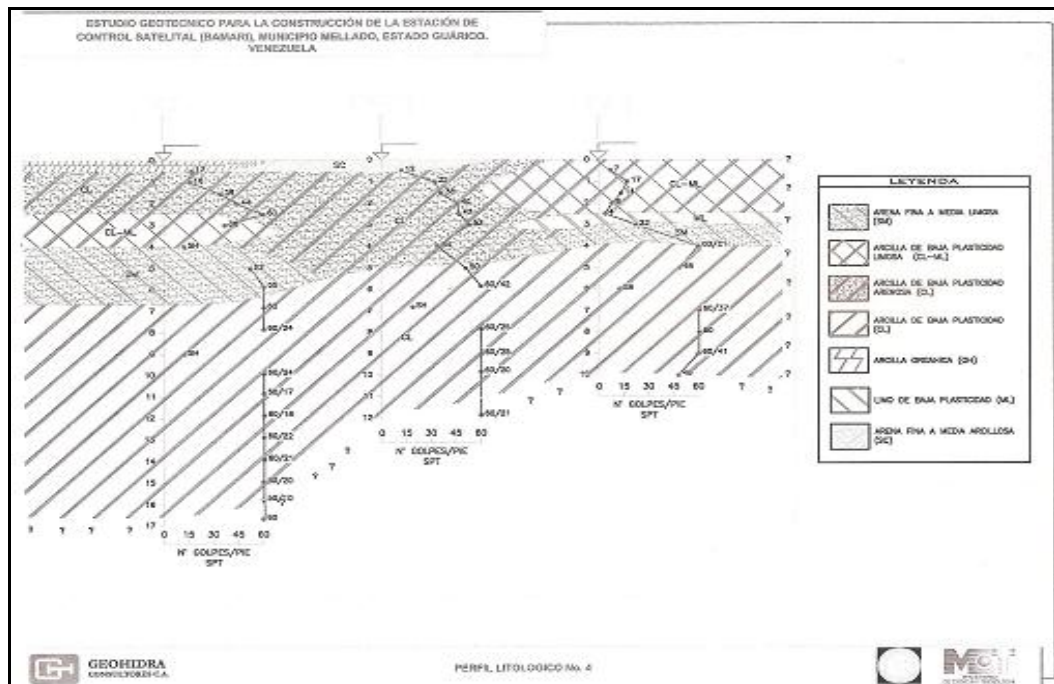
### Apéndice A2. Perfil Litológico 2



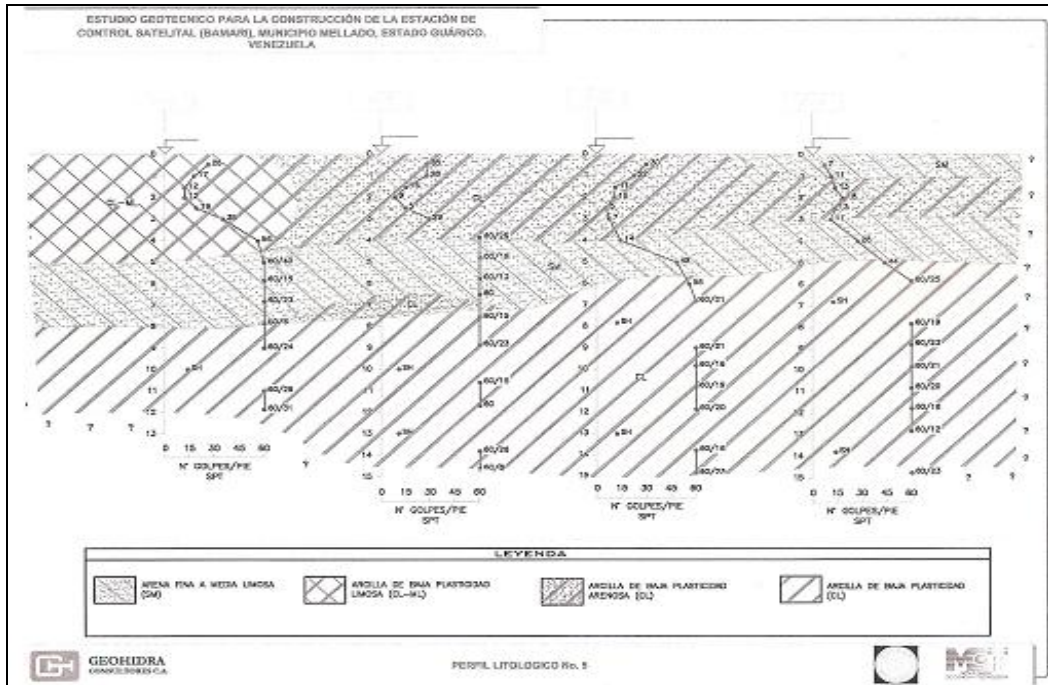
### Apéndice A3. Perfil Litológico 3



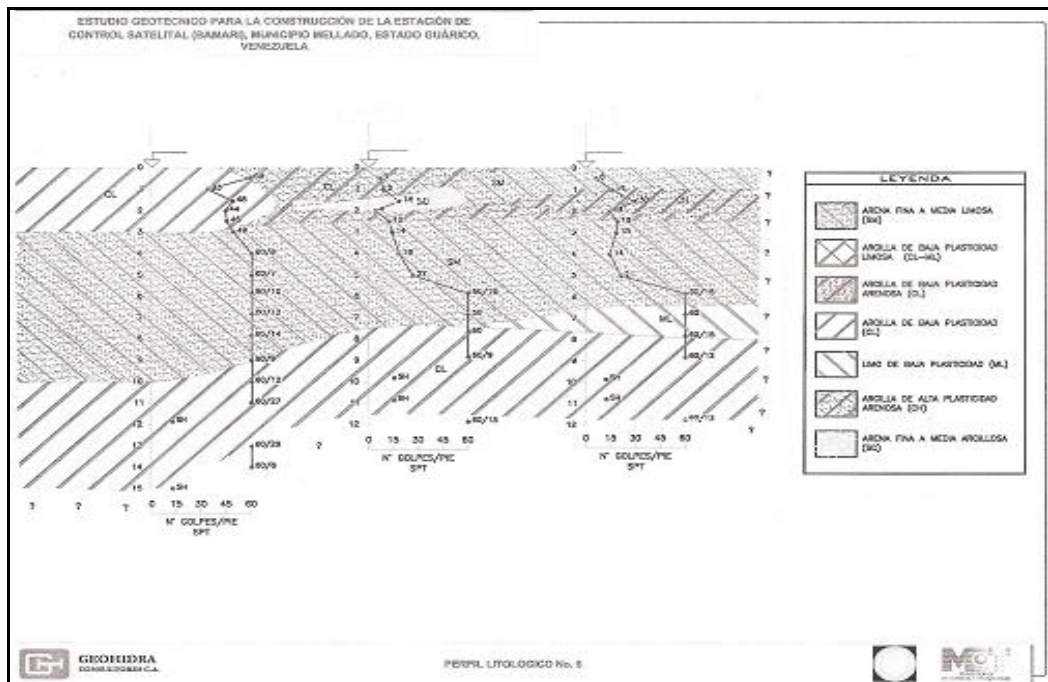
### Apéndice A4. Perfil Litológico 4



### Apéndice A5. Perfil Litológico 5

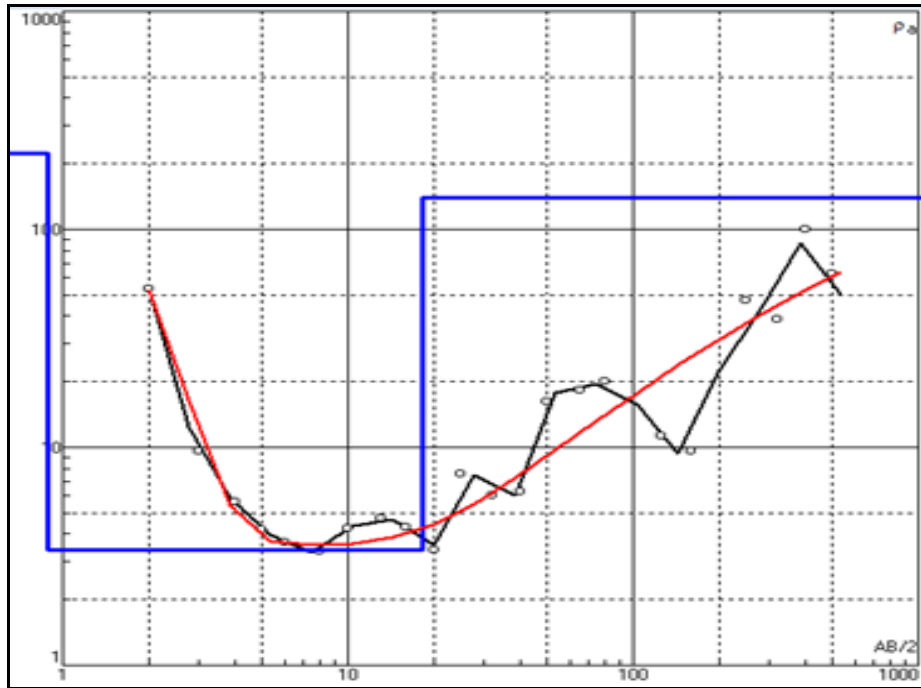


### Apéndice A6. Perfil Litológico 6

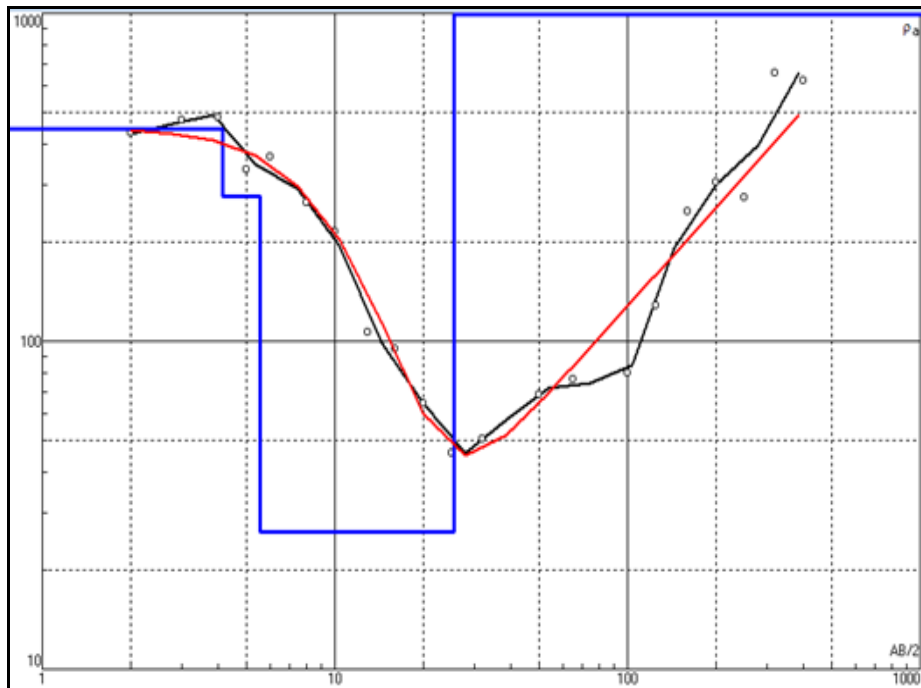


## B. Curvas de Resistividades generadas por el programa *IPI2WIN*

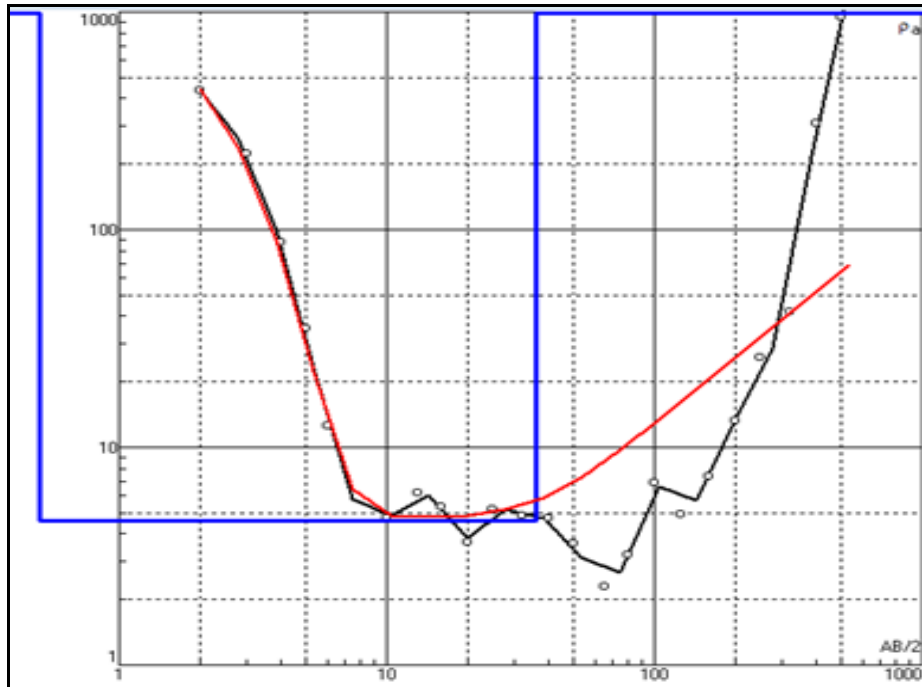
Apéndice B1. Curva de Resistividad del SEV 2.



