

MODELO 3D DEL RELLENO “LA CORTADA” DE PAMPLONA, NORTE DE
SANTANDER MEDIANTE TÉCNICAS DE MODELADO DE RESISTIVIDAD
ELÉCTRICA

Autor

CARLOS HABIB GENE-TULANDE

Director

JAIRO-ALBERTO-TORRES-PEÑA

FISICO



PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DPTO DE INGENIERIAS CIVIL, AMBIENTAL Y QUIMICA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA

2021

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo, obtener un modelo 3D para el Relleno Sanitario “La Cortada” de Pamplona, Norte de Santander, ejecutado mediante técnicas de modelado de resistividad eléctrica usando el software Res3DMod, Res3Dinv y ParaView. El proyecto describe la técnica en sondeos de Modelado y Análisis 3D, a través de Tomografía eléctrica dentro del campo de la exploración Geofísica, el cual se caracteriza como un estudio no invasivo, donde a través de su modelado en 3D, el cual permitió caracterizar las diferentes resistividades presentes para los desechos tóxicos, zonas activas, zonas clausurada y lixiviados que se encuentran en este relleno sanitario. Permitiendo, la localización de la estructura del relleno y anomalías complejas obtenidas del subsuelo, tanto geológicas como antrópicas. En este sentido, se generó un modelo 3D sintético a través de la reprocesamiento de cinco (5) líneas previamente sondeadas en campo y que pasó por un análisis de los programas RES2DIVN, donde se procesaron los estudios y el modelo 3D abordado. Durante la ejecución del proyecto, se manejaron técnicas de modelado de resistividad eléctrica usando el software Res3DMod, Res3Dinv y ParaView, este último programa para la visualización del modelo 3-D sintético.

Palabras Claves: Técnicas, Modelados, Desechos Tóxicos, Zonas Activas, Zonas Clausuradas y Relleno Sanitario.

Abstract

The objective of this research was to obtain a 3D model for the “La Cortada” Landfill in Pamplona, Norte de Santander, executed through electrical resistivity modeling techniques using Res3DMod, Res3Dinv and ParaView software. The project describes the technique in 3D Modeling and Analysis probes, through Electrical Tomography within the field of Geophysical exploration, which is characterized as a non-invasive study, where through its 3D modeling, which allowed to characterize the different resistivity's present for the toxic wastes, active zones, closed zones and leachates found in this landfill. Allowing, the location of the structure of the fill and complex anomalies obtained from the subsoil, both geological and anthropic. In this sense, a synthetic 3D model was generated through the reprocessing of five (5) lines previously probed in the field and that went through an analysis of the RES2DIVN programs, where the studies and the 3D model addressed were processed. During the execution of the project, electrical resistivity modeling techniques were handled using Res3DMod, Res3Dinv and ParaView software, the latter program for the visualization of the synthetic 3-D model.

Key Words: Techniques, Modeling, Toxic Waste, Active Zones, Closed Zones and Sanitary Landfill.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	x
Capítulo 1	12
1. Problema.....	12
1.1 Problema y justificación.....	12
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo general..	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2	14
2. Marco referencial.....	14
2.1 Antecedentes.....	14
2.2 Marco teórico.....	23
2.2.1 Estudios de imágenes eléctricas 3-D..	23
2.2.2 Tipos de matrices para levantamientos 3-D.	23
2.2.3 La matriz polo-polo.	25
2.2.4 La matriz polo-dipolo..	29
2.2.5 Los arreglos dipolo-dipolo, Wenner y Schlumberger.	31
2.2.6 Resumen de tipos de matrices..	33
2.2.7 Un programa de modelado directo en 3-D..	37
2.2.8 Algoritmos de inversión 3-D y conjuntos de datos 3-D.	
2.2.9 Un programa de inversión 3-D.....	43
2.3 Marco contextual	44
2.3.1 Ubicación.....	44
2.3.2 Localización geográfica y geológica del área.....	45
Capítulo 3	47
3. Metodología.....	47
3.1 Primera fase: Procesamiento de datos a través del software Res2DInv	47
3.2 Segunda fase: Procesamiento de datos a través del software Res3DMod.....	52
3.3 Tercera fase: Inversión de datos a través del software Res3DInv	56
3.4 Cuarta fase: Modelado en 3-D a través del software ParaView.....	60
Capítulo 4	61
4. Resultados.....	61
4.1 Procesamiento de datos a través del software Res2DInv.	61
4.2 Procesamiento de datos a través del software Res3DMod.	65
4.3 Inversión de datos a través del software Res3DInv	78
4.4 Modelo en 3-D a través del software ParaView	91
Capítulo 5.	94
5. Análisis de resultados	94
5.1 Procesamiento de datos a través del software Res2DInv	94
5.2 Procesamiento de datos a través del software Res3DMod	95

5.3	Inversión de datos a través del software Res3DInv	97
5.4	Modelo en 3-D a través del software ParaView	99
6.	Conclusiones.....	101
	Referencias	104

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores de resistividad de desechos y lixiviados.	15
Tabla 2. Análisis de resultados de resistividades.	19
Tabla 3. Rangos de resistividades en las diferentes líneas.	20
Tabla 4. Rangos de las resistividades en las cuatro (4) capas.	21
Tabla 5. Factores de amortiguamiento.	48
Tabla 6. Configuración del método de modelado.....	49
Tabla 7. El modelo tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.	54
Tabla 8. El modelo Línea 1 Zona Activatiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.	65
Tabla 9. El modelo Línea 2 Zona Activatiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.	67
Tabla 10. El modelo Línea 4 Zona Clausurada tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.....	69
Tabla 11. El modelo Línea 5 Zona Clausurada tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.....	72
Tabla 12. El modelo Línea 7 Zona Clausurada tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.....	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. La disposición de los electrodos para un levantamiento tridimensional.	26
Figura 2. Dos posibles secuencias de medición para un levantamiento tridimensional. La ubicación de los electrodos de potencial correspondientes a un solo electrodo de corriente en la disposición utilizada por (a) una encuesta para medir el conjunto de datos complete y (b) una encuesta en diagonal cruzada.....	27
Figura 3. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polos. Las parcelas tienen la forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades.	28
Figura 4. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polo-dipolo con $n = 1$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C1 es la cruz blanca más a la izquierda.....	31
Figura 5. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polo-dipolo con $n = 4$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades.	32
Figura 6. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz dipolo-dipolo con $n = 1$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C2 es la cruz blanca más a la izquierda.	34
Figura 7. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz dipolo-dipolo con $n = 4$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C2 es la cruz blanca más a la izquierda.....	34
Figura 8. Uso del método de desplazamiento para medir una cuadrícula de 10 por 10 con un sistema de electrodos múltiples con 50 nodos. (a) Encuestas usando una cuadrícula de 10 por 5 con las líneas orientadas en el X-.	37
Figura 9. Un modelo 3-D con 4 prismas rectangulares en una cuadrícula de encuesta de 15 por 15. (a) La cuadrícula de diferencias finitas. (b) Pseudosecciones horizontales de resistividad aparente para la matriz polo-polo con los electrodos alineados en el X- direccion.	39
Figura 10. Los modelos utilizados en la inversión 3-D. (a) Modelo estándar donde los anchos de las celdas rectangulares son iguales a los espacios entre electrodos unitarios en el X- y y- direcciones. (b) Un modelo en el que las pocas capas superiores se dividen por la mitad, tanto vertical como horizontalmente, para proporcionar una mejor resolución. (c) Un modelo donde las celdas del modelo se dividen en la dirección horizontal pero no en la dirección vertical..	44
Figura 11. Ubicación geográfica, Relleno Sanitario La Cortada, Pamplona.....	45
Figura 12. Descripción geológica del área de estudio.....	46
Figura 13. Filtrado de puntos.	48
Figura 14. Disposición del modelo y datos de resistividad.	49
Figura 15. Inversión del modelo de resistividades.	50
Figura 16. Gráficas RMS.....	51
Figura 17. Modelo invertido con topografía línea 1.....	52
Figura 18. La disposición de los electrodos en un estudio de imágenes de resistividad 3D. Fuente: Res3dmodx64 ver. 3,04 (Loke, 2014, p.5).	53
Figura 19. Modelo 3-D LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos.....	54

