

**IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN  
GEOELÉCTRICA Y MODELAMIENTO DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS  
DEL SUELO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS  
INDUSTRIALES ELOGY. PORE, CASANARE**

**AUTOR**

**Astrid Andrea Sánchez Martínez**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FÍSICOQUÍMICAS, ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2015**

**IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN  
GEOELÉCTRICA Y MODELAMIENTO DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS  
DEL SUELO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS  
INDUSTRIALES ELOGY. PORE, CASANARE**

**ASTRID ANDREA SÁNCHEZ MARTÍNEZ  
PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
GEÓLOGA**

**DIRECTOR**

Ingeniero Civil Luis Eduardo Moreno Torres

**CODIRECTOR**

Geólogo Juan Camilo Gómez Royero

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISCOQUÍMICAS, ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2015**

## DEDICATORIA

*A Dios. Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida.*

*A mis padres, Pedro Nel Sánchez y Angela Martínez a quienes les debo todo en la vida, que con su amor e incondicional entrega han hecho de mí una persona de bien. A ellos que son mi fortaleza para seguir adelante y dar lo mejor de mí.*

*A mis hermanos Viviana y Pedro por su paciencia y apoyo.*

*A mis amigos y compañeros de estudio Mariam, Adriana, Juanca, Mafe, Ingrid y Paola, que más que amigos son parte de mi familia.*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, que no me desampara y a quien le agradezco por darme la fortaleza de poder superar con éxito esta etapa tan importante en mi vida.

A mi mamá, por su amor y motivación para que siempre siga adelante. Gracias por creer en mí y tenerme paciencia. Te amo mami.

A mi papa, que es mi ejemplo de tenacidad. Gracias por su amor y por todos sus esfuerzos realizados para sacarme adelante. Te amo papi.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) que fue la institución que me acogió y en donde me he desarrollado como profesional y persona.

A la Escuela de Geología y a todos sus profesores quienes hicieron parte fundamental de esta etapa de mi vida, contribuyendo con mi formación académica, profesional, ética y personal. Gracias.

A la empresa HYDROINGENIERIA S.A.S, quien me abrió sus puertas y me brindó la oportunidad de poner en práctica los conocimientos y valores adquiridos en mi formación como Geóloga en la UIS.

A mi director de proyecto de grado. Ingeniero y profesor de la universidad Luis Eduardo Moreno Torres quien me brindo su colaboración y ayuda, haciendo valiosos aportes y sugerencias durante el desarrollo y la culminación de este trabajo.

A mi tutor y amigo el Geólogo Juan Camilo Gómez Royero que me dedico su tiempo y sus conocimiento. Gracias por la ayuda y apoyo incondicional (manito).

A el ing. Iván Camilo Galvis Tarazona por darme la oportunidad de desarrollar la presente tesis en su empresa. Gracias por su ayuda y predisposición.

A mis amigos que fueron mi apoyo incondicional y con los que crecí como persona cada día un poco más. Gracias por dejarme ser parte de sus vidas y por su amistad.

A mi profesor, entrenador y amigo Hugo Mario Matuk que me enseñó el valor de la disciplina y el trabajo en equipo. Gracias por tantos buenos consejos. “no sirve de nada ser un gran profesional si no se es una buena persona”, hay que divertirse haciendo lo que realmente nos apasiona”. Gracias.

Al voleibol y a mis compañeras de equipo que hicieron de mi paso por la universidad una experiencia inolvidable. Gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	18
1. OBJETIVO GENERAL .....	20
1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	20
2. JUSTIFICACIÓN .....	21
3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....	24
4. MARCO TEORICO .....	25
4.1 CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO, DISTRIBUCIÓN Y MIGRACIÓN DEL HIDROCARBURO	25
4.1.1 Relación entre la zona contaminada y anomalías de resistividad .....	27
4.2 LA GEOFÍSICA AMBIENTAL.....	27
4.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE CORRIENTE CONTINUA .....	28
4.3.1 Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua .....	28
4.3.2 Resistividad eléctrica.....	32
4.3.3 Medición del potencial eléctrico.....	32
4.3.4 Relación geológica y resistividad eléctrica .....	35
4.4 MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA.....	37
4.4.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV) .....	38
4.4.2 Calicata eléctrica .....	39
4.4.3 Tomografía Eléctrica.....	40
4.5 TEORÍA DE LA TÉCNICA DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	41
4.5.1 Ventajas y desventajas de los diferentes arreglos para tomografías eléctricas.....	43
4.5.2 Configuraciones / Dispositivos.....	44

4.5.3	Definición del problema inverso.....	49
4.5.4	Teoría de inversión.....	50
4.6	PARÁMETROS PETROFÍSICOS .....	55
4.6.1	Modelo de un capilar - medio poroso.....	59
5.	MARCO GEOLOGICO .....	66
7.1	GEOLOGÍA REGIONAL .....	67
7.2	GEOLOGÍA LOCAL:.....	69
7.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	70
8	METODOLOGIA .....	72
8.1	PERFILES DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS .....	72
8.1.1	Instrumentación .....	72
8.1.2	Procedimiento de medición .....	73
8.2	DATOS DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO.....	79
8.3	MUESTREO DE SUELO Y AGUA .....	80
8.3.1	Descripción de los análisis físico-químicos realizados .....	83
8.4	PROCESAMIENTO DE DATOS GEOELÉCTRICOS.....	84
8.5	MODELACIÓN DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS .....	84
9.	VALORACIÓN DE INFORMACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	92
9.1	ANÁLISIS DEL INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO .....	92
9.2	ANÁLISIS ESTUDIO GEOELÉCTRICO PRELIMINAR GEOSOFTMINE .....	93
10.	RESULTADOS.....	96
10.1	Exploración geoelectrica.....	96
10.1.1	Piscinas (1-4).....	98

10.1.2 Piscinas (5-6).....	101
10.1.3 Landfarming.....	103
10.1.4 Zona de aspersión.....	105
10.2 MODELACIÓN PETROFÍSICA DEL SUELO.....	106
10.2.1 Modelación petrofísica del suelo – Zona saturada .....	108
11. INTERPRETACION DE RESULTADOS .....	111
11.1 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LOS DATOS DE RESISTIVIDAD .....	111
11.1.1 Piscinas (1-4).....	111
11.1.2 Piscinas (5-6).....	114
11.1.3 Landfarming.....	117
11.1.4 Zona de aspersión.....	119
11.2 DETERMINACIÓN DE ZONAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS.....	121
11.2.1 Piscinas (1-4).....	122
11.2.2 Piscinas (5-6).....	123
11.2.3 Landfarming. Celdas 1 – 2.....	124
11.2.4 Zona de aspersión.....	125
12. CONCLUSIONES .....	127
13. RECOMENDACIONES .....	129
BIBLIOGRAFIA.....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espacial de las zonas de estudio dentro de la planta de tratamiento ELOGY.....	22
Figura 2. Localización geográfica de la planta de tratamiento ELOGY.....	24
Figura 3. Modelo conceptual de un derrame.....	26
Figura 4. Gráfico de un dispositivo de resistividad.....	29
Figura 5. Vectores de densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite (Orellana, 1982). .....	31
Figura 6. Esquema básico Esquema básico de los métodos de resistividad. ....	33
Figura 7. Diferentes dispositivos usados en sondeos eléctricos de resistividad 1D, 2D y 3D con sus correspondientes factores geométricos (Loke.2001) .....	34
Figura 8. Dispositivo electródico convencional simétrico .....	38
Figura 9. Modelo de interpretación 1D.....	39
Figura 10. Etapas del procesamiento de inversión eléctrica .....	42
Figura 11. Dispositivo wenner.....	44
Figura 12. Dispositivo wenner- schlumberger .....	45
Figura 13. Dispositivo Polo-Polo .....	46
Figura 14. Dispositivo Polo-Dipolo. ....	47
Figura 15. Dispositivo Dipolo-Dipolo .....	48
Figura 16. Arreglo de bloques rectangulares utilizados en el modelo 2D .....	54
Figura 17. La dependencia de la resistividad de la concentración de diferentes soluciones. ....	56
Figura 18. Distribución de iones en la DEL, dependiendo de la concentración de la solución y del electro acuático neutral. $C = 1; 10; 100 \text{ mol / m}^3$ . Líneas continuas - concentración de iones, las líneas de puntos - potencial eléctrico de un líquido, mV. La distancia es en amstrom.....	58
Figura 19. Conductividad en una capa eléctrica doble para una solución de NaCl	59

Figura 20.Diferentes modelos de rock. 1 - Matrix no conductor de corriente eléctrica. 2. capilares finos (arcilla). 3. capilares gruesas (arena). 4. modelos equivalentes.....	61
Figura 21. La dependencia de la resistividad de arena y mezcla de arcilla de M y contenido de arcilla volumétrica en diversas concentraciones de NaCl.....	64
Figura 22.Mapa geológico del área de estudio. ....	66
Figura 23.Perfil estratigráfico local del área de estudio .....	70
Figura 24.Equipo utilizado para la medición de los datos de resistividad. ....	72
Figura 25.Distribución espacial de las zonas de estudio dentro de la planta de tratamiento ELOGY.....	74
Figura 26.Distribución de las tomografías realizadas en campo dentro del área de piscinas de la planta ELOGY. ....	75
Figura 27.Ubicación de los perfiles geoelectricos en la zona de landfarming. ....	76
Figura 28. Ubicación de los perfiles geoelectricos dentro del área de aspersión...	77
Figura 29. Montaje de adquisición de datos en el área de landfarming en la planta ELOGY.....	78
Figura 30. Diagrama de posicionamiento del equipo de la forma Roll Along.....	79
Figura 31. Diagrama de flujo de agua subterránea.....	80
Figura 32. Piezómetro PZ.8 ubicado adjunto a la zona de Landfarming.....	81
Figura 33. Distribución de los puntos de muestreo de agua y suelo en la planta ELOGY.....	82
Figura 34.Caja de resistividad (Soil box resistivity).....	84
Figura 35. Formato de entrada *swo.....	85
Figura 36.Formato de datos tipo *.exp .....	86
Figura 37. Ventana de inicio de PetroWin, opción para lectura de archivo *swo ...	87
Figura 38. Opción para lectura de archivo *exp .....	88
Figura 39. Opción de cálculo de propiedades de la muestra de suelo.....	88
Figura 40.Procesamiento de datos experimentales de muestra de roca .....	89
Figura 41. Ventana de dialogo con información sobre resultados de la muestra...	90

Figura 42. Ventana para ingresar a la opción “To calculate the teoretical curves of mixture” .....	91
Figura 43. Cuervas teóricas obtenidas por el software PetroWin .....	91
Figura 44. Distribución SEV desarrollados por GEOSOFTMINE. ....	94
Figura 45. Perfiles geoelectricos de resistividad (P1, P2, P3 y P4) localizados en la zona de piscinas 1-4. ....	100
Figura 46. Perfiles geoelectricos de resistividad (P5, P6, P7 y P8) localizados en la zona de piscinas 5-6. ....	102
Figura 47. Perfiles geoelectricos de resistividad (P9, P10, P11 y P12) localizados en el área de Landfarming. ....	104
Figura 48. Perfiles geoelectricos de resistividad (P13, P14 y P15) localizados en el área de Aspersión. ....	105
Figura 49. Relación resistividad del suelo y la salinidad del agua para las muestras MS1 y MS2. ....	107
Figura 50. Modelo petrofísico de suelo MS 1 para condiciones de completa saturación .....	109
Figura 51. Modelo petrofísico de suelo MS 2 para condiciones de completa saturación. ....	110
Figura 52. Capa de sedimentos no consolidados localizados en áreas adjuntas a la piscinas 1-4. ....	111
Figura 53. Perfiles geoelectricos de resistividad (P1, P2, P3 y P4) localizados en la zona de piscinas 1-4. ....	112
Figura 54. Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Piscinas 1 – 4...	113
Figura 55. Perfiles geoelectricos de resistividad (P5, P6, P7 y P8) localizados en la zona de piscinas 5-6. ....	115
Figura 56. Capa de sedimentos no consolidados localizados en áreas adjuntas a la piscinas 5-6. ....	116
Figura 57. Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Piscinas 5 – 6...	116
Figura 58. Perfiles geoelectricos de resistividad (P9, P10, P11 y P12) localizados en el área de Landfarming. ....	118

Figura 59. Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Landfarming. ....	119
Figura 60. Perfiles geoelectricos de resistividad (P13, P14 y P15) localizados en el área de Aspersión.....	120
Figura 61. Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de aspersión .....	121
Figura 62. Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de las piscinas 1-4. En gris se exhiben las zonas contaminadas .....	123
Figura 63. Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de las piscinas 5-6. En negro se exhiben las zonas contaminadas.....	124
Figura 64. Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en la zona de Landfarming. En gris se exhiben las zonas contaminadas .....	125
Figura 65. Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de aspersión .....	126

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistividad de algunas rocas, materiales y químicos (Loke, 2001). .....	37
Tabla 2. Características de los perfiles geoelectricos del área de piscinas. ....	75
Tabla 3. Datos de los perfiles geoelectricos realizados en la zona de landfarming. .....	76
Tabla 4. Datos de los perfiles geoelectricos de la zona de aspersión.....	77
Tabla 5. Datos de piezómetros .....	80
Tabla 6. Resultados del análisis de porcentaje de arcilla, arena y limo reportados por Antek S.A.....	93
Tabla 7. Resultados del estudio geoelectrico desarrollado por GEOSOFTMINE. .	95
Tabla 8. Características de los perfiles geoelectricos. ....	97
Tabla 9. Datos recolectados de los piezómetros de la red de monitoreo de aguas subterráneas. Valores de resistividad y nivel piezométrico del agua subterránea ELOGY.....	106
Tabla 10. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelo MS 1- 2.....	108

## RESUMEN

**TÍTULO: IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA Y MODELAMIENTO DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS DEL SUELO EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES ELOGY. PORE, CASANARE**

**AUTORES: ASTRID ANDREA SANCHEZ MARTINEZ\*\***

**PALABRAS CLAVE:** Tomografías eléctricas, Modelamiento de parámetros petrofísico, rango de contaminación.

### DESCRIPCIÓN

El uso de tomografías de resistividad eléctrica en conjunto con la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo ha obtenido un impacto sustancial en la delimitación de posibles zonas contaminadas por hidrocarburos, dado que proporciona información valiosa acerca de la distribución espacial del contaminante en el subsuelo de una manera rápida y efectiva. Esta metodología fue aplicada en la caracterización de dos posibles áreas contaminadas por hidrocarburos dentro de la planta de tratamiento de residuos industriales ELOGY ubicada a las afueras del Municipio de Pore en el departamento de Casanare.

Dentro de la planta ELOGY se llevaron a cabo quince (15) perfiles geoeléctricos con una extensión de 100m - 64m y separación entre electrodos de 1m – 0.8m alcanzando profundidades de investigación de 13m, distribuidos en las zonas de piscinas y landfarming que corresponden a las áreas directas de estudio y en una zona de no contaminación por hidrocarburos (zona de aspersión planta ELOGY) que permitirá verificar la metodología implementada.

Con el objetivo de brindar un mayor respaldo a los resultados obtenidos por las tomografías se hace necesario la creación del modelo petrofísico del suelo en el área de estudio, el cual fue realizado a través de la correlación de los datos de resistividad obtenidos por medio de los perfiles geoeléctricos y los valores de salinidad del agua de poro y algunas otras características como porcentaje de arcillas y porosidad, adquiridos de las muestras de suelo y agua extraídas de la zona, permitiendo establecer un rango de contaminación.

El rango de contaminación obtenido mediante la modelación petrofísica corresponde a 1252 Ohm.m en condiciones de completa saturación que permite definir la existencia de algunas áreas contaminadas dentro de las zonas de landfarming y piscinas 1-4, con profundidades variables.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, aunque cabe resaltar que el presente trabajo es tan solo un estudio preliminar, que brinda indicios de las grandes ventajas que este método podría ofrecer al estudio de contaminación por hidrocarburos.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Programa de Geología. Director: Ingeniero. LUIS EDUARDO MORENO TORRES Co-Director UIS: Geólogo. JUAN CAMILO GOMEZ ROYERO

## ABSTRACT

**TITLE: IDENTIFICATION OF AREAS FOR HYDROCARBONS CONTAMINATED BY APPLYING GEOELECTRIC SURVEY METHODS AND MODELING PETROPHYSICAL PARAMETERS OF SOIL TREATMENT PLANT IN INDUSTRIAL WASTE ELOGY. PORE, CASANARE**

**AUTHORS: ASTRID ANDREA SANCHEZ MARTINEZ \*\***

**KEY WORDS:** Tomography electrical, Modeling of petrophysical parameters, Range of contamination

### CONTENT

The use of Tomography electrical resistivity in conjunction with the modeling of petrophysical parameters of soil obtained a substantial impact on the identification of possible areas contaminated by hydrocarbons, since it provides valuable information about the spatial distribution of contaminants in the subsurface from a quickly and effectively. This methodology was applied in the characterization of two possible areas contaminated by hydrocarbons within the treatment plant ELOGY industrial waste located on the outskirts of the municipality of Pore in the department of Casanare.

Inside the plant ELOGY conducted fifteen (15) geoelectric profiles with an area of 100m - 64m and electrode spacing of 1m - 0.8m reaching depths of 13m research, distributed in areas of pools and landfarming corresponding to the direct study in an area of no hydrocarbon contamination (plant spray zone Elogy) that enables verify methodology implemented areas.

With the aim of providing greater support for the results obtained by Tomographies is necessary the creation of the petrophysical model of soil in the study area, which was made through the correlation of resistivity data obtained is made necessary by the geoelectric profiles and salinity values of pore and some other features like porosity and percentage of clay, acquired from soil and water samples taken from the area, thus allowing for a range of contamination.

The range of contamination obtained by petrophysical modeling corresponds to 1252 Ohm.m in complete saturation that defines the existence of some contaminated areas within 1-4 landfarming and pools with varying depths areas.

The results are satisfactory, although it should be noted that this study is only a preliminary study that provides evidence of the great advantages that this method could offer to the study of hydrocarbon contamination.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Programa de Geología. Director: Ingeniero. LUIS EDUARDO MORENO TORRES Co-Director UIS: Geólogo. JUAN CAMILO GOMEZ ROYERO.

## INTRODUCCION

La contaminación del recurso agua y suelo es uno de los mayores problemas medioambientales que se presentan en la actualidad. En años recientes, la contaminación de los suelos y aguas subterráneas por hidrocarburos ha motivado la investigación de nuevas tecnologías que permitan la identificación y delimitación de las zonas contaminadas. Por tal razón, el empleo de técnicas geofísicas para estudios medioambientales se ha convertido en una herramienta esencial en la caracterización y estudio del subsuelo. Especialmente, el empleo de métodos de prospección geoeléctrica en unión con la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo es una de las técnicas recientemente más utilizadas en la identificación de suelos contaminados por hidrocarburos, ya que ofrecen resultados satisfactorios con gran exactitud y rapidez.

Los métodos geoeléctricos consisten en introducir corriente en el terreno y medir el voltaje producido por la misma en puntos determinados de la superficie. A partir del valor de la corriente inyectada y del voltaje medido, se obtiene valores de resistividad del objeto o zonas del subsuelo. Uno de los métodos geoeléctricos más usado en la actualidad son las tomografías de resistividad eléctrica que permiten conocer las dimensiones y profundidad de estructuras o cuerpos en el subsuelo mediante la realización de imágenes en dos dimensiones de la variación espacial de la resistividad.

La creación de un modelo petrofísico del área de estudio mediante el cálculo de los Parámetros Petrofísicos (PP) a partir de datos de resistividad del suelo, que involucra además análisis de laboratorios del suelo y agua de la zona, como salinidad del agua de poro, contenido de arcilla en el suelo, y datos de resistividad del agua, sirven como fuente de apoyo para determinar los límites de resistividad que permitan diferenciar entre un suelo limpio y un suelo contaminado logrando una mejor caracterización del comportamiento eléctrico del subsuelo. En un área que presente contaminación reciente por hidrocarburo las propiedades eléctricas

del suelo producen altas anomalías resistivas debido a la influencia del contaminante (hidrocarburo), ya que este posee características de un aislante eléctrico lo que produce una disminución en la conductividad eléctrica y por tal razón un aumento en los valores de resistividad que nos permiten diferenciarlo del agua fresca.

El presente proyecto busca delimitar posibles zonas contaminadas por hidrocarburos en las áreas de extracción y biorremediación de hidrocarburos que corresponden a las zonas de piscinas y landfarming dentro de la planta de tratamiento de residuos industriales ELOGY, a partir de la implementación de tomografías de resistividad eléctrica y la determinación e interpretación de los parámetros petrofísicos del suelo, Además cabe resaltar que este proyecto corresponde a un estudio preliminar que busca evaluar la eficiencia de esta nueva metodología en la determinación de posibles zonas contaminadas.

## **1. OBJETIVO GENERAL**

Delimitar las posibles zonas contaminadas por hidrocarburos mediante la aplicación de tomografías eléctricas y la modelación de los parámetros petrofísicos del subsuelo, en cada una de las áreas de estudio de la planta de residuos industriales ELOGY.

### **1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

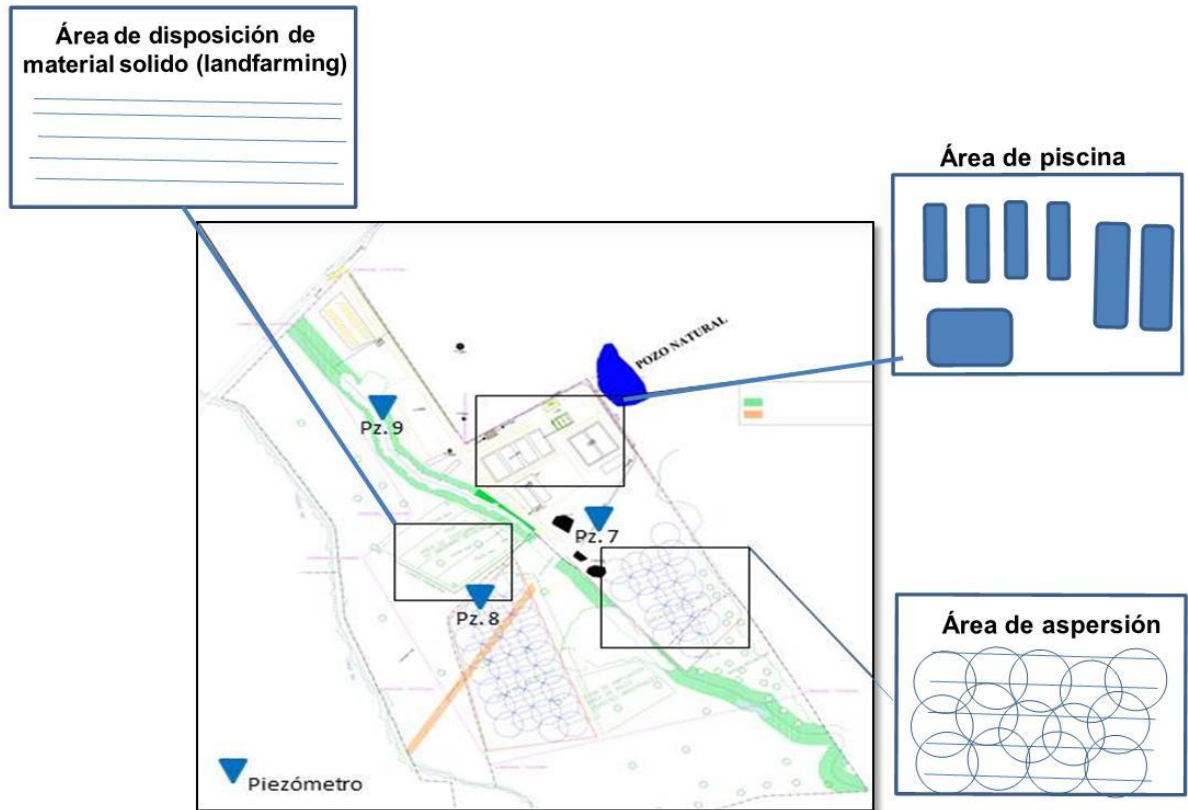
- Describir la metodología empleada para la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo.
  
- Emplear tomografías eléctricas en conjunto con la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo en la caracterización de suelos contaminados por hidrocarburos
  
- Evaluar la distribución y disposición de posibles zonas contaminadas por hidrocarburos en la planta ELOGY.
  
- Obtener imágenes de la variación espacial de la resistividad eléctrica en el subsuelo que muestren la distribución de las zonas contaminadas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto es elaborado por la empresa HYDROINGENERIA.S.A.S para la empresa ELOGY encargada del tratamiento de residuos aceitosos generados en la operación de campos petroleros, utilizando tratamientos físico-químicos y de biorremediación *ex situ* de tipo aerobio, a través de técnicas de landfarming a campo abierto y piscinas, que consisten en extraer el contaminante en un lugar bajo condiciones controladas de laboratorio, con el fin de recuperar el hidrocarburo presente en los residuos y retornarlos a la operación petrolera.

- Área de piscinas: Esta área corresponde a piscinas recubiertas por pequeñas membranas impermeables unidas, donde son depositados los residuos, que contienen agua, hidrocarburo y sedimentos, los cuales son separados por densidad, el hidrocarburo extraído es devuelto al cliente mientras que los sedimentos y el agua son tratados para luego ser reintegrados al ambiente. Figura 1.
- Área de Landfarming: en esta área son llevados los residuos sólidos es decir los sedimentos, los cuales han sido tratados con métodos de biorremediación aeróbicas, los sedimentos se dispersan en esta zona y se son monitoreados constantemente.

**Figura 1.** Distribución espacial de las zonas de estudio dentro de la planta de tratamiento ELOGY.



La empresa HYDROINGENIERIA.S.A.S tiene como finalidad la delimitación de posibles zonas contaminadas por hidrocarburos en las áreas de piscinas y landfarming, ya que se desea establecer la existencia de posibles fugas en el área de piscinas, además de evaluar la presencia de hidrocarburos en el área de landfarming dentro de la planta ELOGY.

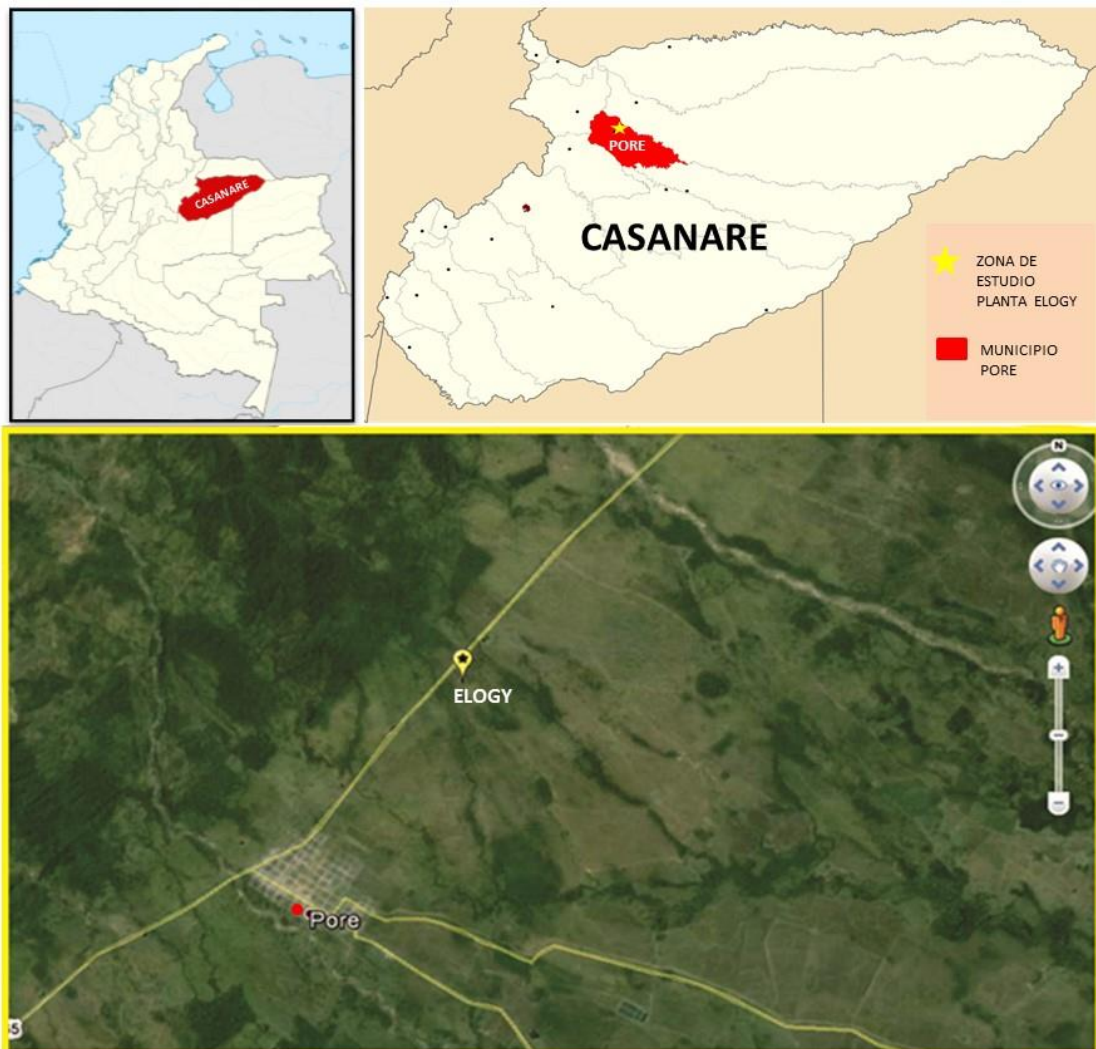
La determinación de posibles áreas contaminadas por hidrocarburos se llevara a cabo a través del empleo de una nueva metodología que implementa tomografías eléctricas de resistividad y la modelación de parámetros petrofísicos del suelo en la caracterización y delimitación de posibles zonas contaminadas por hidrocarburos, esta nueva metodología ha obtenido resultados satisfactorios en el

determinación y caracterización de suelos contaminados por hidrocarburos, ya que muestra a través de imágenes bidimensionales, la localización y distribución de las zonas contaminadas de una manera rápida y eficiente permitiendo así efectuar un diagnóstico preliminar de la zona y dejando abierto cualquier posible acción de remediación que se desee realizar y así evitar un mayor deterioro ambiental.

### 3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La planta de tratamiento de residuos industriales asociados a la industria petrolera ELOGY, se encuentra localizada en el predio Punto Nuevo, situado en la vereda Guachiría, localizado a 3 Km del casco urbano del Municipio de Pore, al este de la vía que conduce al Municipio de Paz de Ariporo en el Departamento de Casanare. La *Figura 2* muestra la ubicación geográfica de la planta ELOGY.

**Figura 2.** Localización geográfica de la planta de tratamiento ELOGY.



Fuente: Google Inc.

## 4. MARCO TEORICO

### 4.1 CONTAMINACIÓN DEL SUBSUELO, DISTRIBUCIÓN Y MIGRACIÓN DEL HIDROCARBURO

Uno de los mayores problemas ambientales en la actualidad es la contaminación de los ecosistemas terrestres y acuáticos debido a derrames y fugas de hidrocarburos y sus derivados. En Colombia se han derramado millones de barriles de petróleo en el suelo, como es el caso de Maravales en Putumayo, o Sincelejo Ayacucho-Coveñas, entre otros donde estos derrames han generado impactos negativos al medio ambiente, además de impactos económicos, sociales y de salud pública, debido a los atentados terroristas contra oleoductos, y a los frecuentes incidentes que se presentan en los procesos de transporte y almacenamiento de hidrocarburos.