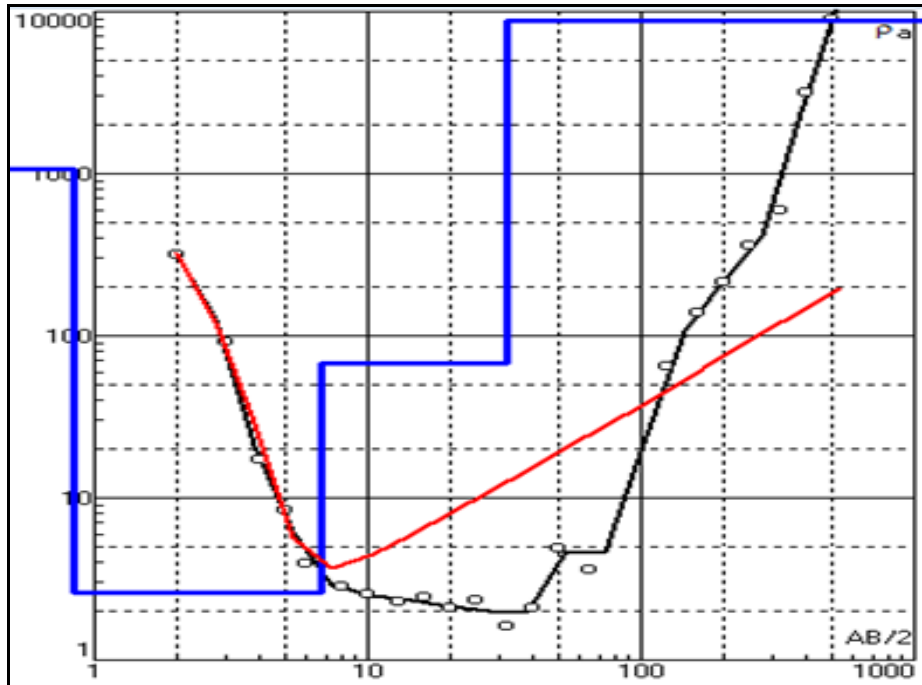
Apéndice B2. Curva de Resistividad del SEV 3.



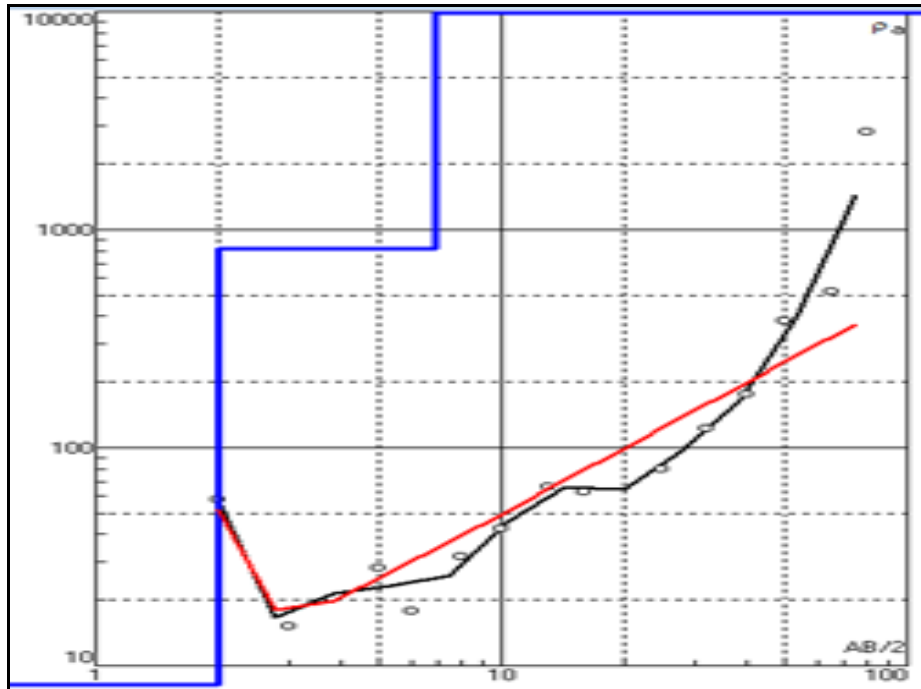
Apéndice B3. Curva de Resistividad del SEV 4.



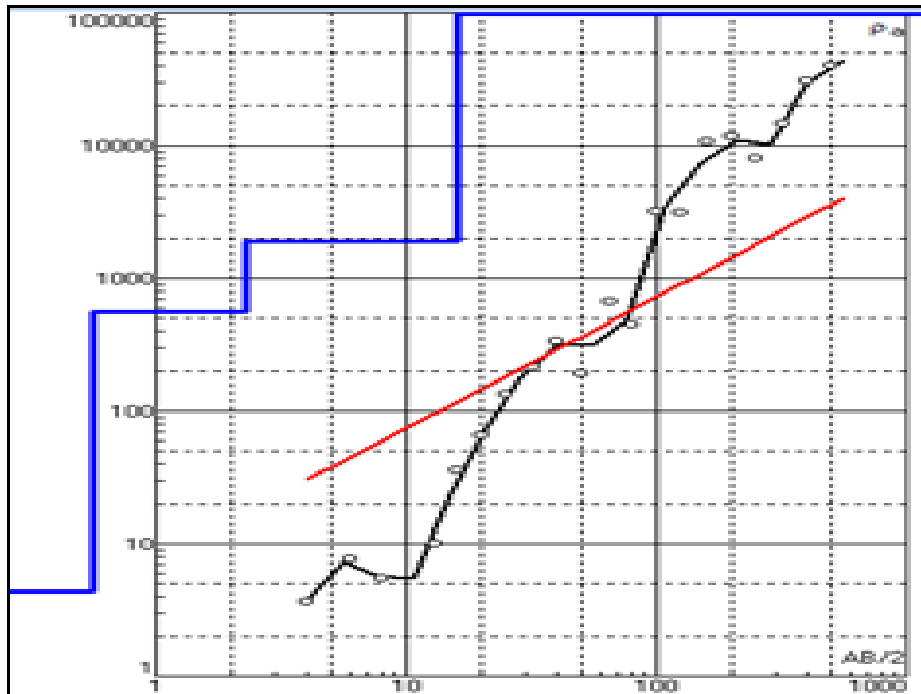
Apéndice B4. Curva de Resistividad del SEV 5.



Apéndice B5. Curva de Resistividad del SEV 6.

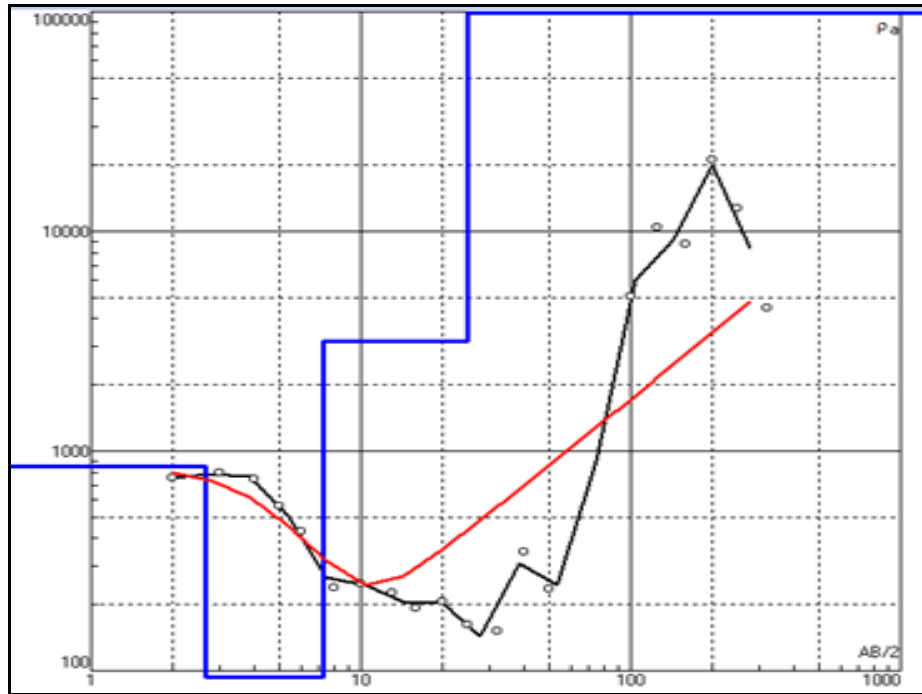


Apéndice B6. Curva de Resistividad del SEV 7.