Figura 20. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.	55
Figura 21. Resistividad Aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.	
Fuente: Autor.....	56
Figura 22. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Secciones transversales horizontales SLICE.....	58
Figura 23. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLI..	58
Figura 24. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLI .	59
Figura 25. RMS..	59
Figura 26. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético.....	60
Figura 27. Línea 1 ZONA ACTIVA inversión modelo con topografía.....	61
Figura 28. Línea 2 ZONA ACTIVA inversión modelo con topografía.....	62
Figura 29. Línea 4 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía.....	63
Figura 30. Línea 5 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía.....	63
Figura 31. Línea 7 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía.....	64
Figura 32. Modelo 3-D LÍNEA 1 ZONA ACTIVA que muestra la ubicación de los electro..	65
Figura 33. Resistividad aparente LINEA 1 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-X.....	66
Figura 34. Resistividad aparente LÍNEA 1 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-Y.....	66
Figura 35. Modelo 3-D LÍNEA 2 ZONA ACTIVA que muestra la ubicación de los electrod	67
Figura 36. Resistividad aparente LÍNEA 2 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-X.....	68
Figura 37. Resistividad aparente LÍNEA 2 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-Y.....	68
Figura 38. Modelo 3-D LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos.....	69
Figura 39. Resistividad aparente LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.	70
Figura 40. Resistividad aparente LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y..	71
Figura 41. Modelo 3-D LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos.....	72
Figura 42. Resistividad aparente LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.	73
Figura 43. Resistividad aparente LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y..	74
Figura 44. modelo 3-D LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos.....	75
Figura 45. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.	76
Figura 46. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.	77
Figura 47. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ..	78
Figura 48. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE XZ	79
Figura 49. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ	79
Figura 50. RMS LÍNEA 1 ZONA ACTIVA.....	80
Figura 51. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA, secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ.	81
Figura 52. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE XZ	82
Figura 53. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ	82
Figura 54. RMS LÍNEA 2 ZONA ACTIVA.....	83
Figura 55. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA secciones transversales horizontales SLICE-XZ- YZ.....	84
Figura 56. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE XZ.....	84
Figura 57. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE YZ.....	85
Figura 58. RMS LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA.....	85

Figura 59. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ.	86
Figura 60. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE XZ.....	87
Figura 61. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE YZ.....	87
Figura 62. RMS LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA.....	88
Figura 63. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ.....	89
Figura 64. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE XZ.....	89
Figura 65. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ.....	90
Figura 66. RMS LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA.....	90
Figura 67. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Modelo 3-D sintético..	91
Figura 68. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Modelo 3-D sintético..	92
Figura 69. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético.....	92
Figura 70. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético.....	93
Figura 71. LÍNEA 7 ZONA Autor basado en el software ParaView. CLAUSURADA Modelo 3-D sintético.	93

Introducción

La problemática asociada a los residuos sólidos en el municipio de Pamplona es de índole permanente. El Relleno Sanitario “La Cortada”, es un sitio de destino final de residuos, donde acuden personas a recuperar elementos reciclables, y es uno de los pocos del país, que se encuentra a cielo abierto, puesto que ha rebasado su capacidad y no cumple en muchos aspectos con los requerimientos ambientales.

Los rellenos sanitarios y basureros a cielo abierto causan problemas ambientales que afectan el suelo, el agua y el aire. Con el tiempo alguna parte de sus componentes dará lugar a nuevos compuestos químicos que provocarán la contaminación del medio, es por eso que en estos escenarios es de vital importancia el conocimiento interno de las estructuras que conforman el suelo.

Con el fin de aportar un recurso técnico y científico a la problemática del relleno, se retomarán una serie de datos ya existentes que permitirán conocer a detalle las propiedades geo-eléctricas de las zonas contaminadas por lixiviados y generar a través de estos datos un procesamiento de la zona, que permitan responder los siguientes interrogantes como: ¿Hasta qué profundidad se encuentran los Rellenos Sólidos del relleno La Cortada? ¿Cuál es la ubicación de los posibles focos de lixiviados? y ¿Cuál es la distribución de la resistividad con respecto a la zona de contaminación?

En esta medida, la presente investigación describe la Técnica en Sondeos de Modelado y Análisis 3D, a través de Tomografía Eléctrica dentro del campo de la Exploración Geofísica, para estudiar el Relleno Sanitario La Cortada de Pamplona Norte de Santander, el cual se caracteriza como un estudio no invasivo, donde a través de su modelado en 3D se pueden

caracterizar las diferentes resistividades presentes para los desechos tóxicos, zonas activa, zonas clausurada y lixiviados que se encuentran en este relleno sanitario. Este estudio genera la localización de la estructura del relleno y anomalías complejas obtenidas del subsuelo, tanto geológicas como antrópicas que resultan del análisis y procesamiento de los datos al cual está limitado el presente estudio.

Capítulo 1

1. Problema

1.1 Problema y justificación

La problemática asociada a los residuos sólidos en el municipio de Pamplona es de índole permanente, el Relleno Sanitario La Cortada es uno de los pocos sitios de disposición final del país, en donde todavía se observan personas recuperando elementos reciclables. En la actualidad el crecimiento poblacional es acelerado y el relleno sanitario no cumple en muchos aspectos con los requerimientos ambientales. Los rellenos sanitarios y basureros a cielo abierto causan problemas ambientales que afectan el suelo, el agua y el aire. Con el tiempo alguna parte de sus componentes dará lugar a nuevos compuestos químicos que provocarán la contaminación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general. Obtener un modelo 3D para el Relleno Sanitario “La Cortada” de Pamplona, Norte de Santander mediante técnicas de modelado de resistividad eléctrica usando el software Res3DMod, Res3DInv Y ParaView.

1.2.2 Objetivos específicos. Describimos los siguientes:

- Reprocesar los datos con el fin de obtener los valores de resistividad y sus espesores.

- Plantear un modelo 3D para una Zona Activa y Zona Clausurada, a partir de la interpretación de las líneas 2D.
- Realizar Modelo 3D para identificar caracterización e identificación de las zonas activa, zonas clausurada, zonas saturadas por lixiviados, zona de residuos sólidos del Relleno Sanitario “La Cortada” ubicado en la Vereda Chíchira del Municipio de Pamplona, Norte de Santander.
- Procesar los datos a través del software Res3DMod, Res3DINV y ParaView.

Capítulo 2

2. Marco referencial

2.1 Antecedentes

La prospección geofísica tiene extensas aplicaciones en diferentes áreas de estudio, la primera aplicación de los métodos geoelectricos para la exploración de yacimientos fue en el año 1829 (Business WordPress Themes, “Geofísica”, 2020), cuando el inglés Robert Fox midió los campos eléctricos naturales que se producían a través de procesos de oxidación-reducción para descubrir los yacimientos de sulfuros de Cornualles (Inglaterra), Conrad Schlumberger, considerado como “padre de la prospección eléctrica”, en 1912 inicia estudios para prospección de yacimientos utilizando la conductividad eléctrica de las rocas (Business WordPress Themes, “Geofísica”, 2020)

En el campo de modelamientos tridimensionales en rellenos sanitarios, la prospección eléctrica es empleada actualmente, de una manera habitual, con el objetivo de identificar y determinar el volumen aproximado de los potenciales focos de lixiviación dentro de la masa de residuos, es así como en Lima, Perú se llevó acabo la caracterización y modelamiento bajo el suelo del relleno sanitario en la ciudad de Chancay (Valencia, 2017), donde se procedió a limitar los sólidos para los desechos (basura) y para los lixiviados teniendo en cuenta los siguientes valores de resistividad:

Tabla 1. *Valores de resistividad de desechos y lixiviados.*

Desechos	
Valores de resistividad	20 a 260 Ohm*m
volumen	368.750 m ³
Lixiviados	
Valores de resistividad	9 a 21 Ohm*m
Volumen	78.875 m ³

Fuente: Valencia, (2017).