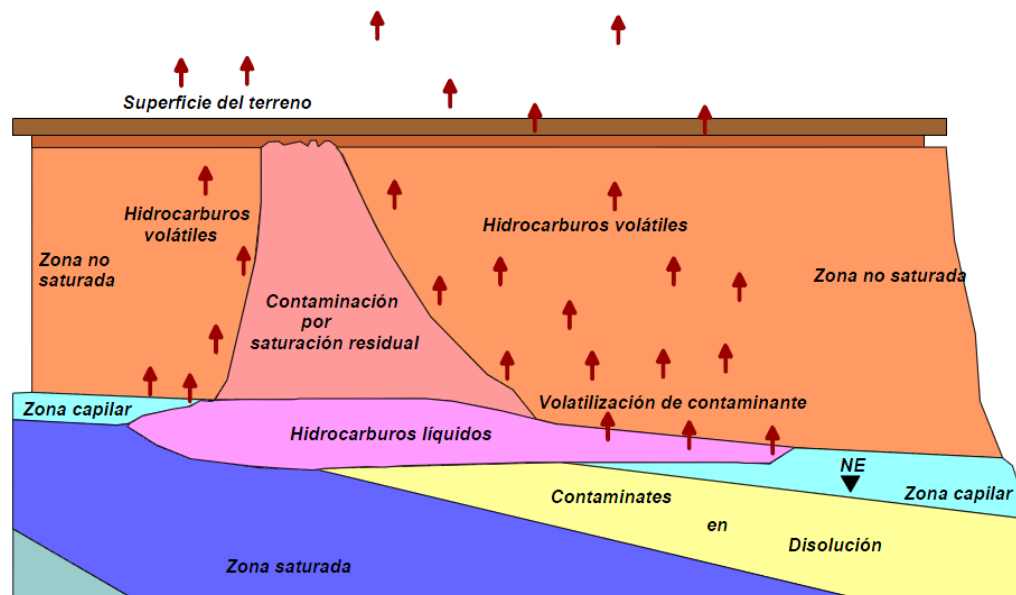
En el caso de los suelos, las principales consecuencias ambientales que se presentan después de un evento de contaminación por hidrocarburos son la reducción o inhibición del desarrollo de la cobertura vegetal en el lugar del derrame, los cambios en la dinámica poblacional de la fauna, de la biota microbiana y, finalmente, la contaminación por infiltración a cuerpos de agua subterránea. El impacto ambiental de los desechos liberados sería mínimo si permanecieran en el punto de liberación; desafortunadamente, la mayoría de los desechos migran hasta afectar un área extensa. Esta migración es generalmente a través de capas permeables, estructuras geológicas o aguas subterráneas. Es por esto que la principal preocupación de los derrames de estos compuestos es el potencial de migración que posee en diferentes direcciones en la zona saturada y en dirección vertical en la zona no saturada (Madrid *et al.*, 2002).

Los derrames y fugas de hidrocarburos en suelos se pueden infiltrar dentro de este hasta alcanzar grandes extensiones y afectar al medio ambiente. Para que el proceso de transporte y movilidad de los LNAPL (líquidos livianos en fase no acuosa por sus siglas en inglés) se lleve a cabo debe existir una variedad de

parámetros. Entre ellos se pueden considerar las propiedades del propio LNAPL como la densidad, la viscosidad, la solubilidad, la presión de vapor, la volatilidad y la tensión interfacial, además de las características del suelo en el que se propaga (fuerza o presión capilar, distribución del tamaño de poros y contenido de agua inicial, estructura geológica de los estratos y características de las aguas subterráneas) y las funciones dependientes de la saturación (saturación residual y permeabilidad relativa).

El comportamiento de los productos del petróleo no siempre sigue el gradiente que se espera. La dirección, transporte y flujo multifase de los hidrocarburos dependen de procesos geoquímicos y procesos de volatilización, disolución, biodegradación, transporte y adsorción (figura 3). Los hidrocarburos pueden presentarse en el subsuelo en cualquiera de las siguientes fases: vapor, líquido, fase adsorbida y fase disuelta (Madrigal, 1998). De acuerdo con estas fases es el comportamiento que tendrá el contaminante al entrar en contacto con la matriz envolvente así como su migración hacia el subsuelo.

**Figura 3.** Modelo conceptual de un derrame.



Cuando se logra identificar un derrame de hidrocarburos o la fuente principal de la contaminación se deben llevar a cabo las acciones pertinentes para conocer el impacto de su migración y las posibilidades del saneamiento del suelo.

#### **4.1.1 Relación entre la zona contaminada y anomalías de resistividad.**

Cuando una fuga de líquidos en fase no acuosa ligera (LNAPL) se lleva a cabo, penetra en el subsuelo, produciendo un cambio en sus propiedades físico - químicas, modificando la resistividad eléctrica entre ellos. La diferencia entre la resistividad del suelo contaminado y limpio depende de factores como la edad de evento de contaminación. En caso de fuga reciente, el suelo contaminado crea anomalías de alta resistividad, siendo generalmente producida por el comportamiento aislante de los hidrocarburos. Por otro lado, cuando la fuga es de edad (a partir de cuatro meses a un año después de la contaminación, o más) la contaminación del aceite crea anomalías de baja resistividad.

La contaminación por hidrocarburo maduro aumenta ligeramente la conductividad del agua, produciendo cambios en la estructura de poro y rellenando los poros con productos de biodegradación, lo que produce cambios de conductividad superficial en los poros (Abdel Aal et al., 2004). Este efecto de la resistividad del suelo es equivalente al aumento de contenido de arcilla que se pueden encontrar en el proceso de estimación de contenido de arcilla y se utiliza como criterio para discriminar zonas contaminadas de petróleo.

## **4.2 LA GEOFÍSICA AMBIENTAL**

A lo largo de la década de 1990, los métodos utilizados para caracterizar los sitios contaminados con desechos peligrosos han cambiado considerablemente. La caracterización de estos sitios, a menudo requerían de un largo plazo para la obtención de datos suficientes que apoyaran las decisiones correctivas, lo que han llevado a la aparición de una serie de técnicas innovadoras, diseñadas para

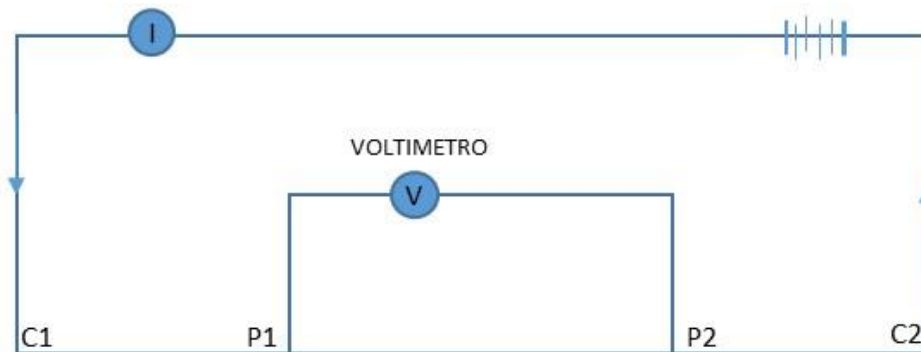
acelerar la adquisición de datos, aumentar la cantidad de información recopilada y reducir los costos con el fin de optimizar la caracterización de sitios contaminados, Este conjunto de tecnologías corresponden a las técnicas geofísicas (Georadar (GPR), Electromagnética, Sísmica de reflexión/Refracción, Resistividad y Conductividad Eléctrica, Magnetometría) (EPA, 2000). La técnica implementada en el presente trabajo corresponde a la prospección eléctrica, a través de tomografías eléctricas en conjunto con la modelación de parámetros petrofísicos cuyos fundamentos teóricos se describen a continuación.

### **4.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE CORRIENTE CONTINUA**

El método de exploración eléctrica de corriente continua estudia, por medio de mediciones en la superficie, la distribución de la propiedad de resistividad en el subsuelo. Las rocas son agregados de minerales con una serie de propiedades físicas que, analizadas por medio de diversos equipos (dependiendo la metodología), permiten inferir el tipo de roca o estructura geológica asociada. Las respuestas obtenidas a través de esta metodología están en función de las propiedades eléctricas de las rocas, en particular de la capacidad de conducir corriente (resistencia o conductividad).

**4.3.1 Corrientes eléctricas en medios homogéneos y de capas horizontales en corriente continua.** Para establecer un campo eléctrico en un medio de resistividad  $\rho$ , es necesario hacer circular una corriente eléctrica por medio de dos fuentes (electrodos de corriente) (Figura 4). Este sistema de exploración geoelectrica se compone de un generador que transmite corriente eléctrica directa por medio de cables cuyos extremos se unen a los electrodos (barras conductoras de metal) enterradas en la superficie del terreno, generando un circuito eléctrico.

**Figura 4.**Gráfico de un dispositivo de resistividad.



Para resolver el campo eléctrico generado por este sistema de electrodos nos basamos en las siguientes ecuaciones (Orellana, 1982).

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta S}{\delta t} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (6.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t} \quad \text{Ley de Ampere} \quad (6.2)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\delta p}{\delta t} \quad \text{Ley de Continuidad} \quad (6.3)$$

$$J = \sigma E \quad \text{Ley de Ohm} \quad (6.4)$$

La Ley de Faraday establece que, al existir un campo magnético (B) que varía en el tiempo, es compensado por un campo eléctrico. A su vez, la Ley de Ampere indica que el flujo de una corriente eléctrica produce un campo magnético en el espacio circundante. La Ley de continuidad establece que en un medio sin cargas puntuales ( $\frac{\delta \rho}{\delta t} = 0$ ), la corriente introducida en un volumen de control debe necesariamente salir de él a la misma tasa. La Ley de Ohm representa la densidad de corriente J en un punto teniendo la misma dirección y sentido que el campo E

en el mismo punto, y proporcional a él.  $\sigma$  es la conductividad, inversa de la resistividad  $\rho$ .

Para el caso específico de un campo eléctrico producto de una fuente de corriente continua, las ecuaciones de Maxwell se reducen a un sistema vectorial estacionario:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (6.5)$$

$$\nabla \times H = J \quad (6.6)$$

De tal forma que el campo eléctrico es irrotacional, es decir deriva de un potencial escalar  $U$ , tal que:

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (6.7)$$

Considerando la ecuación de continuidad y la Ley de Ohm e insertando la definición de potencial escalar, tenemos que:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = \sigma \nabla \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 U + \vec{E} \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (6.8)$$

Si la conductividad de un medio es uniforme el gradiente de la conductividad es cero, de tal forma que el potencial eléctrico en condiciones estacionarias cumple con la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (6.9)$$

Si se traza alrededor de un electrodo  $C1$  y dentro del semiespacio inferior una superficie semiesférica, en cualquier punto de ella, por razón de simetría, la

densidad de corriente  $J$  tendrá el mismo valor y estará dirigida radialmente (figura. 5). La integral de  $J$  sobre la superficie semiesférica será igual a  $I$  por lo que si el radio es  $r$  se tiene:

$$2\pi r^2 J = I \quad (6.10)$$

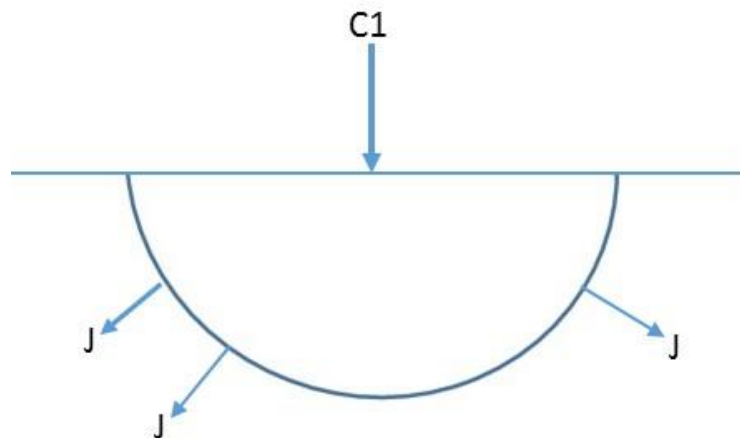
$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (6.11)$$

Dónde:

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (6.12)$$

Esto significa que el campo  $E$  de un electrodo es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia  $r$ .

**Figura 5.** Vectores de densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie limite (Orellana, 1982).



**4.3.2 Resistividad eléctrica.** El método de resistividad eléctrica en corriente continua está regido por la Ley de Ohm, la cual dice que en la mayoría de los casos, la corriente fluye a través de un conductor y ésta es proporcional al voltaje:

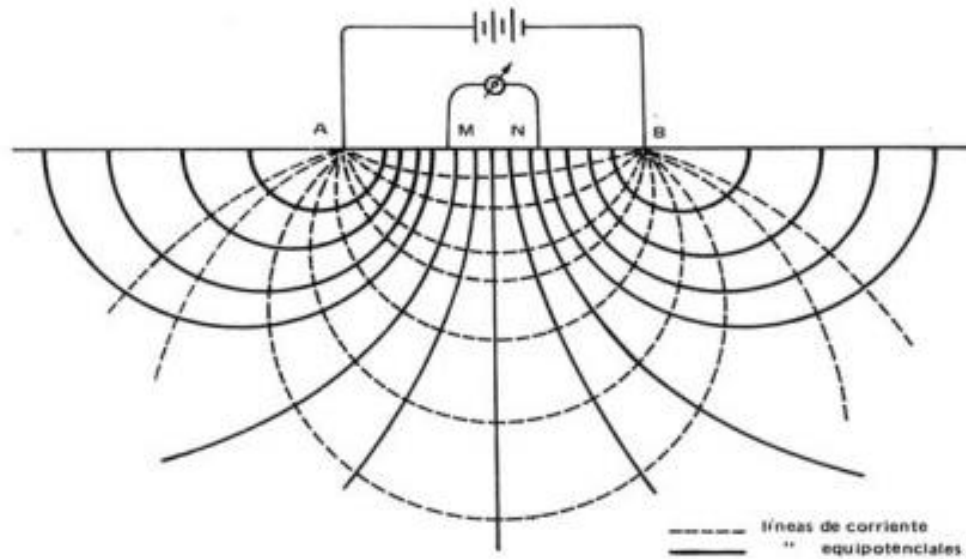
$$V = IR \quad (6.13)$$

Donde  $R$ , representa una constante de proporcionalidad, también llamada resistencia, cuya unidad es el ohm, el voltaje  $V$  en volts y la corriente  $I$  en amperes, en el Sistema Internacional. El recíproco de la resistencia, la conductancia, se mide en siemens o omhs. La resistencia eléctrica de una unidad cúbica a una corriente circulando entre dos caras opuestas se llama resistividad ( $\rho$ ) y se mide en ohm-metro ( $\Omega \cdot m$ ). Físicamente, la resistividad eléctrica es la capacidad que tiene cada material para oponerse al paso de una corriente eléctrica, a su vez, el inverso de la resistividad es la conductividad.

### **4.3.3 Medición del potencial eléctrico**

**4.3.3.1 Definición de arreglos geoelectricos.** *Para medir el potencial eléctrico se utilizan dos barras a modo de electrodos ( $M$  y  $N$ ) que miden la diferencia de potencial, como se muestra en la figura 6.*

**Figura 6.** Esquema básico Esquema básico de los métodos de resistividad.



La diferencia de potencial  $I$  entre los electrodos de voltaje (M, N), es la diferencia de la suma de los potenciales asociados a los electrodos de corriente en cada punto (A, B). Si el medio es homogéneo de resistividad  $\rho$ , la diferencia de potencial es (Orellana, 1982).

$$\nabla U = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (6.14)$$

Donde  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  y  $r_4$  son la distancia entre electrodos. Despejando la resistividad de la ecuación 6.13, la expresión queda:

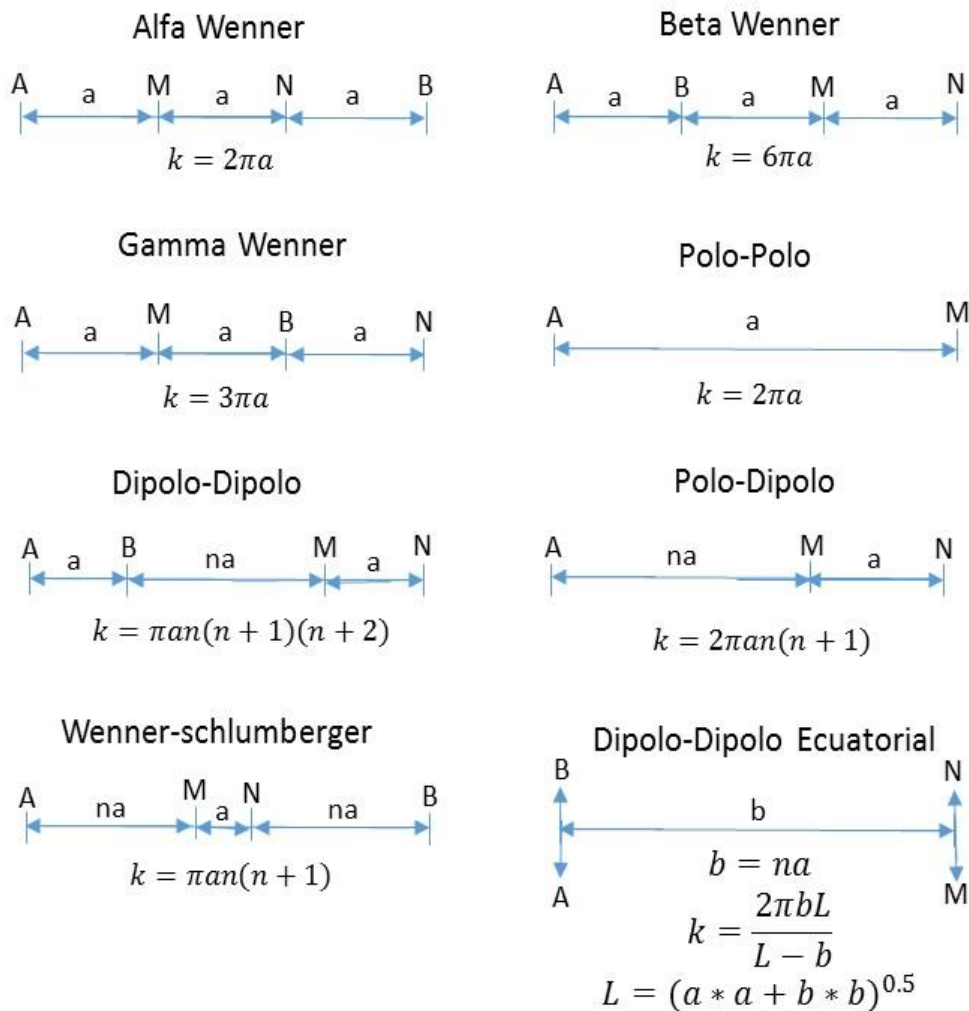
$$\rho = k \frac{\Delta U}{I} \quad (6.15)$$

Dónde:

$$k = 2\pi \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (6.16)$$

Es un factor geométrico que depende de la disposición de los electrodos. Tomando en cuenta esto, se pueden definir diferentes tipos de arreglos geométricos de electrodos (figura 7).

**Figura 7.** Diferentes dispositivos usados en sondeos eléctricos de resistividad 1D,2D y 3D con sus correspondientes factores geométricos (Loke.2001)



K= Factor Geométrico

Estos cuatro electrodos (A-B, M-N) pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre un plano que representa la superficie del terreno, estas disposiciones se denominan *modalidades, dispositivos, configuraciones* o *arreglos* (Urbietta, 2001).

**4.3.3.2 Resistividad aparente.** Los cálculos anteriores se emplean para un subsuelo homogéneo. La utilización de la ecuación 6.14 permite obtener la resistividad verdadera del medio, aunque esto es muy difícil de encontrar en los diferentes medios a explorar. Si se mide el terreno heterogéneo y se llevan los datos a la fórmula 6.14 se obtendrá una resistividad aparente  $\rho_a$  que dependerá de los diferentes valores de resistividad (propiedad de cada medio) y de las distancias  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  y  $r_4$ . Es importante tomar en cuenta que no es el promedio de cada resistividad presente, sino una medición individual que se asocia al punto inmediatamente bajo el centro de la modalidad de electrodos (Urbietta, 2001). Esta resistividad, que se obtiene aplicando la expresión de medios homogéneos, a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo, es la resistividad aparente. Las dimensiones y unidades, ohm-m ( $\Omega \cdot m$ ), son las mismas para ambas (Orellana, 1982).

**4.3.4 Relación geológica y resistividad eléctrica.** Los sondeos de resistividad eléctrica proporcionan una imagen de la distribución de resistividad del subsuelo. Para convertir esa imagen en una aproximación de la estructura geológica del subsuelo es importante conocer la variación de este parámetro (resistividad aparente) en los diferentes tipos de materiales que lo constituyen.

En la tabla 1, se observa que las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad, lo cual depende en gran medida del grado de fracturamiento que tienen, además del porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que hace disminuir sus valores de resistividad. Los suelos húmedos y el agua subterránea tienen valores aún más bajos. Para los suelos arcillosos, las resistividades son normalmente menores que las correspondientes al suelo arenoso. Aun con las características de cada tipo de material, se observa que existe superposición en los valores de resistividad debido a que este parámetro depende de factores como la porosidad, el grado de saturación de agua, la concentración de sales disueltas y la temperatura.

La resistividad del agua del terreno varía desde 10 a 100 ohm-m dependiendo de la concentración de sales disueltas. En la tabla 1 también se reporta el valor de resistividad de varios contaminantes industriales. Los metales, como el hierro, tienen valores sumamente bajos. La presencia de químicos, como sodio y cloruro de potasio, en el suelo producen una importante reducción en la resistividad del terreno a menos de 1ohm-m, con concentraciones moderadas. El efecto de electrolitos, como el ácido acético, es comparativamente menor. Algunos de los compuestos de hidrocarburos, como el xileno, tienen resistividades muy altas.

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que su resistividad, además de depender de su composición intrínseca, dependa de factores externos como la temperatura, humedad, presión, etc. que pueden provocar que las resistividades de un mismo suelo cambien con el tiempo (Gasula, 1999).

**Tabla 1.** Resistividad de algunas rocas, materiales y químicos (Loke, 2001).

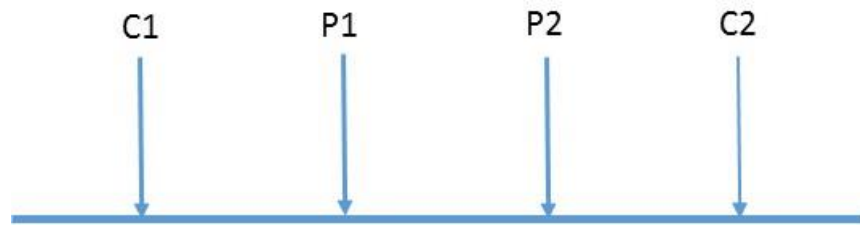
	Material	Resistividad ( $\Omega\text{-m}$ )	Conductividad eléctrica (siemens/m)
Rocas igneas y metamórficas	Granito	$5 \times 10^3 - 10^8$	$10^{-8} - 2 \times 10^{-4}$
	Basalto	$10^3 - 10^0$	$10^{-0} - 10^{-3}$
	Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^8 - 1.7 \times 10^{-3}$
	Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
	Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Rocas sedimentarias	Areniscas	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
	Lutitas	$20 - 2 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.02$
	Calizas	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.22$
Agua y suelos	Arcilla	1-100	0.01-1
	Aluvión	10-800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
	Agua subterránea (no contaminada)	10-100	0.01-0.1
	Agua marina	0.2	5
Químicos	Hierro	$9.074 \times 10^{-8}$	$1.102 \times 10^7$
	0.01M Cloruro de potasio	0.708	1.413
	0.01M Cloruro de sodio	0.843	1.185
	0.01M Acido acético	6.13	0.163
	Xileno	$6.998 \times 10^{10}$	$1.429 \times 10^{-17}$

#### 4.4 MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA

A continuación se describen brevemente los métodos geoelectricos de corriente continua que actualmente se emplean para investigaciones 1D, 2D y 3D.

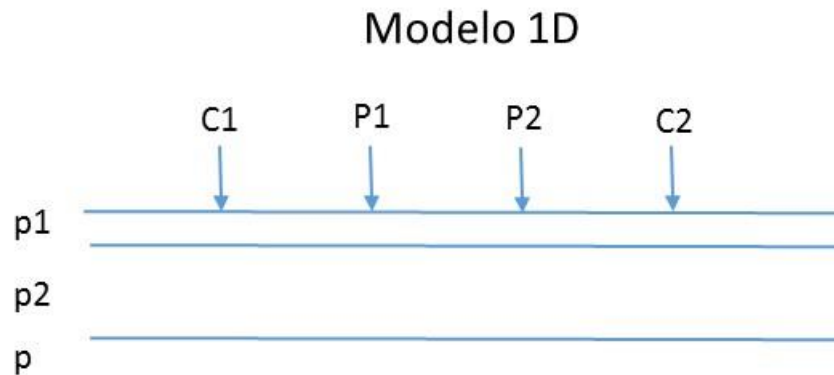
**4.4.1 Sondeo eléctrico vertical (SEV).** Este método tiene sus orígenes en la década de 1920 debido al trabajo de los hermanos Schlumberger. Para aplicar los SEV, el centro del arreglo de electrodos es fijo, pero el espaciamiento entre ellos aumenta para obtener información sobre secciones más profundas del subsuelo (Figura 8).

**Figura 8.** *Dispositivo electródico convencional simétrico*



Para la interpretación de los datos del sondeo 1D, se considera por lo general que el subsuelo se conforma por capas horizontales homogéneas e isotrópicas (figura 9). Para estos casos, la resistividad cambia únicamente con la profundidad ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p$ ), pero no cambia en la dirección horizontal. A pesar de esta limitación, el método presenta resultados útiles para situaciones geológicas en las que se puede suponer un modelo unidimensional (para la determinación del nivel freático, por ejemplo). La limitación más severa del método SEV es que en el subsuelo se presentan cambios de resistividad en direcciones horizontales. En muchos estudios que presentan una geología compleja la resistividad puede cambiar rápidamente en cortas distancias, aspecto que este método no detectará con la suficiente precisión (Loke, 2001).

**Figura 9.** Modelo de interpretación 1D



**4.4.2 Calicata eléctrica.** La Calicata Eléctrica se aplica en el estudio de las variaciones laterales de resistividad en el subsuelo, pero no puede detectar cambios verticales de resistividad (Urbieta, 2001). Es un método de investigación horizontal a profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos.

Las aplicaciones de la calicata eléctrica consisten en la detección de fisuras, fallas, contactos verticales en general y objetos o estructuras enterradas. La realización de calicatas en trayectorias paralelas permite trazar la cartografía de resistividades aparentes de un terreno a profundidad constante representada por curvas de isorresistividad. Estos mapas se aplican en arqueología para decidir sobre la estrategia a seguir en las excavaciones (Gasula, 1999).

Las distancias entre los electrodos de corriente y de potencial son constantes, por lo que el arreglo de electrodos se mueve sin cambiar la configuración. Su interpretación es principalmente cualitativa. No obstante, el objeto de la exploración es tomar la mayor cantidad posible de lecturas y tener buena resolución tanto vertical como horizontal, además de un procesamiento rápido de

información. La metodología que logra estas características es la Tomografía Eléctrica en 2D, que se describe a continuación.

**4.4.3 Tomografía Eléctrica.** Las Tomografía Eléctrica pueden considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectricos clásicos, como el SEV y la calicata eléctrica.

La técnica de la *Tomografía Eléctrica* emplea los valores de resistividad aparente medidos, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. Para calcular la distribución de la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente, se aplica la técnica de inversión desarrollada por Loke & Barker (1996).

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos. En este sentido conviene aclarar que la tomografía eléctrica no es en modo alguno comparable a las calicatas eléctricas convencionales ya que estas últimas únicamente proporcionan información de tipo cualitativo, aunque las medidas de campo se efectúen de forma similar en ciertos aspectos (Arias, 2011).

La Tomografía Eléctrica es, probablemente, el método de prospección geofísica más versátil para realizar análisis del subsuelo relacionados con la contaminación, dado que permite trabajar en profundidades muy variables y abordar múltiples objetivos, como la identificación de plumas de contaminación.

La tomografía eléctrica es un método prospectivo geoelectrico que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico,

diferenciándolos según sus valores de resistividad eléctrica, ya que indican el grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a través de ellos.

A partir de la ejecución de la campaña de prospección geoeléctrica aplicando tomografía se determinan los valores de resistividad diferentes que permitirán identificar unidades litológicas de distinta naturaleza y los contactos que las delimitan, definiendo las masas contaminantes y acotar los terrenos del subsuelo afectados por la contaminación (Aracil, *et al.*, 2002).

Este método se basa en la implantación de numerosos electrodos a lo largo de perfiles, con una separación determinada en función del grado de resolución que se necesite; como regla general, un estudio de tomografía de resistividad eléctrica requiere la obtención de un número muy elevado de datos, con un corto espaciado entre medida para conseguir la necesaria resolución lateral y también que las medidas se realicen involucrando de forma progresiva varios rangos de profundidad (Hernández *et. al.*, 2008). Cada uno de estos cuadripolos ya programados permite una medida de la resistividad que se atribuye a un determinado punto geométrico del subsuelo, cuya posición y profundidad en el perfil depende de la posición de dicho cuadripolo y de la separación entre los electrodos que lo conforman.

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o ambientales (Stewart, 1996).

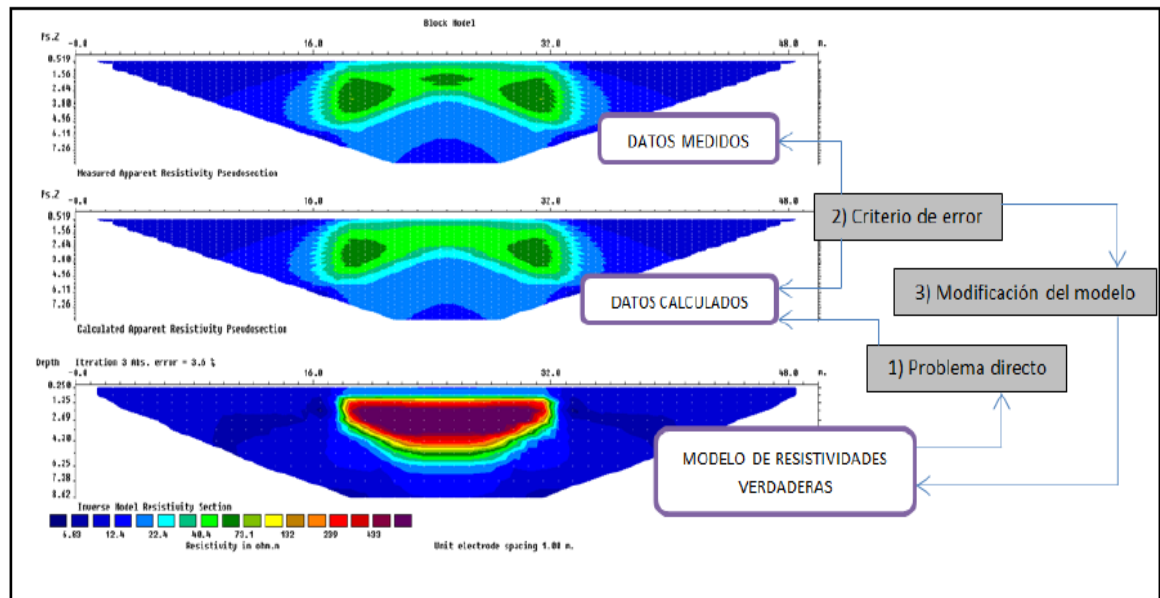
#### **4.5 TEORÍA DE LA TÉCNICA DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA**

El procedimiento de generación de una *Tomografía Eléctrica* mediante inversión, parte de los datos de resistividad aparente medidos, representados en forma de

pseudoperfil o pseudosección. A continuación se genera un modelo hipotético de resistividades verdaderas del subsuelo, y resolviendo lo que se define como “cálculo del problema directo”, se llega al modelo de resistividades aparentes que se derivaría del mismo. Estas resistividades aparentes se comparan con las realmente medidas, y se calcula el error entre estos modelos. A través de este error se modifica el modelo hipotético real de resistividades verdaderas, y se repite el proceso anterior. De este modo, tras una serie de iteraciones, se consigue un modelo de resistividades verdaderas del subsuelo que da explicación a las resistividades aparentes medidas (Arlandi, 2005).