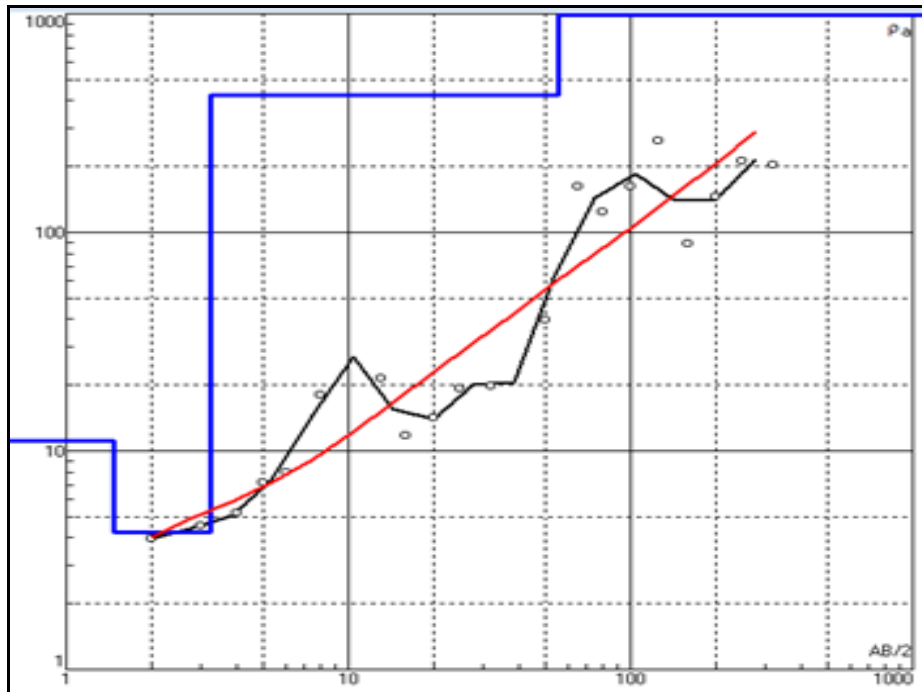




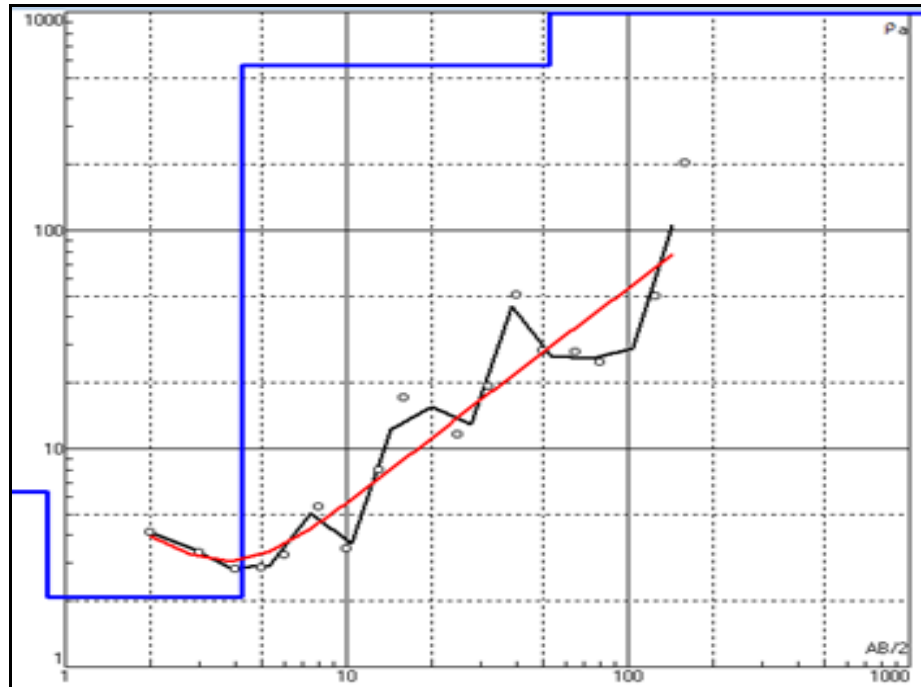
Apéndice B7. Curva de Resistividad del SEV 8



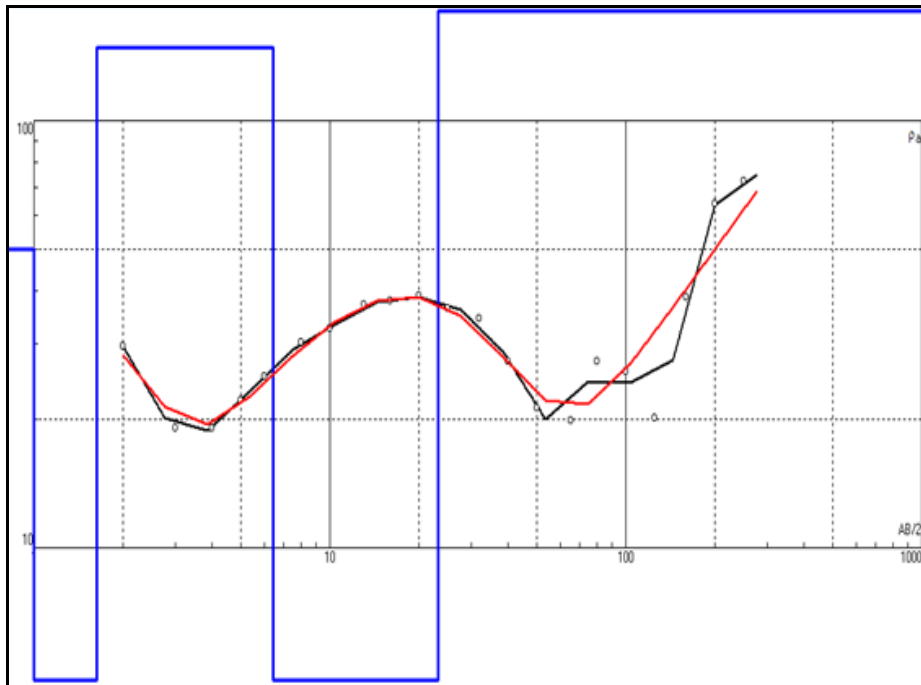
Apéndice B8. Curva de Resistividad del SEV 9



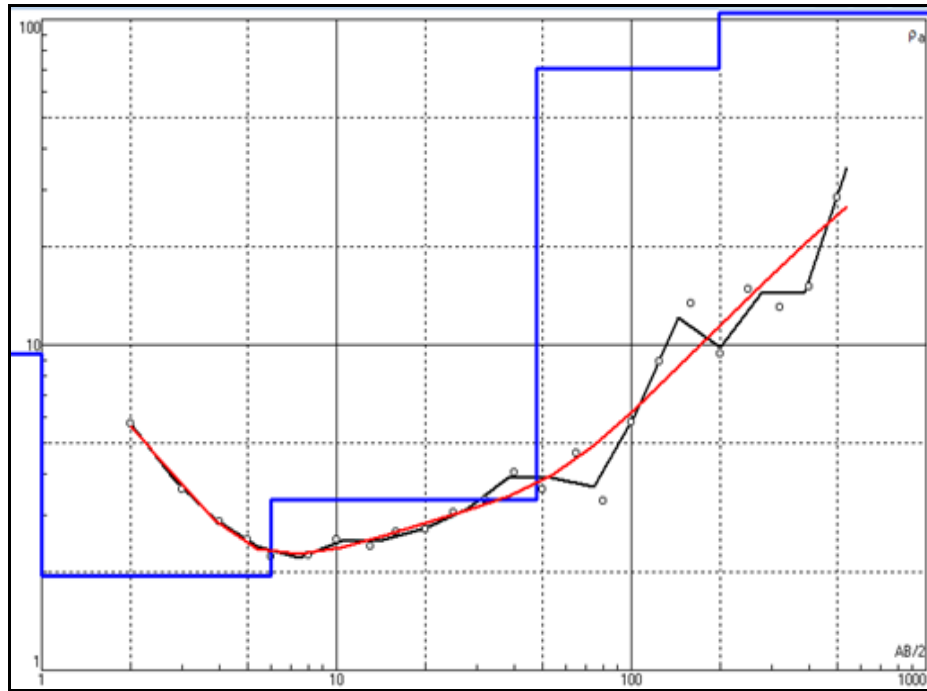
Apéndice B9. Curva de Resistividad del SEV 10



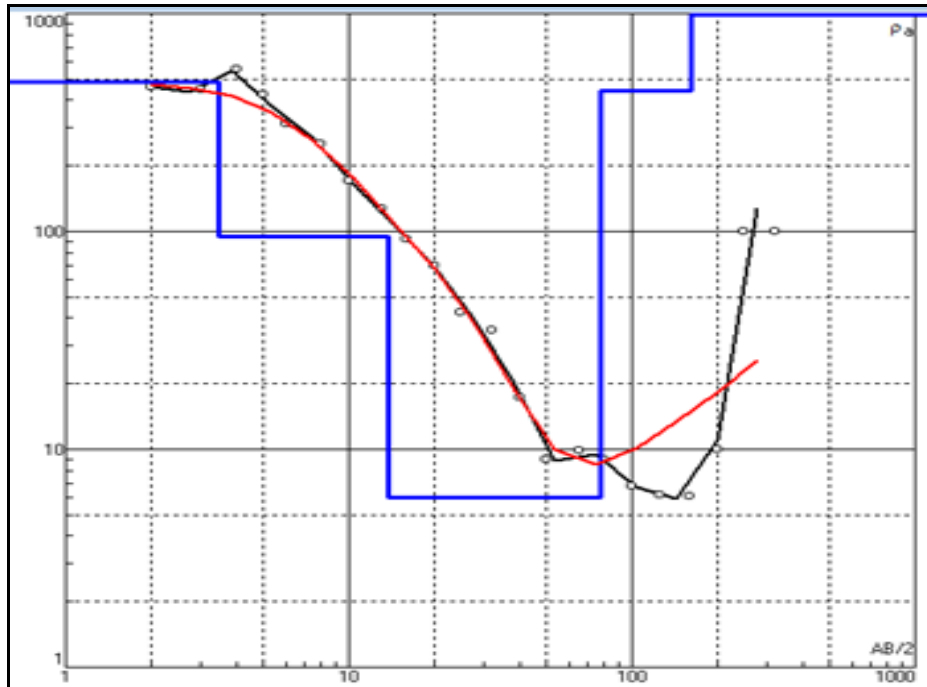
Apéndice B10. Curva de Resistividad del SEV 11



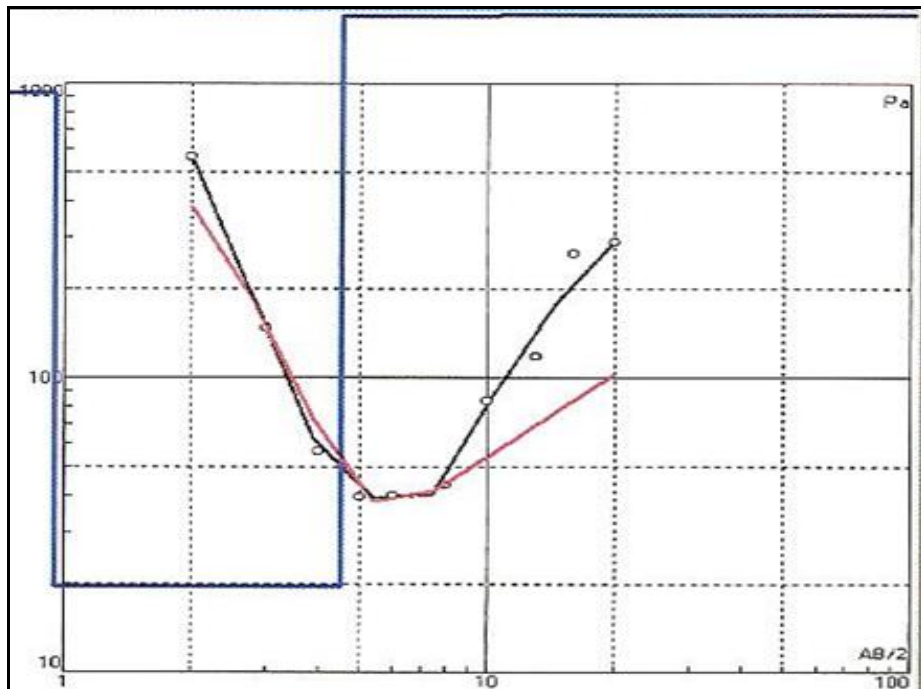
Apéndice B11. Curva de Resistividad del SEV 12



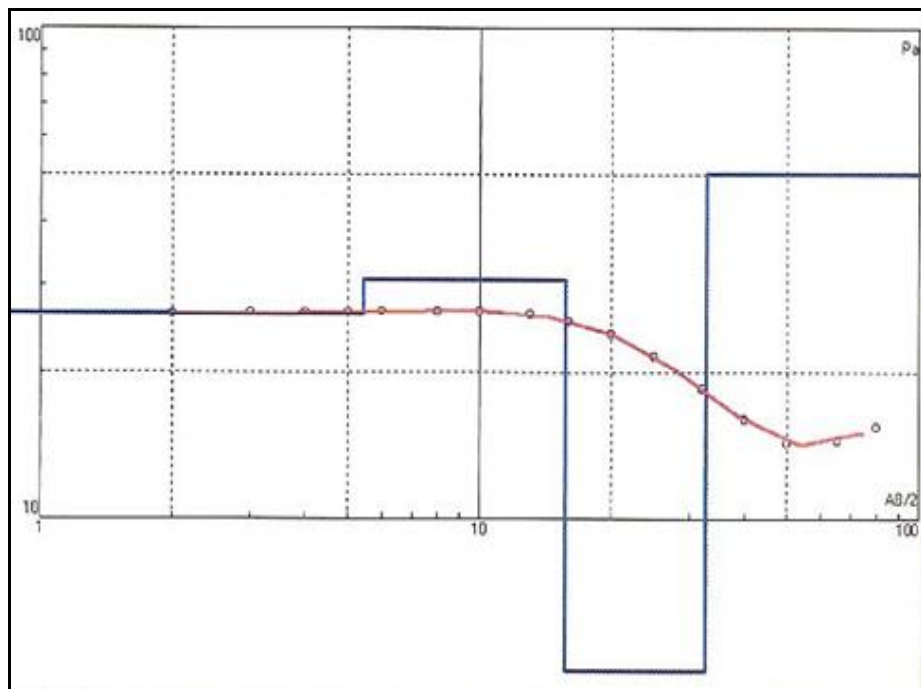
Apéndice B12. Curva de Resistividad del SEV 13