En otros campos de aplicación, Cifuentes, Cabrer, Andrade, y Hernández (2017), llevaron a cabo un método de exploración geofísico, con el fin de encontrar la presencia de unos túneles subterráneos que supuestamente estaban presentes bajo la catedral de Morelia, en la ciudad de Morelia de México. La aplicación de este método fue muy conveniente porque esta edificación es patrimonio de la humanidad y por ende no se le podía realizar excavaciones ni aplicar ningún tipo de método destructivo. Al final del estudio, con los resultados de resistividad obtenidos cercanos a los 20 Ohm*m, representativo de los materiales geológicos de origen volcánico, ignimbritas principalmente, se logró confirmar la existencia de una serie de estructuras organizadas que pueden corresponder a túneles por su geometría y continuidad (Cifuentes, Cabrer, Andrade, y Hernández, 2017).

El método de tomografía eléctrica de resistividad basado en la modelación 2D, mediante el empleo de técnicas numéricas ha dejado en evidencia muchos resultados precisos, como los encontrados por Mendoza (2019), en una comunidad de Ecuador llamada Rumicruz (Calpi, Riobamba), donde se llevaron a cabo unos estudios que permitieron identificar varias zonas de interés ecológico, en los que, mediante la interpretación de tomografías eléctricas de resistividad. Los cuales estuvieron variados en esta zona entre: 20 a 100 Ohm*m, permitieron

encontrar de manera exacta la ubicación de unas tumbas a través de un modelo geoestadístico tridimensional, delimitando puntualmente zonas de mucha riqueza arqueológica prehispánica de esta comunidad (Mendoza, 2019). La significativa mejora en los equipos de adquisición de datos, ha incrementado el uso de las técnicas de tomografía eléctricas en su modalidad 3D y 2D. En el área de la ingeniería civil se puede determinar el origen de muchas patologías presentes en la edificaciones como consecuencia directa de las fallas existentes en el suelo, que provocan en muchos casos evidentes asentamientos diferenciales, como los registrados en un estudio llevado a cabo por Álvarez, (2015), realizado bajo dos edificaciones ubicadas en la delegación Miguel Hidalgo de la ciudad de México, donde en ambos casos se estudió las posibles causas a los problemas presentados y la identificación de las zonas más afectadas por la acumulación de agua, las cuales en las conclusiones fueron asociadas como zonas con bajos resistivos menos a $15 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ y se recomendó, para una mejor comprensión del comportamiento dinámico del suelo, llevar a cabo estos estudios en épocas de lluvias y en épocas de estiaje, en especial si existe la posibilidad de que las construcciones sean afectadas por fallas u otros fenómenos de carácter regional (Álvarez, 2015).

La utilización de diferentes modelos inversos ha sido muy útil para la caracterización de suelos, tal como se llevó a cabo, en un estudio realizado por Cruz, (2017), realizado bajo la Pirámide de Kukulcán, en la zona arqueológica de Chichén Itzá, México, cuyo fin fue mostrar los alcances del método de resistividad eléctrica 3D utilizando arreglos no convencionales, en este estudio también se muestran las diferencias entre los modelos inversos obtenidos usando los programas de inversión ERTL ab64 y EarthImager 3D.

Otro estudio con un carácter similar llevado a cabo por Perdomo (2009), en el partido de San Cayetano, Provincia de Buenos Aires, Argentina, cuyo objetivo fue identificar estructuras

arquitectónicas enterradas y evaluar las dimensiones del asentamiento subterráneo, mostró través de secciones 2D de distribución de resistividades mayores a $640 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ la detección adecuada de rasgos arquitectónicos, que se identificaron como anomalías resistivas (Perdomo, 2009).

Otro ejemplo en el cual se ve la aplicación de los estudios geofísicos para identificar elementos contaminantes en el suelo, se desarrolló en una investigación llevada a cabo bajo el subsuelo de una corriente de agua llamada “Arroyo la Mexicana” realizado por Cuevas (2014) en Sonora, México, donde se evidencio a través de las tomografías eléctricas, los espesores de sedimentos contaminados en el área con valores entre 20 a $100 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, producto de la actividad minera de la zona, en esta tesis se aborda un avance de técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica, el cual confirma que estas técnicas geofísicas forman una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos, arqueológicos y medioambientales. Otro Proyecto, fue el de Biosca, (2011), el proyecto en mención, se caracterizó por unos objetivos innovadores en el ámbito científico y tecnológico, lo que permitió la implementación de las mejoras sobre las técnicas y procesos de inversión de la tomografía geo-eléctrica de la superficie que pudieron ser alcanzados mediante la aplicación de técnicas geofísicas de tomografía eléctrica sobre zonas que son focos potenciales de contaminación directa o difusas, como la relación de la resistividad eléctrica con valores de pH más ácidos con la profundidad y que marca una relación de concentraciones de metales con valores de resistividad eléctrica, el artículo presenta aportes a la mediciones geofísicas utilizando el método de la tomografía de resistividad eléctrica y el radar de penetración terrestre o geo radar en la metodología de la investigación de los movimientos de ladera.

De esta forma, el trabajo por Cervantes (2017) presentó el caso de estudio sobre el deslizamiento de Lidecko, el cual muestra las ventajas y beneficios del uso de los métodos geoelectrónicos en este tipo de investigaciones, el cual presenta un procesamiento de datos precisos de resistividad medidos en el campo, donde se encontraron sedimentos arcillo-limosos con valores de $(10 - 40 \Omega.m)$, areniscas saturadas $(50 - 200 \Omega.m)$, areniscas resistivas $(250 - 700 \Omega.m)$ y una acumulación de depósitos deluviales de $(500 - 1000 \Omega.m)$. Este documento describe los trabajos llevados a cabo para la caracterización de un deslizamiento de ladera producido en uno de los taludes que configura material de relleno de un vertedero de RSU/RCD clausurado y recientemente restaurado, mediante una campaña de prospección geofísica por tomografía eléctrica se pudo determinar la verdadera extensión del vertedero en profundidad así como identificar la superficie de despegue del deslizamiento y ver la relación de la misma con los materiales del sustrato, material de relleno con una resistividad de $(5 - 25 \Omega.m)$. Así mismo, el trabajo de Plata y otros (2005), mostró la aplicación y desarrollo de nuevas técnicas de interpretación, mediante la tomografía eléctrica, dando como resultado que las resistividades de las rocas están relacionadas con la porosidad que se encuentran en el rango de $(160 - 400 \Omega.m)$ y contenido en agua con valores de $(1.5 - 6.9 \Omega.m)$, por lo que es un parámetro de gran utilidad para la determinación de la geometría de los acuíferos, y para la evaluación de la calidad de las aguas (Plata y Otros, 2005).

Existen muchas formas de explorar geo-eléctricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas tomográficas, la tesis de Pellicer (2015), llevó a cabo un estudio geofísico con el método de tomografía eléctrica de resistividad para estudiar un deslizamiento desarrollado en abril 2013 en la localidad de Toleo (Oviedo-España), teniendo el objetivo de presentar los principales resultados obtenidos mediante esta técnica y evaluar la

eficacia del método, los resultados de resistividad permitieron interpretar la posición de la superficie del deslizamiento el cual arroja zona de anomalías de baja resistividades (15 – 50 Ω .m) que corresponde a las rocas del sustrato alteradas y fragmentadas, el límite entre esta zona más resistiva y el sustrato cuya resistividad es menor (10 – 150 Ω .m) lo que marca una franja más conductora y puede indicar posibles presencia de una falla, expone de manera práctica, los métodos que actualmente se están utilizando en el campo de la exploración eléctrica, en lo referente a tomografía eléctrica, en temas tan importantes como la contaminación ambiental subterránea, la población agrícola, la arqueología moderna, la geo tecnología, y en general la localización de estructuras y anomalías complejas por lo general subsuelo, tanto geológicas como antrópicas (Pellicer, 2015).

En el artículo “métodos geofísicos aplicados a las celdas activas y clausuradas del Relleno Sanitario La Cortada (Norte de Santander)”, realizado por Hinojosa (2017), logró a través de la aplicación de los métodos de Tomografía de refracción sísmica (TRS) y la tomografía de resistividad eléctrica (TRE), la caracterización del Relleno Sanitario “La Cortada”, logrando a través del análisis de los resultados, anomalías de la resistividad eléctrica con valores comprendidos entre los siguientes rangos:

Tabla 2. *Análisis de resultados de resistividades.*

Residuos Sólidos	
Valores de resistividad	12 a 50 Ohm*m
Velocidades S tipo P	233 a 890 m/s
Lixiviados	
Valores de resistividad	4 a 11 Ohm *m
Espesor de la capa	
Zona Clausurada	14 a 30 m
Zona activa	7,40 a 20,90 m

Hinojosa (2017, p.65)

Estos valores finalmente mostraron en las zonas clausuradas y activas resistividades asociadas a la acumulación de contaminantes, donde la diferencia de contrastes hizo efectiva su caracterización.