La *Figura 10* describe gráficamente el procedimiento de inversión desarrollado para la generación de una *Tomografía Eléctrica*.

**Figura 10.** Etapas del procesamiento de inversión eléctrica



**4.5.1 Ventajas y desventajas de los diferentes arreglos para tomografías eléctricas.** Los diferentes tipos de configuraciones de electrodos tienen ventajas y desventajas particulares. La elección de la “mejor” configuración para un perfil de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, la sensibilidad del equipo y el nivel de profundidad de la zona de estudio.

En la práctica, los dispositivos más usados en la tomografía eléctrica para la obtención de imágenes de resistividad eléctrica en 2D son: a) Dipolo-Dipolo, b) Wenner-Schlumberger, c) Wenner, d) Polo-Polo y e) Polo-Dipolo.

Las consideraciones que deben tomarse en cuenta para sus usos son las siguientes:

- **La profundidad media de investigación.** Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad (Edwards, 1977). Hay que destacar que las profundidades son estrictamente válidas para un modelo homogéneo de la tierra. Si hay grandes contrastes de resistividad cerca de la superficie, la profundidad real de investigación podría ser diferente.
- **La sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales.** Se denomina sensibilidad al mínimo cambio en una dada cantidad (en este caso la resistividad) que la configuración puede percibir, en tanto que la resolución es la capacidad de distinguir separadamente dos rasgos u objetos cercanos, o dicho de otra forma, a la mínima separación que pueden tener dos cuerpos sin que sus identidades individuales se pierdan. La sensibilidad es una función que muestra el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influirá en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (McGillivray et al., 1990). Los

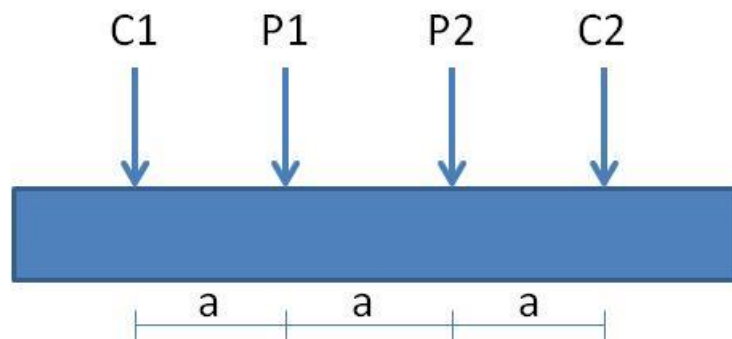
valores más altos de sensibilidad se encuentran cerca de los electrodos. El rango de sensibilidades es único para un modelo de subsuelo determinado y para todos los dispositivos. Entre más alta es la sensibilidad, más confiable es el modelo de resistividad.

- **La cobertura horizontal de datos / relación señal ruido.** No todos los tipos de arreglos tienen la misma cobertura, por ejemplo, el dispositivo Wenner-Schlumberger tiene una cobertura horizontal mejor comparada con el Wenner. Por su parte, la relación señal/ruido está estrechamente relacionada con el valor de la constante  $k$  de cada dispositivo y para el mismo modelo de subsuelo, esto es, a mayor valor de constante  $k$  menor será la señal de potencial medido y viceversa. En otras palabras, la señal es inversamente proporcional al factor geométrico usado para calcular el valor de resistividad aparente

#### 4.5.2 Configuraciones / Dispositivos

**4.5.2.1 Wenner.** Los electrodos se disponen de forma equidistante sobre una línea en el orden C1-P1 y P2-C2 (figura 11), cumpliéndose que la distancia entre electrodos consecutivos sea la misma.

**Figura 11.**Dispositivo wenner



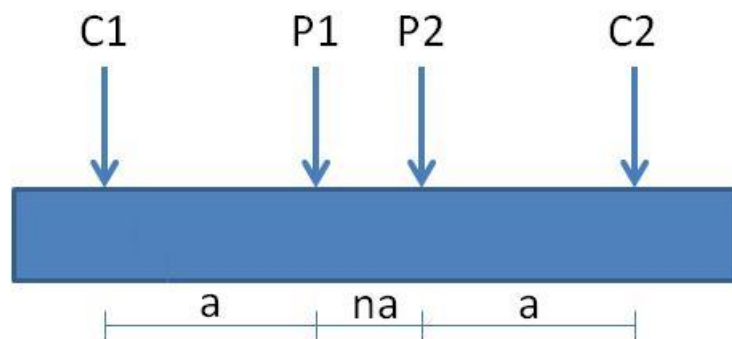
El factor geométrico del dispositivo se deduce de la ecuación. (6.17):

$$k = 2\pi a$$

En general, el dispositivo Wenner es eficaz resolviendo cambios verticales de resistividad (estructuras horizontales), pero una de sus desventajas es que es relativamente pobre en detectar los cambios horizontales (estructuras verticales estrechas) cuando el espaciamento entre electrodos se aumenta (Loke 2001).

**4.5.2.2 Wenner-Schlumberger.** Este es una configuración combinada entre los dispositivos Wenner y Schlumberger que consiste en una forma modificada del dispositivo Schlumberger con un espaciamento constante donde  $n$  es la relación entre la distancia de los electrodos C1-P1 (o P2-C2) y el par potencial P1-P2 (figura 12).

**Figura 12.** Dispositivo wenner- schlumberger



El factor geométrico del dispositivo es (ecuación 6.18):

$$K = \pi a n(n + 1)$$

Este arreglo es moderadamente sensitivo a estructuras horizontales y verticales. En áreas donde se esperan ambos tipos de estructuras geológicas esta configuración puede ser utilizada convenientemente. La profundidad media de investigación es 10% más grande que para el dispositivo Wenner con la misma distancia entre los electrodos (C1 y C2).

**4.5.2.3 Polo-Polo.** Menos usado que los anteriores el dispositivo Polo-Polo (figura 13) posee un único electrodo de corriente y un electrodo de potencial. Los otros dos (C2 y P2) deben ponerse a una distancia mayor de 20 veces la separación máxima de la longitud total del tendido

**Figura 13.**Dispositivo Polo-Polo



El factor geométrico del dispositivo se expresa(ecuación 6.19):

$$K = 2\pi a$$

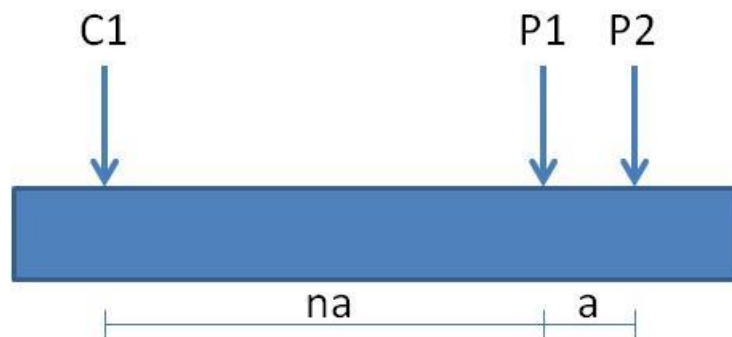
Una de sus desventajas es que, a causa de la gran distancia que existe entre los electrodos P1 y P2, se puede generar una cantidad importante de ruido capaz de degradar severamente la calidad de las medidas, por lo que este conjunto se usa principalmente en perfiles 2D relativamente pequeños de 50 a 80 metros totales.

Es comúnmente utilizado en levantamientos arqueológicos o para sondeos tridimensionales.

El Polo-Polo tiene una cobertura horizontal muy amplia y profundidad de investigación mayor que otros arreglos. Sin embargo, tiene una resolución relativamente pobre, reflejada por el espaciamiento comparativamente grande de electrodos.

**4.5.2.4 Polo-dipolo.** En este caso, el electrodo de corriente C2 se halla una gran distancia de los otros tres (figura 14).

**Figura 14.** Dispositivo Polo-Dipolo.



El factor geométrico del dispositivo es, en este caso (ecuación 6.20)

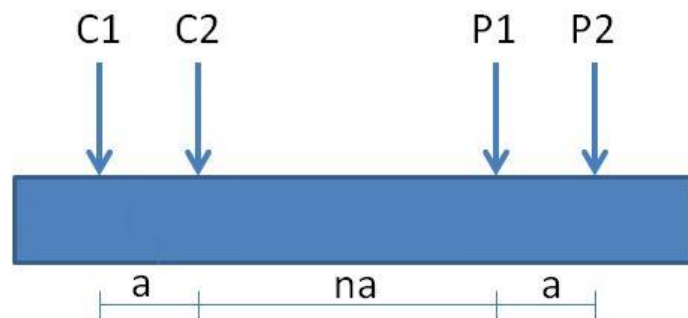
$$K = 2\pi n(n + a)$$

Esta configuración tiene buena cobertura horizontal pero una señal significativamente más alta comparada con el dispositivo Dipolo-dipolo, además no es tan sensible al ruido como el Polo-polo. El dispositivo Polo-dipolo es asimétrico, a diferencia de los otros arreglos; sobre estructuras simétricas las anomalías de

resistividad aparente en la sección son asimétricas. Para eliminar este efecto, sería conveniente repetir las mediciones con un arreglo inverso.

**4.5.2.5 Dipolo-dipolo.** En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea C1C2-P1P2 formando así un doble dipolo (figura 15).

**Figura 15.** Dispositivo Dipolo-Dipolo



El factor geométrico del dispositivo es (ecuación 6.21):

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

El inconveniente en el campo es que el dispositivo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y tensión, lo que significa que para la misma corriente el voltaje medido disminuye más de 200 veces cuando “n” aumenta desde 1 a 6, por lo que necesita detectores más sensibles que los otros dispositivos.

El arreglo Dipolo-dipolo es muy sensible a cambios de resistividad horizontal, pero relativamente insensible a cambios verticales, de modo que es útil en estructuras como muros enterrados, cavidades y plumas de contaminación, pero relativamente pobre en estructuras horizontales como capas sedimentarias.

La profundidad media de investigación de este conjunto depende del factor “n” así como de “a”. Para perfiles 2D este conjunto tiene una cobertura mejor de datos horizontales que el Wenner.

**4.5.3 Definición del problema inverso.** La teoría de inversión está organizada por un conjunto de técnicas matemáticas para la obtención de información de las propiedades físicas del suelo, basadas en observaciones.

Los datos obtenidos en el sitio estudiado se interpretarán basados en la teoría de inversión, que reproducirá un modelo de acuerdo con las condiciones del sitio contaminado mediante sus parámetros de resistividad eléctrica.

La *teoría de inversión* se utiliza en contraste con el método directo, que consiste en que, dados los valores de un conjunto de parámetros para un modelo de la Tierra hipotético, se reproducen los datos sintéticos (datos teóricos). Por el contrario, para el método inverso se utilizan los datos medidos en campo y una relación teórica para derivar los valores del conjunto de parámetros que explican o reproducen las observaciones de campo (Menke, 1989).

- Problema directo:

Parámetros del modelo- modelo- predicción de datos

- Problema inverso:

Datos-modelo- parámetros del modelo estimados

**4.5.4 Teoría de inversión.** En el tema siguiente se ofrece una pequeña introducción acerca de la teoría de inversión; la información está tomada de la tesis de Urbietta (2001) y el libro de Menke (1989).

Para describir matemáticamente los procesos geofísicos se puede utilizar una integral de Fredholm de segundo orden, descrita como:

$$d_i = \int_0^z K_i(z)p(z)dz$$

Dónde:

$d_i$  Es la respuesta del sistema medida en la  $i$ -ésima excitación artificial (en este caso inyección de corriente eléctrica).

$p(z)$  Es la función relacionada con algún aspecto de la estructura o propiedad física de la tierra (resistividad).

$K_i$  Son las funciones kernel, que describen la relación entre los datos y la función  $p(z)$  (modelo de la Tierra). Y  $dz$  es el diferencial de  $z$ .

Entonces, el problema inverso se puede enunciar como: dado un conjunto de datos experimentales ( $e$ ), determine aquellos parámetros de la Tierra ( $m$ ) que explican los datos observados.

El proceso de seleccionar variables que representan datos y parámetros del modelo se conoce como parametrización. En este proceso es necesario expresar el problema en su forma lineal

$e = F(m)$ , donde  $F$  es una función que relaciona parámetros con los datos observados y que es computacionalmente manejable. Para un sistema discreto, se tiene que:

$$e_i = \sum_{j=1}^m F_{ij} m_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

La tierra es parametrizada, en este caso, en un número de capas discretas, cada una con su propia resistividad eléctrica ( $\rho_i$ ).

Lo anterior se aplica en el caso que el problema sea directo; para la determinación de las resistividades verdaderas el problema es no lineal, por lo que se plantea como sigue:

Sea  $(e_1, e_2, \dots, e_n)^T$  los datos observados (resistividades aparentes) y sea  $m = (m_1, m_2, \dots, m_m)^T$  los parámetros del modelo (resistividades de los bloques), el problema directo y el problema inverso se definen como el mapeo de un “espacio de modelo ( $m$ )” y un “espacio de datos ( $e$ )”. Para lo que a este trabajo atañe, se tendrá un espacio definido sobre un cierto intervalo y un espacio de datos que es un vector  $n$ -dimensional, por tanto, el problema directo se puede describir como:

$$e_j = F_j(m) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N.$$

$F_j(m)$  Es una función que relaciona a un modelo dado  $m(x)$  con el  $j$ -ésimo dato  $e_j$ .

Si el problema es lineal, la ecuación anterior se describe como:

$$e_j = \int K_j(x) m(x) d^3x \quad j = 1, 2, 3, \dots, N.$$

$k_j(x)$  Es el kernel de la función asociada con el  $j$ -ésimo dato.

Para el problema inverso se quiere determinar un modelo estimado  $m_{est}(x)$  tal que satisfaga:

$$e_j^{obs} = F_j(m_{est}) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N.$$

$e_j^{obs}$  Es la j-ésima observación

Una de las opciones para la solución de problemas no lineales encontrados en geofísica es comenzar con una solución estimada  $m_{est}$  y resolver el problema directo para obtener estos datos estimados. Entonces, con una perturbación  $\delta m(x)$ . Que sumada a  $m_{est}$  nos devuelva un nuevo modelo que reproduzca los datos observados, la ecuación anterior se expresa como una serie de Taylor:

$$e_j^{obs} = F_j(m_{est}) + F_j^2(m_{est})\delta m + \frac{1}{2!}F_j^2(m_{est})\delta m^2 + \dots$$

Donde

$F_j^n(m)$  Es la llamada derivada de Fréchet de orden n de  $F_j(m)$  La derivada de primer orden simplemente es la derivada de Fréchet.

Si se define la diferencia para la j-ésima observación como  $\delta_{ej} = e_j^{obs} - F_j(m_{est})$ , entonces se tiene que:

$$\delta_{ej} = F_j^1(m_{est})\delta m + 0(\|\delta m\|^2)$$

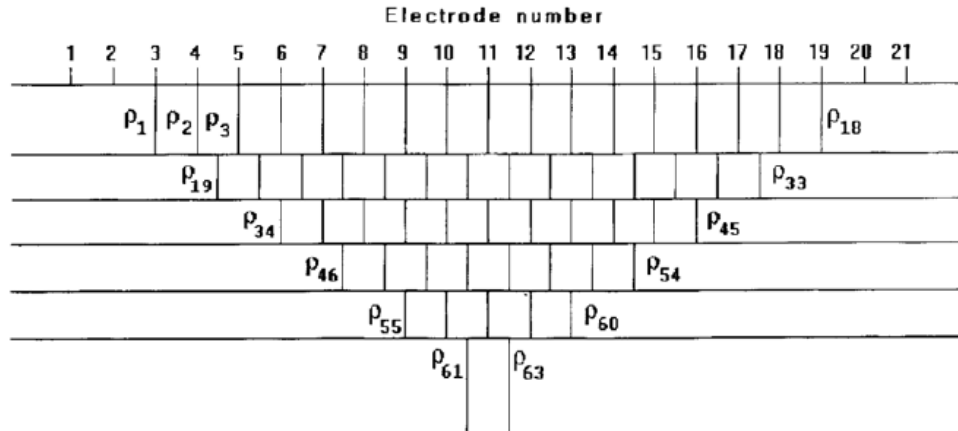
Considerando los términos de orden mayor como despreciables y teniendo en cuenta la ecuación x, la solución es:

$$\delta_{ej} \approx \int K_j(x, m_{est}) \delta m(x) d^3x$$

Donde  $K_j(x, m)$ , es el kernel de Fréchet asociado a la  $j$ -ésima observación. El kernel establece la relación entre una perturbación pequeña en el modelo y los correspondientes cambios en los datos. Como la ecuación es lineal en  $\delta m(x)$ , se puede encontrar empleando técnicas numéricas comunes cuando el kernel de Fréchet ha sido determinado

**4.5.4.1 Modelo de inversión 2D.** En este modelo de inversión 2D, donde se basa el software RES2DINV utilizado en el proceso de inversión en el presente trabajo, consiste de un número de bloques rectangulares en 2D (figura 16). Estos bloques son igual al número de datos en la pseudosección de resistividades aparentes y son arreglados de igual manera. Los centros en el interior de los bloques se ponen en la profundidad de investigación media (Edward, 1977) para los diferentes espaciamentos usados en los electrodos. La profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamento de los electrodos para el arreglo Wenner. El método convencional de mínimos cuadrados de Gauss-Newton se utiliza para determinar la resistividad de los bloques rectangulares (parámetros del modelo) que minimizarán las diferencias entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos.

**Figura 16.** Arreglo de bloques rectangulares utilizados en el modelo 2D



El RES2DINV utiliza un método iterativo que a partir de un modelo inicial trata de encontrar un modelo mejorado cuyos valores de resistividad aparente sean más cercanos a los valores medidos. Un método conocido de inversión iterativa es el método de suavizado y constreñido (de Groot-Hedlin *et al.*, 1990), que tiene la forma matemática:

$$J_i^T J_i + \gamma_i C^T C) P_i = J_i^T g_i$$

Donde  $i$  es el número de iteración,  $J_i$ , es la matriz jacobiana de derivadas parciales,  $g_i$ , es el vector de discrepancia que contiene las diferencias entre logaritmos de los valores de resistividad aparente medidos y calculados,  $\gamma_i$  es el factor de amortiguamiento y  $P_i$  es el vector de la perturbación del modelo de parámetros para la  $i$ -ésima iteración. Para 2D  $C$  es un filtro utilizado para suavizar las perturbaciones del modelo de parámetros para cierto valor constante (Looke y Barker, 1996).

#### 4.6 PARÁMETROS PETROFÍSICOS

La relación entre la resistividad del suelo y los parámetros petrofísicos (PP) es bien conocida como la fórmula Archie (Archie, 1942) que muestra la relación de resistividad de la roca con la salinidad de las aguas subterráneas, la porosidad y el factor de formación.

Estudios de suelo recientes han descubierto también la influencia de la humedad, contenido de arcilla volumétrica, tamaño de grano y el embalaje, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la resistividad de los contaminantes en la caracterización de los parámetros petrofísicos del suelo.

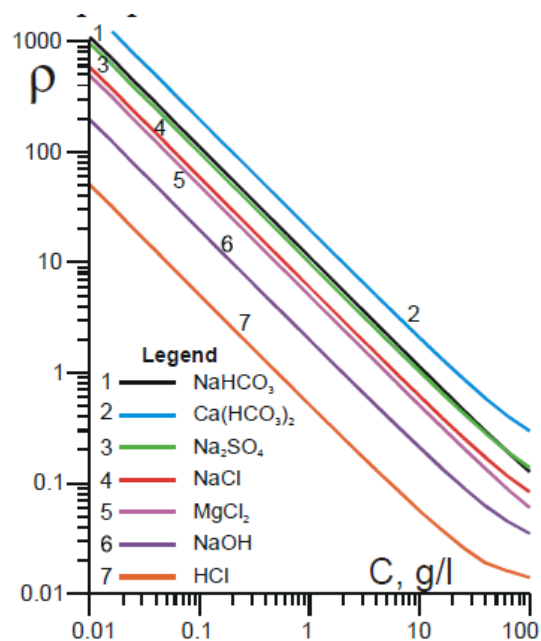
Todo este conocimiento permitió el desarrollo de una teoría de la resistividad del suelo y algoritmos de solución del problema directo (cálculo de la resistividad utilizando PP conocidos) y la solución al problema inverso (estimación de algunos PP de resistividad del suelo, teniendo en cuenta que todos los demás PP son conocidos o fijos).

El principio básico de interpretación petrofísica consiste en el análisis de la relación entre la resistividad del suelo y la salinidad del agua de los poros. Para estimar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de arcilla, porosidad y de la resistividad del terreno, para la búsqueda o la fijación de todos los demás valores de los PP tanto como sea posible de la realidad es necesario extraer muestras de suelo representativas del sitio a las cuales se les mide su resistividad en función de la salinidad del agua  $\rho$  (C). Estas curvas de  $\rho$ (C) se interpretan para encontrar PP como la porosidad arena, radio capilar de la arcilla, contenido de arcilla y CIC arcilla. Estos parámetros se pueden utilizar como un modelo petrofísico en la interpretación de la resistividad del suelo y la salinidad del agua de poro para estimar el contenido de arcilla, la porosidad y la CIC de suelo.

A.Rylov propone el algoritmo de cálculo basado en la teoría física-química exacta. Este cálculo se debe realiza teniendo en cuenta tres etapas.

En la primera etapa se utiliza la resistividad de la solución. La teoría electrostática de soluciones débiles, desarrollado por Debye y Hückel en 1923 y actualizado por S.Arrenius. Los resultados de los cálculos para algunas soluciones se presentan en la Figura 17. A.Ryjov, demostró, que la conexión de la conductividad eléctrica con la concentración de sal disuelta en el agua es satisfactoria debido a la siguiente dependencia:

**Figura 17.** La dependencia de la resistividad de la concentración de diferentes soluciones.



$$\sigma = |z + z| CF (V_c + V_a) \exp [- C / (|z + z| n \cdot 1000)] \quad (6.22)$$

Dónde:

$\sigma$  - conductividad eléctrica,  $\text{Sm} / \text{m}$ ;

$C$  - concentración, mole /  $\text{m}^3$ ;  $F$  - Faraday constante, Coulomb / mol;

$V_c, V_a$  - movilidad de los cationes y aniones de la sustancia disuelta,  $\text{m}^2 / (\text{V s.})$ ;

n - número de hidratación, que muestra, el número de moles de la envolvente solvante i-th de iones en una solución, mole / m<sup>3</sup>, z<sub>+</sub>z<sub>-</sub> valencia de los cationes y aniones, en consecuencia:

Para una temperatura diferente de 20°C es necesario usar una corrección de la temperatura y para calcular la conductividad eléctrica en la siguiente fórmula:

$$\sigma(T) = \sigma_{293} [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (6.23)$$

Dónde:

$\sigma_{293}$ - conductividad eléctrica de una solución calculado en la fórmula (6.22), para la temperatura  $T_0$ ;

$\sigma(T)$  - conductividad eléctrica de la solución a la temperatura T;

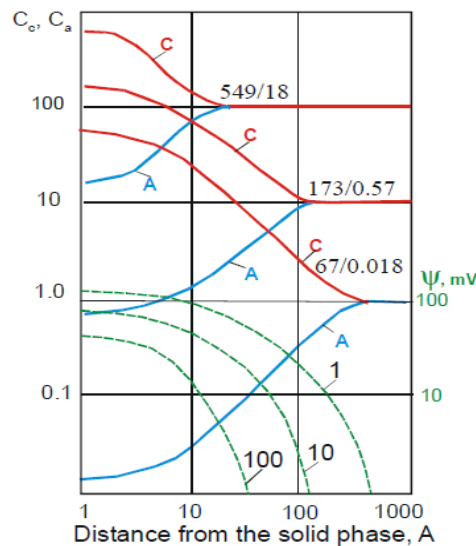
$\alpha$  - factor de temperatura igual a  $1,77 \cdot 10^{-2}$ , 1 / ° K. ( grados Kelvin).

En la segunda etapa se calcula la conductividad en una doble capa eléctrica (DEL, por sus siglas en inglés Double Electrical Layer), en el límite entre la solución y en fase sólida con parámetros conocidos. Las propiedades de la solución se determinaron en la primera etapa. Por lo tanto se utiliza la teoría DEL. Por primera vez la teoría cuantitativa DEL fue ofrecido en 1879 por Helmholtz. Entonces Gui (1910) y Chapman (1913) ofrecen de manera independiente la teoría DEL, que tuvo en cuenta la interacción iónica de tipo Coulomb en la zona, cerca de la interfaz. Consideraron, que cerca de un interfaz fases de cargas eléctricas se forma el catión y el anión, que la concentración depende de la distancia hasta una fase sólida

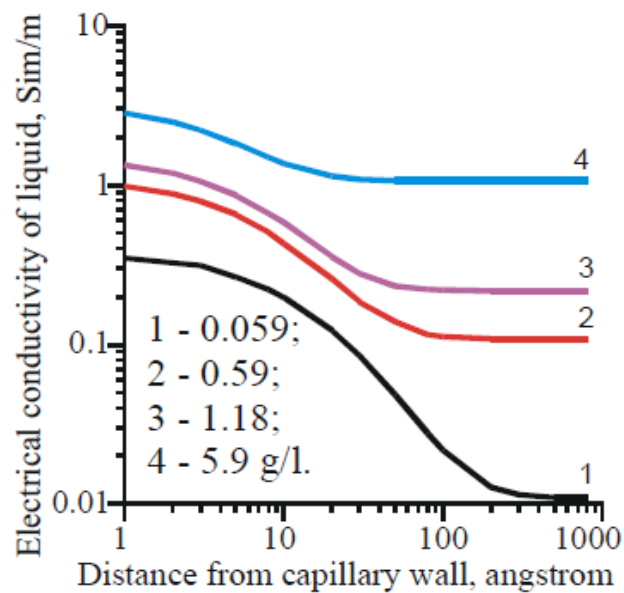
Los ejemplos de los cálculos se presentan en la Figura 18y 19. La conductividad en una doble capa eléctrica es más alta, en una solución libre, y menor es el contenido de sal en la solución (Figura 19). En la Figura 18 se muestra la estructura de la DEL y su dependencia de la concentración de la solución electro

neutral. En la Figura 19 una variación de la conductividad de la solución en función de la distancia a una pared capilar (a diferentes concentraciones de solución de NaCl electroneutral  $C = 0,059; 5,9 \text{ g / l } 0,59; 1,18$ ) se muestra. (La distancia se da en Amgstroms, 1 Amgstrom =  $10^{-10} \text{ m}$ ). De la Figura 18 se deduce, que si se aproxima a una pared capilar la concentración de cationes crece (en 1-1,5 orden), y la concentración de aniones disminuye, que esencialmente rompe con la neutralidad eléctrica de una solución cerca de interfase sólido - líquido. La concentración significativa de cargas libres cerca a la interfaz se debe esencialmente a la conductividad eléctrica de la DEL, en consecuencia la conductividad eléctrica de un líquido con la disminución del radio capilar crece y se diferencia esencialmente de la conductividad eléctrica de una solución electroneutral. El espesor DEL disminuye con el crecimiento de la concentración. En soluciones con concentración de más de  $100 \text{ mol / m}^3$ , es posible pasar por alto la influencia DEL y utilizar fórmulas más simples para el cálculo de la resistividad de la roca.

**Figura 18.** Distribución de iones en la DEL, dependiendo de la concentración de la solución y del electro acuático neutral.  $C = 1; 10; 100 \text{ mol / m}^3$ . Líneas continuas - concentración de iones, las líneas de puntos - potencial eléctrico de un líquido, mV. La distancia es en amgstrom



**Figura 19.** Conductividad en una capa eléctrica doble para una solución de NaCl



En la tercera etapa, la resistividad de la roca se calcula teniendo en cuenta las propiedades del fluido de poro, los parámetros DEL, y también la porosidad roca y la humedad. Es posible calcular las propiedades del suelo, por ejemplo de la mezcla de arena-arcillosa, piedra caliza arcillosa o cualquier otra mezcla de rocas con diferentes radios de poro. Para estos cálculos, se utiliza el siguiente modelo capilar - medio poroso.

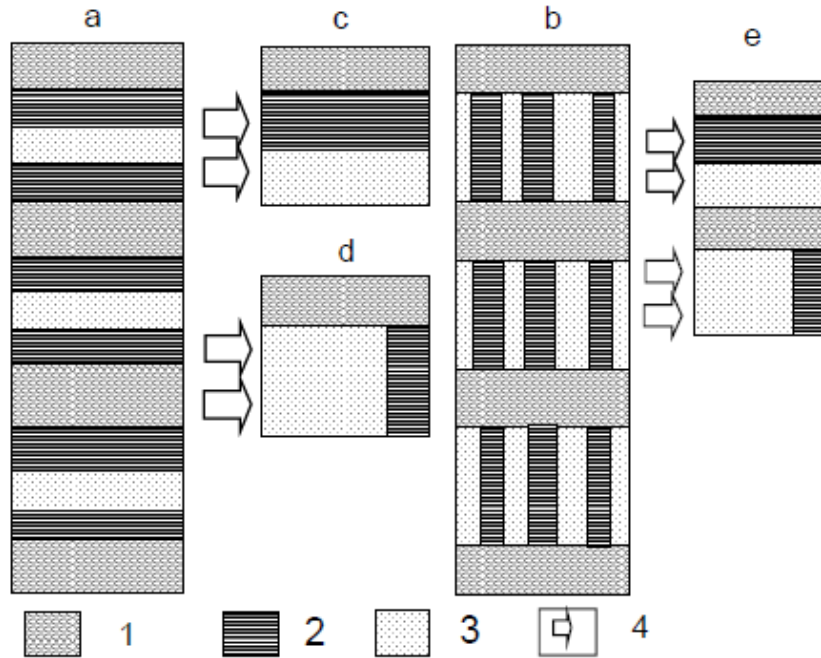
**4.6.1 Modelo de un capilar - medio poroso.** El modelo consta de tres componentes: el primer componente (por ejemplo - arena) contiene poros anchos; el segundo componente (por ejemplo, arcilla) contiene poros estrechos, y el fluido en arena y arcilla es el tercer componente. Generalmente los poros del primer y segundo componentes no se encuentran necesariamente completamente llenos con un líquido, la parte del espacio poroso puede ser llenado con gas, en este caso el modelo incluye cuatro componentes.