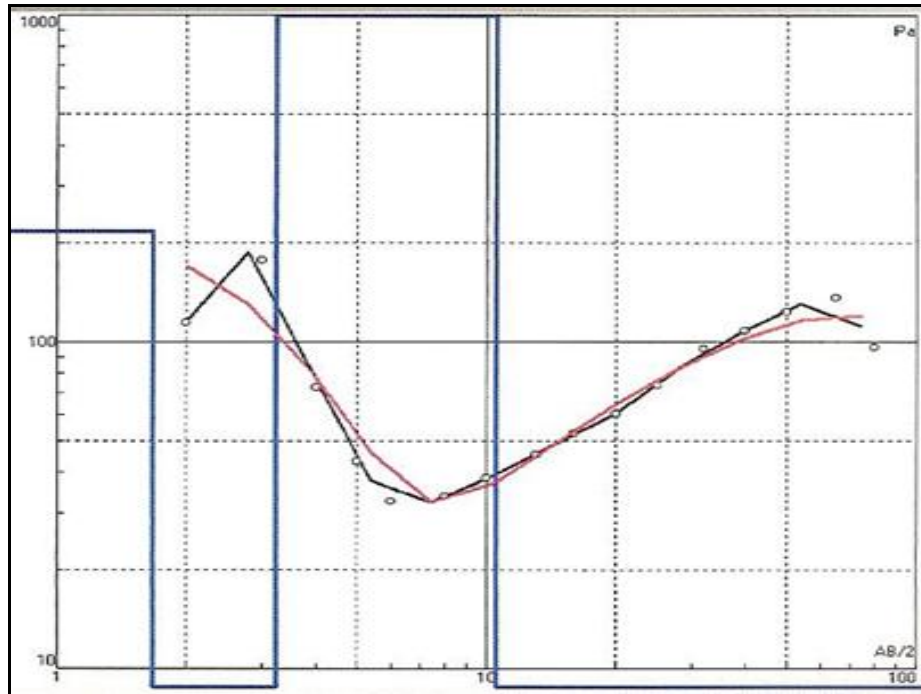
Apéndice B13. Curva de Resistividad del SEV R1



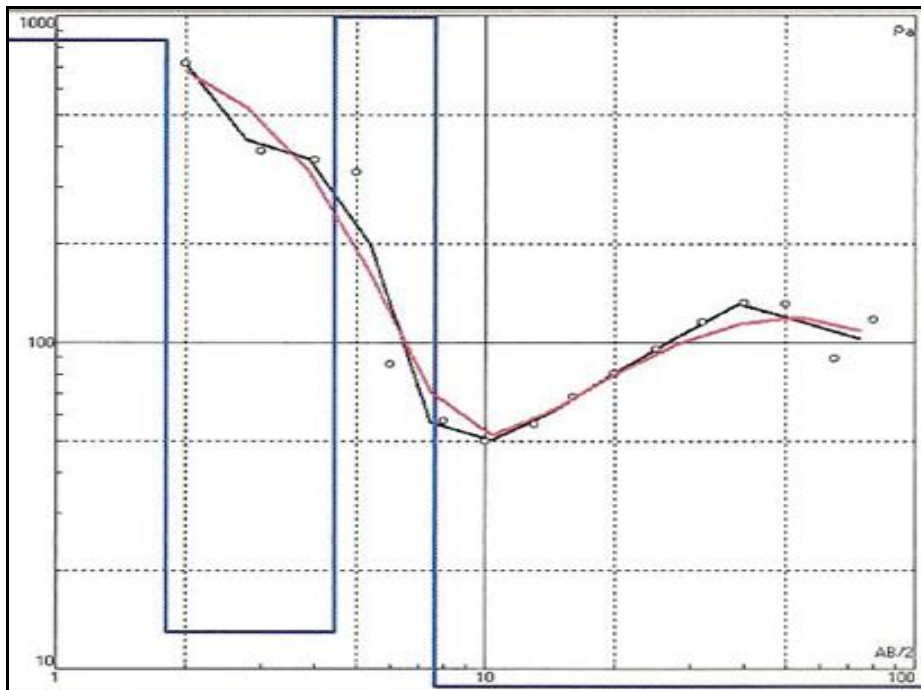
Apéndice B14. Curva de Resistividad del SEV R2



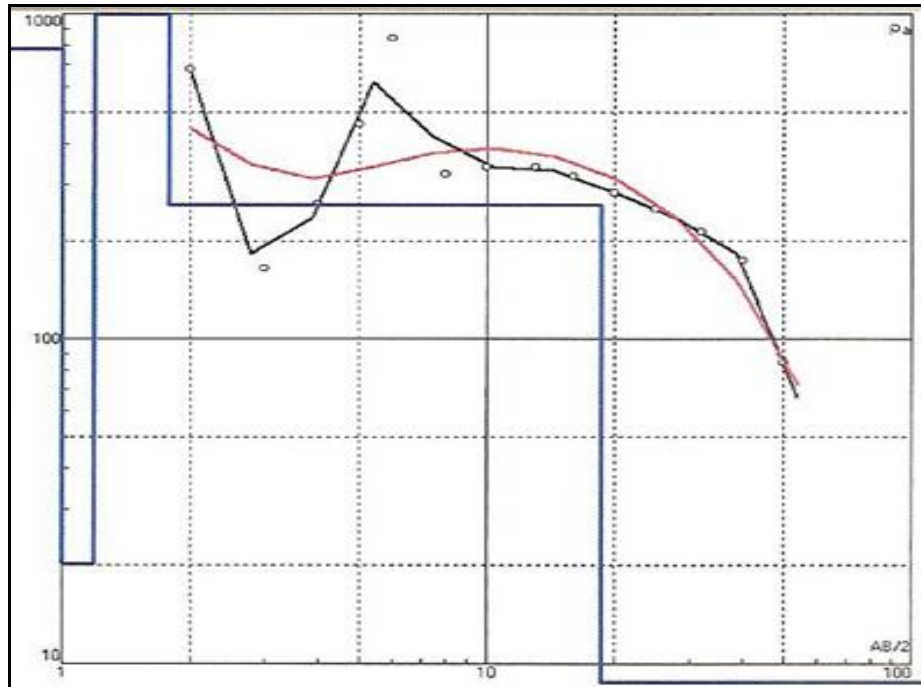
Apéndice B15. Curva de Resistividad del SEV R3



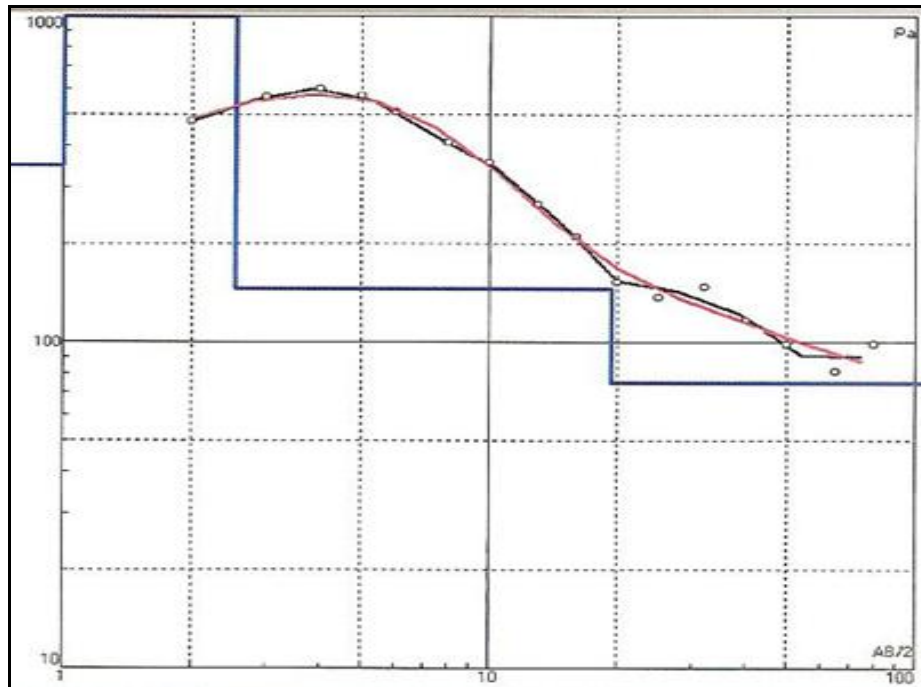
Apéndice B16. Curva de Resistividad del SEV R4



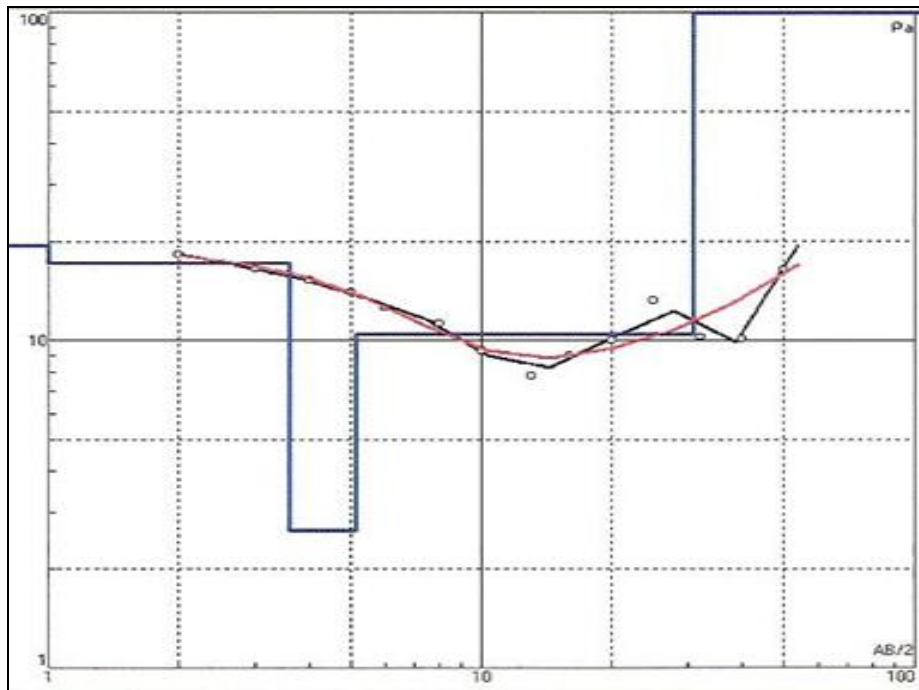
Apéndice B17. Curva de Resistividad del SEV R5