Sobre la misma zona de estudio, Torres, Cantillo y Contreras, (2018), realizaron su proyecto de grado sobre el Relleno Sanitario “La Cortada”, donde se llevó a cabo la aplicación de métodos geológicos, para determinar la resistividad eléctrica de los suelos, la geometría 2D bajo las líneas de estudio e identificar las posibles plumas de contaminación. como resultado de este estudio se obtuvieron los siguientes rangos de datos sobre las diferentes líneas tomadas (Torres, Cantillo y Contreras, (2018).

Tabla 3. *Rangos de resistividades en las diferentes Líneas.*

Zonas activas del relleno	
Línea 1	
Profundidad	15 a 152 m
Resistividad lixiviados	< 10 Ohm*m
Resistividad anomalías	>1000 Ohm*m
Línea 2	
Profundidad	15 a 20 m
Resistividad lixiviados	< 10 Ohm*m
Línea 3	
No se registraron datos	
Zonas clausuradas del relleno	
Línea 4	
Profundidad	15 a 25 m
Resistividad lixiviados	<10 Ohm*m
Línea 5	
Profundidad	15 m
Resistividad lixiviados	<10 Ohm*m
Línea 6	
Profundidad	5 a 10 m
Resistividad lixiviados	<10 Ohm*m
Resistividad anomalías	>1000 Ohm*m

Fuente: Torres, Cantillo y Contreras, (2018, p.82)

Los valores de resistividad de los desechos saturados se encontraron en rangos entre los 10 5 50 Ohm*m, la resistividad de los lixiviados entre 1 a 10 Ohm*m y la presencia de arcillas y arenas saturadas entre 15 a 100 Ohm*m. Otro aporte importante, se encuentra en Suarez y Zúñiga (2013), trabajo ejecutado en Costa Rica sobre un caso de estudio del Relleno Sanitario “Río Azul”, donde se identificaron las zonas con mayores potenciales de almacenamiento de lixiviados a través de 25 SEV’S (Sondeos Eléctricos Verticales), en el modelo geofísico planteado, el cual consta de 4 capas, se obtuvieron los siguientes rangos de resultados:

Tabla 4. *Rangos de las resistividades en las 4 capas.*

Capas	Profundidad	Tipo de Suelo	Resistividad
1	0,5 a 30 m	Grava, arcilla	20 a 24 Ω m
2	4 a 12 m	Desechos	11 a 18 Ω m
3	8 a 50 m	Lixiviados	1 a 5,4 Ω m
4	17 a 50 m	Lavas	49 a 360 Ω m

Fuente: Suárez y Zúñiga (2013, p.55).

Este estudio además de identificar los lixiviados para realizarles el tratamiento adecuado, también logró obtener información sobre los niveles del basamento donde se podrán captar e impedir las posibles infiltraciones hacia los acuíferos de la región (Suarez y Zúñiga, 2013).

Otro estudio importante en este ámbito se puede resaltar el trabajo de Mancilla, (2017), ejecutado en el Relleno Regional La Cortada del municipio de Pamplona. Relleno sanitario que alberga la producción de residuo sólidos de 8 municipios de la región, convirtiéndose en un lugar de alta complejidad ambiental, que requiere un diagnóstico e intervención. En este sentido, la investigación emplea dos (2) métodos geofísicos - Refracción Sísmica, que arroja las velocidades de onda P y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), que trabaja con

velocidades obtenidas a partir de las ondas S, con el propósito de caracterizar los materiales subyacentes y establecer los parámetros dinámicos del suelo, el cual arroja resultados muy variados en cuanto resistividades presentes sobre todo en el área clausurada del Relleno Sanitario La Cortada y el área activa, en las zonas activas se presentan resistividades mayores que en la zona clausura en cada resistividades de entre dé (200 – 560 Ω .m) con presencia de material saturado por lixiviados, mientras que el área clausurada se hallan resistividades de (160 – 340 Ω .m) también con presencia de materia saturado por lixiviados (Mancilla, 2017).

En este mismo sentido, Marin y Avendaño (2017), presenta estudios geo eléctricos como ampliación de la geofísica ambiental en el Relleno Sanitario de Chiquinquirá, Boyacá, Colombia, como objeto de detectar infiltraciones de lixiviados a partir de la correlación de tomografía eléctrica obtenidas a partir de las mediciones de dos propiedades físicas del subsuelo. Con técnicas geo-eléctricas se utilizaron los sondeos eléctricos verticales, en los cuales se obtuvieron mediciones de resistividad y variabilidad, en las cuales la correlación de las tomografías de resistividad y cargabilidad, permitió visualizar capas de residuos depositados, detectar infiltraciones de lixiviados y caracterizar la litología del subsuelo, se presentan resistividades de (3 – 25 Ω .m) para residuos saturados con lixiviados y de (25 – 90 Ω .m) para residuos sólidos no saturados y arcillolitas, estos valores se repiten en mayor medidas a las líneas puesta, según los resultados obtenidos el segmento areniscas cuarzosas que subyace a una profundidad de 60 metros, es óptimo para evitar infiltraciones de lixiviados ya que en estas se pudo observar que no se encontraban saturadas (Marín y Avendaño, 2017).

2.2 Marco teórico

2.2.1 Estudios de imágenes eléctricas 3-D. La tomografía de resistividad eléctrica "...es un método de exploración geofísico utilizado ampliamente para llevar a cabo la evaluación de las propiedades eléctricas del subsuelo" (Subterránea, Sf., párr.1) , con el fin de localizar y detectar las estructuras geológicas presentes en él, para llevar a cabo el objetivo de este método, es inyectada una corriente continua a la tierra por medio de dos electrodos, uno de corriente y con otro par de electrodos se mide la distribución de la diferencia del potencial (voltaje), este proceso se realiza continuamente a lo largo de un perfil que puede ser de hasta 60 electrodos. La diferencia de potencial medida se utiliza para el cálculo de la resistividad aparente del subsuelo (Subterránea, Sf, párr.1).

El modelo de interpretación 3-D debería, en teoría, dar los resultados más precisos. Al igual que las encuestas tridimensionales, sin embargo, son un tema de investigación activa, pues no han alcanzado el nivel comparativamente 2-D que se utiliza de forma habitual. La razón principal son los costos de la encuesta, y desarrollos actuales que deberían ser mucho más altos para un levantamiento tridimensional de un área que es suficientemente grande. Respecto al estudio de imágenes, hay dos futuros. Uno es el desarrollo de las encuestas 3-D una opción más rentable en la lectura cercana que se debe tomar de una sola vez. Esto es importante para reducir el medidor de resistividad multicanal que permiten más de un desarrollo de microcomputadoras mucho rápidas para permitir la inversión de tiempo de la encuesta (Loke, 2002, p.100).

2.2.2 Tipos de matrices para levantamientos 3-D. Entre la variedad de configuraciones de medición existen las siguientes: schlumberger, wenner, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Polo-Polo,

wenner-Schlumberger, entre otros, estas configuraciones se seleccionan de acuerdo al problema a resolver.

Las utilizaciones de diferentes modelos inversos han sido muy útiles para la caracterización de suelos, tal como se llevó a cabo, en un estudio realizado por Cruz (2017), bajo la pirámide de Kukulkán, en Chichén Itzá, México, zona altamente arqueológica, el fin de este trabajo fue “mostrar los alcances del método de resistividad eléctrica 3D utilizando arreglos no convencionales, en este estudio también se muestran las diferencias entre los modelos inversos obtenidos usando los programas de inversión ERTL ab64 y EarthImager 3D” (Cruz, 2017).