Las paredes de los capilares en la arena tienen una corriente eléctrica no conductora esqueleto - granos de SiO<sub>2</sub>, las paredes de los capilares en arcilla también tienen un esqueleto no conductor una cáscara de silicato. El número de poros de la arena y la arcilla en unidad de volumen corresponde a N<sub>s</sub> y N<sub>c</sub>, en consecuencia. El volumen total de poros en la arena y la arcilla se puede expresar a través de un valor de porosidad, por separado para cada componente, arena y arcilla. El modelo de una mezcla multicomponente se presenta en la Figura 20. Se compone de dos tipos de capilares que tienen diferentes radios. La Figura 20 incluye:

- a) Modelo de conexión en paralelo de arena y arcilla capilares.
- b) Modelo de conexión en serie de arena y arcilla capilares.
- c) Modelo equivalente al modelo (a) para conexión en paralelo de los capilares.
- d) Modelo equivalente para el modelo (b) para la conexión en serie de capilares.
- e) Modelo de serie - la conexión en paralelo de los capilares.

La conductividad de dicho modelo depende básicamente de la conductividad de un líquido en los poros de arena y arcilla, Permite unir todos los esqueletos no conductores de arena y arcilla en un volumen aparte V<sub>1</sub>, todo el líquido en los poros de la arena también en el otro unidad de volumen V<sub>2</sub>, y líquido en los poros de la arcilla en un tercer volumen - V<sub>3</sub>. Obtendremos un nuevo modelo de mezcla de rocas, donde la conductividad eléctrica es equivalente al modelo inicial. Así los modelos 4a y 4c son equivalentes entre sí en la resistividad, y los modelos 4b y 4d, en consecuencia, también son equivalentes entre sí. En Figura 20 muestra el modelo, mezclado de los modelos 4c y 4d se presenta, que muestra un caso general. Modelo 1, transformado en la forma equivalente, tiene un tipo, representado en Figura 20.2c. Este modelo es nombrado como modelo con capilares paralelos. Cuando los poros en la arena y la arcilla se encuentran completamente llenos por un líquido la resistividad del modelo con capilares paralelos es igual: En  $k_{ps} > C_{clay}$

**Figura 20.** Diferentes modelos de rock. 1 - Matrix no conductor de corriente eléctrica. 2. capilares finos (arcilla). 3. capilares gruesas (arena). 4. modelos equivalentes.



$$\rho_{prl} = \frac{1}{\sigma_{l,clay}K_{pclay}C_{clay} + \sigma_{l,s}(K_{ps} - C_{clay})} \quad (6.24)$$

y  $K_{ps} < C_{clay}$

$$\rho_{prl} = \frac{1}{\sigma_{l,clay}K_{pclay}C_{clay}} \quad (6.25)$$

Donde  $\rho_{prl}$  - resistividad de la roca consistía en una arena - mezcla de arcilla en la conexión en paralelo de los capilares;

$\sigma_{l,clay}$ , conductividad arcilla de un líquido en los capilares de la arcilla;

$\sigma_{l,s}$ , conductividad de un líquido en los capilares de arena;

$K_{p,clay}$ , porosidad de arcilla;

$K_{ps}$ , porosidad de arena;

$C_{clay}$ , contenido de arcilla volumétrica en una mezcla de arena-arcillosa.

La condición  $K_{ps} < C_{clay}$  significa, que todos los capilares de arena se llenan con arcilla, por lo tanto, la conductividad de una mezcla, en este caso sólo depende de la conductividad de un líquido en los capilares de la arcilla, el índice de porosidad y el contenido de arcilla volumétrica.

La conductividad de este modelo (con conexión capilares paralelos) es posible calcularla como el valor inverso de su resistividad:

$$\sigma_{prl} = \frac{1}{\rho_{prl}} \quad (6.26)$$

El modelo de mezcla de arena-arcillosa con conexión en serie de capilares de arena y arcilla está representado en la misma Figura 20.4b. Al hacer transformaciones similares, recibimos un modelo equivalente de la conexión en serie de capilares que aparecen en Figura 20.4d. Este modelo se nombrará como modelo con los capilares de la serie. En la conexión en serie de capilares el modelo tiene una resistividad eléctrica igual: Si  $K_{ps} < C_{clay}$ .

$$\text{Si } K_{ps} > C_{clay} \rho_{ser} = \left(1 - \frac{C_{clay}}{K_{ps}}\right) \frac{1}{K_{ps}\sigma_{l,s}} + \frac{C_{clay}}{K_{ps}} \times \frac{1}{K_{ps}K_{p,clay}\sigma_{l,clay}} \quad (6.27)$$

$$\text{Si } K_{ps} < C_{clay} \cdot \quad \sigma_{ser} = C_{clay}K_{p,clay}\sigma_{l,clay} \quad (6.28)$$

En la naturaleza por lo general, se observa la distribución conjunta de los capilares en paralelo y en serie, es decir, en los poros de la arena algunos corchos de arcilla están disponibles, pero también existen los capilares en el que la arcilla se unta en las paredes de los poros de la arena. Por lo tanto consideramos que la parte volumétrica de los capilares paralelos en el modelo mixto de serie - conexión en paralelo es igual a M y que para la conexión en serie es igual a 1-M. En este caso, el modelo de conductividad mixta es posible calcularlo bajo la siguiente fórmula:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{M}{\rho_{prl}} + \frac{(1-M)}{\rho_{ser}} \quad (6.29)$$

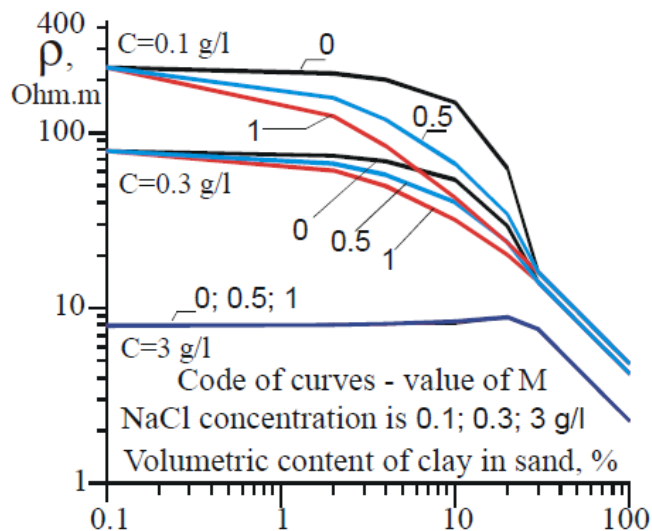
Donde  $\sigma_{\Sigma}$  es la conductividad específica de una mezcla de conexión en paralelo y serie d capilares.

Dicha construcción supone una amplia selección de modelos de roca. Por ejemplo, podemos considerar el modelo, en el que 25% de los capilares ancho se encuentran llenos con corchos, y en el otro 75% del volumen de los capilares anchos arcilla se unta en sus paredes de arcilla.

En realidad el modelo consta de dos cuerpos porosos. Dentro de los capilares del primer cuerpo poroso se coloca el segundo cuerpo poroso, que se puede untar sobre las paredes de los capilares del primer cuerpo o estar en corchos. La combinación de estos cuerpos varia las formas estructurales de los espacios porosos y esta flexibilidad permite el cálculo de dependencias funcionales de las propiedades eléctricas de las rocas para muchos casos prácticos. El espacio poroso puede estar completamente lleno por el líquido, o no completamente. La parte del espacio poroso de los capilares, no llenos de un líquido, puede ser llenado con gas o bien líquido no conductor (aceite) o hielo, que es un cuerpo no conductor eléctrico. Por lo tanto, mediante el establecimiento de la saturación incompleta de los capilares por el agua, es posible calcular los volúmenes de la

primera y segundo cuerpo, y propiedades eléctricas de las rocas en estado congelado. En la Figura 21. Se observa la dependencia de la resistividad de la mezcla de arena y arcilla a una concentración constante de sales (0,1; 0,3; 3 g / l) en solución de NaCl en diversos porcentaje de capilares con conexión en paralelo (valor M) y varios grado de contenido de arcilla. Las dependencias representadas en la Figura 21 se calcula según la fórmula (6.29) en los siguientes parámetros de arena y arcilla: para arcilla el  $\alpha_{\text{arcilla}} = 0,50$ , el radio de los poros de la arcilla -  $r_1 = 0,01$  micras; para la arena el  $\alpha_{\text{arena}} = 0,25$ , radio de los poros de arena -  $r_1 = 0,1$  mm. Notemos, que por su valor  $M = 1$ , toda la arcilla se asigna en las paredes de los capilares, y en  $M = 0$  - se concentra en los corchos arcillosos.

**Figura 21.** La dependencia de la resistividad de arena y mezcla de arcilla de M y contenido de arcilla volumétrica en diversas concentraciones de NaCl.

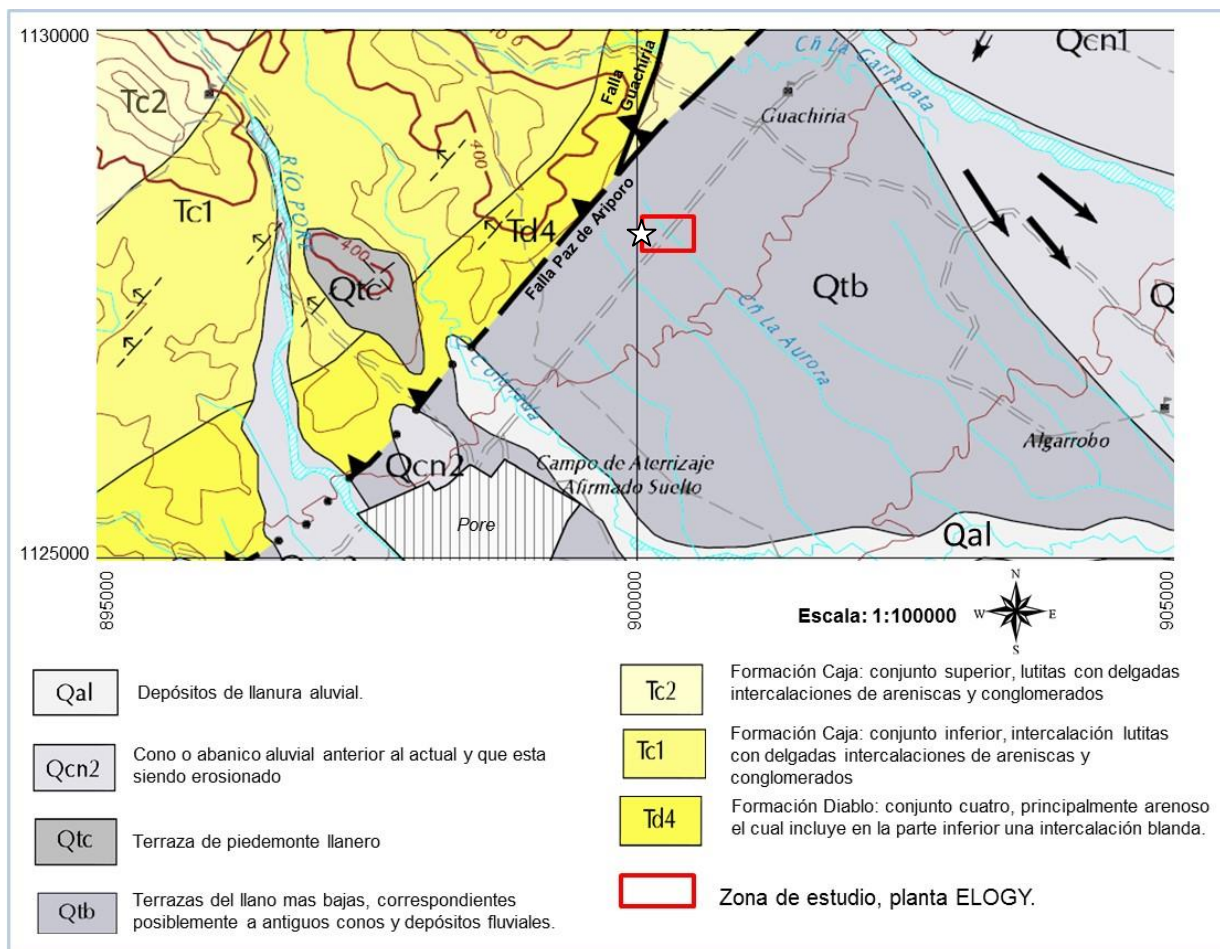


Cuando la arcilla está "manchada" en las paredes de los capilares en roca arenisca, el pequeño aumento de contenido de arcilla cambia apreciablemente la resistividad de mezcla (en escala logarítmica es la dependencia casi inversamente proporcional). En un caso de arcilla "corchos", por el contrario, los cambios significativos de contenido de arcilla en un intervalo desde 1 hasta 20% prácticamente no tienen ningún efecto en el valor de la resistividad, pero influyen fuertemente en el intervalo de 20 - 100%. En la práctica la arcilla se coloca en la

arena en ambas formas - del primero y segundo tipo, como se ve en la fórmula (6.29).

## 5. MARCO GEOLOGICO

**Figura 22.** Mapa geológico del área de estudio.



**Fuente:** *Ingeonimas 2002.*

Geológicamente el Municipio de Pore, está localizado en la cuenca de los Llanos Orientales, constituida por espesos sedimentos de edad Terciaria y Cretácea, sobre los cuales se han depositado gran cantidad de materiales cuaternarios no consolidados, como resultado de varios ciclos tectonosedimentarios desarrollados desde el Precámbrico hasta el Cenozoico. De acuerdo a Cediell, (1982) la cuenca de las llanos orientales corresponde a un "Barkarc basin", desarrollado desde el cretácico inferior a medio en facies marinas sobre un basamento Pre cretáceo de

rocas Precámbricas y sedimentarias, Paleozoicas y Jurásicas, con su límite occidental marcado por fallas normales en dirección NE-SW, de edad Precámbrica.

## 7.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Las unidades geológicas que afloran en el área de estudio corresponden a secuencia de rocas de edad terciaria representadas por el conjunto Td4, Tc1, Tc2 (Niveles de lutitas separadas por delgadas intercalaciones de areniscas y conglomerados) pertenecientes a la formación Diablo y caja con algunos depósitos cuaternarios de terrazas bajas, conos y llanuras aluviales pertenecientes al piedemonte llanero y a depósitos aluviales.

**Formación Diablo (Td):** Presenta una morfología de cerros alargados separados por angostas depresiones, debido a la predominancia de niveles duros de areniscas con respecto a los niveles blandos de lutitas, la edad de esta formación ha sido inferida al Mioceno inferior a Mioceno medio. Esta formación es subdividida en cuatro conjuntos Td1, Td2, Td3 y Td4. Siendo el conjunto Td4 el miembro de la formación Diablo que se identifica en la zona de estudio.

- **Conjunto Td4 (superior):** Se encuentra en contacto normal con el conjunto Td3 al igual que con la Formación Caja que lo suprayace. se caracteriza por secuencias de areniscas y lutitas intercaladas en paquetes delgados, con un ligero predominio de niveles duros sobre los blandos. Este conjunto posee un espesor aproximado de 800m y forma topográficamente colinas suaves.

**Formación Caja (Tc) :** Esta formación se caracteriza por presentar una morfología poco escarpada con cerros de crestas alineadas en forma de delgadas

cuchillas separada por angostos valles, que dan al terreno una forma escalonada, esto debido a la alternancia de conjuntos de capas de areniscas y conglomerados con capas de lutitas. Esta formación fue subdividida informalmente en dos conjuntos que geomorfológicamente no presenta un mayor contraste, pero se diferencian un poco en el contenido de niveles blandos.

- **Conjunto Inferior (Tc1):** Se encuentra en contacto normal con la formación diablo, se caracteriza por la alternancia rítmica de delgadas capas de areniscas y conglomerados con capas de lutitas.
- **Conjunto superior (Tc2):** Suprayace a Tc1 y se diferencia del anterior por presentar mayores intercalaciones de niveles blandos, especialmente el techo de la formación.

**Terrazas del piedemonte (Qtc):** Presentan formas de mesetas, generalmente escalonadas debido a los numerosos niveles de aterrazamiento que exhiben.

**Terrazas del llano más bajas (Qtb):** Se encuentran constituidos principalmente por grandes acumulaciones de sedimentos fluviales. Depósitos de terrazas presentan formas de mesetas escalonadas debido a los numerosos niveles de aterrazamiento, constituidos de material transportado de aspecto conglomerático depositado en zonas de menor pendiente compuesta de arenas mal calibradas y gravas.

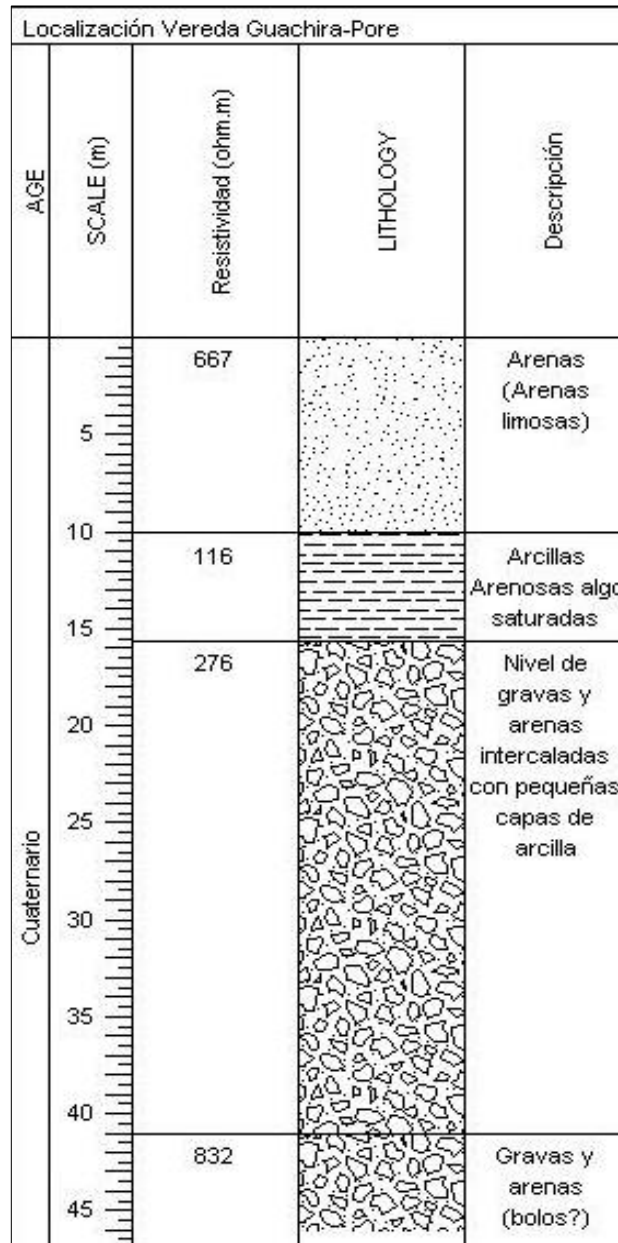
**Depósitos de llanura aluvial (Qal):** Estos depósitos se localizan en las zonas adyacentes a los cauces sometidos a inundación y están constituidos principalmente por sedimentos finos actuales depositados por las corrientes mayores.

**Conos o abanicos aluviales (Qcn2):** Corresponden a las grandes acumulaciones de sedimentos que actualmente están siendo depositados por los ríos como consecuencia del cambio brusco del gradiente que sufre las corrientes al llegar al llano. Estos depósitos no se encuentran afectados por las fallas

## **7.2 GEOLOGÍA LOCAL:**

El área de estudio se localiza en la zona plana al este de la vía que comunica al municipio de Pore con Paz de Ariporo, constituida por terrazas de piedemonte llanero, formadas a partir del avance del material aluvial, se componen de arenas y limos que se vuelven más arcillosos a medida que se profundizan. En el área puntual de estudio afloran depósitos cuaternarios del Holoceno, pero debajo de ellos se hallan unidades sedimentarias de edad terciaria, como las que afloran en la parte superior de la microcuenca de la quebrada la Colorada. Estudios geoelectrónicos y de suelos realizados anteriormente revelaron el perfil estratigráfico mostrado en la *Figura 23*.

**Figura 23.**Perfil estratigráfico local del área de estudio



.Fuente: *ELOGY LTDA.*

### 7.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Estructuralmente la región del piedemonte está afectada por grandes fallas inversas como las de Guaicaramo, Yopal, Guachiría y Paz de Ariporo y grandes

estructuras sinclinales con flancos localmente plegados y el extenso anticlinal de Corozal. Localmente, la falla de Paz de Ariporo, que pasa por el casco urbano del municipio de Pore con dirección SW-NE, marca el límite entre la zona montañosa y la zona de llanura, presentando un plano de falla subvertical y ligeramente inclinado hacia el oeste.

Se conoce que el área de piedemonte se halla afectada por tectonismo intenso, e incluso activo en el presente, debido al Sistema de Fallas Frontal de la Cordillera Oriental, conocido como Sistema de Fallas del Borde Llanero que sigue el límite de los Andes más orientales de Colombia, constituido por varios segmentos de fallas subparalelas en dirección general NE-SE, registrándose sismos fuertes recientemente como los de Tauramena a principios de 1995 y el de Yopal el 23 de abril de 1995.

**Falla de Paz de Ariporo :** Falla de tipo inverso, con plano de falla subvertical, ligeramente inclinado hacia el oeste y cortado por pequeñas fallas de rumbo. Afecta los conos aluviales del borde de la cordillera y es probable que aun siga activa.

**Falla de Guachiría :** Es una falla de tipo inverso, de alto ángulo, con su plano inclinado hacia el oeste, con rumbo noreste sufriendo un giro de  $10^{\circ}$  hacia el oeste al cruzar el río Ariporo. Su traza superficial se conecta con la falla de Paz de Ariporo al noreste del municipio, se extiende desde la parte sur del área bordeando la cordillera y penetra dentro de la región de piedemonte al norte de la población de Pore, marcando el contacto entre los conjuntos superiores de la formación diablo con la formación Caja.

## 8 METODOLOGIA

Con el fin de caracterizar y delimitar posibles zonas contaminadas dentro de la planta de tratamiento ELOGY se establece la siguiente metodología para la obtención de datos, tanto para la prospección geoelectrica como para la modelación de los parámetros petrofísicos.

### 8.1 PERFILES DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

**8.1.1 Instrumentación.** El equipo utilizado para la adquisición de los datos de resistividad fue el Terrameter ABEM LS, este equipo es un avanzado sistema de adquisición de datos para mediciones de auto potencial (Self Potential SP), Resistividad (RES) y Polarización Inducida en dominio del tiempo (IP). Consta de 72 electrodos, un set de cables LUND (4 cables, con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), dos (2) conectores de cables y 75 Jumper cable-electrodo, como se observa en la *Figura 24*.

**Figura 24.** Equipo utilizado para la medición de los datos de resistividad.



**Fuente:** ABEM

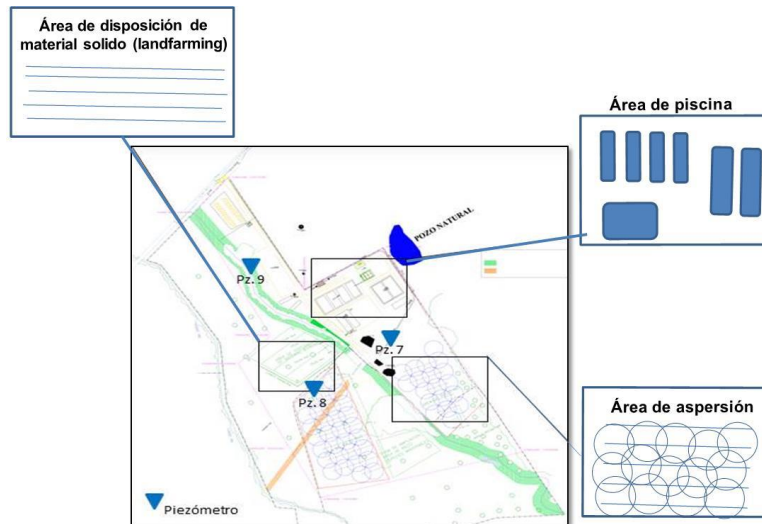
Adicionalmente se requirió la implementación de algunos otros equipos con el fin de obtener una buena calidad durante el proceso de recolección de datos. La siguiente lista es un sumario de equipo adicional utilizado en la campaña de adquisición de datos:

- GPS GARMIN 62SC
- Batería externa
- Un set de Walkie Talkies
- Martillos de Poliuretano
- Cinta métrica no metálica
- Conductivímetro HANNA

**8.1.2 Procedimiento de medición.** En la zona de estudio se llevaron a cabo quince (15) tomografías eléctricas con una profundidad máxima de 13 metros y una extensión entre 100 y 64 metros (dependiendo su ubicación) con un espaciamiento de electrodos de 1 y 0.8 metros respectivamente. Estas fueron realizadas mediante el uso del dispositivo geoelectrico Gradiente el cual es un arreglo desarrollado para sistemas resistivímetros multicanales, los cuales pueden tomar varias mediciones simultáneamente con los pares de electrodos de potencial en diferentes posiciones pero con la misma posición de los electrodos de corriente. En el arreglo Gradiente tradicional, los electrodos de corriente son fijados en el final de la línea mientras que las medidas son hechas con los electrodos de potencial en diferentes posiciones a lo largo de la línea. De esta manera, diferentes conjuntos de mediciones son hechas con los electrodos de corriente en diferentes ubicaciones.

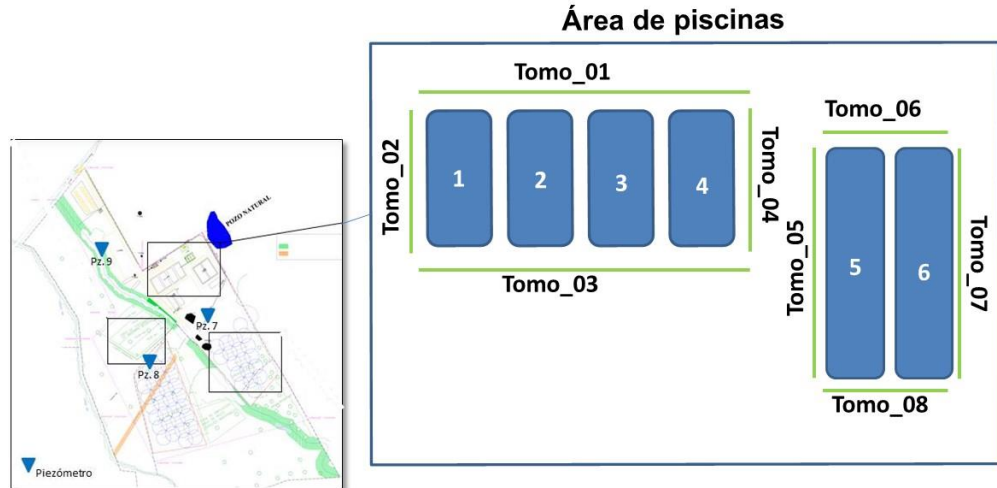
Los perfiles geoelectricos fueron distribuidos teniendo en cuenta las limitaciones y distribución de las zonas de estudio. La *Figura 25*, muestra la distribución de las áreas de estudio dentro de la planta ELOGY.

**Figura 25.** Distribución espacial de las zonas de estudio dentro de la planta de tratamiento ELOGY



- En el área de piscinas se llevaron a cabo ocho (8) perfiles geoelectrónicos los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera, los primeros cuatro perfiles cubren el área de las piscinas de almacenamiento (1 - 4), mientras que los cuatro restantes rodean las piscinas (5 - 6) de residuos industriales. La Figura 26, muestra la ubicación de los perfiles geoelectrónicos dentro del área de piscinas.

**Figura 26.** Distribución de las tomografías realizadas en campo dentro del área de piscinas de la planta ELOGY.



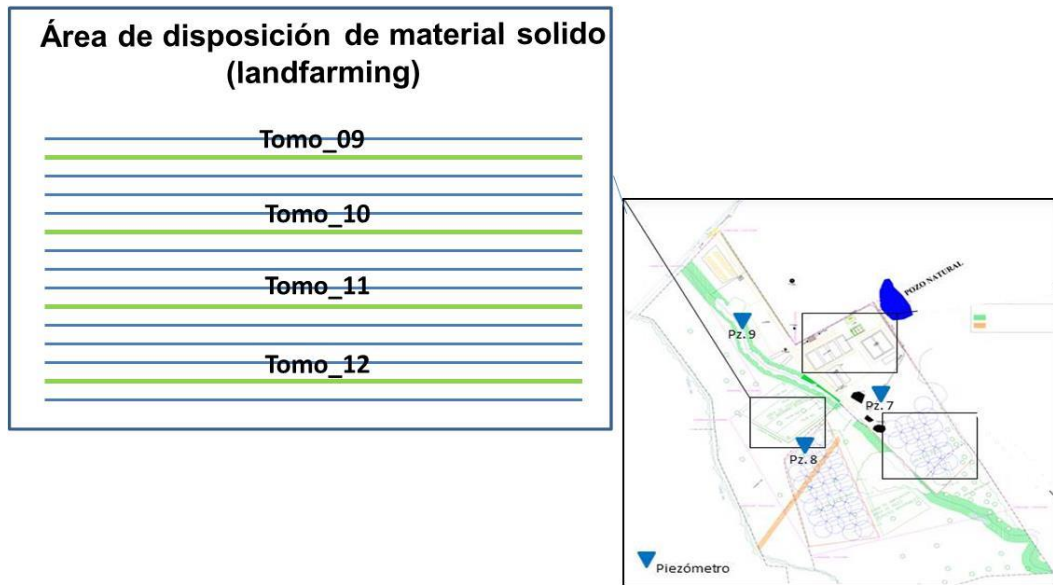
La longitud, espaciado entre electrodos y la orientación de cada perfil elaborado dentro del área de piscinas se resumen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características de los perfiles geoelectricos del área de piscinas.

	Perfil	Longitud (m)	Espaciado entre electrodos (m)	Orientación del perfil
Área de piscinas (1-4)	1	100	1	E-W
	2	80	1	N-S
	3	100	1	E-W
	4	80	1	N-S
Área de piscinas (5-6)	5	64	0.8	N-S
	6	64	0.8	E-W
	7	64	0.8	N-S
	8	64	0.8	E-W

- Dentro del área de landfarming se dispusieron cuatro (4) perfiles geoelectricos, paralelamente uno del otro tratando que cubrieran la totalidad del área. La Figura 27 muestra la distribución de los perfiles en esta área.