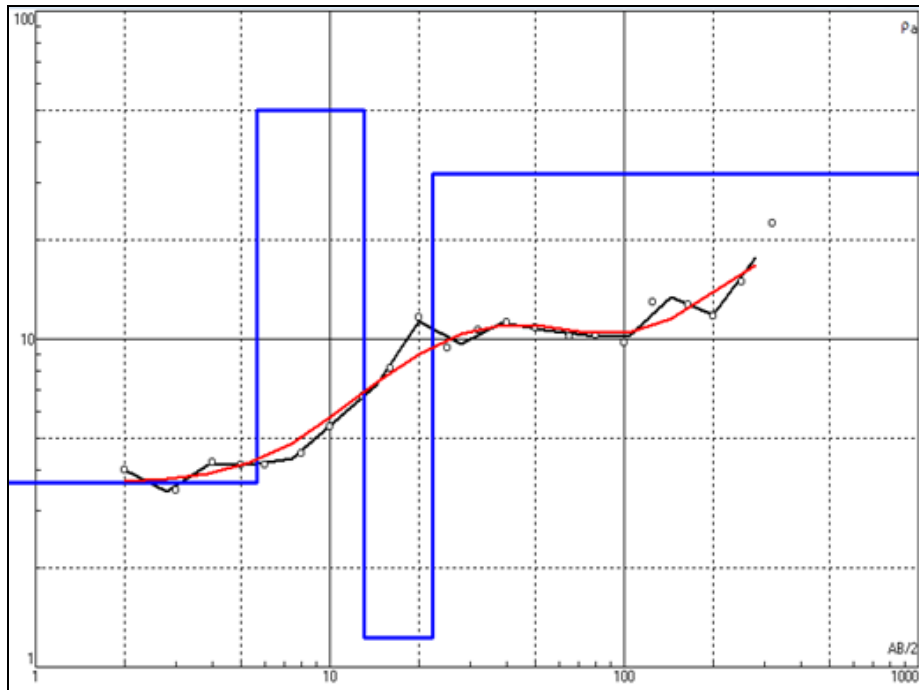
Apéndice B18. Curva de Resistividad del SEV R6



Apéndice B19. Curva de Resistividad del SEV R7

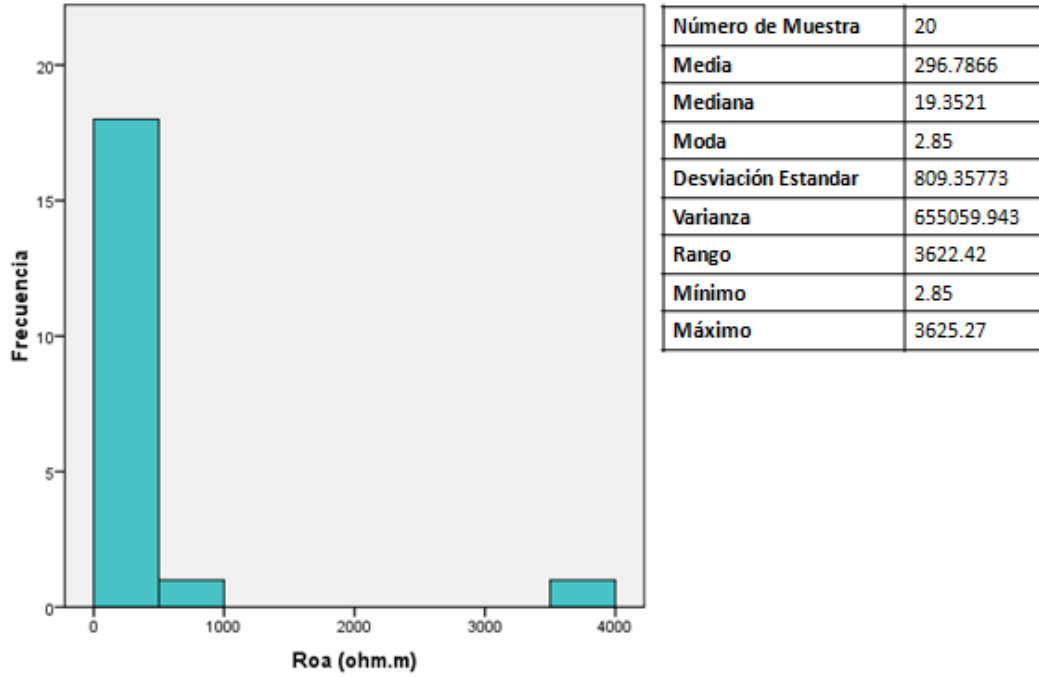


Apéndice B20. Curva de Resistividad del CONTROL

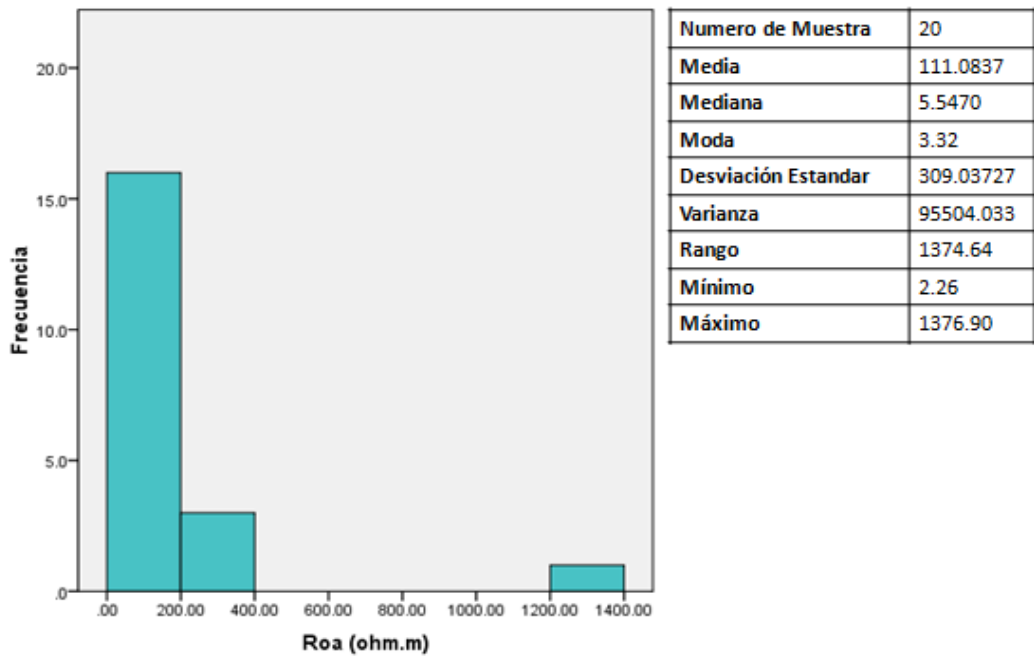


**C. Histogramas y estadística de los mapas de isorresistividades.**

Apéndice C1. Histograma y estadística de mapa de isorresistividades  $AB/2=4m$



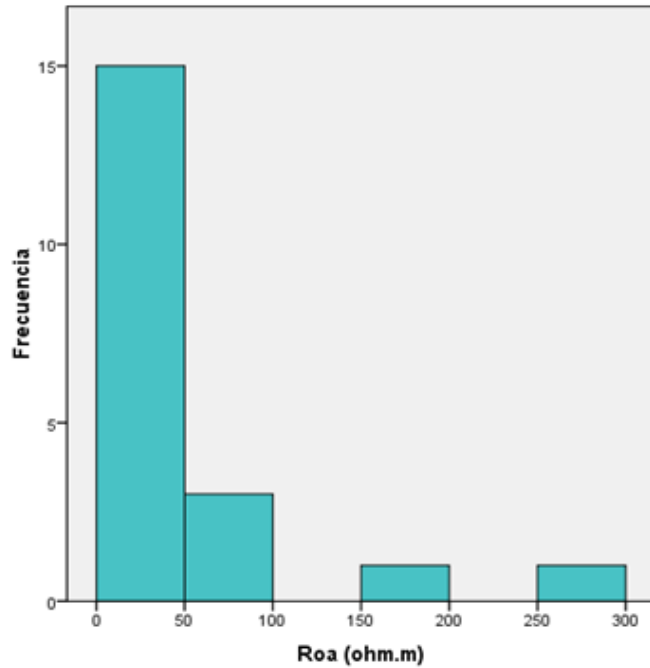
Apéndice C2. Histograma y estadística de datos de mapa de isorresistividades  $AB/2=8m$





Apéndice C3. Histograma y estadística de datos de mapa de isorresistividades

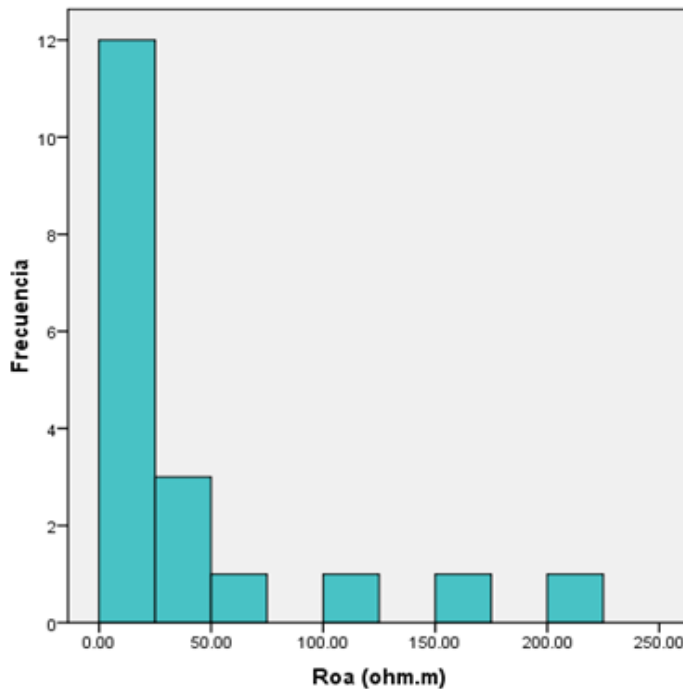
AB/2=16m



<b>Numero de Muestra</b>	20
<b>Media</b>	42.4216
<b>Mediana</b>	11.1897
<b>Moda</b>	1.61
<b>Desviación Estandar</b>	70.42390
<b>Varianza</b>	4959.526
<b>Rango</b>	266.21
<b>Mínimo</b>	1.61
<b>Máximo</b>	267.82

Apéndice C4. Histograma y estadística de datos de mapa de isorresistividades

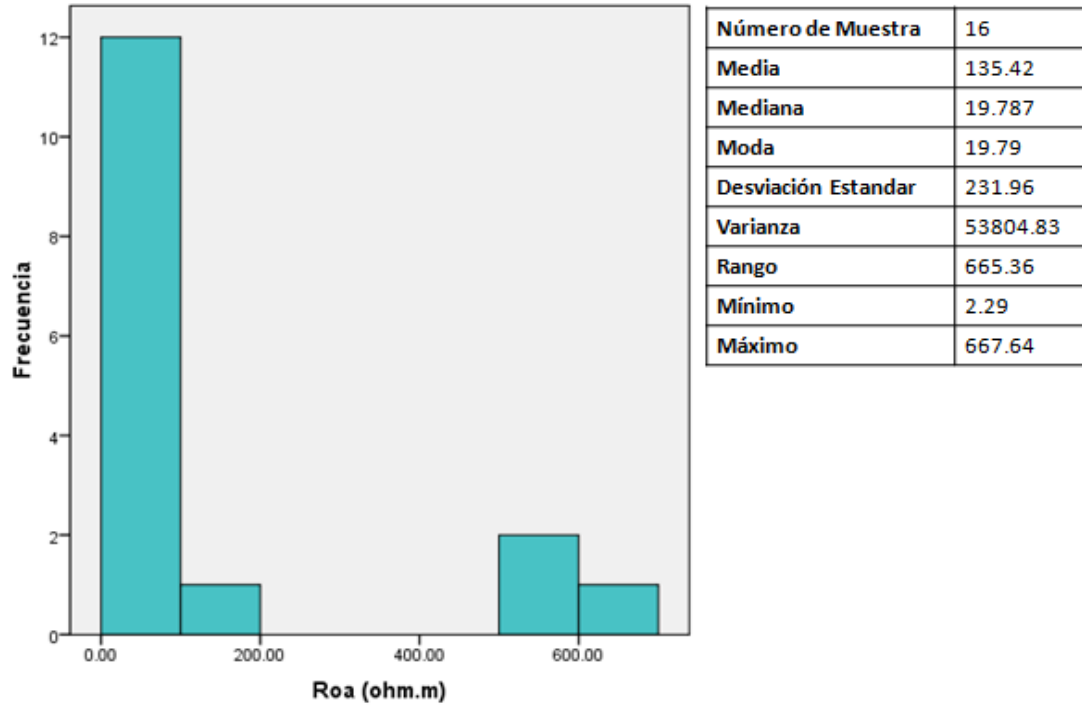
AB/2=32m



<b>Número de Muestra</b>	19
<b>Media</b>	39.79
<b>Mediana</b>	17.21
<b>Moda</b>	1.61
<b>Desviación Estandar</b>	60
<b>Varianza</b>	3600.17
<b>Rango</b>	212.12
<b>Mínimo</b>	1.61
<b>Máximo</b>	213.72