Otro estudio con un carácter similar llevado a cabo en el partido de San Cayetano, provincia de Buenos Aires, Argentina, cuyo objetivo fue identificar estructuras arquitectónicas enterradas y evaluar las dimensiones del asentamiento subterráneo, mostró través de secciones 2D de distribución de resistividades mayores a $640 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ la detección adecuada de rasgos arquitectónicos, que se identificaron como anomalías resistivas (López, 2012). Otro ejemplo en el cual se ve la aplicación de los estudios geofísicos para identificar elementos contaminantes en el suelo, se desarrolló en una investigación llevada a cabo bajo el subsuelo de una corriente de agua llamada “arroyo la mexicana” en Sonora, México, donde se evidencio a través de las tomografías eléctricas, los espesores de sedimentos contaminados en el área con valores entre 20 a $100 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, producto de la actividad minera de la zona, en esta tesis se aborda un avance de técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica, el cual confirma que estas técnicas geofísicas forman una potente herramienta (económica y no intrusiva) para la solución de problemas geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geotérmicos, arqueológicos y medioambientales (Cuevas, 2014).

2.2.3 La matriz polo-polo. Loke, (2002) en el Tutorial 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, muestra mediante la Figura 1, una posible disposición de los electrodos, que puede ser utilizada para un levantamiento en 3D, mediante un sistema de electrodos múltiples con 25 nodos. Por beneficio y ventaja, los electrodos suelen estar adecuados en una rejilla cuadrada con la misma unidad de espacio entre electrodos en el X y Y direcciones. Para mapear cuerpos ligeramente alargados, una cuadrícula rectangular con diferentes números de electrodos y espaciamientos en el X y Y Se pueden utilizar direcciones. En este sentido el autor muestra, “la configuración de electrodo polo-polo se usa comúnmente para levantamientos 3-D, como el método E-SCAN” (Li y Oldenburg; Ellis y Oldenburg (como se citó en Loke, 2002, p.100). De este modo “...el número máximo de mediciones independientes, *norte máx.*, que se puede hacer con *norte mi* electrodo” (Loke, 2002, p.100), se configura bajo la siguiente ecuación:

$$n_{max} = n_e(n_e - 1)/2$$

Ecuación 1. (Loke, 2002, p.100)

En este caso, cada electrodo se usa a su vez como un electrodo de corriente y se mide el potencial en todos los demás electrodos. Es preciso, que, debido a la reciprocidad, es prudente la medición los “potenciales en los electrodos con un número de índice más alto que el electrodo de corriente” (Loke, 2002, p.100), tal como se evidencia en la Figura 4. Para una cuadrícula de 5 por 5 electrodos, hay 300 medidas posibles. Para cuadrículas de electrodos de 7 por 7 y 10 por 10, una encuesta para medir el conjunto de datos completo tendría 1176 y 4500 puntos de datos, respectivamente. Para los levantamientos comerciales, las cuadrículas de menos de 10 por 10 probablemente no sean prácticas ya que el área cubierta sería demasiado pequeña (Loke, 2002). De este modo, se lleva mucho ejecutar una gran cantidad de mediciones, particularmente con los medidores de resistividad de un solo canal, usados comúnmente para

los levantamientos 2-D. Para reducir el número de mediciones necesarias sin degradar gravemente la calidad del modelo obtenido, en la Figura 2b se muestra una secuencia de medición alternativa. En este método propuesto de "estudio transversal en diagonal", las mediciones de potencial solo se realizan en los electrodos a lo largo del X- dirección, la y- dirección y las líneas diagonales de 45 grados que pasan por el electrodo de corriente. El número de puntos de datos con esta disposición para una cuadrícula de 7 por 7 se reduce a 476, que es aproximadamente un tercio del requerido por una encuesta de conjunto de datos completa (Loke y Barker como se citó Loke, 2002).

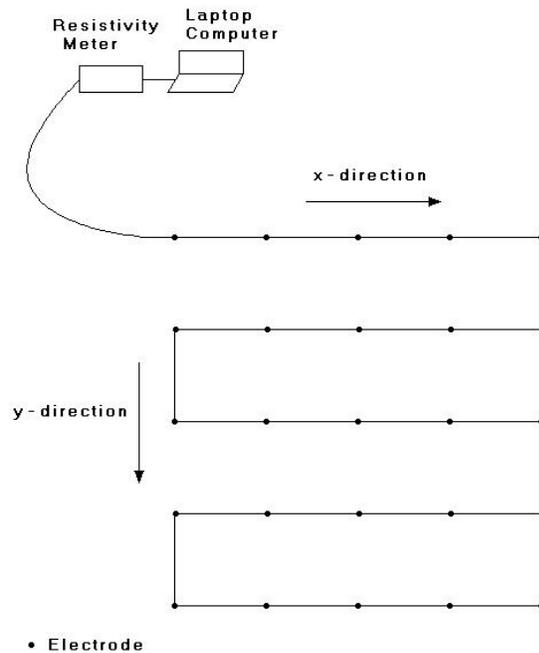


Figura 1. La disposición de los electrodos para un levantamiento tridimensional. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.101),

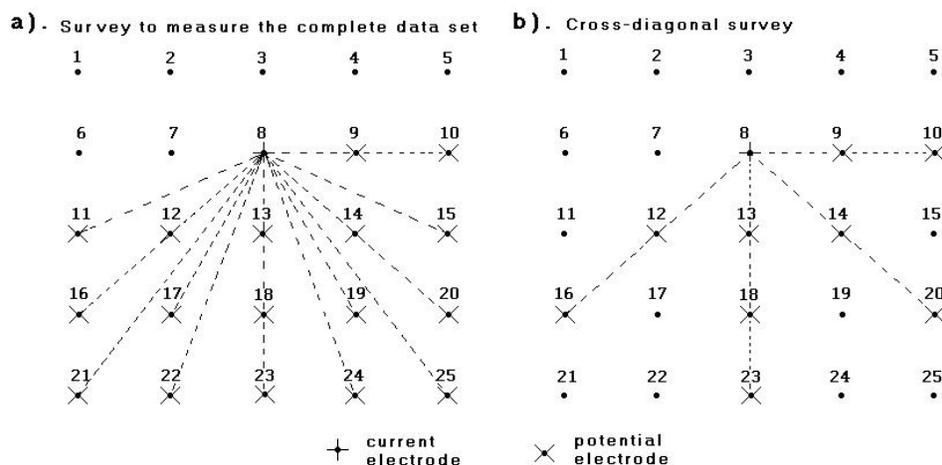


Figura 2. Dos posibles secuencias de medición para un levantamiento tridimensional. La ubicación de los electrodos de potencial correspondientes a un solo electrodo de corriente en la disposición utilizada por (a) una encuesta para medir el conjunto de datos completo y (b) una encuesta en diagonal cruzada. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.101).

En algunos casos, los conjuntos de datos 3-D se construyen a partir de una serie de líneas topográficas bidimensionales paralelas (Ver Figura 3). Idealmente debería haber un conjunto de líneas topográficas con mediciones en el X-dirección, seguida de otra serie de líneas en la y-dirección. Bajo este aspecto, el uso de medidas en dos direcciones perpendiculares ayuda a reducir cualquier sesgo direccional en los datos (Loke, 2002).

Sin embargo, en algunos casos, solo están disponibles los datos de una serie de líneas de levantamiento en una dirección. Esto es particularmente común si las encuestas se realizaron originalmente para proporcionar imágenes bidimensionales. A veces, el espacio entre los electrodos "en línea" es significativamente menor que el espacio entre las líneas. Una cuestión importante es el espaciado máximo entre las líneas que se puede utilizar para que

los datos sigan considerándose "3-D" y sean una guía útil es el gráfico de sensibilidad en 3D tal como lo muestra Loke (2002). En la Figura 2 Loke (2002), muestra “los valores de sensibilidad en cortes horizontales a través de la tierra. Los electrodos están dispuestos a lo largo de las marcas de 0 y 1 metro a lo largo del X- eje. Cerca de la superficie, hay una región aproximadamente circular con valores de sensibilidad negativos en los dos cortes superiores a profundidades de 0.07 y 0.25 metros” (Loke, 2002, p.102).

La zona con la mayor sensibilidad, si se utiliza la línea de contorno de sensibilidad de cuatro (4) unidades como guía, donde “se extiende en él y- dirección a un poco más de la mitad del espacio entre electrodos. Esto significa obtener una cobertura 3-D completa, si las mediciones solo se realizan en el X- dirección”, donde el espacio entre líneas no debe ser mucho mayor que el espacio menor de los electrodos utilizados (Loke, 2002, p.102).