**Figura 27.** Ubicación de los perfiles geoelectricos en la zona de landfarming.



La tabla 3, muestra las principales características de los perfiles dentro del área de landfarming

**Tabla 3.** Datos de los perfiles geoelectricos realizados en la zona de landfarming.

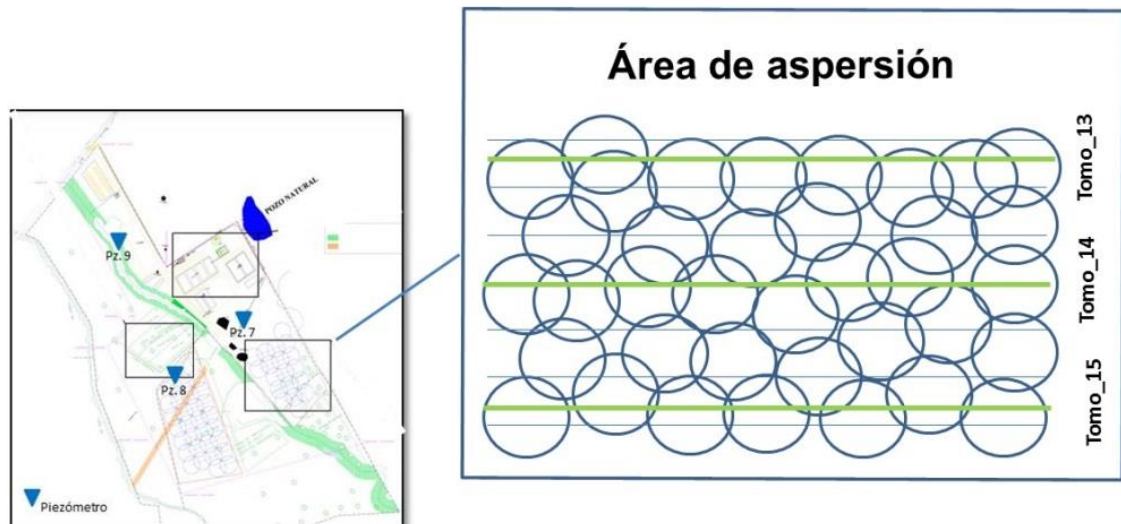
	Perfil	Longitud (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Orientación del perfil
Área de landfarming	9	64	0.8	E-W
	10	64	0.8	E-W
	11	64	0.8	E-W
	12	64	0.8	E-W

- Área de aspersión: esta área es destinada para el riego de la fase líquida (agua) producto de la separación por densidades de los residuos industriales, la cual es previamente tratada antes de ser dispersada en esta zona, con el fin de retornarla al ambiente, este riego de agua es monitoreado a través de análisis de laboratorio que certifican que las aguas regadas no contienen hidrocarburos. Por lo que podríamos decir que esta área corresponde a una zona limpia es decir sin presencia de hidrocarburos. En esta área se realizaron tres (3) perfiles geoelectricos cuyas características se muestran en la tabla 4 y su distribución dentro del área en la Figura 28.

**Tabla 4.** Datos de los perfiles geoelectricos de la zona de aspersión

	Perfil	Longitud (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Orientación del perfil
Área de aspersión	13	80	1	E-W
	14	80	1	E-W
	15	80	1	E-W

**Figura 28.** Ubicación de los perfiles geoelectricos dentro del área de aspersión

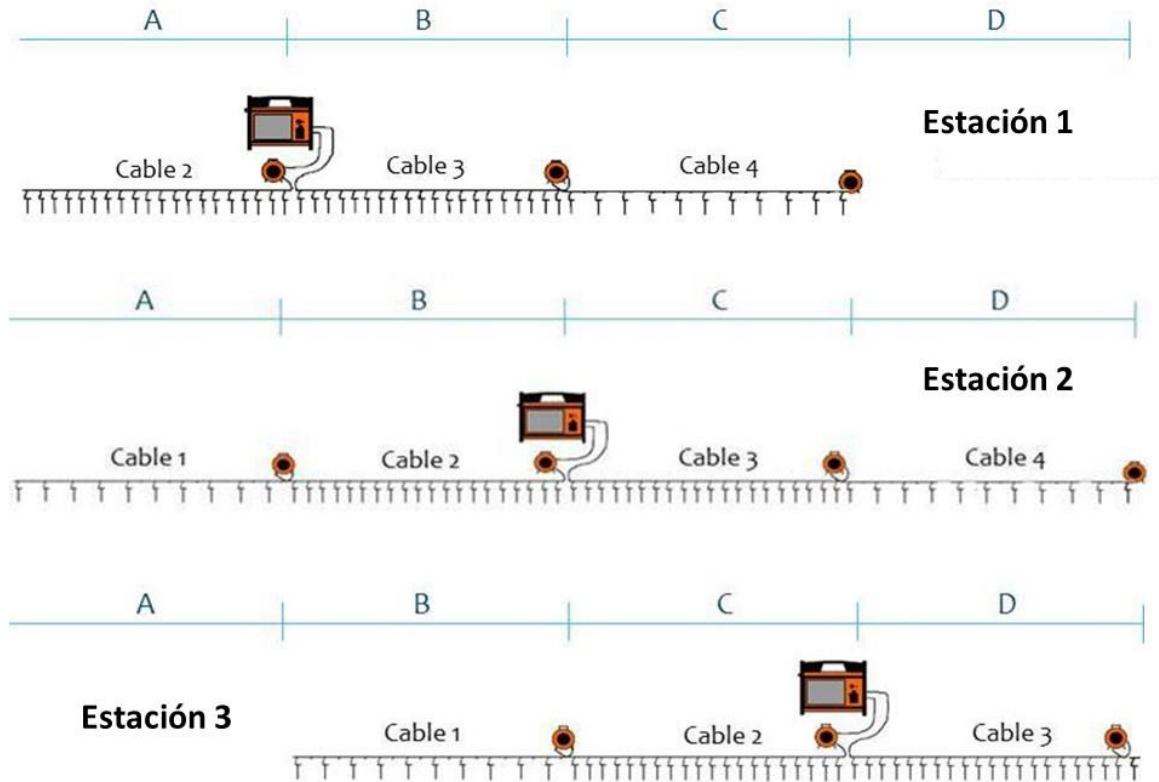


La adquisición de datos para los perfiles geoelectricos se realizó a través del proceso llamado Roll Along (Figura 30) el cual indica que el equipo tendrá tres o más posiciones durante la toma de datos, el anterior procedimiento se implementa para aumentar la longitud del perfil sin alterar el espaciamiento entre electrodos logrando así una mayor extensión sin comprometer la resolución y profundidad del perfil. La Figura 29 muestra montaje de medición del equipo TERRAMETER LS.

**Figura 29.** Montaje de adquisición de datos en el área de landfarming en la planta ELOGY.



**Figura 30.** Diagrama de posicionamiento del equipo de la forma Roll Along



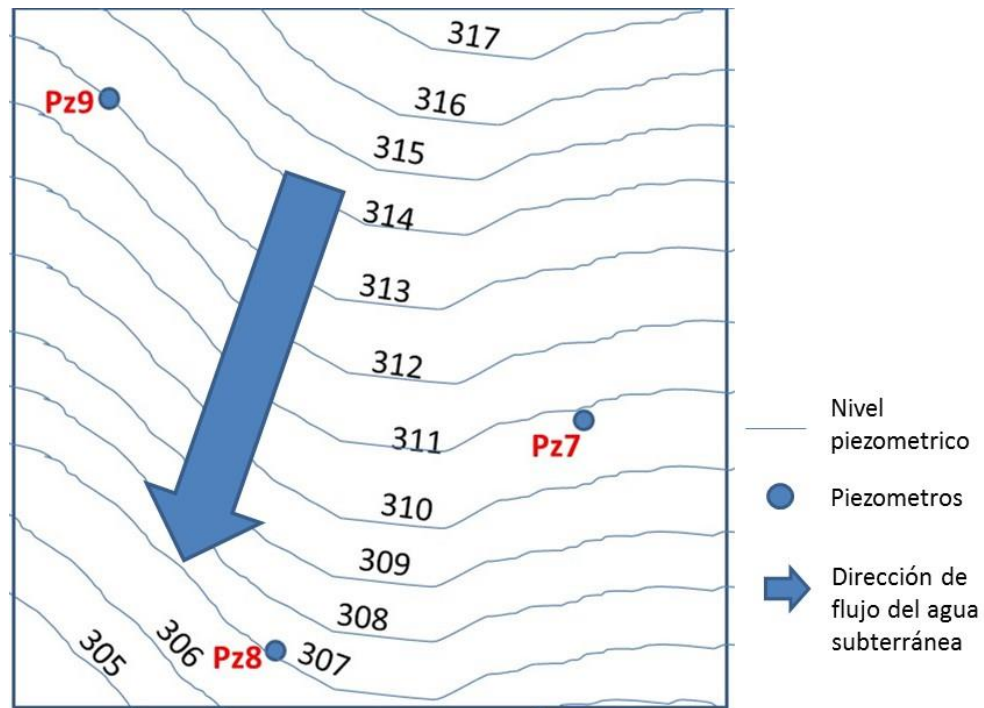
## 8.2 DATOS DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO.

Debido a la presencia en superficie de afluentes (rio y lago) dentro de la planta ELOGY se hace necesario determinar el nivel piezométrico en la zona, este es determinado mediante el cálculo de la diferencia entre los datos de altura sobre el nivel del mar (msnm) para cada piezómetro y los valores de profundidad del nivel freático en cada piezómetro, con el fin de definir la dirección del flujo de agua subterránea y así proyectar las líneas de la tomografía. La Tabla 5 muestra los datos usados para el cálculo del nivel piezométrico y la Figura 31 el diagrama de flujo subterráneo obtenido.

**Tabla 5.** Datos de piezómetros

	Pz 7	Pz 8	Pz 9		Pz 7	Pz 8	Pz 9	
	314	312	316	[msnm]	314	312	316	[msnm]
Fecha	Profundidad del nivel freático				Nivel piezométrico del agua			
14/07/2014	290	520	97	[cm]	311,1	306,8	315,0	[msnm]
15/07/2014	278	595	300	[cm]	311,2	306,1	313,0	[msnm]
16/07/2014	290	555	320	[cm]	311,1	306,5	312,8	[msnm]
17/07/2014	285	440	306	[cm]	311,2	307,6	312,9	[msnm]
18/07/2014	293	547	290	[cm]	311,1	306,5	313,1	[msnm]

**Figura 31.** Diagrama de flujo de agua subterránea



### 8.3 MUESTREO DE SUELO Y AGUA

Los puntos muestreados se definieron en campo de acuerdo con la inspección e información previas sobre el lugar.

- *Muestreo del agua*

Fueron identificados tres (3) puntos de muestreo de aguas subterráneas los cuales corresponden a los piezómetros 9, 8 y 7 que hacen parte de la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la planta ELOGY. Se realizó un seguimiento durante cinco (5) días de la conductividad eléctrica y el nivel del agua subterránea en cada uno de ellos. La *Figura 32* muestra el piezómetro 8 localizado adjunto a la zona de Landfarming.

**Figura 32.** Piezómetro PZ.8 ubicado adjunto a la zona de Landfarming

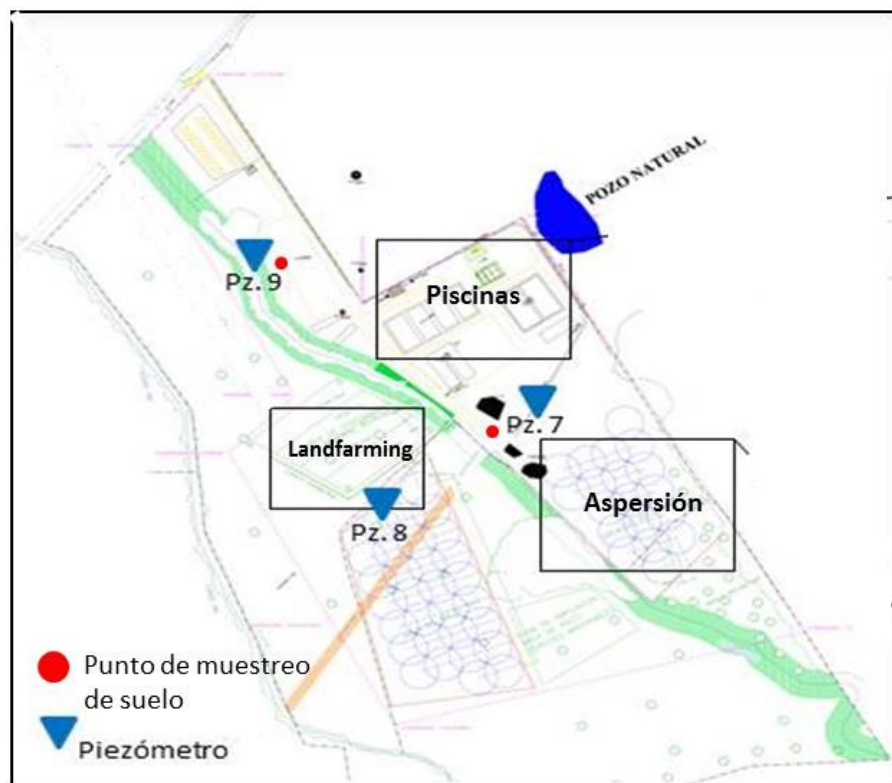


- *Recolección de muestras de suelo*

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos de la planta ELOGY fueron obtenidas a través de los reportes de laboratorio de *Antek S.A.*, empresa encargada del análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo, humedad, concentración de elementos químicos, hidrocarburos totales, contenidos de arena,

arcilla y limo durante los meses de Junio y Julio del 2014. Además se establecieron dos (2) puntos de muestreo pertenecientes a la zona adyacente al piezómetro siete (7) y a la zona de acceso de la planta ELOGY cerca al piezómetro nueve (9), de los cuales se extrajeron cinco (5) muestras en cada punto para un total de 10 muestras de suelo superficiales. Las muestras se recolectaron según los requerimientos necesarios, y siguiendo el procedimiento adecuado para su recolección, almacenamiento y transporte al laboratorio. La Figura 33 corresponde a la ubicación de los puntos de muestro de suelo yagua dentro de la planta ELOGY.

**Figura 33.** Distribución de los puntos de muestreo de agua y suelo en la planta ELOGY



### 8.3.1 Descripción de los análisis físico-químicos realizados

- **Muestreo de agua**

Las muestras de agua son utilizadas para determinar la resistividad del agua y la temperatura, las cuales servirán como datos al modelamiento de los parámetros petrofísicos. Estas muestras son extraídas de los piezómetros a través de un tipo de pipeta, luego de extraerlas son llevadas al laboratorio en el cual se determina su conductividad y resistividad, luego se separan en diferentes fracciones a las cuales se les añade NaCl en diferentes proporciones buscando salinizar el agua (rangos de salinidad implementados 0.55 – 1.36 – 3.92 – 10.94 – 30.05 g/l), para ser utilizadas luego con las muestras de suelo.

- **Muestras de suelo :**

Las muestras recolectadas de los dos (2) puntos de muestreo fueron divididas para su posterior análisis en laboratorio. Una parte de las muestras fueron utilizadas para el análisis de hidrocarburos totales realizado por el laboratorio *Antek S.A.* La otra parte de las muestras fue necesaria para el análisis de las curvas de relación entre la resistividad del suelo ( $\rho(C)$ ) y la salinidad del agua en los poros, utilizadas en la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo. Para ello las muestras se someten a un proceso de secado y homogeneización, posteriormente se dividen en cinco partes iguales. Cada submuestra es saturada con agua de diferentes grados de salinidad (0.5 – 30 gr/l), y mediante una caja de medición de resistividad del suelo (soil box resistivity)(Figura 34) conectada a un resistímetro (TERRAMETER LS) se calcula el valor de resistividad para cada una.

Las cajas de resistividad están compuestas por dos electrodos de corriente ubicados en los extremos de la caja los cuales se encargan de inyectar corriente y dos electrodos de voltaje encargados de la medición del potencial.

**Figura 34.** Caja de resistividad (Soil box resistivity).



#### **8.4 PROCESAMIENTO DE DATOS GEOELÉCTRICOS**

Para la inversión de los datos resistividad aparente adquiridos en campo se utilizó el software RES2DINVx64 (versión 4.00), desarrollado por Geotomo Software; el cual se basa en la teoría de inversión descrita por Loke & Barker (1996), referenciada en Gómez (2014), los resultados obtenidos de los modelos de inversión se exportaron a SURFER para lograr una mejor visualización.

Para la visualización de los datos en 3D, se acomodaron los datos 2D en el Voxler, representando el comportamiento del contaminante en extensión y profundidad.

#### **8.5 MODELACIÓN DE LOS PARÁMETROS PETROFÍSICOS**

La modelación de los parámetros petrofísicos del suelo se realizó mediante la utilización del software **PetroWin**, diseñado para el procesamiento de datos geoelectrónicos en base a la caracterización fisicoquímica del agua y el suelo, por medio del algoritmo matemático desarrollado por Ryjov&Rudoplatov (1990).

El cálculo de parámetros petrofísicos del suelo implementando el software PetroWin comienza estableciendo los archivos de entrada con extensión \*.swo (Figura 35) que corresponden al tipo de sal disuelto en el agua de poros y un archivo \*.exp (Figura 36) que contienen datos experimentales de resistividad versus concentración de sales de NaCl en agua de poros.

El archivo \*.swo corresponde al tipo de sal en solución en este caso es NaCl, la Figura 35 muestra el modelo de archivo de entrada \*.swo

**Figura 35.** Formato de entrada \*.swo

```

6.000000 !Hydration number
3.4999999E-07 !Sorpton constant
0.01000000 59.00000 !Concentration g/l and gram-molecular mass
23.5 !Temperature
1 1 !Valence
4.4987480E-08 6.8665102E-08 !Mobility for cation, anion
NaCl.swo !Name of solution
  
```

Estructura del formato \*.swo

Línea 1 Valor de hidratación para NaCl (el valor de hidratación varía de 5 -6).

Línea 2 Constante de sorción es igual a 3.4999999E-07, no cambiar este valor.

Línea 3 Concentración de sales en solución y peso en gramos por molécula de NaCl,

Línea 4 Temperatura tomada en campo para la muestra de agua en grados centígrados.

Línea 5 Carga eléctrica relativa del catión y anión, (valencia) de sal NaCl.

Línea 6 Movilidad de catión y anión del NaCl.

Línea 7 Tipo de sal.

**Figura 36.** Formato de datos tipo \*.exp

```

piezometro_7: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
5 ! Number of data
0.5540345      34.86374      ! value salinity,Rexp
1.362295      19.74526      ! value salinity,Rexp
3.925257      7.005331     ! value salinity,Rexp
10.94026      2.716602     ! value salinity,Rexp
30.05687      0.9954087    ! value salinity,Rexp
100.0000      0.3000000    0.3000000    0.0000000E+00  1.300000
2.9999999E-02 0.5600000    0.5600000    0.8000000      2.000000
0.7500000     ! Part of serial kapillary
6.000000      ! Number hydratation
3.4999999E-07 ! Konstant sorbtion
9.9999998E-03 59.00000     ! Contration g/l,molecular weight,g/l
23.50000      ! Temperature
1             1 ! Valentnost
4.4987480E-08 6.8665102E-08 ! Mobility kation,anion
                piezometro_7.EXP
                NaCl

```

El archivo tipo \*.exp tiene la siguiente estructura.

Línea 1    Número de datos (concentración de solución y resistividad de muestra)

Línea 2 – Línea 6    Valor de salinidad, y valor de Resistividad experimental de muestras de suelo

Línea 7            Primer componente de mezcla tiene capilares gruesos – como en arena o caliza    este componente tiene cinco valores: Radio de capilar en micrón, porosidad en unidades relativos (parámetro adimensional); humedad volumétrica en unidades relativos: capacidad de intercambio catiónico en  $\alpha$  /l: tortuosidad

Línea 8            Segundo componente de mezcla tiene capilares finos – como en la arcilla    este componente también tiene cinco valores: radio promedio de capilares de arcilla, porosidad de la arcilla; humedad volumétrica en unidades relativos; capacidad de intercambio catiónico en  $\alpha$  /l: Valor de coeficiente de tortuosidad de Archie-

Línea 9            Valor característico para parte de capilares de arcilla conectados en paralelo    con capilares de arena (valor recomendable es 0.75,

Línea 10 Valor de hidratación para NaCl (el valor de hidratación varia de 5 -6).

Línea 11 Constante de sorción es igual a 3.4999999E-07, no cambiar este valor.

Línea 12 Concentración de sales en solución y peso en gramos de molécula de NaCl.

Línea 13 Temperatura tomada en campo para las muestra de agua en C°

Línea 14 Carga eléctrica relativa del catión y anión, (valencia) de sal NaCl.

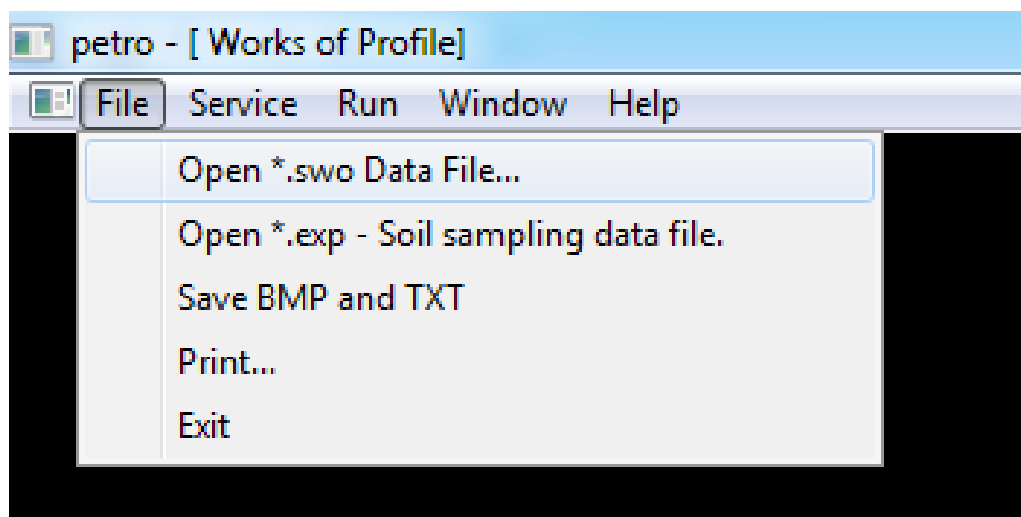
Línea 15 Movilidad de catión y anión del NaCl.

Línea 16 Nombre de este archivo

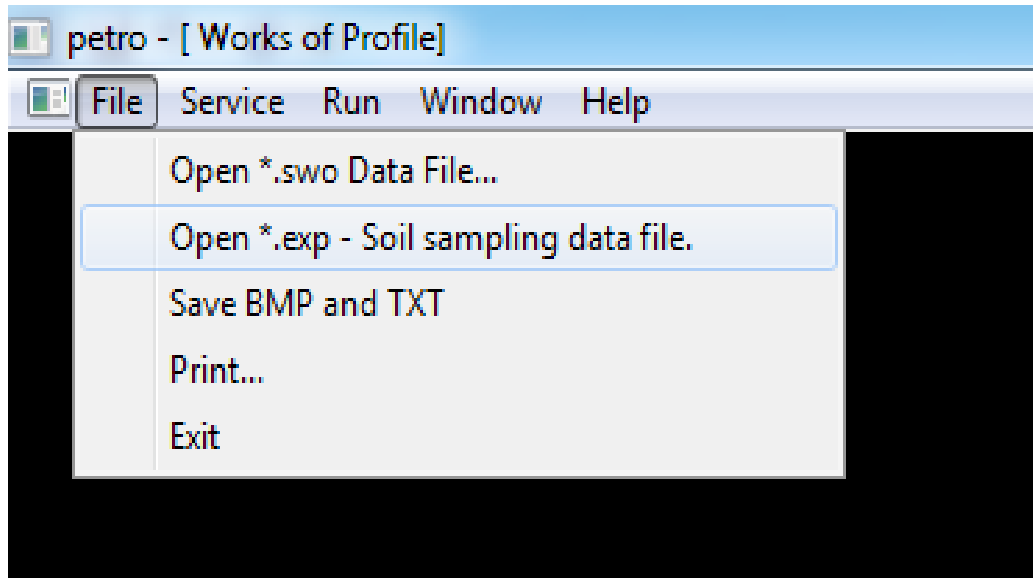
Línea 17 Tipo de sal

Una vez elaborados y ordenado los archivos de entrada en el formato requerido se procede a la inversión de los mismos. El proceso inicia con la lectura de los datos (*Figuras 37 y 38*).

**Figura 37.** Ventana de inicio de PetroWin, opción para lectura de archivo \*.swo

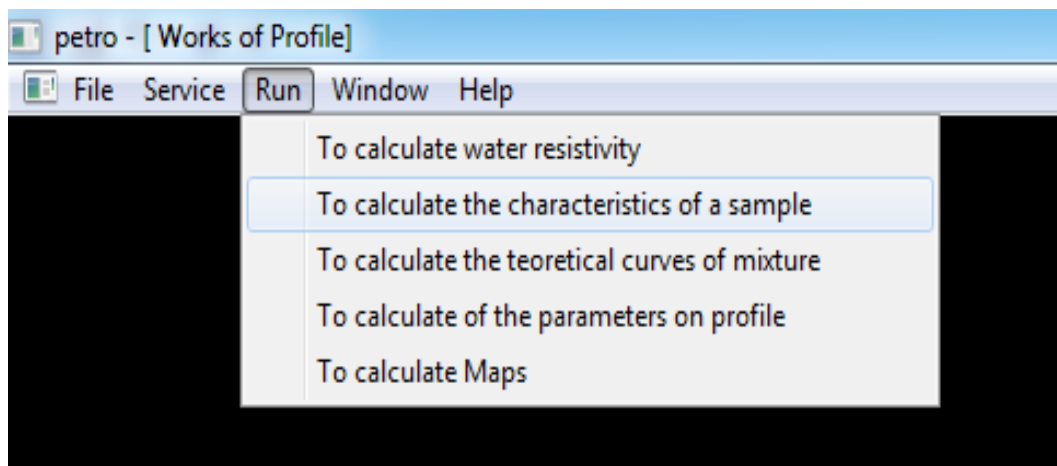


**Figura 38.** Opción para lectura de archivo \*.exp



Luego de cargar los archivos al programa podemos comenzar con el procesamiento. Seleccionando segunda opción – “To calculate the characteristics of a sample” (Figura 39) - podemos calcular las propiedades de la muestra de suelo.

**Figura 39.** Opción de cálculo de propiedades de la muestra de suelo

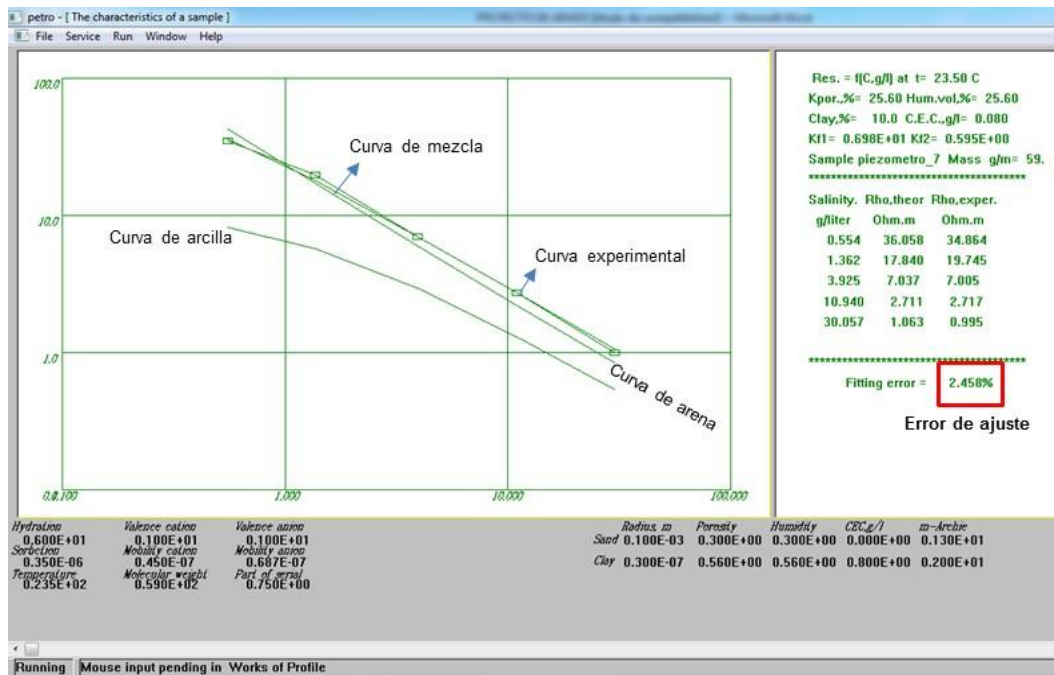


Posteriormente obtendremos los resultados de interpretación de las curvas experimental y teórica (resistividad versus salinidad), y dos curvas adicionales,

una para primer componente (arena) y la otra para segundo componente (arcilla). como se puede observar en la Figura 40.

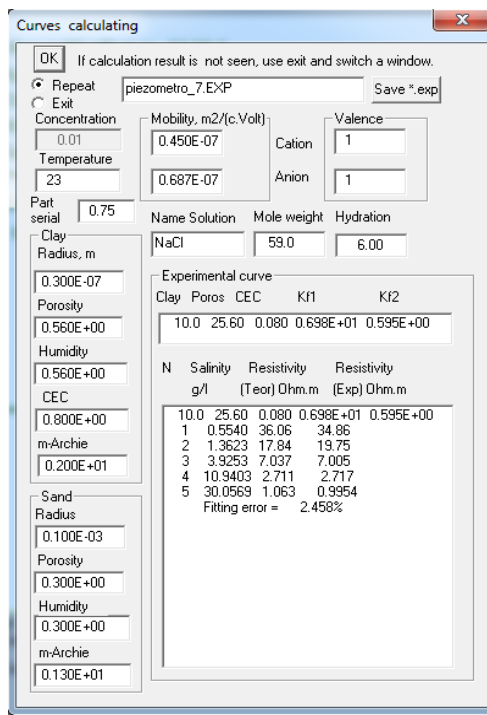
Debido a que el error de ajuste para nuestra muestra es bueno ya que no sobrepasa el 5% de error las curvas de mezcla y experimental casi se sobreponen una a la otra.

**Figura 40.** Procesamiento de datos experimentales de muestra de roca



Consecutivamente aparece una ventana de dialogo en la que se puede ver la tabla de resultados de la interpretación y el valor de error de ajuste (RMS) (Figura 41). Cuando el error de ajuste es satisfactorio (por ejemplo menor de 5%) podemos salvar los resultados de interpretación en archivo con extensión - \*.dat.