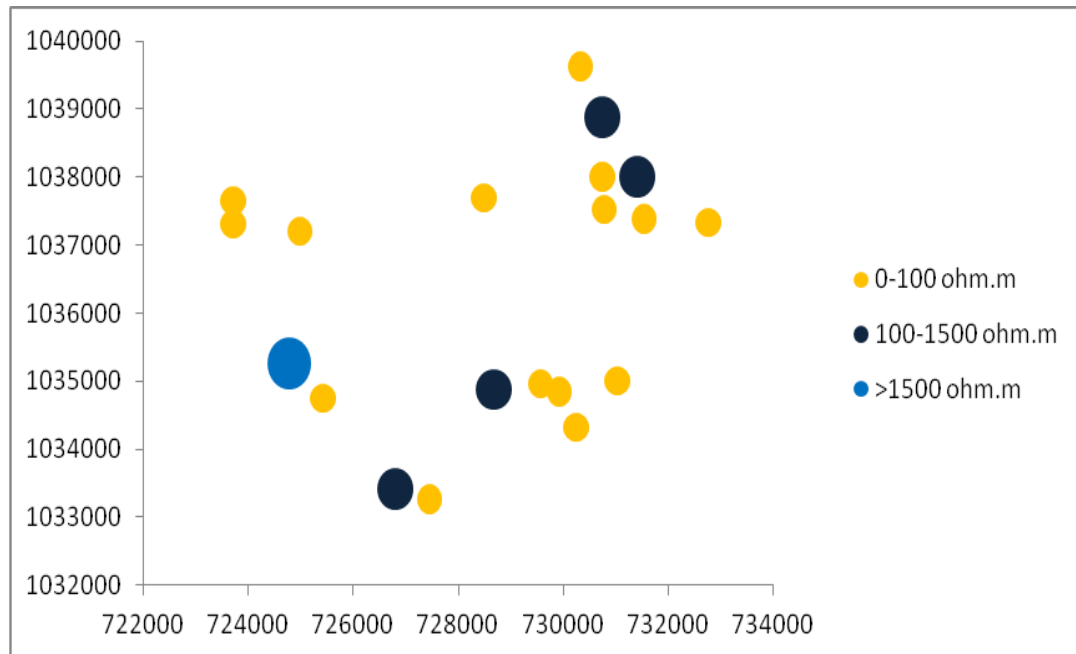
Apéndice C5. Histograma y estadística de datos de mapa de isorresistividades

AB/2=64m

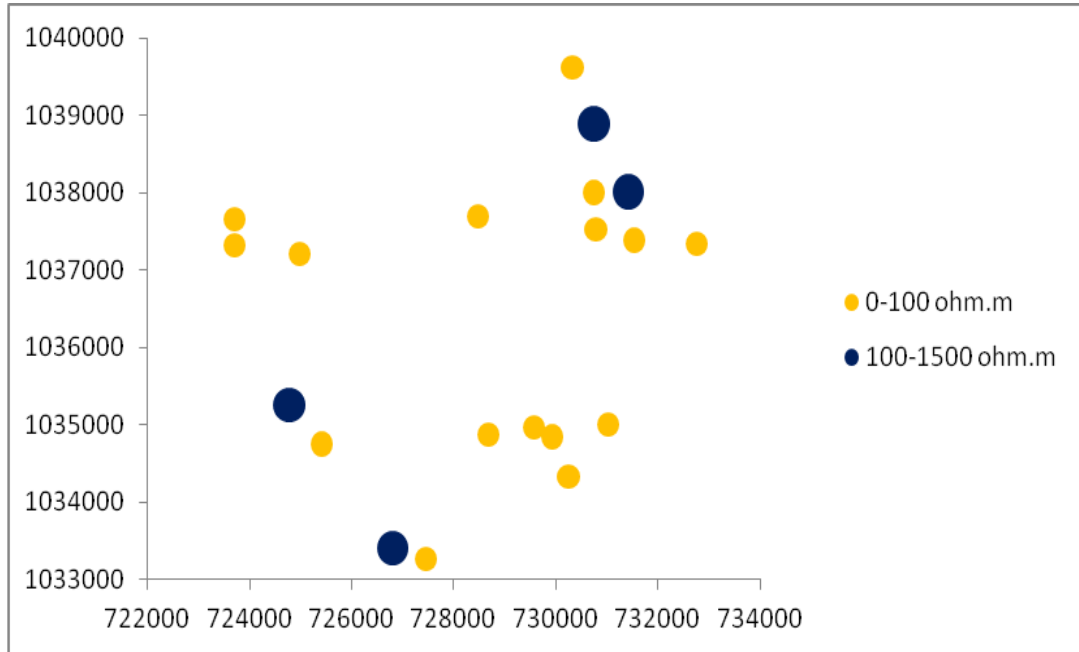


**D. Diagramas de Burbujas.**

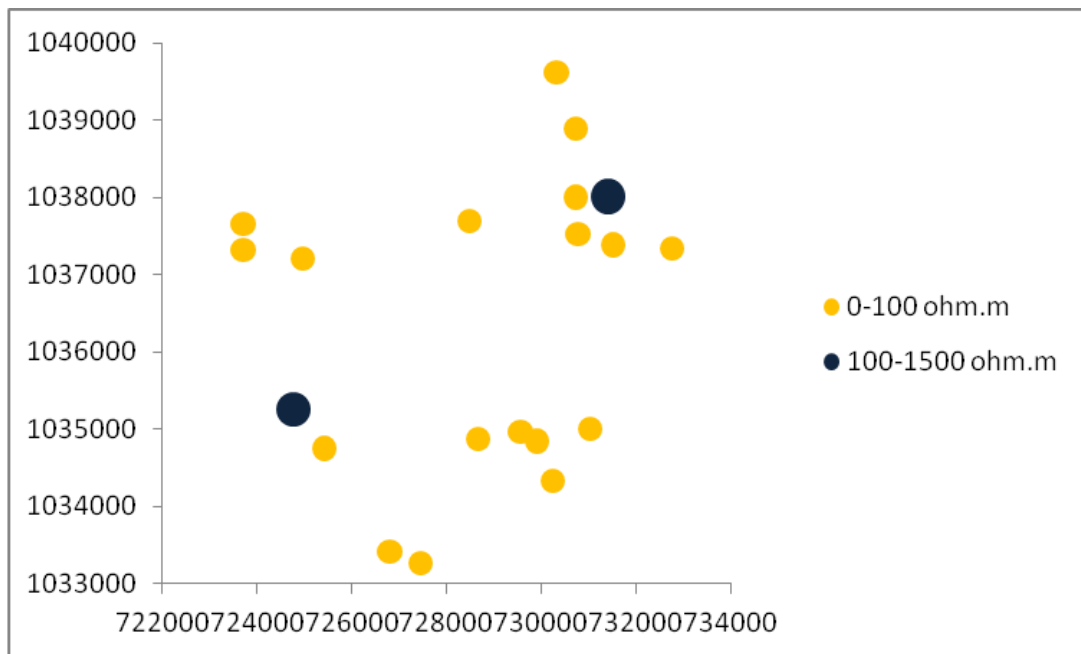
Apéndice D1. Diagrama de burbujas para la distancia AB/2=4m



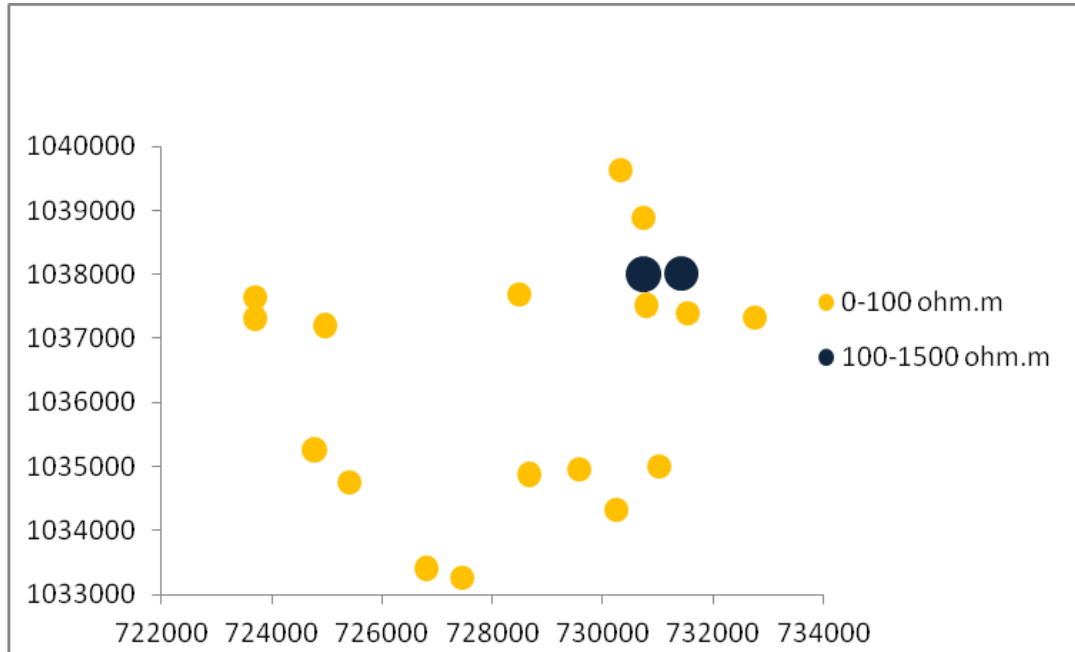
Apéndice D2. Diagrama de burbujas para la distancia  $AB/2=8m$



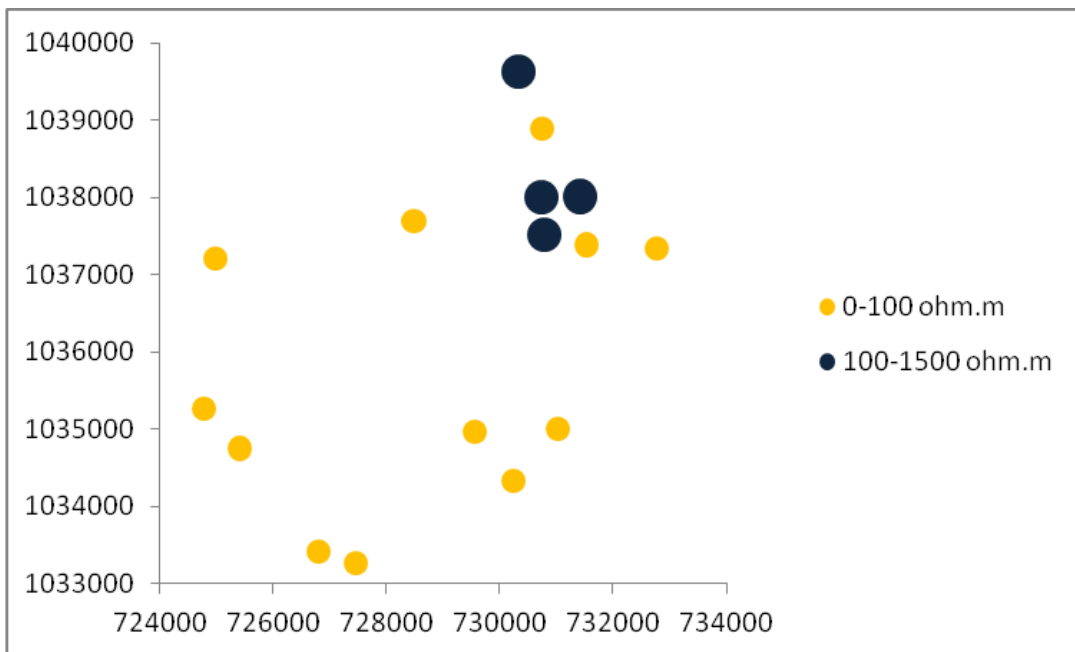
Apéndice D3. Diagrama de burbujas para la distancia  $AB/2=16m$



Apéndice D4. Diagrama de burbujas para la distancia  $AB/2=32m$



Apéndice D5. Diagrama de burbujas para la distancia  $AB/2=64m$



### E. Tablas de datos de resistividades aparentes.

Apéndice E1. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 1.