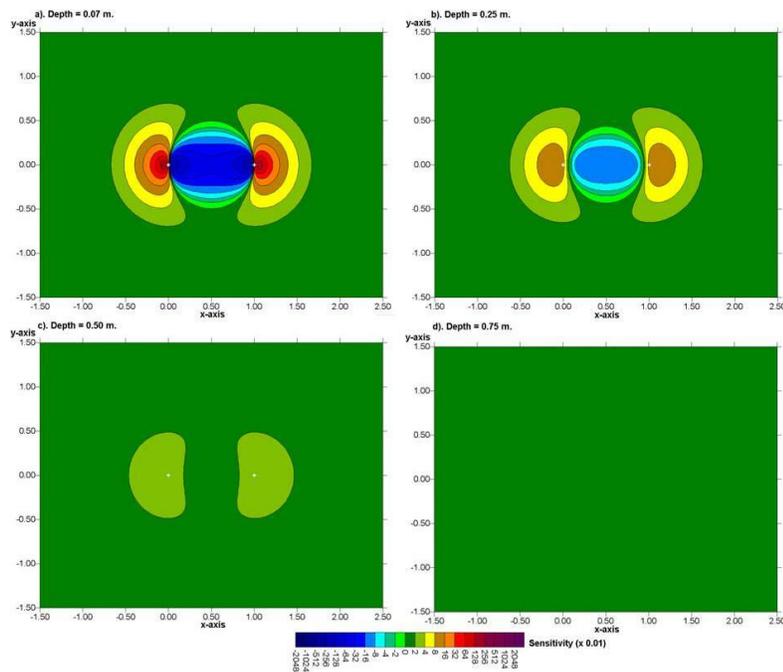


Figura 3. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polos. Las parcelas tienen la forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.102).

La matriz de polos tiene dos desventajas principales, (Loke, 2002), cita lo siguiente:

“En primer lugar, tiene un aspecto mucho más pobre en comparación con otras matrices. Las estructuras del subsuelo tienden a difuminarse en el modelo de inversión final. La segunda desventaja, particularmente para grandes espacios entre electrodos, es que el segundo electrodo de corriente y el electrodo de potencial deben colocarse a una distancia suficientemente grande de la rejilla de medición. Ambas desventajas, que utilizaron esta matriz para un experimento de campo, encontraron que alrededor del 15% de las mediciones no satisfacían la reciprocidad porque la contribución de los electrodos remotos era significativa. En general, esto probablemente afecte a las lecturas con espacios más grandes” (p.102).

2.2.4 La matriz polo-dipolo. Esta matriz es una alternativa atractiva a la matriz de polos para levantamientos con cuadrículas de levantamiento medianas y grandes (12 por 12 y más). Loke, (2002), menciona que tiene un mejor poder de resolución que la matriz de polos (Sasaki como se citó en Loke, 2002) y es menos susceptible al ruido telúrico ya que ambos electrodos potenciales se mantienen dentro de la cuadrícula de levantamiento. Esto “en comparación con la matriz dipolo-dipolo, tiene una intensidad de señal mucho más fuerte. Aunque tiene un electrodo "remoto" (el electrodo C2), el efecto de este electrodo en las mediciones es mucho menor en comparación con el arreglo polo-polo” (Loke, 2002, p.102).

Bajo este aspecto, dado que la matriz de polo-dipolo es una matriz asimétrica, “las mediciones deben realizarse con las disposiciones hacia adelante y hacia atrás de los electrodos”, con el fin de superar “el problema de la baja intensidad de la señal para grandes

valores de n Factor (superior a 8), el a ” (Loke, 2002, p.103). En este sentido, el espaciado entre el par de dipolos P1-P2 debe aumentarse para obtener una mayor profundidad de investigación con un menor n Factor. El uso de mediciones redundantes con niveles de datos superpuestos para aumentar la densidad de datos puede, en algunos casos, ayudar a mejorar la resolución del modelo de inversión resultante (Loke, 2002). Las Figuras 4 y 5 tomadas de Loke, (2002), evidencian los patrones de sensibilidad para esta matriz con el factor de separación de dipolos “ n ” Igual a 1 y 4 respectivamente. Hay un área prominente con valores de sensibilidad negativos entre los electrodos C1 y P1 (ubicados a 0.0 y 0.5 metros a lo largo del X-eje) (Loke, 2002). Los gráficos están organizados de manera que la longitud de la matriz (en este caso, la distancia entre los electrodos C1 y P2) se establece en 1,0 metro para ambos n Factores. Para un n , el área de sensibilidades negativas entre los electrodos C1 y P1 se hace más grande y se extiende a una mayor profundidad. La matriz es más sensible a las estructuras fuera del eje de la matriz (es decir, en el y-dirección) cuando n Es igual a 1.

Es por ello que el área con los valores de sensibilidad más altos se extiende alrededor de “...0,8 veces la longitud de la matriz (Figura 4), o 1,6 veces el espacio entre electrodos unitarios. Cuando el n Es mayor (Figura 5), la matriz es más sensible a las estructuras fuera del eje cerca del dipolo P1-P2” (Loke, 2002, p.103). En este caso, se debe tener en cuenta los valores de sensibilidad negativos a la derecha del electrodo P2. Si el levantamiento tridimensional se lleva a cabo con una serie de líneas paralelas y no se realizan las mediciones de líneas cruzadas, donde la distancia entre “...líneas debe estar preferiblemente dentro de dos o tres veces el espacio entre electrodos de la unidad en línea. Esto es para asegurar que el material del subsuelo entre las líneas esté adecuadamente mapeado por las mediciones en línea” (Loke, 2002, p.103).

2.2.5 Los arreglos dipolo-dipolo, Wenner y Schlumberger. La utilización de esta matriz, se puede recomendar para cuadrículas de más de 12 por 12 debido a la menor cobertura de datos horizontal en los lados (Loke, 2002). El problema principal a que se enfrenta esta matriz es la fuerza de la señal comparativamente baja. Al igual que en las encuestas 2-D, este problema se puede solucionar aumentando el "a" Entre el dipolo P1-P2 para obtener una mayor profundidad de investigación a medida que aumenta la distancia entre los dipolos C1-C2 y P1-P2. Además, se recomienda el uso de niveles de datos superpuestos (Loke, 2002, p.103).

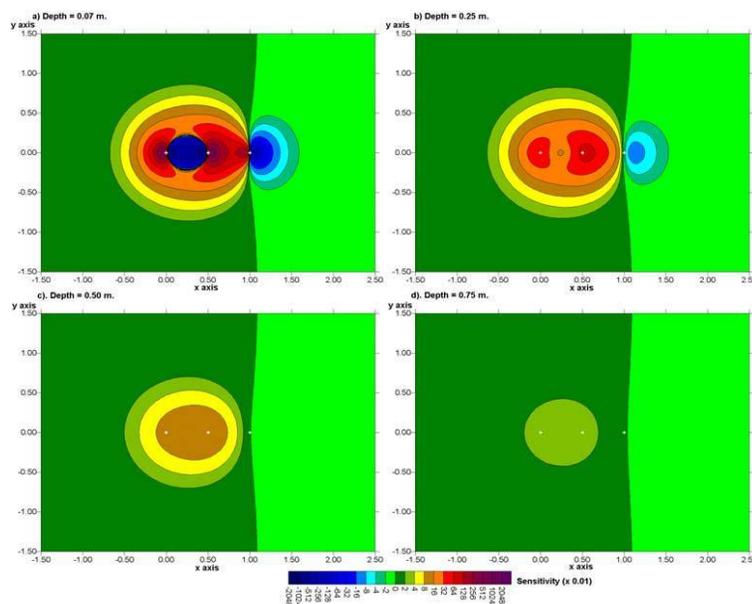


Figura 4. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polo-dipolo con $n = 1$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C1 es la cruz blanca más a la izquierda. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.104).