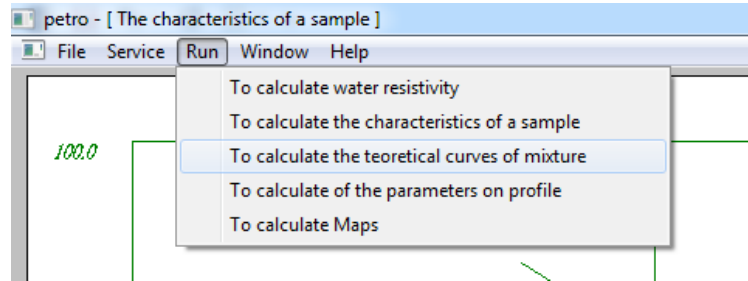
**Figura 41.** Ventana de dialogo con información sobre resultados de la muestra



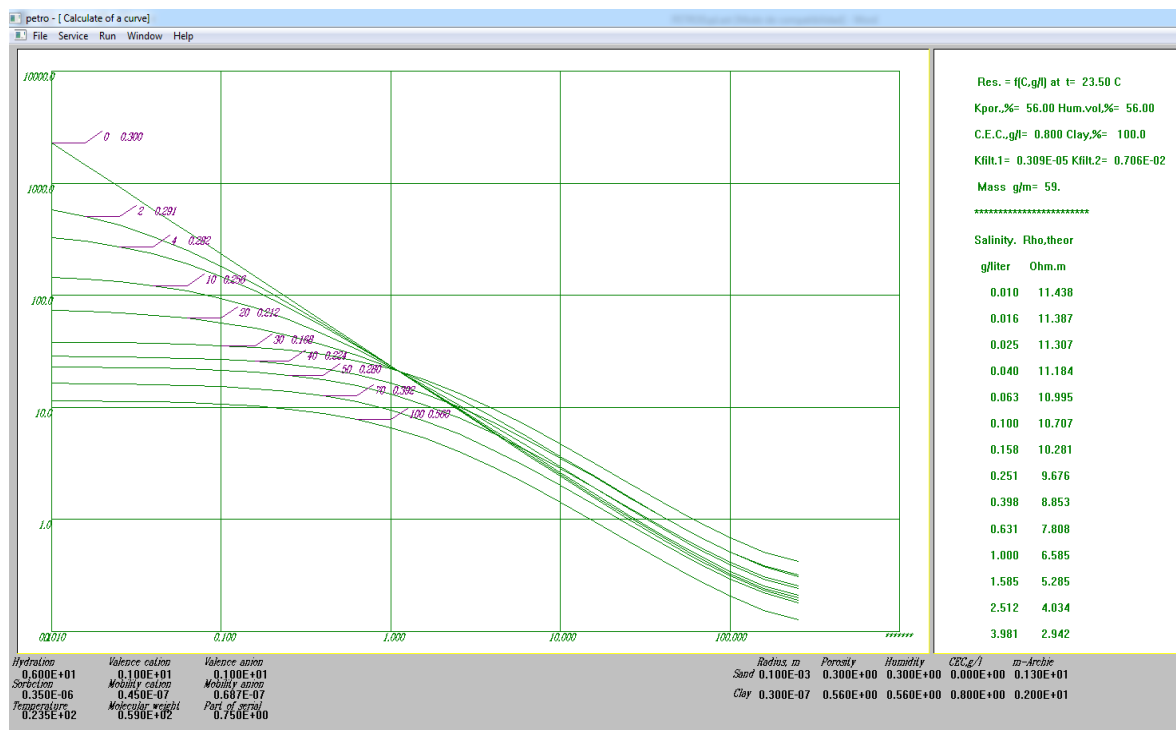
Después de obtener los parámetros de la muestra de suelo a través de la curva experimental de resistividad versus salinidad de agua, podemos usar estos resultados para calcular el grupo de curvas teóricas, que caracterizan el área de donde se extrajo la muestra de suelo. Estas curvas se obtendrán del cálculo de resistividad versus mineralización para diferentes contenidos de arcilla en una mezcla de dos componentes arena y arcilla.

Usando la opción “To calculate the teoretical curves of mixture” (Figura 42) podremos calcular las curvas teóricas de resistividad de suelo en función de mineralización de solución acuática en poros de suelo. (Figura 43)

**Figura 42.** Ventana para ingresar a la opción “To calculate the teoretical curves of mixture”



**Figura 43.** Cuervas teóricas obtenidas por el software PetroWin



## 9. VALORACIÓN DE INFORMACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 9.1 ANÁLISIS DEL INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

Durante el mes de Mayo y Junio del 2014 la empresa *Soluciones Ambientales* desarrolló el análisis físico-químico de las aguas subterráneas monitoreadas por los piezómetros de la red de seguimiento de la calidad del agua de la planta ELOGY. En los resultados de los reportes de laboratorio se evidencia una diferencia en los valores de conductividad, donde el piezómetro Pz7 se caracteriza por presentar los valores más altos (entre 796 y 1789  $\mu\text{S/cm}$ ) y el piezómetro Pz9 los valores más bajos (entre 114 y 285  $\mu\text{S/cm}$ ), indicando así que los valores de conductividad para el piezómetro Pz8 representan valores intermedios entre los otros piezómetros (entre 243 y 368  $\mu\text{S/cm}$ ). Los valores de conductividad se relacionan con los resultados del análisis de **Hidrocarburos Totales**, los cuales arrojan que el Pz7 posee los valores más altos (entre 10 y 19 mg/L), el Pz8 muestra unos valores bajos a medio (entre <3 y 4 mg/L) y el Pz9 exhibe unos valores cercanos a cero (<< 3 mg/L), demostrando que éste se encuentra ubicado en una zona no contaminada. Los resultados del análisis de **Grasas y Aceites** revelan que el Pz9 posee los valores más bajos (3 mg/L), mientras que el Pz7 presenta los valores más altos (entre 59 y 101 mg/L).

Por otra parte, los análisis de las muestras de suelo reportados por la empresa *Antek S.A.*, desarrollados entre Junio y Julio de 2014, confirman que el área de acceso a la planta (Pz9) corresponde a una zona no contaminada, ya que los análisis de **Hidrocarburos Totales** revelan una concentración entre 0.053 y <0.002 mg/L para esta área, mientras que para la zona de *Landfarming* los resultados indican una concentración de 2.1, 0.78 – 1.1 y 4.87 mg/L, respectivamente, señalando la evidente contaminación presente en esta zona de tratamiento de residuos sólidos (sedimentos) producto del proceso de separación por densidades de los residuos industriales.

Los reportes de resultados de laboratorio de las muestras de suelo incluyen información acerca del porcentaje de arena, limo y arcilla para el área de acceso a la planta (cerca al Pz9) y la zona de *Landfarming*. Los resultados obtenidos son presentados en la *Tabla 6*.

**Tabla 6.** Resultados del análisis de porcentaje de arcilla, arena y limo reportados por Antek S.A.

	<i>Landfarming</i>	Área de acceso
<b>Arcilla (%)</b>	6	12 – 22
<b>Arena (%)</b>	71	46 – 57
<b>Limo (%)</b>	23	31 – 32

Los reportes de resultados de laboratorio elaborados por las empresas *Soluciones ambientales* y *Antek S.A.*, para los análisis de agua subterránea y suelo, respectivamente, son incluidos en el **Anexo A**.

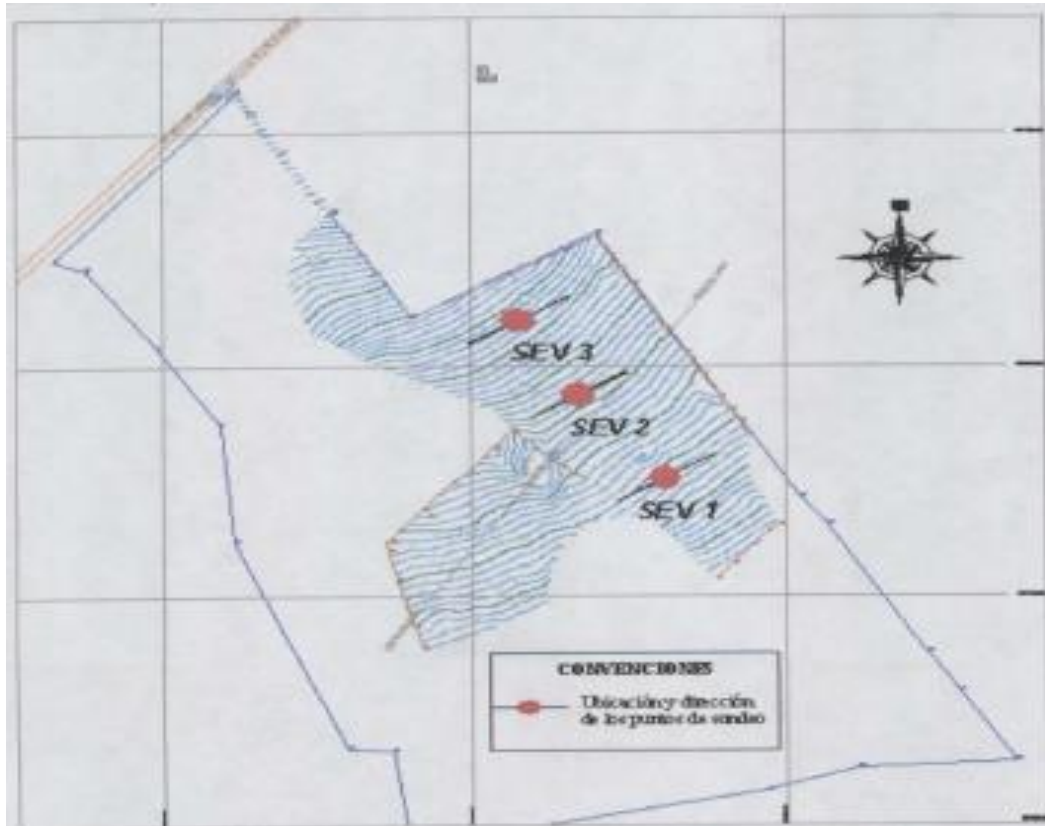
## 9.2 ANÁLISIS ESTUDIO GEOELÉCTRICO PRELIMINAR GEOSOFTMINE

La empresa GEOSOFTMINE presentó un informe con los resultados obtenidos de tres (3) Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) elaborados en la planta ELOGY antes de la construcción de la planta para un estudio de base ambiental. Los SEV se ubicaron entre las coordenadas X: 1.127.000, 1.127.750; Y: 900.000, 950.000. La localización y distribución de los SEV se puede observar en la *Figura 44*.

De acuerdo con los resultados obtenidos del estudio geoelectrico realizado por la empresa GEOSOFTMINE, el área donde se realizaron los SEV está compuesta por depósitos cuaternarios de origen aluvial (Qal), los cuales están conformados por sedimentos no consolidados de gravas, arenas y lodos. Según los resultados del estudio geoelectrico, el área está constituida por una capa de materiales arcillo-arenosos, con un rango de resistividad entre 565 y 712 Ohm.m y espesor promedio de 12 metros, suprayaciendo a una capa de arcillas arenosas con un

rango de resistividad entre 116 y 196 Ohm.m y espesor promedio de 6 metros. La secuencia anterior es subyacida por un nivel de gravas y arenas, el cual posee un rango de resistividad entre 257 y 314 Ohm.m y espesor promedio de 28 metros. Los resultados obtenidos en el estudio se pueden observar en la *Tabla 7*.

**Figura 44.** Distribución SEV desarrollados por GEOSOFTMINE.



**Fuente:** GEOSOFTMINE

**Tabla 7.** Resultados del estudio geoelectrico desarrollado por GEOSOFTMINE.

SEV 1			
CAPA	PROFUNDIDAD (m)	RESISTIVIDAD (Ohm.m)	INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA
1	0 – 13.7	712	Materiales arcillo-arenosos
2	13.7 – 18.6	162	Arcillas arenosas
3	18.6 – 50.9	314	Nivel de gravas y arenas
SEV 2			
CAPA	PROFUNDIDAD (m)	RESISTIVIDAD (Ohm.m)	INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA
1	0 – 10.1	667	Materiales arcillo-arenosos
2	10.1 – 15.7	116	Arcillas arenosas
3	15.7 – 41.4	276	Nivel de gravas y arenas
SEV 3			
CAPA	PROFUNDIDAD (m)	RESISTIVIDAD (Ohm.m)	INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA
1	0 – 12	565	Materiales arcillo-arenosos
2	12 – 19.3	196	Arcillas arenosas
3	19.3 – 43.4	257	Nivel de gravas y arenas

## 10. RESULTADOS

### 10.1 EXPLORACIÓN GEOELÉCTRICA

Los resultados de las tomografías eléctricas de resistividad realizadas en campo son mostrados a través de imágenes que evidencian la variación de resistividad real en el subsuelo. Durante el trabajo de campo se llevaron a cabo 15 perfiles geoeléctricos con características diferentes, distribuidos en tres (3) áreas de la planta ELOGY: ocho(8) perfiles en el área de las piscinas de almacenamiento de residuos industriales, cuatro (4) perfiles en la zona de *Landfarming*, y los tres últimos perfiles se llevaron a cabo en el área destinada para la aspersion de la fase liquida (agua) producto del proceso de separación por densidades de los residuos industriales la cual hipotéticamente es una área no contaminada ya que los análisis de laboratorio del agua dan como resultado la no presencia de hidrocarburos. Esta área nos servirá de apoyo a los resultados obtenidos. En la *Tabla 8* se pueden observar las características de los perfiles geoeléctricos realizados durante el trabajo de campo.

**Tabla 8.** Características de los perfiles geoelectricos.

	Perfil	Longitud (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Profundidad máxima (m)	RMS-error (%)
Área de piscinas (1-4)	1	100	1	13	4.7
	2	80	1	13	3.7
	3	100	1	13	6.4
	4	80	1	13	7.6
Área de piscinas (5-6)	5	64	0.8	10.5	7
	6	64	0.8	10.5	9.8
	7	64	0.8	10.5	3.4
	8	64	0.8	10.5	7.6
Área de landfarming	9	64	0.8	10.5	3.1
	10	64	0.8	10.5	3.8
	11	64	0.8	10.5	4.4
	12	64	0.8	10.5	4.8
Área de aspersión	13	80	1	13	1.17
	14	80	1	13	1.2
	15	80	1	13	2.9

Los perfiles geoelectricos fueron generados a partir del procesamiento de los datos adquiridos en campo. El proceso de inversión genera, a partir de la pseudosección de resistividad aparente (datos de campo), un modelo de la distribución de la resistividad real del subsuelo que pueda ser considerada como una solución válida de los datos experimentales, de forma que el modelo teórico de ésta sea similar a las observaciones de campo. El criterio de convergencia del proceso está relacionado con el cálculo del error cuadrático medio (RMS), determinado entre los datos experimentales (datos de campo) y la respuesta del modelo deducido. Cuando se fije en un valor menor al 10% se considera que el ajuste entre los datos y los resultados es óptimo (GEOTOMO SOFTWARE, 2013).

Las anomalías geofísicas se interpretan en términos de modelos geoelectricos simplificados, suponiendo que las propiedades físicas son homogéneas dentro de

cada uno de los cuerpos. Por tal motivo, la interpretación sólo representa una aproximación de las condiciones geológicas y estructuras que involucran un cambio en las propiedades del medio, de acuerdo a los objetivos de interés.

**10.1.1 Piscinas (1-4).** En la imagen de resistividad para la Tomo-01 (*Figura 45*), se observa una capa de resistividad media (entre 400 y 1500 Ohm.m) en la superficie, con un espesor máximo de un metro, suprayaciendo a una segunda capa caracterizada por valores de baja resistividad (entre 40 y 200 Ohm.m), con un espesor aproximado de 2.5 metros. Adicionalmente, se observa una tercera capa de resistividad media (entre 200 y 700 Ohm.m) que se ubica a una profundidad de 3 metros con un espesor máximo de 5 metros. Aproximadamente, a partir de los 8 metros de profundidad se identifica una cuarta capa con valores bajos de resistividad (entre 50 y 200 Ohm.m). Los valores más altos de resistividad ( $> 1250$  Ohm.m) se ven reflejados en una zona anómala del perfil, ubicada entre los 70 y 76 metros de extensión, a una profundidad de 4.5 metros y se extiende hasta el fondo de la imagen, reflejando su continuidad en profundidad.

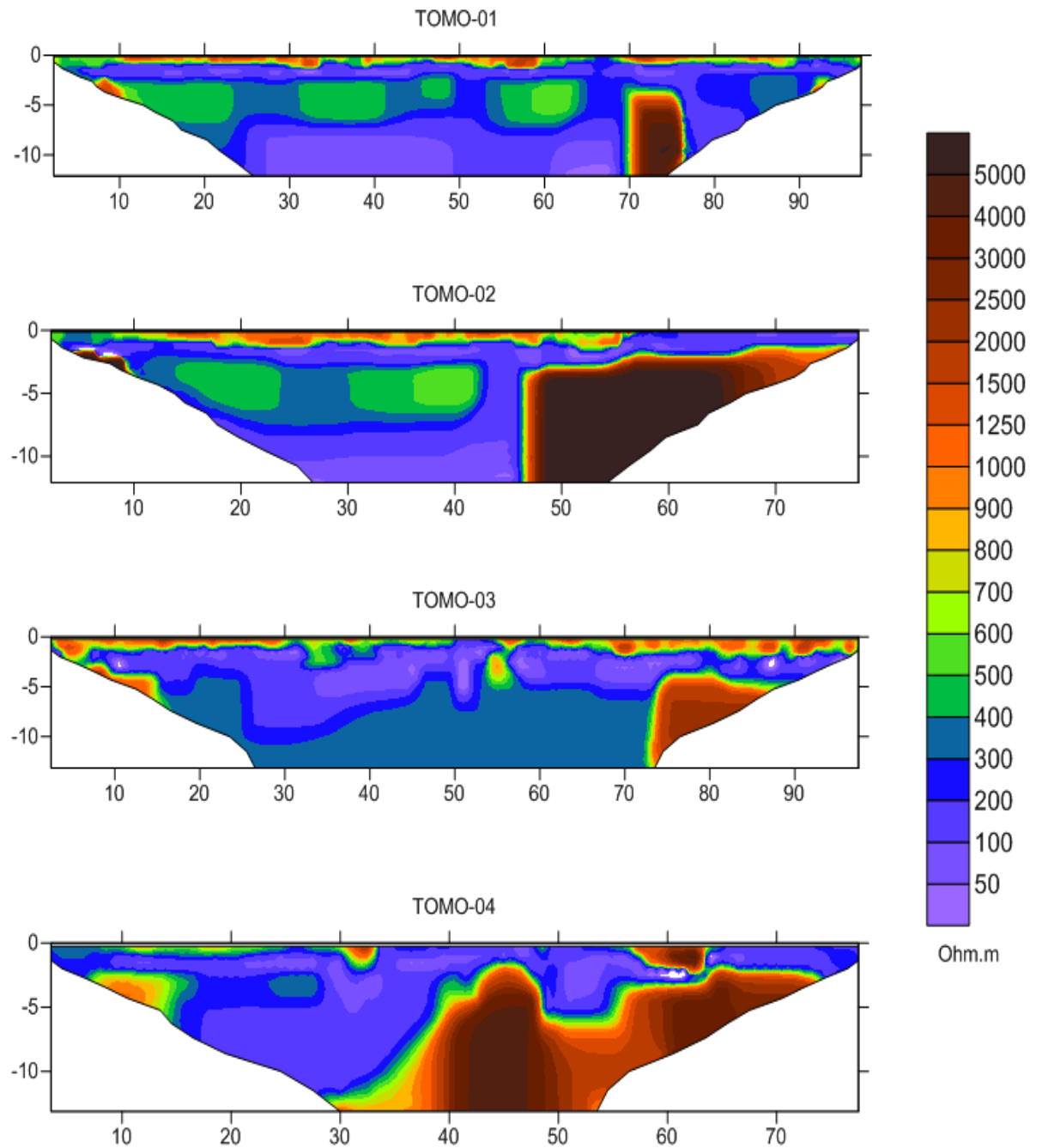
En la imagen de resistividad para la Tomo-02 (*Figura 45*) se observa una respuesta eléctrica semejante a la de la Tomo-01. Las capas 1 – 4 conservan las mismas características que las descritas anteriormente. En la Tomo-02 existe una anomalía resistiva con valores  $> 1250$  Ohm.m, ubicada a 2 metros de profundidad a partir de los 46 metros de extensión y con un espesor sin determinar debido a su prolongación hasta la máxima profundidad dejando en evidencia su continuidad hacia el fondo y el costado derecho de la imagen.

En la Tomo-03 (*Figura 45*) se observa una capa de resistividad media (entre 400 y 1500 Ohm.m) en la superficie con un espesor máximo de 2 metros en los extremos de la imagen, que disminuye hacia en centro de la misma. Adicionalmente, se pueden apreciar otras dos capas: la capa 2, con un espesor máximo de 5 metros y un rango de resistividad entre 20 y 200 Ohm.m, y la capa 3 ubicada a una profundidad de 5 metros que se extiende hasta el fondo de la

imagen alcanzando un rango de resistividad entre 200 y 400 Ohm.m. Se observan una zonas anómalas con un rango de resistividad entre 1500 – 3000 Ohm.m se evidencian en los extremos de la imagen, ubicadas a un profundidad aproximada de 4 metros.

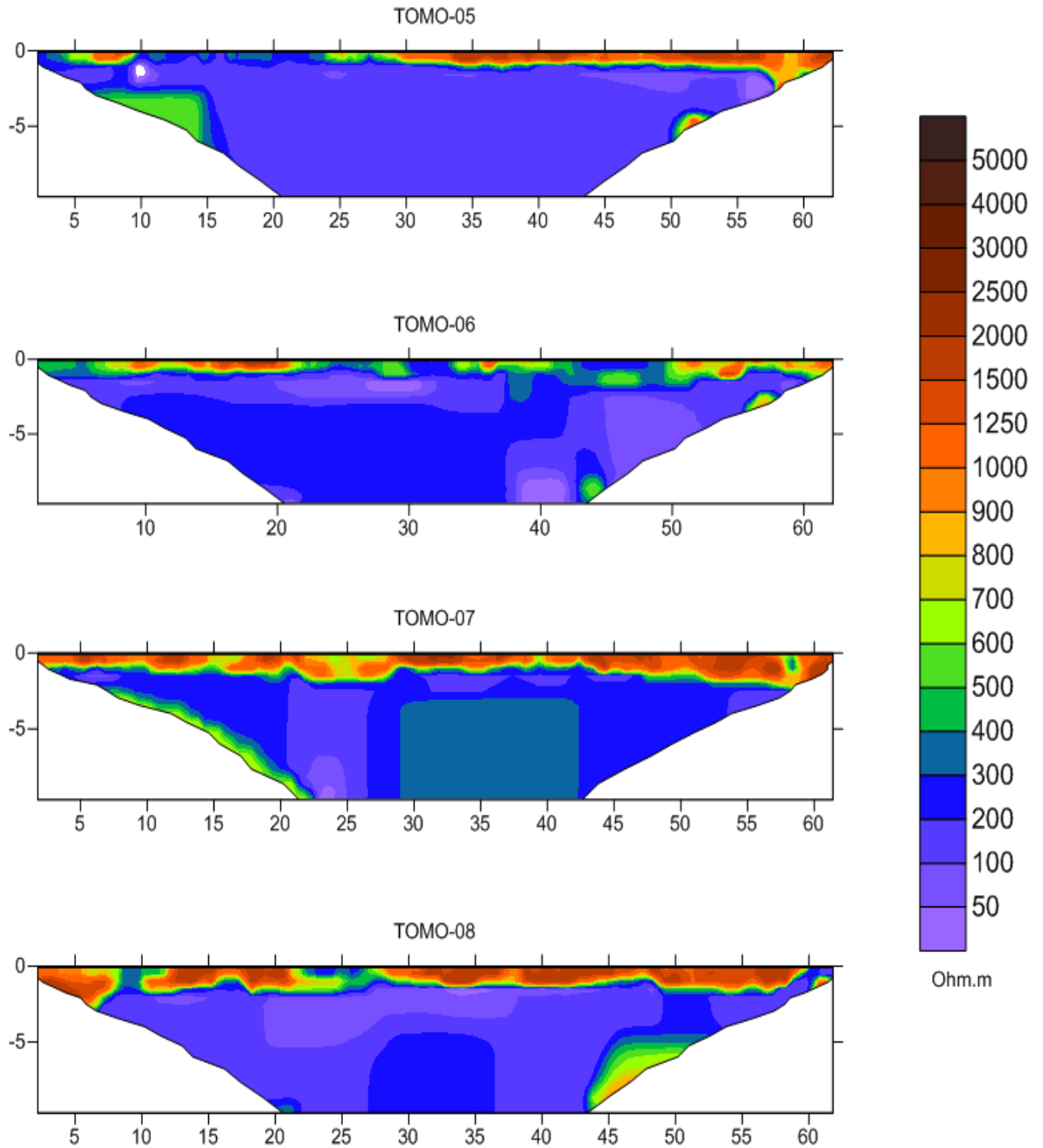
En la sección de resistividad para la Tomo-04 (*Figura 45*) se aprecia una delgada capa en la superficie, entre los 8 y 32 metros de extensión, con un espesor máximo de un metro y un rango de resistividad entre 500 y 900 Ohm.m. Los valores de resistividad comunes en la Tomo-04 4 se encuentran entre 30 y 400 Ohm.m, divididos en dos capas: una capa de (30 – 200 Ohm.m) y la otra capa entre (200 – 400 Ohm.m). Dos anomalías resistivas que pueden ser identificadas en la imagen, con valores de resistividad entre 2000 y 4800 Ohm.m.

**Figura 45.** Perfiles geoelectricos de resistividad (P1, P2, P3 y P4) localizados en la zona de piscinas 1-4.



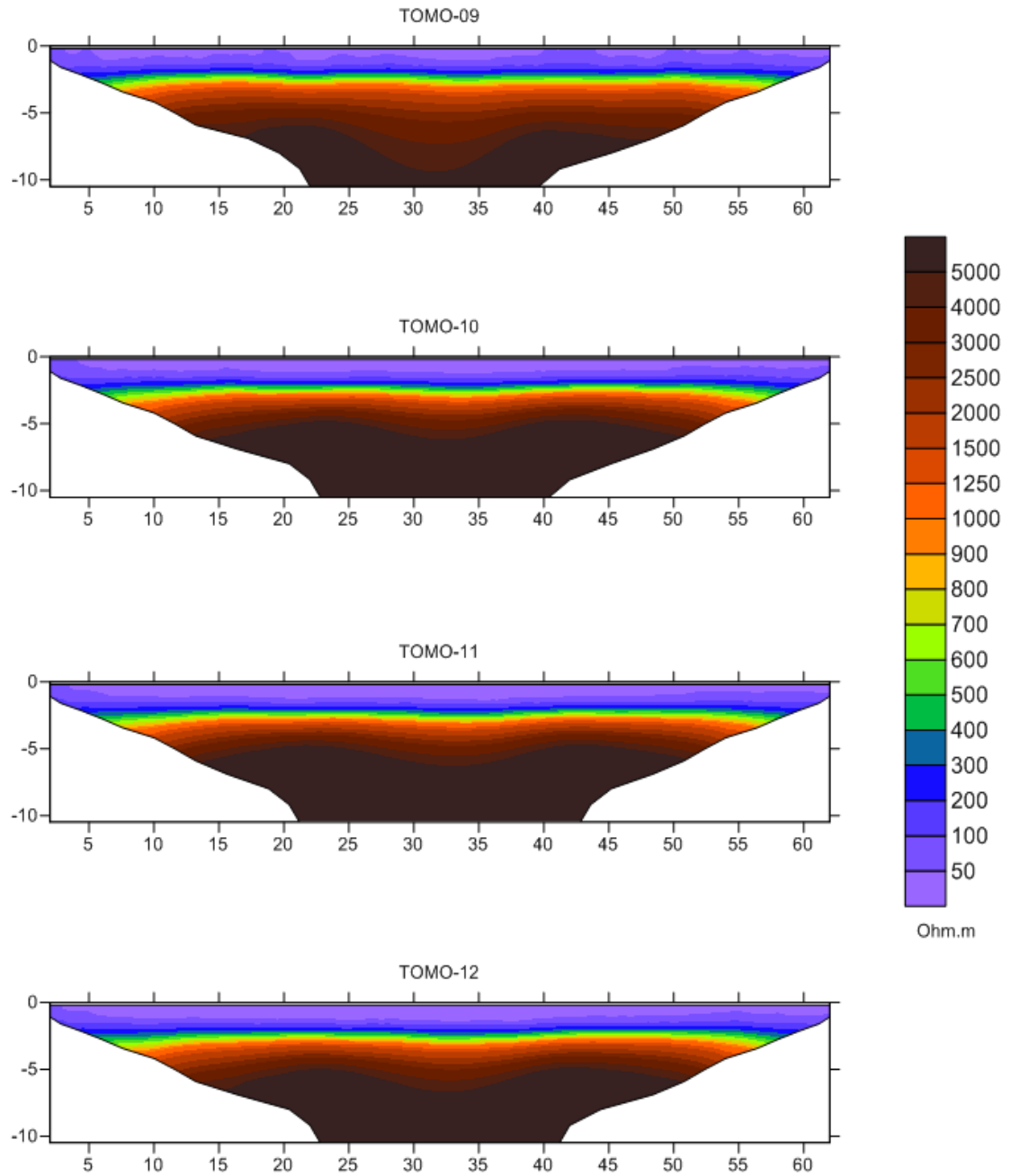
**10.1.2 Piscinas (5-6).** En las secciones de resistividad para las *Tomo\_0 5 – 08* (*Figura 46*) se observa una capa de 1 – 3 metros de espesor, discontinua en las tomografías 5 y 8, con un rango de resistividad entre 400 y 1500 Ohm.m. El rango de resistividad que predomina en los perfiles corresponde a valores entre 20 y 400 Ohm.m, divididos en dos capas: una capa (20 – 200 Ohm.m) y otra capa (200 – 400 Ohm.m). Adicionalmente se pueden observar en todas las tomografías diversas anomalías resistiva, localizadas principalmente en los extremos de las imágenes con valores entre 400 a 1000 Ohm.m.

**Figura 46.** Perfiles geoelectricos de resistividad (P5, P6, P7 y P8) localizados en la zona de piscinas 5-6.



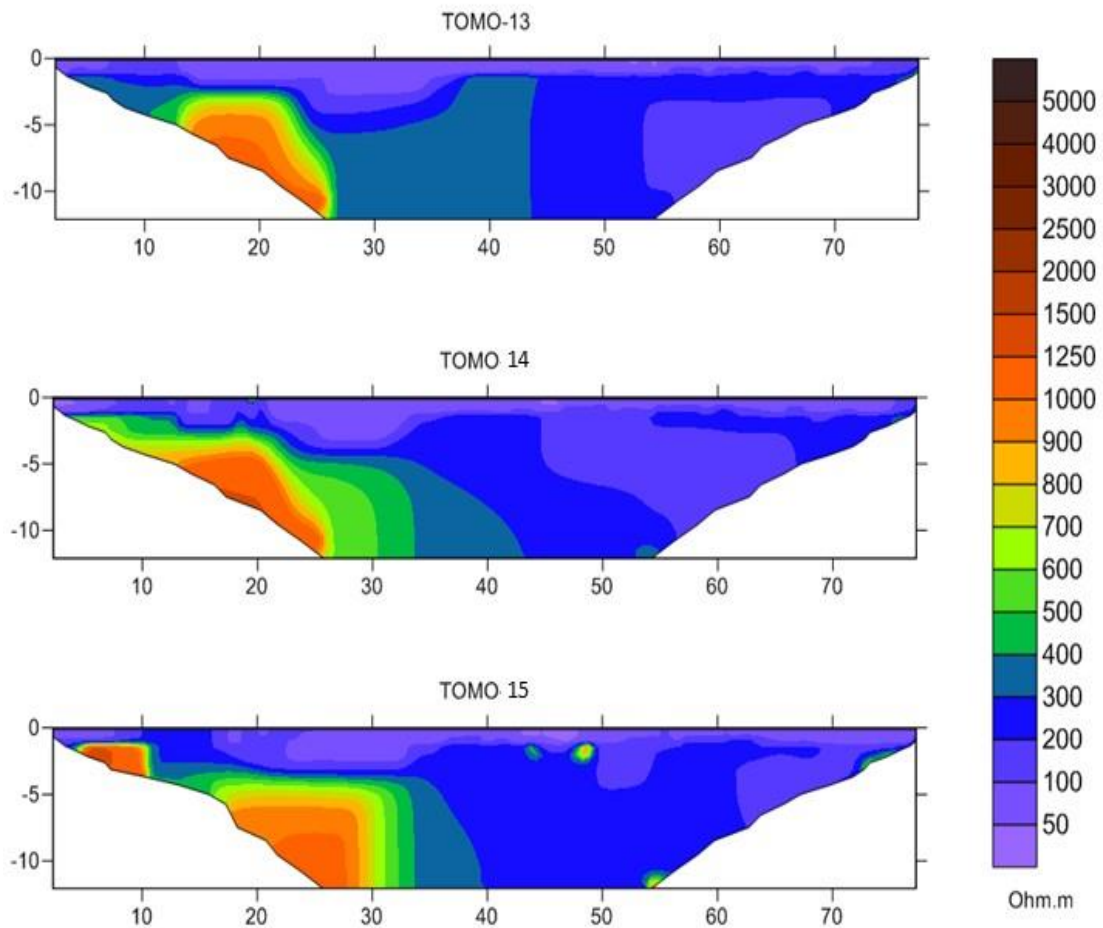
**10.1.3 Landfarming.** Las imágenes de resistividad para las tomografías 9 – 12 fueron realizadas en la zona de Landfarming (*Figura 47*). Las tomografías realizadas en esta zona presentan valores de resistividad muy parecidos, podemos observar una capa superficial con un rango de resistividad entre 20 y 300 Ohm.m, la cual posee un espesor de aproximadamente 2 metros y suprayace una capa la cual posee un rango de resistividad muy amplio y evidencia unos valores muy elevados (entre 900 y 5000 Ohm.m)

**Figura 47.**Perfiles geoelectricos de resistividad (P9, P10, P11 y P12) localizados en el área de Landfarming.



**10.1.4 Zona de aspersión.** En las secciones de resistividad para las tomografías 13 – 15, (Figura 48) se observa una capa en superficie con un espesor máximo de 3 metros y valores bajos de resistividad (entre 20 y 200 Ohm.m) supra yaciendo una segunda capa la cual posee un rango de resistividad entre 200 y 400 Ohm.m y se extiende hasta el fondo de la imagen. En el extremo izquierdo de las imágenes se puede observar la presencia de una anomalía de resistividades con valores entre 400 y 1000 Ohm.m.