AB/2	MN	SP	V (mvolt,)	I (mA)	K	R	pa
2	1	0	11300	25.3	11.7809725	446.640316	5261.85726
3	1	0	9600	59.4	27.4889357	161.616162	4442.65628
4	1	0	3700	50.5	49.4800843	73.2673267	3625.2735
5	1	0	2590	70.6	77.7544182	36.6855524	2852.46378
6	1	0	1500	74.2	112.311937	20.2156334	2270.45695
8	1	0	440	64	200.276532	6.875	1376.90116
10	1	0	200	70.1	313.373867	2.85306705	894.076654
10	1	0	230	74.4	313.373867	3.09139785	968.763299
10	1	0	250	84.1	313.373867	2.97265161	931.551329
13	1	0	80	82.5	530.14376	0.96969697	514.078798
13	1	0	74	83	530.14376	0.89156627	472.658292
16	1	0	14	42	803.462321	0.33333333	267.820774
20	2	0	6	82.7	626.747734	0.07255139	45.4714197
25	2	0	0.8	48.6	980.176908	0.01646091	16.1345993
32	2	0	0.4	46.1	1606.92464	0.00867679	13.942947
40	2	0	1	29.4	2511.70333	0.03401361	85.4320859
50	2	0	0.5	50.3	3925.42002	0.00994036	39.0200797
65	2	0	0.2	51	6635.04368	0.00392157	26.0197792
80	2	0	0.2	150	10051.5257	0.00133333	13.4020343
100	2	0	0.3	80	15706.3925	0.00375	58.8989718
125	2	0	2.1	460	24542.1218	0.00456522	112.040121
160	5	0	0.2	181	16081.0274	0.00110497	17.769091
200	5	0	0.1	430	25128.8142	0.00023256	5.84391029
320	5	0	0.1	0.43	64335.8906	0.23255814	14961.835
400	10	0	0.3	1.67	50257.6285	0.17964072	9028.31649

Apéndice E2. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 2.

AB/2	MN	SP	V (mV)	I (mA)	K	R	pa
2	1	0	790	173.8	11.7809725	4.54545455	53.5498748
3	1	0	50	143	27.4889357	0.34965035	9.61151599
4	1	0	14	123	49.4800843	0.11382114	5.63187951
5	1	0	10	185.3	77.7544182	0.05396654	4.19613698
6	1	0	6	183	112.311937	0.03278689	3.6823586
8	1	0	3.3	199	200.276532	0.01658291	3.32116862
10	1	0	2.3	169.9	313.373867	0.01353737	4.24225953
13	1	0	1.6	180	530.14376	0.00888889	4.71238898

16	1	0	0.7	130	803.462321	0.00538462	4.32633558
20	1	0	0.5	186	1255.85166	0.00268817	3.37594533
25	1	0	0.7	182	1962.71001	0.00384615	7.54888466
32	1	0	0.3	160	3216.20548	0.001875	6.03038527
40	1	0	0.2	160	5025.76285	0.00125	6.28220356
50	2	0	0.7	170	3925.42002	0.00411765	16.1634942
65	2	0	0.5	181	6635.04368	0.00276243	18.32885
80	2	0	0.3	150	10051.5257	0.002	20.1030514
125	2	0	0.3	650	24542.1218	0.00046154	11.3271331
160	5	0	0.3	500	16081.0274	0.0006	9.64861644
250	5	0	0.3	250	39265.9812	0.0012	47.1191774
320	5	0	0.3	500	64335.8906	0.0006	38.6015343
400	5	0	0.3	300	100527.038	0.001	100.527038
500	5	0	0.2	500	157075.706	0.0004	62.8302823

Apéndice E3. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 3.

AB/2	MN	SP	V (V)	I (A)	K	R	$\rho_a$
2	1	0	23	0.65	11.7809725	35.3846154	416.865179
3	1	0	4	0.24	27.4889357	16.6666667	458.148929
4	1	0	2.17	0.23	49.4800843	9.43478261	466.833839
5	1	0	0.5	0.12	77.7544182	4.16666667	323.976742
6	1	0	1.45	0.46	112.311937	3.15217391	354.026759
8	1	0	0.23	0.18	200.276532	1.27777778	255.908902
10	1	0	0.24	0.36	313.373867	0.66666667	208.915911
13	1	0	0.08	0.41	530.14376	0.19512195	103.442685
16	1	0	0.024	0.21	803.462321	0.11428571	91.8242653
20	1	0	0.014	0.28	1255.85166	0.05	62.7925832
25	1	0	0.009	0.4	1962.71001	0.0225	44.1609752
25	2	0	0.02	0.43	980.176908	0.04651163	45.5896236
32	2	0	0.01	0.32	1606.92464	0.03125	50.2163951
50	2	0	0.007	0.4	3925.42002	0.0175	68.6948504
65	2	0	0.006	0.52	6635.04368	0.01153846	76.5581964
100	5	0	0.0051	0.4	6279.25832	0.01275	80.0605435
125	5	0	0.006	0.46	9813.55005	0.01304348	128.002827
160	5	0	0.0062	0.4	16081.0274	0.0155	249.255925
200	5	0	0.0051	0.42	25128.8142	0.01214286	305.135601
250	5	0	0.0035	0.5	39265.9812	0.007	274.861868
320	5	0	0.0047	0.46	64335.8906	0.01021739	657.344969
400	5	0	0.0031	0.5	100527.038	0.0062	623.267635

Apéndice E4. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 4.

AB/2	MN	SP	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	9.24	0.25	11.7809725	36.96	435.424742
3	1	0	2.44	0.3	27.4889357	8.13333333	223.576677
4	1	0	0.64	0.36	49.4800843	1.77777778	87.9645943
5	1	0	0.18	0.4	77.7544182	0.45	34.9894882
6	1	0	0.04	0.36	112.311937	0.11111111	12.4791042
10	1	0	0.006	0.4	313.373867	0.015	4.70060801
13	1	0	0.005	0.43	530.14376	0.01162791	6.16446233
16	1	0	0.002	0.3	803.462321	0.00666667	5.35641547
20	2	0	0.002	0.34	626.747734	0.00588235	3.68675138
25	2	0	0.002	0.38	980.176908	0.00526316	5.15882583
32	2	0	0.001	0.33	1606.92464	0.0030303	4.86946861
40	2	0	0.0006	0.32	2511.70333	0.001875	4.70944374
50	2	0	0.0005	0.54	3925.42002	0.00092593	3.63464817
65	5	0	0.0005	0.58	2650.7188	0.00086207	2.28510242
80	5	0	0.0005	0.63	4017.31161	0.00079365	3.18834254
100	5	0	0.0007	0.64	6279.25832	0.00109375	6.86793878
125	5	0	0.0003	0.6	9813.55005	0.0005	4.90677503
160	5	0	0.0003	0.66	16081.0274	0.00045455	7.30955791
200	5	0	0.0003	0.57	25128.8142	0.00052632	13.2256917
250	10	0	0.0007	0.53	19627.1001	0.00132075	25.922585
320	10	0	0.0007	0.54	32162.0548	0.0012963	41.6915525
400	10	0	0.004	0.65	50257.6285	0.00615385	309.277714
500	10	0	0.006	0.5	78531.9624	0.012	942.383548

Apéndice E5. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 5.

AB/2	MN	SP	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	10.4	0.39	11.7809725	26.6666667	314.159265
3	1	0	0.5	0.15	27.4889357	3.33333333	91.6297857
4	1	0	0.08	0.23	49.4800843	0.34782609	17.2104641
5	1	0	0.025	0.23	77.7544182	0.10869565	8.45156719
6	1	0	0.009	0.26	112.311937	0.03461538	3.88772091
8	1	0	0.0024	0.17	200.276532	0.01411765	2.82743339
10	1	0	0.003	0.37	313.373867	0.00810811	2.54086919
13	1	0	0.0015	0.35	530.14376	0.00428571	2.27204469
16	1	0	0.0003	0.1	803.462321	0.003	2.41038696
20	1	0	0.0004	0.24	1255.85166	0.00166667	2.09308611
25	2	0	0.0005	0.21	980.176908	0.00238095	2.33375454
32	2	0	0.0001	0.1	1606.92464	0.001	1.60692464

40	5	0	0.0004	0.19	1001.38266	0.00210526	2.10817402
50	5	0	0.0005	0.16	1566.86934	0.003125	4.89646667
65	5	0	0.0003	0.22	2650.7188	0.00136364	3.61461655
125	10	0	0.0049	0.37	4900.88454	0.01324324	64.9036061
160	10	0	0.0067	0.39	8034.62321	0.01717949	138.030706
200	10	0	0.0092	0.54	12558.5166	0.01703704	213.959913
200	10	0	0.0073	0.5	12558.5166	0.0146	183.354343
250	10	0	0.0098	0.62	19627.1001	0.01580645	310.234808
320	10	0	0.0085	0.54	32162.0548	0.01574074	506.254566
400	10	0	0.0108	0.2	50257.6285	0.054	2713.91194
500	10	0	0.0273	0.28	78531.9624	0.0975	7656.86633

Apéndice 6. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 6.

AB/2	MN	SP	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	0.83	0.17	11.7809725	4.88235294	57.5188655
3	1	0	0.11	0.2	27.4889357	0.55	15.1189146
5	1	0	0.036	0.1	77.7544182	0.36	27.9915905
6	1	0	0.035	0.22	112.311937	0.15909091	17.8678082
8	1	0	0.022	0.14	200.276532	0.15714286	31.4720264
10	1	0	0.019	0.14	313.373867	0.13571429	42.5293105
13	1	0	0.02	0.16	530.14376	0.125	66.26797
16	1	0	0.014	0.18	803.462321	0.07777778	62.4915139
25	1	0	0.02	0.49	1962.71001	0.04081633	80.1106127
32	1	0	0.019	0.5	3216.20548	0.038	122.215808
40	1	0	0.015	0.43	5025.76285	0.03488372	175.317309
50	1	0	0.022	0.45	7853.19624	0.04888889	383.934038
65	1	0	0.018	0.46	13272.4436	0.03913043	519.356487
80	1	0	0.025	0.18	20105.4076	0.13888889	2792.41772

Apéndice 7. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 7.

AB/2	MN	SP (mV)	V (mV)	I (A)	K	R	pa
4	1	0.00012	0.00205	0.026	49.4800843	0.074	3.67294472
6	1	0.00015	0.00218	0.03	112.311937	0.068	7.59977443
8	1	0.00014	0.00074	0.022	200.276532	0.027	5.46208723
13	1	0.00017	0.00076	0.031	530.14376	0.019	10.08983286
16	1	0.00017	0.00146	0.029	803.462321	0.044	35.74022049
20	1	0.00017	0.00163	0.028	1255.85166	0.052	65.48369387
25	1	0.00018	0.00189	0.025	1962.71001	0.068	134.24936471
32	1	0.00019	0.00225	0.031	3216.20548	0.066	213.72204152
40	1	0.00019	0.00185	0.025	5025.76285	0.066	333.71065308
50	1	0.00022	0.00118	0.039	7853.19624	0.025	193.30944580



65	1	0.00047	0.00213	0.033	13272.4436	0.05	667.64413076
80	1	0.00023	0.00072	0.022	20105.4076	0.022	447.80225984
100	1	0.00021	0.0044	0.041	31415.1411	0.102	3210.47417969
125	1	0.00018	0.00189	0.027	49086.5998	0.063	3108.81798823
160	1	0.0002	0.00311	0.022	80423.9865	0.132	10637.90003696
200	2	0.00003	0.00265	0.014	62830.2823	0.187	11758.23854012
250	2	0.00016	0.00282	0.033	98173.1996	0.081	7913.35487913
320	2	0.00008	0.00171	0.018	160847.973	0.091	14565.67756111
400	2	0.00012	0.00447	0.036	251325.841	0.121	30368.53918015
500	2	0.00025	0.00429	0.04	392697.511	0.101	39662.44860114

Apéndice 8. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 8.