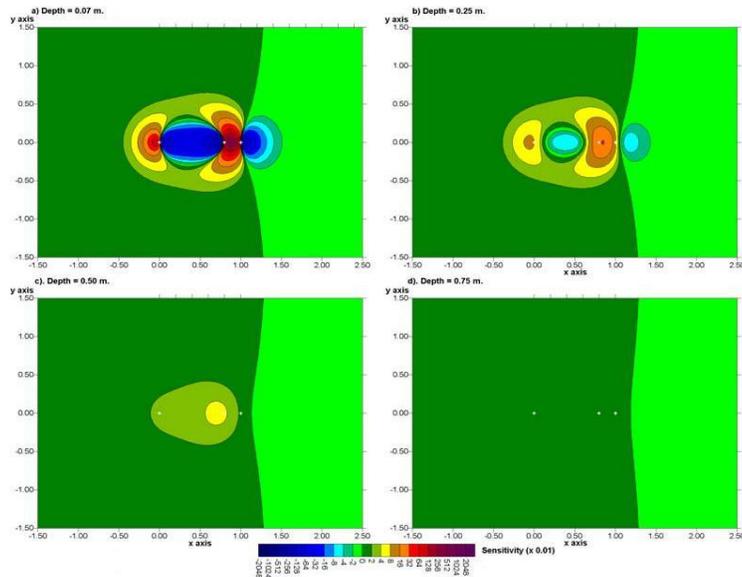


Figura 5. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz de polo-dipolo con $n = 4$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.104).

Las Figuras 4 y 5 expuestas por Loke (2002), muestran los patrones de sensibilidad para la matriz dipolo-dipolo cuando el "n" Factor es igual a 1 y 4 respectivamente. Los valores de sensibilidad tienen valores pequeños pero negativos fuera de la vecindad inmediata de la matriz. Otra característica interesante es que los contornos de sensibilidad tienden a alargarse en él y-dirección, particularmente para los más grandes "n" Valor. Es así, que "el contorno de sensibilidad de 4 unidades se extiende a aproximadamente 0,6 veces la longitud de la matriz en él y-dirección, o aproximadamente 1,8 veces el espacio entre electrodos unitarios" (Loke, 2002, p.105). Esto significa que la matriz es más sensible a las estructuras fuera del eje de la matriz en comparación con las matrices polo-polo y polo-dipolo. En esto, "esta característica es problemática en las encuestas 2-D, pero puede resultar ventajosa en las encuestas 3-D" (Loke, 2002, p.105).

2.2.6 Resumen de tipos de matrices. Respecto a “las cuadrículas relativamente pequeñas de menos de 12 por 12 electrodos, la matriz polo-polo tiene un número sustancialmente mayor de posibles medidas independientes en comparación con otras matrices” (Loke, 2002, p.105). La pérdida de puntos de datos cerca de los lados de la cuadrícula se mantiene al mínimo y proporciona una mejor cobertura de datos horizontal en comparación con otras matrices. Se puede decir, que es una matriz atractiva para pequeñas rejillas de levantamiento con espacios relativamente pequeños (menos de 5 metros) entre los electrodos. Sin embargo, tiene una desventaja y es “...requerir dos electrodos “remotos” que deben colocarse a una distancia suficientemente grande de la cuadrícula de levantamiento. Debido a la gran distancia entre los dos electrodos potenciales, esta matriz es más sensible al ruido telúrico” (Loke, 2002, p.105).

La matriz de polo-dipolo es una opción atractiva para cuadrículas de tamaño mediano. Tiene una resolución más alta que la matriz de polos, solo requiere un electrodo remoto y es mucho menos sensible al ruido telúrico (Loke, 2002). Para levantamientos con rejillas grandes, particularmente cuando no hay una ubicación conveniente para un electrodo remoto, se puede usar la matriz dipolo-dipolo. Para las matrices polo-dipolo y dipolo-dipolo, las mediciones con niveles de datos superpuestos utilizando diferentes " una "Y" norte. Deben utilizarse combinaciones para mejorar la calidad de los resultados. En este caso, “los electrodos para levantamientos 3-D normalmente están dispuestos en una cuadrícula rectangular con un espaciado constante entre los electrodos (Figuras 6 y 7)” (Loke, 2002, p.105). Sin embargo, “el programa de inversión de resistividad e IP RES3DINV también puede manejar cuadrículas con un espaciado no uniforme entre las filas o columnas de electrodos” (Loke, 2002, p.105).

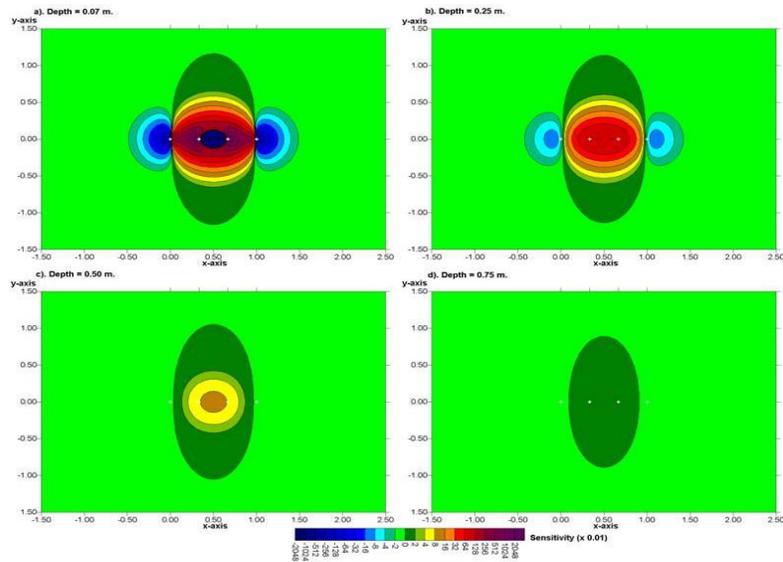


Figura 6. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz dipolo-dipolo con $n = 1$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C2 es la cruz blanca más a la izquierda. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.106).

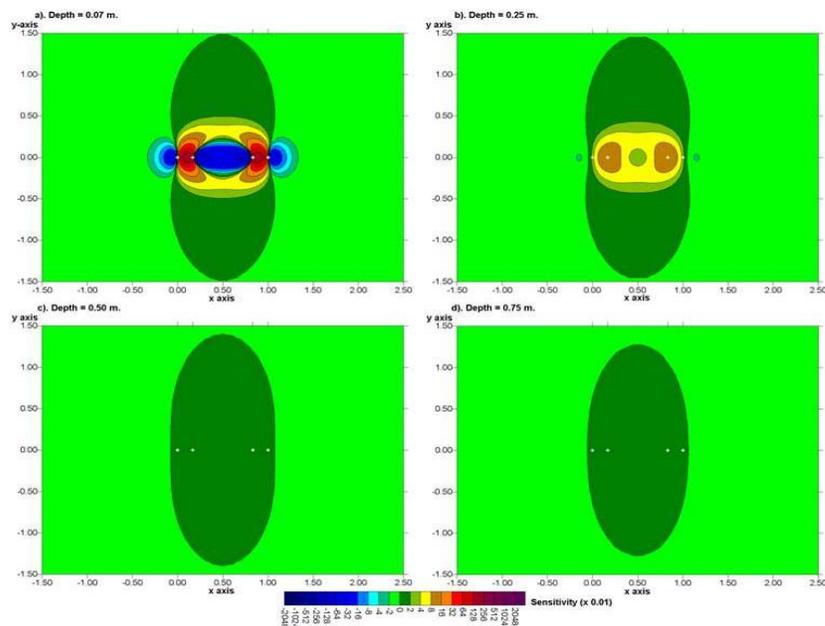


Figura 7. Gráficos de sensibilidad 3-D para la matriz dipolo-dipolo con $n = 4$ en forma de cortes horizontales a través de la tierra a diferentes profundidades. El electrodo C2 es la cruz blanca

más a la izquierda. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.106).

La mayoría de los levantamientos comerciales en 3-D probablemente involucrarán cuadrículas de al menos 16 por 16 para cubrir un área razonablemente grande. Una cuadrícula de 16 por 16 requerirá 256 electrodos, que, es más, las cuadrículas grandes que el disponible en muchos sistemas de medidor de resistividad de electrodos múltiples. Un método para realizar encuestas en con un número limitado de electrodos es extender la técnica de rodar a lo largo de un levantamiento usando un sistema de medidor de encuestas 2-D a encuestas 3-D (Dahlin y Bernstone cómo se citó en Loke, 2002, p.109). La Figura 8 que se evidencia más adelante muestra un ejemplo por cuadrícula de 10. Inicialmente, la resistividad de múltiples electrodos con 50 electrodos para inspeccionar un 10 orientado en el X- dirección. Las mediciones se electrodos están dispuestos en una cuadrícula de 10 por 5 con la dirección de las líneas más largas, con algunas medidas posibles en las realizan principalmente en el X- direcciones diagonales (Loke, 2002).