**Figura 48.**Perfiles geoelectricos de resistividad (P13, P14 y P15) localizados en el área de Aspersión.



## 10.2 MODELACIÓN PETROFÍSICA DEL SUELO

El resultado del cálculo de los límites de resistividad para la determinación de áreas contaminadas por hidrocarburos en la planta ELOGY se definió en función de los valores de resistividad teóricos determinados por medio de la modelación de los parámetros petrofísicos (PP) del suelo en condiciones de saturación total mediante la implementación del software PetroWin.

La modelación de los parámetros petrofísicos del suelo se basa en la relación existente entre la resistividad del suelo y la salinidad del agua intersticial por lo que se hace necesaria la construcción de curvas que relacionen estas variables. De acuerdo a los resultados de resistividad obtenidos de las muestras de agua fue posible determinar los valores de salinidad para cada una de ellas. La *Tabla 9* muestra los resultados obtenidos del muestreo de agua tomados en campo.

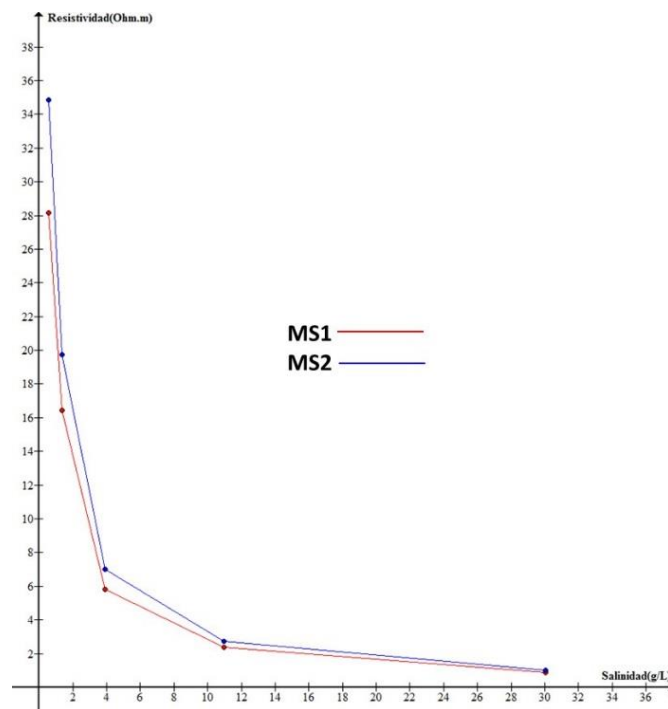
**Tabla 9.** Datos recolectados de los piezómetros de la red de monitoreo de aguas subterráneas. Valores de resistividad y nivel piezométrico del agua subterránea ELOGY

	Pz 7	Pz 8	Pz 9		Pz 7	Pz 8	Pz 9	
	314 msnm	312 msnm	325 msnm		314	312	316	[msnm]
Fecha	Profundidad del nivel freático				Nivel piezométrico del agua			
14/07/2014	290	520	97	[cm]	311.1	306.8	315.0	[msnm]
15/07/2014	278	595	300	[cm]	311.2	306.1	313.0	[msnm]
16/07/2014	290	555	320	[cm]	311.1	306.5	312.8	[msnm]
17/07/2014	285	440	306	[cm]	311.2	307.6	312.9	[msnm]
18/10/2014	293	547	290	[cm]	311.1	306.5	313.1	[msnm]
	Conductividad eléctrica				Resistividad eléctrica			
14/07/2014	292.0	157.6	31.2	[ $\mu$ s/cm]	34.2	63.5	320.5	[Ohm.m]
15/07/2014	297.0	153.7	32.4	[ $\mu$ s/cm]	33.7	65.1	308.6	[Ohm.m]
17/07/2014	324.0	157.2	32.0	[ $\mu$ s/cm]	30.9	63.6	312.5	[Ohm.m]
18/07/2014	286.0	209.5	34.5	[ $\mu$ s/cm]	35.0	47.7	289.9	[Ohm.m]

Adicionalmente, para la correcta modelación de los parámetros petrofísicos es necesario calcular los valores de resistividad del suelo en función de valores

teóricos de salinidad. Mediante la implementación del **SOIL BOX RESISTIVITY** se determinó la resistividad de las muestras de suelo **MS1** y **MS2** para diferentes valores de salinidad del agua (0.55 – 1.36 – 3.92 – 10.94 – 30.05 g/l). La *Figura 49* muestra las curvas que relacionan la resistividad del suelo y la salinidad del agua para las muestras **MS1** y **MS2**.

**Figura 49.** Relación resistividad del suelo y la salinidad del agua para las muestras *MS1* y *MS2*.



La creación del modelo de los parámetros petrofísicos del área de estudio se determinó por medio de la obtención de modelos independientes creados para las muestras **MS1** y **MS2**. Por lo tanto la determinación de los propiedades fisicoquímicas (humedad, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y granulometría) de las muestras de suelo **MS 1 – 2** son parámetros determinantes en la variación de los rangos de resistividad para cada muestra. La *Tabla 10* muestra los resultados obtenidos del análisis de las propiedades fisicoquímicas de suelo realizado en el laboratorio.

**Tabla 10.** Análisis de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de suelo MS 1- 2

COD	CIC	HUMEDAD (%)	ARCILLAS (%)
MS 1	5	8.3	22
MS 2	0.8	9.5	22

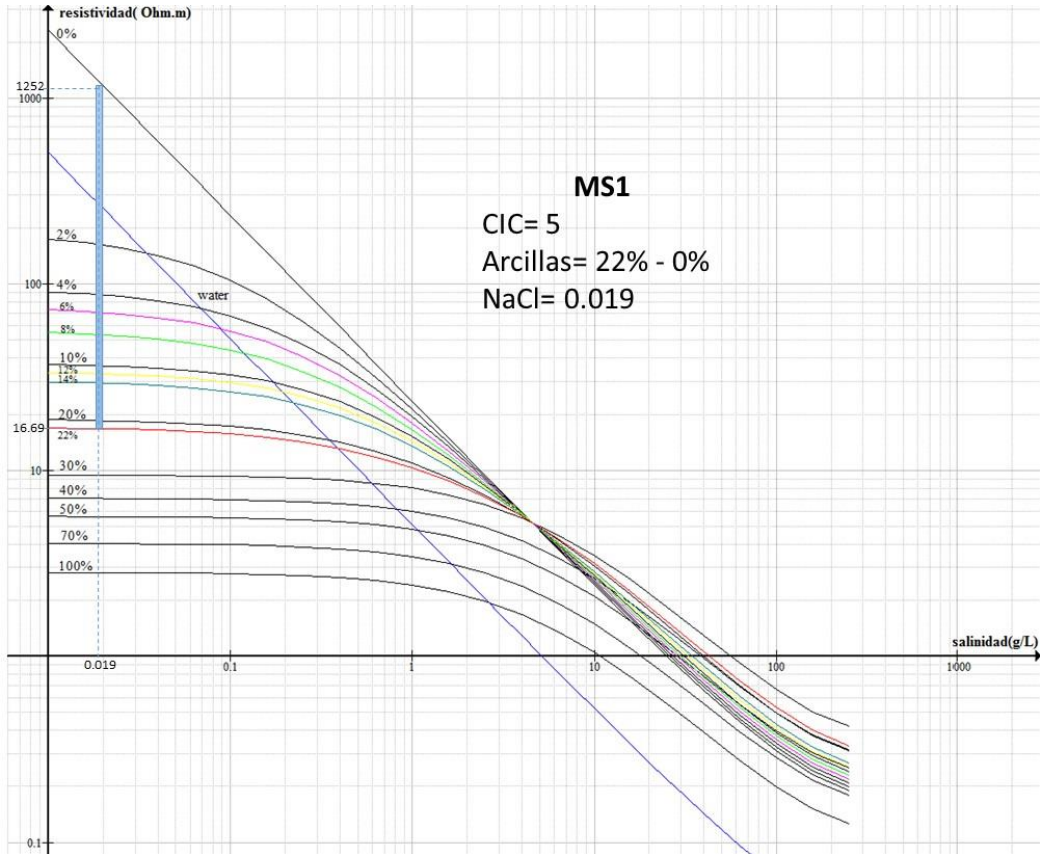
CIC fue determinada teóricamente mediante el ajuste de los parámetros petrofísicos de los componentes del suelo a través del software Petrowin.

Finalmente, el valor de resistividad eléctrica del agua utilizado para la modelación petrofísica es el promedio de los valores obtenidos del muestreo en el piezómetro PZ 9 que corresponde a un valor de 307.9 Ohm.m (Tabla 9) el cual equivale a un contenido de sales disueltas en el agua de 0.0195 g/l este valor se obtiene utilizando la formula  $C = \frac{\rho}{\rho}$  donde C representa el contenido de sal (NaCl) y  $\rho$  resistividad. Partiendo de la premisa que este piezómetro nueve (9) se encuentra en un área libre de contaminación, de acuerdo a los resultados de laboratorio reportados por la empresa *Soluciones Ambientales* que indican un nivel cercano a cero en el resultado del análisis de contenido hidrocarburos totales

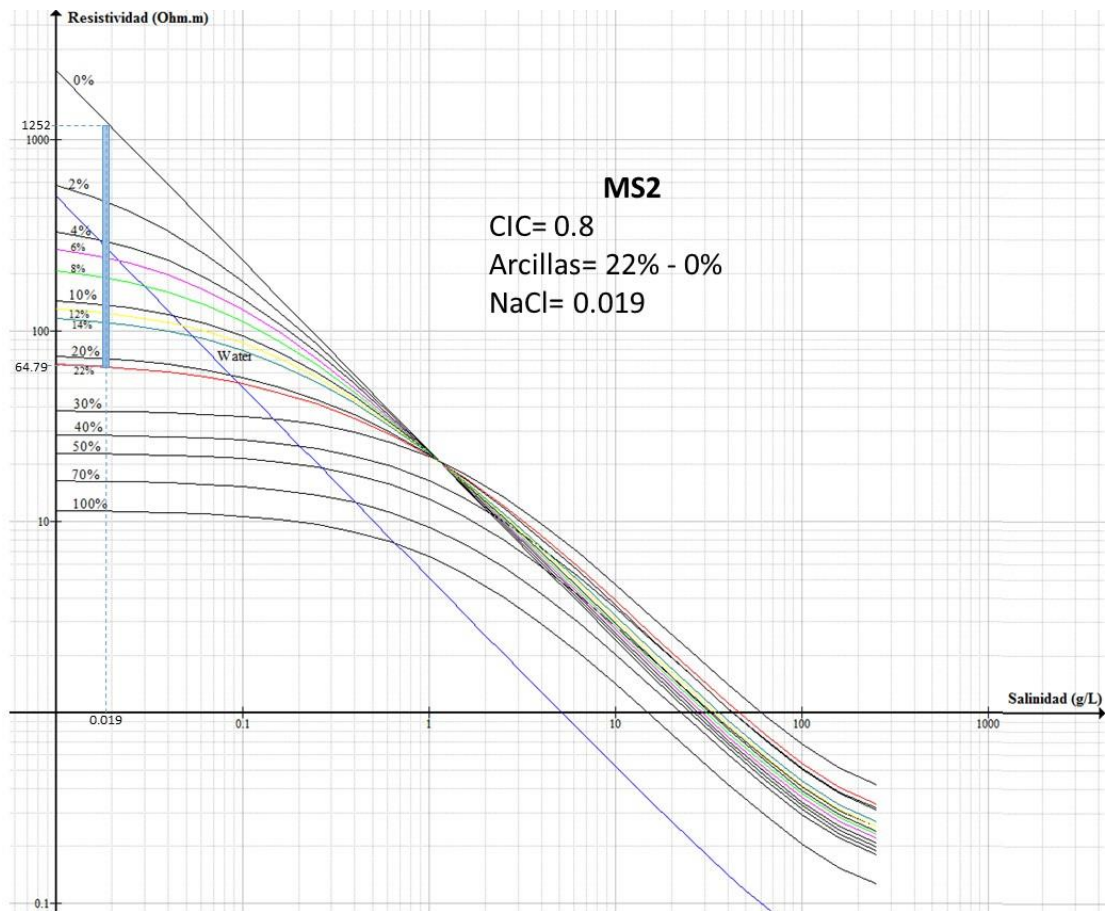
#### 10.2.1 Modelación petrofísica del suelo – Zona saturada

En las *Figuras 50 y 51* se muestran los modelos petrofísicos generados para las muestras de suelo **MS1** y **MS2** en condición de completa saturación. Los valores de resistividad de acuerdo a la modelación petrofísica de las muestras de suelo **MS1** y **MS2** se encuentran entre los rangos 16.69 – 1252 y 64.79 – 1252 Ohm.m respectivamente. Donde el máximo valor corresponde a litologías arenosas (0% arcilla), mientras que el límite inferior de resistividad corresponde a litologías con un porcentaje de arcilla del 22%.

**Figura 50.** Modelo petrofísico de suelo MS 1 para condiciones de completa saturación



**Figura 51.** Modelo petrofísico de suelo MS 2 para condiciones de completa saturación.



## 11. INTERPRETACION DE RESULTADOS

### 11.1 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA DE LOS DATOS DE RESISTIVIDAD

**11.1.1 Piscinas (1-4).** En la sección de resistividad para los perfiles 1 - 4 se identificó una capa con valores de resistividad eléctrica entre 400 y 1500 Ohm.m en la superficie a lo largo de los perfiles con un espesor aproximado de 1 metro, lo cual se relaciona posiblemente con una capa conformada principalmente por sedimentos no consolidados de arenas y gravas en diferentes proporciones. Lo anterior se evidencia claramente en la localización de un relleno en el área adjunta a las piscinas, como se puede observar en la *Figura 52*.

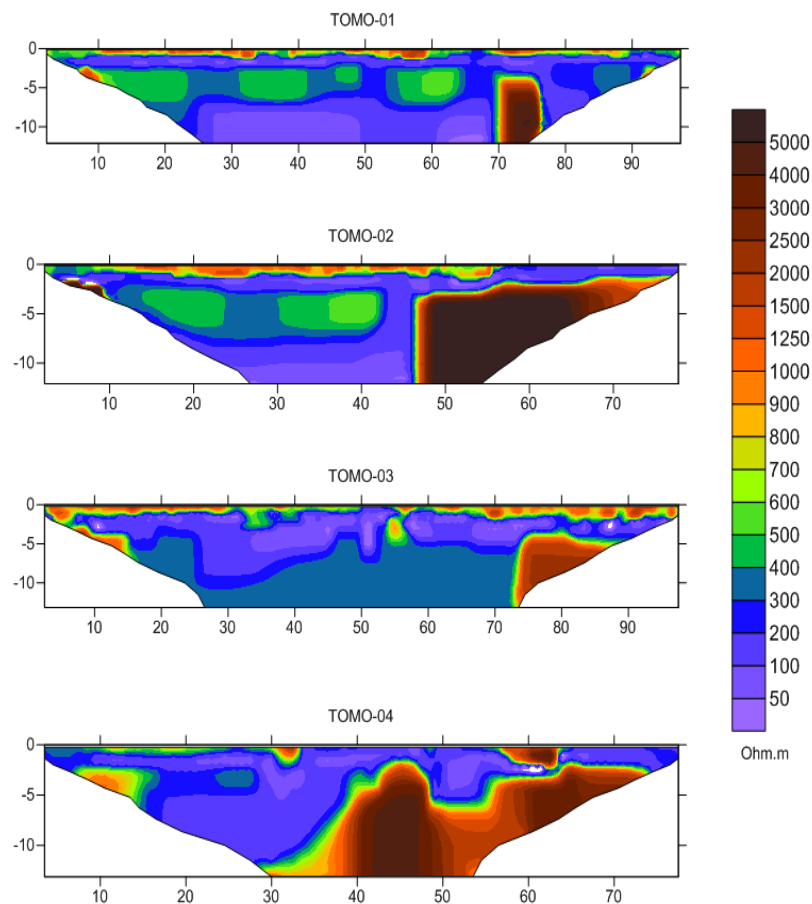
**Figura 52.** Capa de sedimentos no consolidados localizados en áreas adjuntas a la piscinas 1-4.



Subyaciendo a esta capa, se presenta una zona con valores de resistividad bajos (entre 40 y 200 Ohm.m), con espesores variables dependiendo del perfil, que se

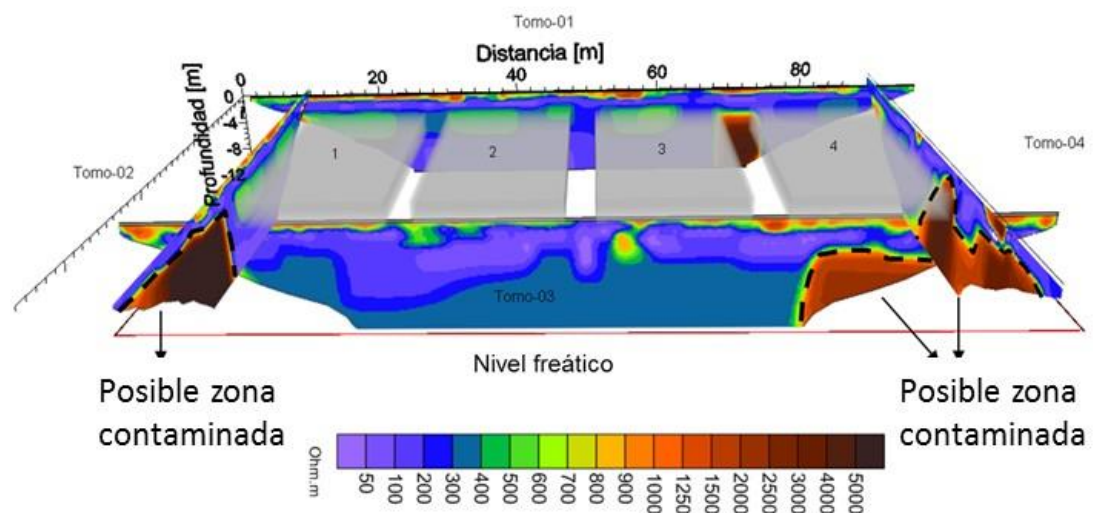
podrían relacionar con un suelo principalmente arcilloso con diferentes proporciones de arena. Adicionalmente, se logra observar en cada uno de los perfiles una capa de resistividad media con valores entre 200 y 700 Ohm.m, la cual se relaciona posiblemente con un suelo principalmente arenoso con diferentes proporciones de arcilla. Sin embargo, para los perfiles 1 y 2 es posible observar la existencia de una capa con valores de resistividad entre 40 y 200 Ohm.m, muy similar a la que se presenta subyaciendo a la capa conformada por sedimentos no consolidados de arenas y gravas, la cual se podría relacionar nuevamente con un suelo arcillo-arenoso (Figura 53).

**Figura 53.** Perfiles geoelectricos de resistividad (P1, P2, P3 y P4) localizados en la zona de piscinas 1-4.



En los *Perfiles 1, 2, 3 y 4*, localizados en la zona de piscinas 1 – 4, se observan diversas anomalías resistivas, las cuales se correlacionan espacialmente con valores altos de resistividad ( $> 1250 \text{ Ohm.m}$ ) (Figura 53). La distribución geoespacial de las anomalías resistivas se encuentran asociadas muy probablemente con áreas contaminadas por hidrocarburos. De acuerdo a las mediciones realizadas en el piezómetro Pz 8, el nivel freático se encuentra a una profundidad aproximada de 3 m de la superficie, por lo tanto podemos inferir que la pluma contaminante tiende a percolar por debajo del nivel de las aguas subterráneas ocasionado por fugas en las piscinas de almacenamiento de residuos industriales. En la *Figuras 54* se puede observar el modelo en 3D de resistividad del suelo para la zona de Piscinas 1 – 4.

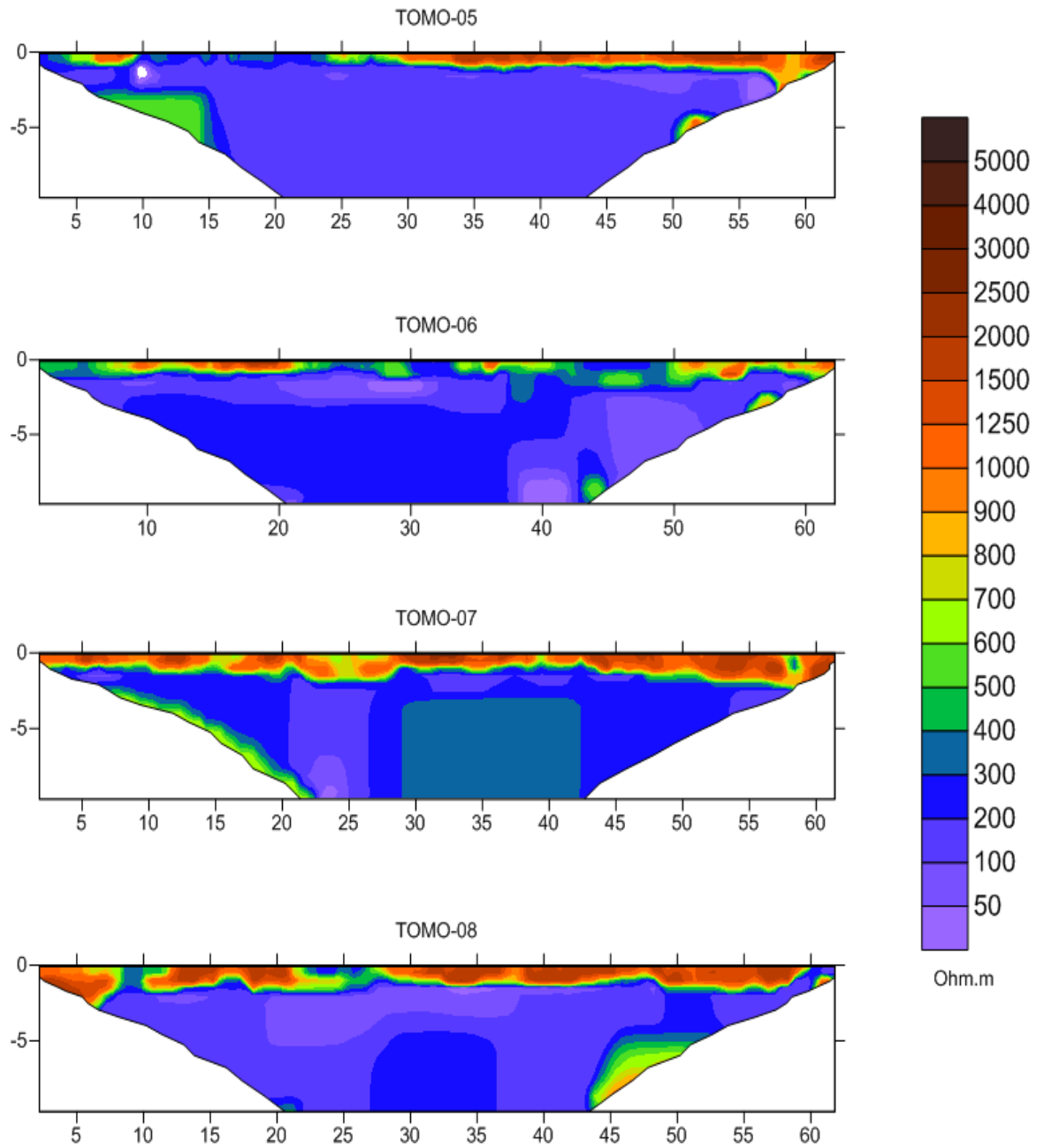
**Figura 54.** Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Piscinas 1 – 4



### 11.1.2 Piscinas (5-6)

Los *Perfiles 5, 6, 7 y 8* localizados en la zona de piscinas 5 – 6 presentan un comportamiento en los valores de resistividad muy similares a los presentados en la zona de piscinas 1 – 4 (*Figura 55*), donde se identifica una capa conformada principalmente por sedimentos no consolidados de arenas y gravas en diferentes proporciones, que corresponde al relleno mostrado en la *Figura 56*. Subyaciendo esta capa, se observa una capa relacionada con un suelo principalmente arcilloso con diferentes proporciones de arena de valores de resistividad entre 20 y 200 Ohm.m y la capa que se relaciona con un suelo principalmente arenoso que se encuentra por debajo del nivel freático que presenta valores de resistividad entre 200 y 400 Ohm.m. Adicionalmente, se identificaron zonas de anomalías resistivas con altos valores de resistividad (> 900 Ohm.m). La *Figura 57* exhiben el modelo 3D elaborado en esta área.

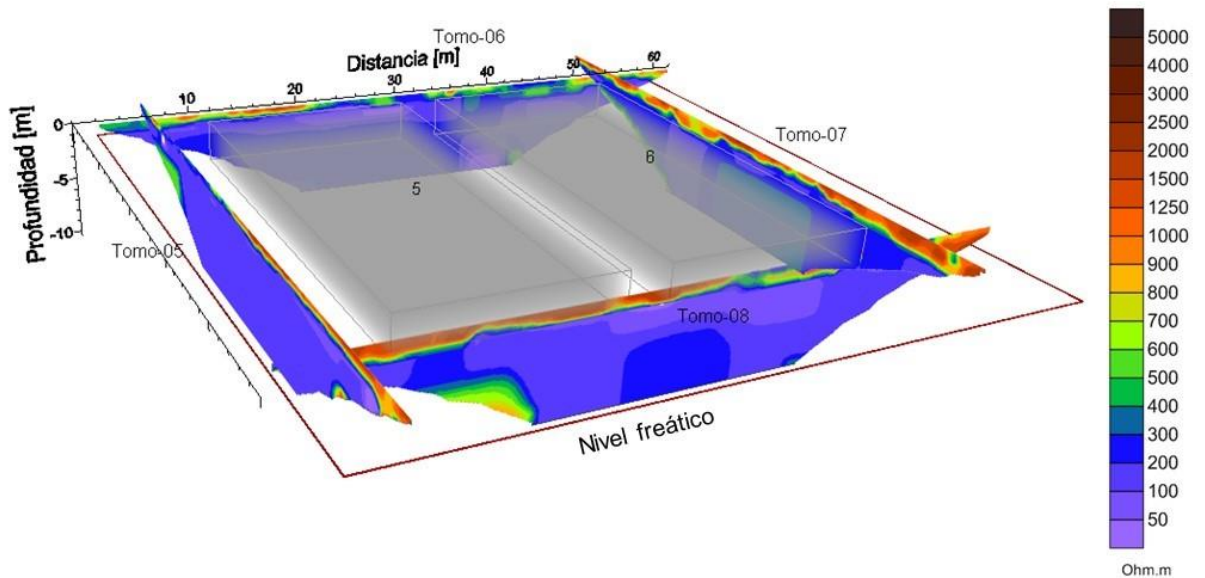
**Figura 55.** Perfiles geoelectricos de resistividad (P5, P6, P7 y P8) localizados en la zona de piscinas 5-6.



**Figura 56.** Capa de sedimentos no consolidados localizados en áreas adjuntas a la piscinas 5-6.



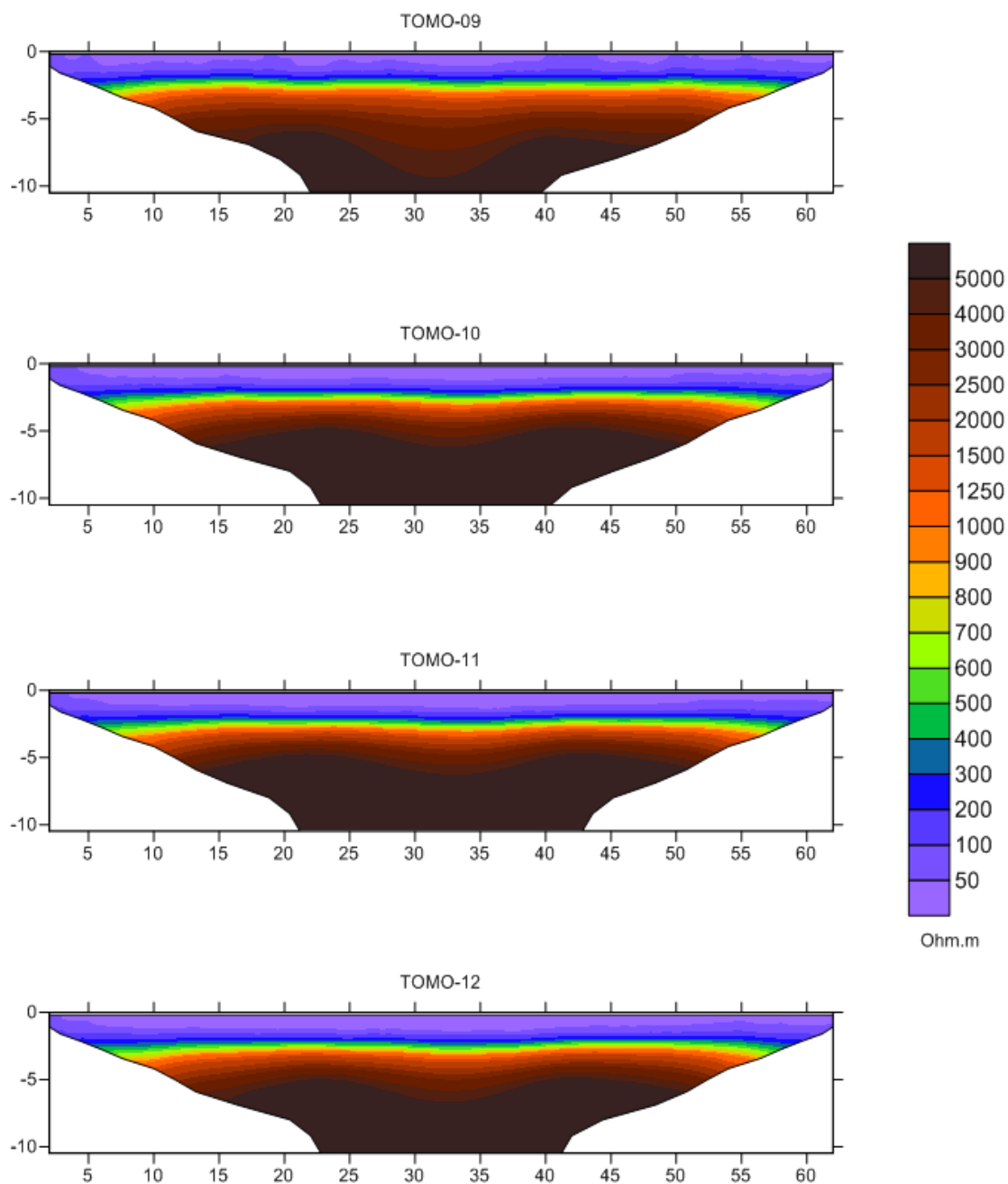
**Figura 57.** Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Piscinas 5 – 6.