AB/2	MN	SP (V)	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0.001	63.37	0.99	11.7809725	64.0090909	754.08933661
3	1	0.01	11.57	0.4	27.4889357	28.9	794.43024228
4	1	0.01	2.57	0.17	49.4800843	15.0588235	745.11185760
5	1	0.01	1.34	0.184	77.7544182	7.22826087	562.02921834
6	1	0.01	1.09	0.282	112.311937	3.82978723	430.13082395
8	1	0.01	0.35	0.285	200.276532	1.19298246	238.92638865
10	1	0.01	0.315	0.387	313.373867	0.7881137	246.97423642
13	1	0	0.179	0.422	530.14376	0.42417062	224.87140543
16	1	0.003	0.14	0.57	803.462321	0.24035088	193.11287368
20	1	0	0.113	0.692	1255.85166	0.1632948	205.07404328
25	1	0	0.111	1.344	1962.71001	0.08258929	162.09881782
32	1	0.017	0.076	1.25	3216.20548	0.0472	151.80489861
32	1	0.0158	0.08	1.25	3216.20548	0.05136	165.18431341
40	1	0.01742	0.07162	0.718	5025.76285	0.07548747	379.38209796
50	1	0.01792	0.06037	1.3	7853.19624	0.03265385	256.43706170
100	1	-0.0212	0.31	1.9	31415.1411	0.17431579	5476.15512885
125	2	0.0839	0.72	1.38	24542.1218	0.46094203	11312.49542264
160	2	0.085	0.38	1.24	40210.8152	0.23790323	9566.28264116
200	2	0.0367	0.52	1.32	62830.2823	0.36613636	23004.45107859
250	2	0.0331	0.16	0.9	98173.1996	0.141	13842.42114760
320	2	0.0033	0.058	1.8	160847.973	0.03038889	4887.99118155

Apéndice 9. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 9

AB/2	MN	SP (mV)	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0.007	0.258	0.74	11.7809725	0.34863919	4.10730868
3	1	0.007	0.247	1.45	27.4889357	0.17034	4.68246531
4	1	0.007	0.105	0.93	49.4800843	0.1128957	5.5860887
5	1	0.007	0.096	0.97	77.7544182	0.09896186	7.69472151

6	1	0.007	0.092	1.2	112.311937	0.07666083	8.60992671
8	1	0.007	0.083	0.84	200.276532	0.09880119	19.7875598
13	1	0.008	0.05	1.04	530.14376	0.04806923	25.4836028
16	2	0.005	0.026	0.72	400.553063	0.03610417	14.4616346
20	2	0.003	0.03	1.2	626.747734	0.0249975	15.6671265
25	2	0.002	0.022	1.02	980.176908	0.02156667	21.1391486
32	2	0.001	0.018	1.38	1606.92464	0.01304275	20.9587222
50	2	0	0.009	0.887	3925.42002	0.01014656	39.8295154
65	2	-0.001	0.02	0.859	6635.04368	0.02328405	154.490697
80	2	-0.002	0.011	1.05	10051.5257	0.0104781	105.320844
100	5	0.006	0.025	0.732	6279.25832	0.03414481	214.404074
125	5	0.001	0.018	0.64	9813.55005	0.02812344	275.990762
160	5	0.002	0.01	1.45	16081.0274	0.00689517	110.881456
200	5	0.005	0.016	1.9	25128.8142	0.00841842	211.544939
250	5	0	0.009	1.68	39265.9812	0.00535714	210.353471
320	10	0.001	0.013	1.9	32162.0548	0.00684158	220.039237

Apéndice 10. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 10

AB/2	MN	SP (mV)	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0.001	0.354	1	11.7809725	0.353999	4.17045247
3	1	0.005	0.248	2	27.4889357	0.1239975	3.40855931
4	1	0.004	0.112	1.9	49.4800843	0.05894526	2.91661659
5	1	0.004	0.077	2	77.7544182	0.038498	2.99338959
6	1	-0.007	0.0483	1.9	112.311937	0.02542474	2.85550145
8	1	-0.007	0.0495	2.1	200.276532	0.02357476	4.72147155
10	1	0.007	0.0269	1.8	313.373867	0.01494056	4.68197967
13	1	-0.001	0.017	1.2	530.14376	0.0141675	7.51081172
16	1	-0.013	0.0297	2	803.462321	0.0148565	11.936638
25	1	0.007	0.02	2.2	1962.71001	0.00908773	17.8365733
32	1	0.0077	0.0215	2.3	3216.20548	0.00934448	30.0537622
40	2	0.006	0.052	2.3	2511.70333	0.02260609	56.7797838
50	2	0.0002	0.013	1.8	3925.42002	0.00722211	28.3498195
65	5	0.0001	0.019	1.8	2650.7188	0.0105555	27.9796623
80	5	0.0003	0.012	1.9	4017.31161	0.00631563	25.37186
125	5	-0.0001	0.005	1	9813.55005	0.0050001	49.0687316
125	10	0.0001	0.009	0.7	4900.88454	0.012857	63.0106725
160	10	0.0001	0.038	1.2	8034.62321	0.03166658	254.429065

Apéndice 11. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 11.

AB/2	MN	SP (mV)	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	4.65	1.85	11.7809725	2.51351351	29.6116335
3	1	0	0.59	0.85	27.4889357	0.69411765	19.0805554

4	1	0	0.25	0.65	49.4800843	0.38461538	19.0308017
5	1	0	0.29	1.02	77.7544182	0.28431373	22.1066483
6	1	0	0.13	0.58	112.311937	0.22413793	25.1733653
8	1	0	0.19	1.26	200.276532	0.15079365	30.2004294
10	1	0	0.1	0.96	313.373867	0.10416667	32.6431112
13	1	0	0.06	0.86	530.14376	0.06976744	36.986774
16	1	0	0.024	0.51	803.462321	0.04705882	37.8099916
20	1	0	0.044	1.42	1255.85166	0.03098592	38.9137135
25	1	0	0.026	1.4	1962.71001	0.01857143	36.4503288
32	1	0	0.009	0.84	3216.20548	0.01071429	34.4593444
40	1	0	0.006	1.1	5025.76285	0.00545455	27.4132519
50	1	0	0.003	1.11	7853.19624	0.0027027	21.2248547
50	2	0	0.005	1.07	3925.42002	0.0046729	18.3430842
65	2	0	0.004	1.55	6635.04368	0.00258065	17.1226934
80	2	0	0.002	0.85	10051.5257	0.00235294	23.6506487
100	2	0	0.002	1.4	15706.3925	0.00142857	22.4377035
125	2	0	0.001	1.41	24542.1218	0.00070922	17.4057601
160	4	0	0.0015	1.91	20103.0514	0.00078534	15.7877367
200	4	0	0.0017	2.04	31412.7849	0.00083333	26.1773208
200	8	0	0.0031	1.9	15701.6801	0.00163158	25.6185307
250	8	0	0.0021	1.79	24537.4094	0.00117318	28.7869049

Apéndice 12. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 12.

AB/2	MN	SP (mV)	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	1.08	2.23	11.7809725	0.48430493	5.70558307
3	1	0	0.27	2.06	27.4889357	0.13106796	3.60291876
4	1	0	0.12	2.08	49.4800843	0.05769231	2.85462025
5	1	0	0.06	1.85	77.7544182	0.03243243	2.52176491
6	1	0	0.044	2.21	112.311937	0.0199095	2.23607477
8	1	0	0.023	2.04	200.276532	0.01127451	2.25801972
10	1	0	0.016	2	313.373867	0.008	2.50699094
13	1	0	0.009	1.98	530.14376	0.00454545	2.40974436
16	1	0	0.007	2.11	803.462321	0.00331754	2.66551481
20	1	0	0.003	1.39	1255.85166	0.00215827	2.71047122
25	1	0	0.003	1.94	1962.71001	0.00154639	3.03511857
32	1	0	0.002	1.93	3216.20548	0.00103627	3.33285542
40	1	0	0.002	2.49	5025.76285	0.00080321	4.03675731
50	1	0	0.001	2.19	7853.19624	0.00045662	3.58593435
50	2	0	0.002	1.62	3925.42002	0.00123457	4.84619756
65	2	0	0.002	2.12	6635.04368	0.0009434	6.25947517
80	2	0	0.001	2.24	10051.5257	0.00044643	4.48728826

100	2	0	0.001	2.01	15706.3925	0.00049751	7.81412561
125	2	0	0.001	2.04	24542.1218	0.0004902	12.0304519
160	2	0	0.001	2.22	40210.8152	0.00045045	18.1129798
160	10	0	0.0016	1.56	8034.62321	0.00102564	8.24063919
200	10	0	0.0005	1.09	12558.5166	0.00045872	5.76078745
250	10	0	0.0011	2.37	19627.1001	0.00046414	9.10962452
320	10	0	0.0004	1.6	32162.0548	0.00025	8.0405137
400	10	0	0.0003	1.62	50257.6285	0.00018519	9.30696824
500	10	0	0.0004	1.81	78531.9624	0.00022099	17.3551298

Apéndice 13. Tabla de resistividades aparentes para el SEV 13.

AB/2	MN	pa (promedio)
2	1	365.5509003
3	1	356.9982589
4	1	439.1089732
5	1	336.9290923
6	1	248.9703622
8	1	200.2765317
10	1	135.8857822
13	1	100.8602432
16	1	73.07944068
20	1	55.16294849
25	1	33.81892215
32	1	27.78717741
40	1	13.74893035
50	1	7.164229058
65	4	7.803740442
80	4	7.10456813
100	4	5.410076616
100	10	6.811549404
125	10	6.142270095
160	10	6.127518189
200	10	10.04681331
250	10	99.80316262
320	10	100.6302947

Apéndice 14. Tabla de resistividades aparentes para el SEV CONTROL.

AB/2	MN	SP	V (V)	I (A)	K	R	pa
2	1	0	0.71	2.24	11.7809725	0.31696429	3.73414752
3	1	0	0.26	2.21	27.4889357	0.11764706	3.23399244
3	1	0	0.26	2.24	27.4889357	0.11607143	3.19068004
4	1	0	0.17	2.17	49.4800843	0.07834101	3.87631997

5	1	0	0.1	2.05	77.7544182	0.04878049	3.79289845
6	1	0	0.07	2.06	112.311937	0.03398058	3.81642506
8	1	0	0.05	2.43	200.276532	0.02057613	4.12091629
10	1	0	0.04	2.51	313.373867	0.01593625	4.99400585
13	1	0	0.03	2.59	530.14376	0.01158301	6.14066132
16	1	0	0.02	2.15	803.462321	0.00930233	7.4740681
20	1	0	0.02	2.35	1255.85166	0.00851064	10.6880993
25	1	0	0.01	2.26	1962.71001	0.00442478	8.68455757
25	2	0	0.021	2.24	980.176908	0.009375	9.18915851
32	2	0	0.015	2.33	1606.92464	0.00643777	10.3450084
40	2	0	0.01	2.29	2511.70333	0.00436681	10.9681368
50	2	0	0.007	2.61	3925.42002	0.00268199	10.5279464
65	2	0	0.003	2	6635.04368	0.0015	9.95256553
65	6	0	0.01	2.16	2207.49244	0.00462963	10.2198724
80	6	0	0.007	2.29	3346.31977	0.00305677	10.2289251
100	6	0	0.004	2.15	5231.27537	0.00186047	9.73260533
125	6	0	0.003	1.9	8176.51848	0.00157895	12.9102923
165	6	0	0.002	2.24	14250.2643	0.00089286	12.7234502
200	6	0	0.001	1.79	20939.2386	0.00055866	11.6978987
250	6	0	0.001	2.18	32720.2111	0.00045872	15.0092711
320	6	0	0.001	2.37	53611.8022	0.00042194	22.6210136