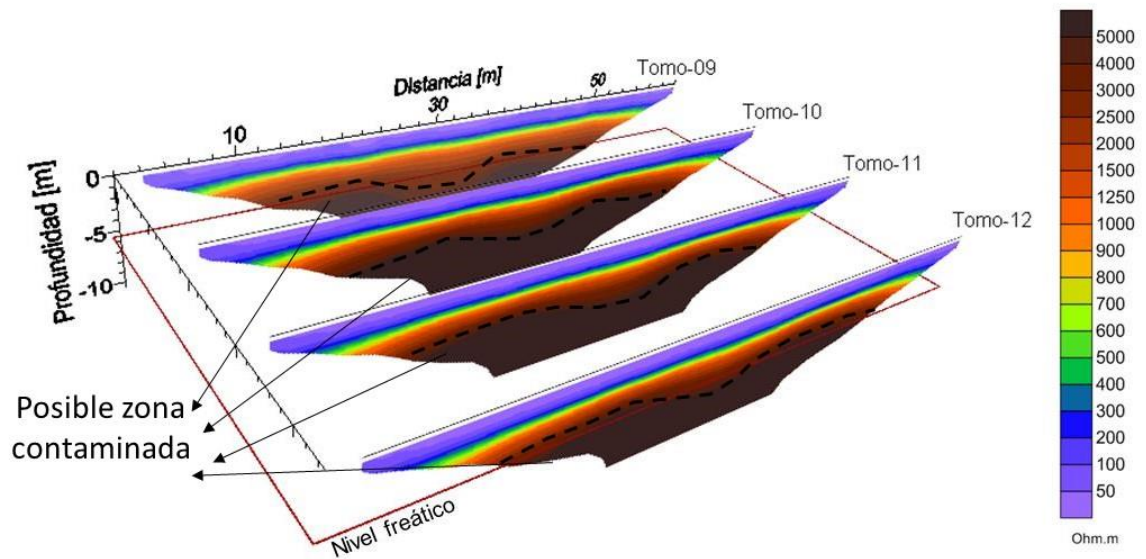
### 11.1.3 Landfarming.

Los *Perfiles 9 - 12* corresponden a la celda de *Landfarming*, que presentan un comportamiento resistivo similar en todos los perfiles (Figura 58). En los perfiles se puede observar la presencia de un suelo areno-arcilloso a lo largo de la superficie con un espesor de 2 m, el cual se caracteriza por presentar valores de resistividad entre 20 y 300 Ohm.m. Adicionalmente, se puede observar a partir de los 2 m de profundidad, una zona con altos valores de resistividad que van de 900– 5000 Ohm.m, los cuales están asociados posiblemente a áreas contaminadas por hidrocarburos que percolan por debajo del nivel de las aguas subterráneas, el cual se encuentra a una profundidad aproximada de 5 metros de acuerdo a las mediciones realizadas en el piezómetro Pz 8. Las *Figuras 59* muestran el modelo en 3D de resistividad del suelo para la celda *Landfarming*.

**Figura 58.**Perfiles geoelectricos de resistividad (P9, P10, P11 y P12) localizados en el área de Landfarming.



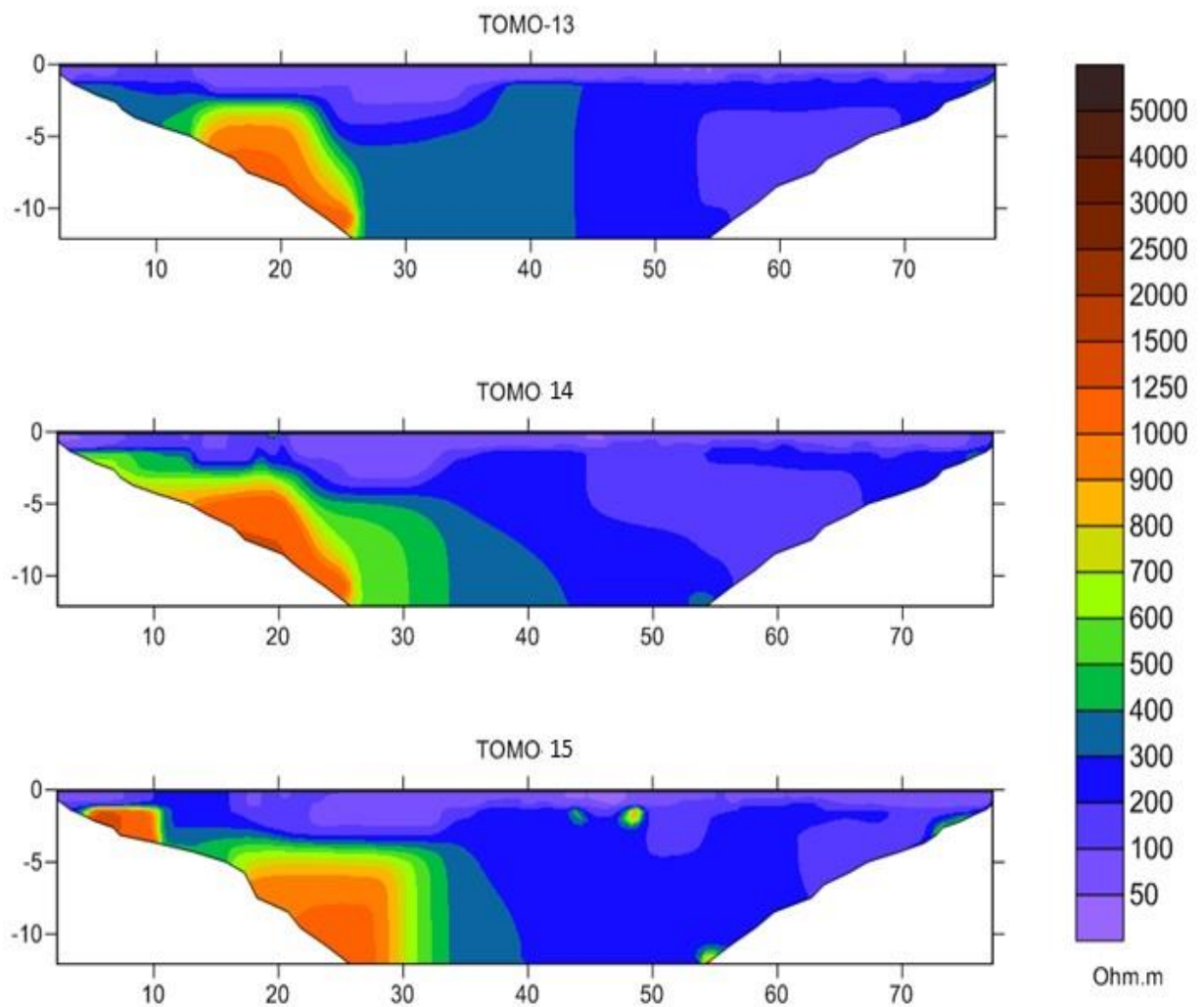
**Figura 59.** Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de Landfarming.



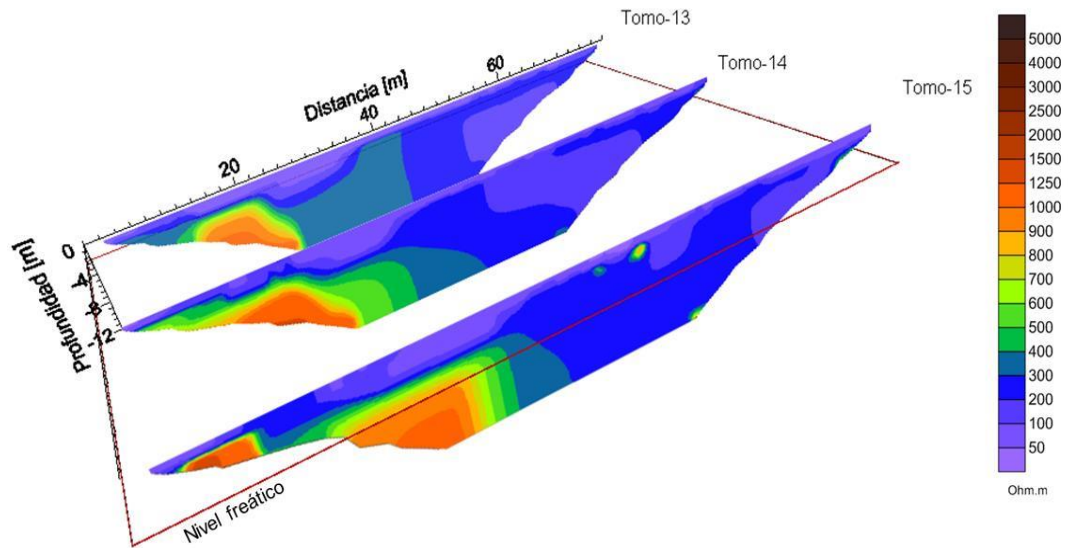
**11.1.4 Zona de aspersión.** En los *Perfiles 13 – 15*, la cual corresponde a la zona de aspersión, se observa un comportamiento resistivo similar a los encontrados en las zona de las piscinas, donde podemos localizar una capa superficial con valores de resistividad bajos (entre 20 y 200 Ohm.m), con un espesor máximo de 3 m, que se podrían relacionar con un suelo principalmente arcilloso con diferentes proporciones de arena, suprayaciendo una capa de resistividad media con valores entre 200 y 400 Ohm.m, la cual se relaciona posiblemente con un suelo principalmente arenoso con diferentes proporciones de arcillas localizado por debajo del nivel de aguas subterráneas, teniendo en cuenta la ubicación del nivel freático, el cual se encuentra a una profundidad de 3 metros de la superficie de acuerdo a las mediciones realizadas en el piezómetro Pz 7.

Sin embargo, es posible observar una anomalía resistiva localizada en el costado oriental de las imágenes geoelectricas exhibidas en la *Figura 60*, donde los *Perfiles 13, 14, y 15* presentan valores de resistividad con un rango entre 400 y 1000 Ohm.m. La *Figura 61* exhibe el modelo 3D elaborado en la zona de aspersion.

**Figura 60.** Perfiles geoelectricos de resistividad (P13, P14 y P15) localizados en el área de Aspersion



**Figura 61.** Modelo 3D de resistividad del suelo para la zona de aspersión



## 11.2 DETERMINACIÓN DE ZONAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBUROS

La localización de áreas contaminadas por hidrocarburos se determinó mediante la generación de modelos tridimensionales generados a partir del cálculo de los valores de resistividad experimentales del suelo, obtenidos de los datos adquiridos en campo, y la determinación de los valores de resistividad teóricos calculados por medio de la modelación de los parámetros petrofísicos (PP) del suelo.

A partir de la modelación de los parámetros petrofísicos del suelo se obtuvo un modelo que corresponde a los rangos de resistividad teóricos característicos del área de estudio, calculados bajo condiciones de completa saturación. De acuerdo a las condiciones de la planta (incluye una red de monitoreo de calidad de aguas que incluye tres piezómetros) se hace posible la utilización del modelo de completa saturación.

Mediante el modelo petrofísico del suelo para la condición de saturada total se exhiben las áreas contaminadas en la planta de tratamiento de residuos industriales ELOGY determinando su profundidad y extensión dentro del área. Los valores de resistividad asociados a posibles litologías contaminadas por hidrocarburos son mayores a 1252 Ohm.m.

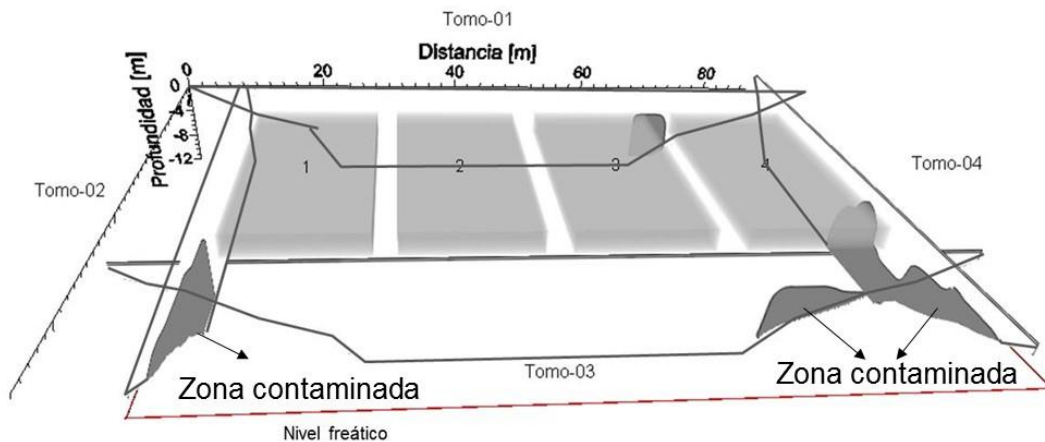
A continuación se presentan las imágenes que exhiben la distribución geoespacial de las zonas contaminadas por hidrocarburos en cada una de las áreas objeto de estudio de la planta ELOGY.

**11.2.1 Piscinas (1-4).** En la zona de piscinas 1 – 4 se observa que la distribución geoespacial de la anomalía resistiva asociada a posibles suelos contaminados por hidrocarburos se encuentra por debajo de nivel freático.

En el *Perfil 1* se logra identificar una anomalía resistiva entre 70 y 76 metros de extensión, a una profundidad de 4.5 metros extendiéndose hasta el fondo de la imagen, reflejando su continuidad en profundidad, la cual posiblemente puede estar ocasionada por una fuga en la piscina de almacenamiento 4. En el *Perfil 2* se observa una anomalía resistiva, ubicada a 2-3 metros de profundidad a partir de los 47 metros de extensión y con un espesor sin determinar debido a su prolongación en profundidad y longitud dejando en evidencia la continuidad de la pluma contaminante, debido a su proximidad con la piscina de almacenamiento 1 se puede inferir la existencia de fugas las cuales generan la migración del hidrocarburo al subsuelo. En el *Perfil 3* se identifica una anomalía resistiva entre 73 y 86 metros de extensión y una profundidad de 4.5 metros extendiéndose hasta el fondo de la imagen. En el *Perfil 4* se observan dos anomalías resistivas entre 38 y 74 metros, y entre 8 y 15 metros de extensión con una profundidad variable (entre 2 y 7 metros) extendiéndose hasta el fondo de la imagen, reflejando su continuidad en profundidad y longitud. Debido a la localización geoespacial de las anomalías resistivas para los *Perfiles 3 y 4* se puede deducir la posible existencia de una fuga en la piscina de almacenamiento 4 que ocasiona el flujo de la pluma

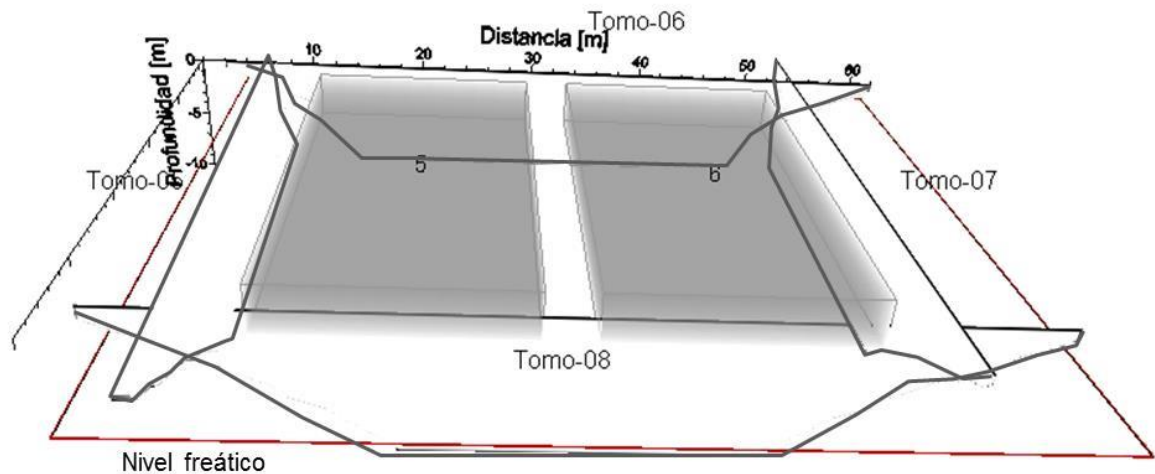
contaminante hacia el subsuelo. En la *Figura 62* se puede observar la distribución geoespacial del suelo contaminado por hidrocarburos en la zona de piscinas 1 – 4.

**Figura 62.** Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de las piscinas 1-4. En gris se exhiben las zonas contaminadas



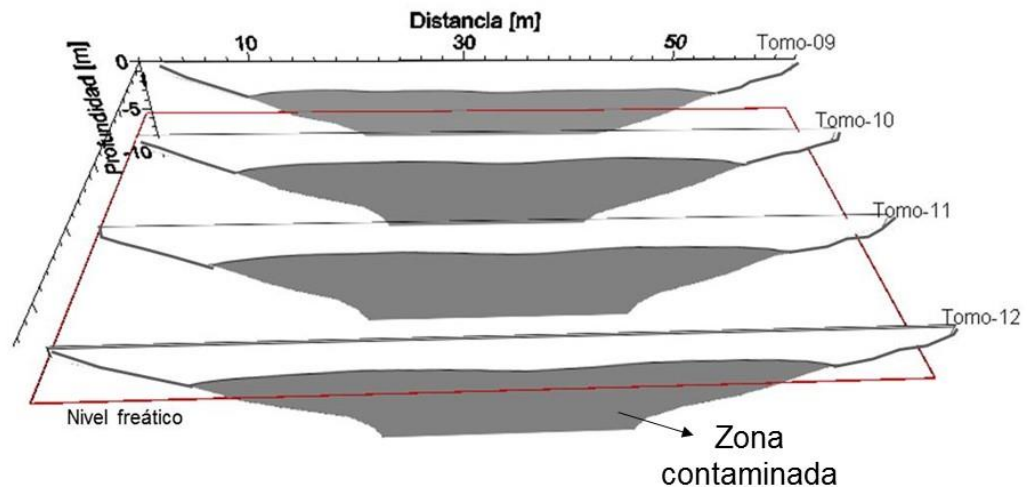
**11.2.2 Piscinas (5-6).** El comportamiento de la distribución geoespacial de suelos contaminados por hidrocarburos de las piscinas 5 – 6 es similar al presentado en las piscinas 1 – 4 debido a que la ubicación de las anomalías resistivas se encuentra por debajo del nivel freático. Los Perfiles elaborados en esta zona no presentan anomalías resistivas que puedan relacionarse a posibles áreas contaminadas por hidrocarburos. *Figura 63.*

**Figura 63.** Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de las piscinas 5-6. En negro se exhiben las zonas contaminadas



**11.2.3 Landfarming. Celdas 1 – 2.** En la zona de *Landfarming* se observa un comportamiento eléctrico homogéneo entre capas horizontales para los *Perfiles 9 – 12*. las anomalías resistivas se encuentra a lo largo de todos los perfiles dentro de la zona saturada desde una profundidad de 5 metros extendiéndose hasta el fondo de la imagen, reflejando su continuidad en profundidad y longitud. La *Figura 64* se puede observar la distribución geoespacial del suelo contaminado por hidrocarburos en la zona de *Landfarming*.

**Figura 64.** Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en la zona de Landfarming. En gris se exhiben las zonas contaminadas

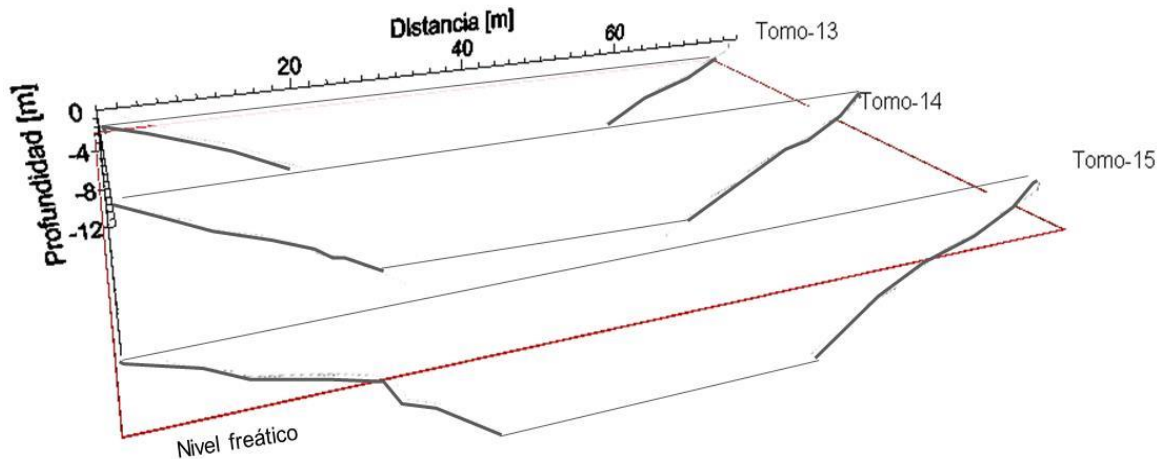


**11.2.4 Zona de aspersión.** En la *Figura 65* se puede notar la ausencia de anomalías relacionadas a zonas contaminadas.

A partir de la interpretación de los resultados, apoyados en observaciones y datos de campo y laboratorio se deduce que:

Debido a los resultados de los análisis de Hidrocarburos Totales reportados por el laboratorio y el valor calculado en el modelo petrofísico (1252 Ohm.m), se puede establecer que el área destinada para la aspersión de la fase líquida (agua) producto del proceso de separación por densidades de los residuos industriales se encuentra libre de contaminación, y las anomalías encontradas, representarían una litología distinta a la predominante en el área y estaría probablemente relacionada con un incremento en la proporción de gravas del suelo.

**Figura 65.** Modelo 3D de zonas contaminadas por hidrocarburos en el área de aspersión



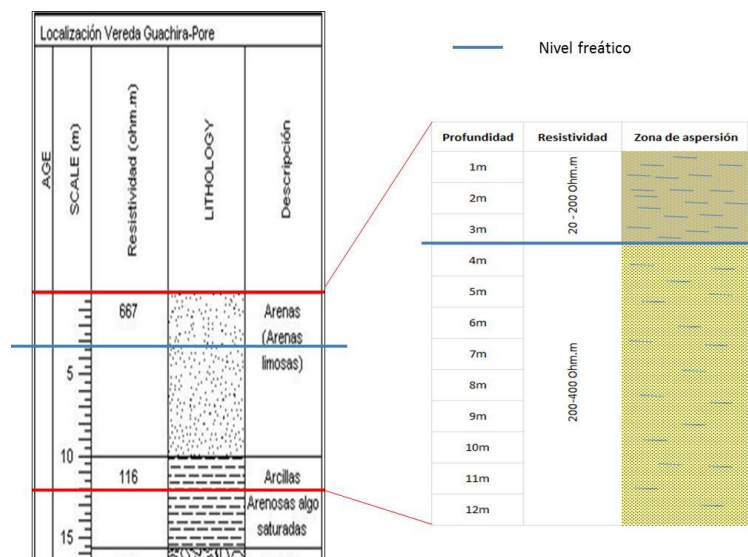
La descripción de la metodología implementada para la toma de datos de las tomografías eléctricas, como para los datos implementados en el modelamiento de los parámetros petrofísicos se planteó de forma didáctica, enfatizando en la sistemática empleada para el procesamiento de datos utilizados para la construcción del modelo petrofísico de la zona objeto de estudio, mediante el uso del software PetroWin, con el fin de dar a conocer esta novedosa e importante herramienta.

Se considera que la técnica de tomografías eléctricas en unión con los parámetros petrofísicos del suelo implementada para el desarrollo del presente estudio puede ofrecer grandes ventajas en la delimitación y caracterización de zonas contaminadas por hidrocarburos, ya que ofrece mayor concentración de datos reduciendo el tiempo de adquisición, y presenta nuevos fundamentos teóricos confiables.

## 12. CONCLUSIONES

El modelamiento de los parámetros petrofísicos del suelo en cooperación de métodos geofísicos (IR) permitieron determinar el rango de resistividad para suelos contaminados por hidrocarburos en estado de completa saturación, estableciendo un límite superior de resistividad de 1252 Ohm.m, que indica que las zonas que presenten valores de resistividad que sobrepasen este límite, corresponden a zonas contaminadas.

Al comparar la estratigrafía local del área de estudio realizada para la planta ELOGY antes de disponer del terreno e intervenirlo con su construcción y operación, con respecto a la descripciones efectuadas y los valores de resistividad obtenidos tanto en las tomografías realizadas en la zona de aspersión como en los SEV realizados anteriormente, se puede observar una gran similitud, además de los resultados de laboratorio de hidrocarburos totales que indican la no contaminación en esta zona, se concluye que el área de aspersión corresponde a una zona no contaminada, la cual puede ser usada para cotejar los resultados obtenidos en las zonas de landfarming y piscinas en la planta.



En la zona de piscinas 1 – 4 de almacenamiento, se identifican zonas contaminadas por hidrocarburos relacionadas con valores anómalos de resistividad que superan el límite de no contaminación de 1252 Ohm.m y se extiende hasta los 5000 Ohm.m. Este valor de resistividad es demasiado alto para ser correlacionado a la geología de la zona, lo que las establece como zonas contaminadas.

Por otra parte, en la zona de *Landfarming* se evidencia una anomalía resistiva alta(> 1252 Ohm.m) después de los 3.5m de profundidad, mostrada en los diferentes perfiles elaborados en la zona, las cuales son extensas y continúan en profundidad, mediante estos resultados, se deduce que la anomalía resistiva presente en esta área está asociada a suelos contaminados.

Los modelos 3D de las zonas contaminadas delimitan y evidencian la extensión y ubicación de estas zonas dentro las áreas de piscinas 1 – 4, y landfarming. Permitiéndonos tener mayor visualización de su distribución.

### 13. RECOMENDACIONES

Aunque el método implementado, ha obtenido numerosos aciertos en la determinación de zonas contaminadas por hidrocarburos, las cuales son identificadas mediante tomografías eléctricas; en conjunto con el modelamiento de los parámetros petrofísicos del suelo, que son adquiridos de muestras de suelo y agua de la zona de estudio, es aún un método que todavía se encuentra en comprobación, por lo tanto, se recomienda ampliar los estudios relacionados a dicho tema con el fin de poder obtener una base de datos estándar para la calibración y mejoramiento de los datos experimentales además de la extracción de núcleos de suelo en las áreas que marcan contaminación para su análisis en laboratorio y la calibración del modelo.

Para obtener mejores resultados, se recomienda hacer un estudio más amplio de la zona, con el fin de caracterizar de una manera más detallada el área de la planta ELOGY.

Se recomienda a la empresa GEOLOGY LTDA, hacer perforación en las áreas identificadas como zonas contaminadas, con el objetivo de obtener datos certeros para aplicar las medidas de remediación respectivas e instalar nuevos piezómetros en los sitios que marca contaminación para monitorear desde el agua los procesos de remediación a los que se sometan las áreas afectadas.

## BIBLIOGRAFIA

ABEM. (2011). Instrument AB. Manual de instrucción Terrameter LS.

Arias, D. E. (2011). Exploración geotécnica-relaciones geoeleéctricas. Facultad de Minas UNAL, Medellín.

Arlandi, M. (2005). Geofísica aplicada a la obra civil. Madrid.

Arrubarrena, M. (2010). Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburo usando tomografía de resistividad eléctrica. Instituto de Ingeniería UNAM, D.F México .

Dakhnov, V. N. (1959). Geophysical well logging: Quartely of the Colorado School of Mines, 57.

Delgado, O. Ladrón, M., Shevnin, V., & Ryjov, A. (2011). Estimation of soil petrophysical parameters based on electrical resistivity values obtained from lab and in-field measurements. Geofísica Internacional .

Edwuars, L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. Geophysics, 42.

ELOGY, L. Estudio de impacto ambiental para la construcción y operación del sistema de transporte, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición de residuos peligrosos asociados a la industria petrolera.

EPA, E. P. (2000). Innovations in Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites.

Gasulla, M. (1999). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universidad Politécnica de Catalunya, Depto. de Ingeniería electrónica , Catalunya, España.

GEOSOFTIME. (2009). Estudio Geoeléctrico. Sogamoso.

Gómez, J. C. (2014). Caracterización Geoeléctrica del Subsuelo en el Sector Floreña NW 6, Yopal-Casanare. UIS, Bucaramanga.

Hernandez, J. O. (2008). Aplicación de métodos geoeléctricos para el diagnóstico de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos. D.F México.

Kobranova, V. (1986). *Petrphysics* (2<sup>nd</sup> edition ed.). Nedra, Rusia.

Loke & Barker. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *En Geophysical Prospecting*, 44,131-152.

Loke, M. H. (2001). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D survey* .

Madrid et al., M. (2002). Caracterización de fosas petroleras y sitios contaminados por crudo a través de métodos geofísicos y sensores geoquímicos in situ. XI congreso Venezolano de geofísica. Caracas, Venezuela.

Madrigal, M. I. (1998). Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México. Instituto de Ingeniería UNAM. D.F México.

McGillivray, P., & Oldenburg, D. (1990). Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.

Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua (segunda edición ed.)*. Paraninfo, España.

Rylov, A. (2000). Unpublished paper , 48.

Rylov, A. (2011). *Calculo de Propiedades Eléctricas del Suelo (Base teórica y algoritmos)*.

Rylov, A., & Shevnin, V. (2011). Theoretic Calculation of Rocks Electrical Resistivity and some Examples of Algorithm's Application. *Geofisica Internacional* .

Stewart, R. R. (1996). Exploration Geophysics Tomography: Fundamentals. Course Note Series. Society of Exploration Geophysics, 3.

Suarez, M. (1985). Interpretación fotogeológica de la Plancha 174-Paz de Ariporo. INGEOMINAS. Bogotá.

Uribieta, J. (2001). La Tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua. Instituto de Ingenieria UNAM, D.F México .