De este modo, toda la cuadrícula es el área de la cuadrícula, donde la rejilla de electrodos de "...10 por 5 se orienta a movido en él y- dirección para que la cuadrícula de 10 por 5 ahora cubra la segunda mitad de la de 10 por 10 continuación en la y- dirección a lo largo de la técnica" (Loke, 2002, p.109). Este ejemplo fue ejecutado con un sistema de resistividad-medidor de solo 25%. El archivo de datos PIPE3D.DAT, obtuvo de una encuesta utilizando un rodillo de este tipo, los electrodos nodos con perpendicularmente a dos tuberías subterráneas conocidas. Las mediciones se realizaron utilizando tres de todas las dispuestos en una cuadrícula de 8 por 3 (Loke, 2002). El eje largo de esta cuadrícula se orientó de 8 por 3 subcuadrículas de modo que

todas las mediciones posibles (incluido un número limitado en él y - dirección) para el poste no se llevó a cabo para reducir el tiempo levantamiento cubra una cuadrícula de 8 por 9. Para cada sub-cuadrícula de 8 por 3, se hicieron arreglos de polos, porque las tuberías tienen segundo conjunto de mediciones en él y - dirección (como en una estructura casi bidimensional) (Loke, 2002).

Por razones prácticas, el número de mediciones de campo en algunas encuestas pueden ser mediciones en el X - y Y - direcciones incluso menos que la técnica de la diagonal cruzada. Otro enfoque común es hacer lo particularmente común si la solamente, sin las medidas diagonales. Se trata de electrodos independientes, pero se necesita una rejilla relativamente grande. encuesta se realiza con un sistema con un número limitado de En algunos casos, las mediciones se realizan solo en una dirección (Loke, 2002).

El conjunto de datos 3-D se invierte de forma consta de una serie de líneas bidimensionales paralelas. Los datos de cada línea de levantamiento 2-D son inicialmente valores de resistividad de independiente para dar una serie de secciones transversales 2-D. El RES3DINV aparente medido para dar una imagen todas las líneas que también pueden combinarse en un conjunto de datos 3-D e invertirse con valores más pobres que los producidos con un tridimensional (Loke, 2002). No obstante, se espera que la calidad del modelo 3-D pueda mostrar variaciones importantes de resistividad a través del levantamiento 3-D completo.

Los instrumentos de resistividad multicanal de conjuntos de datos D se utilizan líneas de levantamiento, aportando, una solución, para extraer información en 3-D de encuestas en 2-D. En concordancia, este podría ser el más rentable, particularmente útil para levantamientos con la matriz dipolo-dipolo porque que puede tolerar arreglo, estar entre las líneas de la encuesta y espaciamientos más grandes (Loke, 2002, p.109).

2.2.7 Un programa de modelado directo en 3-D. En la interpretación de los datos de los levantamientos de imágenes de resistividad en 2-D, la geología del subsuelo no cambia significativamente en la dirección que es perpendicular a la línea del levantamiento. Caso contrario ocurre, en áreas con geología muy compleja, podría haber variaciones sustanciales en la resistividad del subsuelo en esta dirección, es decir, geología es 3-D, lo que podría causar distorsiones en las secciones inferiores del modelo 2-D obtenido (Loke, 2002). El programa gratuito de modelado directo de resistividad en 3-D RES3DMOD.EXE, “permite calcular los valores de resistividad aparente para un levantamiento con una cuadrícula rectangular de electrodos sobre una estructura en 3D. Este es un programa basado en Windows que se puede utilizar desde Windows 95/98 / Me / 2000 / NT” (Loke, 2002, p.109).

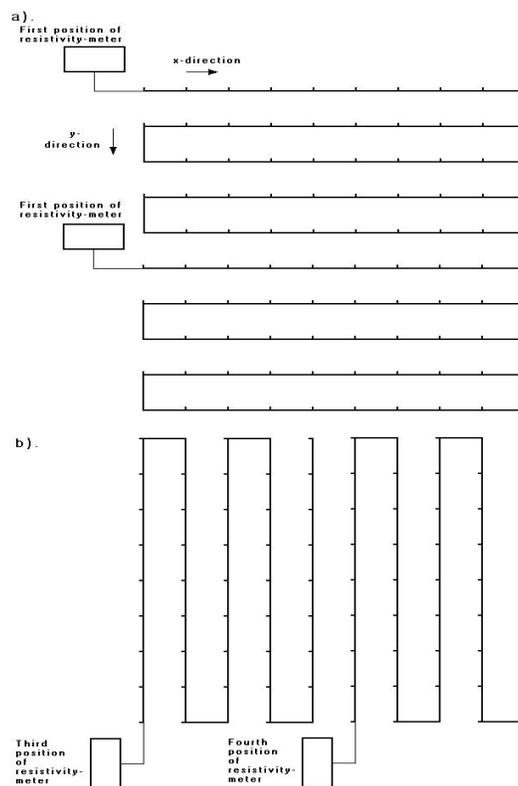


Figura 8. Uso del método de desplazamiento para medir una cuadrícula de 10 por 10 con un sistema de electrodos múltiples con 50 nodos. (a) Encuestas usando una cuadrícula de 10 por 5

con las líneas orientadas en el X-. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.110).

En el caso práctico, para modificar el modelo 3-D, se debe hacer clic en la opción "Editar modelo de resistividad". En esta opción, se puede cambiar la resistividad de las celdas 3-D en la malla utilizada por el método de diferencias finitas (Dey y Morrison, como se citó en Loke, 2002) para calcular los valores de resistividad aparente. Para salir del modo "Editar", se debe presionar la tecla Q o Esc. Para calcular los valores de resistividad aparente, se hace clic en la opción "Calcular". Para ver las pseudosecciones de resistividad aparente, se hace clic en la opción "Mostrar resistividad aparente". Puede optar por mostrar los valores de resistividad aparente en forma de pseudosecciones horizontales o como "...pseudosecciones verticales como se usa en levantamientos 2-D. La visualización de las pseudosecciones verticales da una idea del efecto de una estructura 3-D sobre las medidas en un levantamiento 2-D. En un estudio realizado por Dahlin y Loke" (como se citó en Loke, 2002, p.111).

El programa RES3DMOD también tiene una opción para guardar los valores de resistividad aparente en un formato que pueda ser aceptado por el programa de inversión RES3DINV. Como ejercicio, se debe guardar los valores de resistividad aparente como un archivo de datos RES3DINV para uno de los modelos y luego lleve a cabo una inversión de este conjunto de datos sintéticos. La Figura 9a expresado por Loke (2002), expone un ejemplo de un "modelo 3-D con una cuadrícula de levantamiento de 15 por 15 (es decir, 255 electrodos)" (p.111). El modelo, "consta de cuatro prismas rectangulares incrustados en un medio con una resistividad de $50 \Omega \cdot m$, se muestra en forma de (...) cortes horizontales a través de la tierra. Los valores de resistividad aparente para la matriz polo-polo" (Loke, 2002, p.111), partiendo de esto, con

los electrodos alineados en el X-dirección) se muestran en forma de pseudosecciones horizontales en la Figura 9b. Se debe tener en cuenta, el bloque de baja resistividad con una resistividad de $10 \Omega \cdot m$ cerca del centro de la cuadrícula que se extiende desde una profundidad de 1.0 a 3.2 metros. Para mediciones con espaciamentos de electrodos más cortos de menos de 4 metros, este bloque provoca una anomalía de baja resistividad. Sin embargo, para espacios de electrodos de más de 6 metros, este prisma de baja resistividad causa una anomalía de alta resistividad. Este es un ejemplo de "inversión de anomalía" que es causada por la zona cercana a la superficie de valores de sensibilidad negativos entre los electrodos C1 y P1 (Loke, 2002).

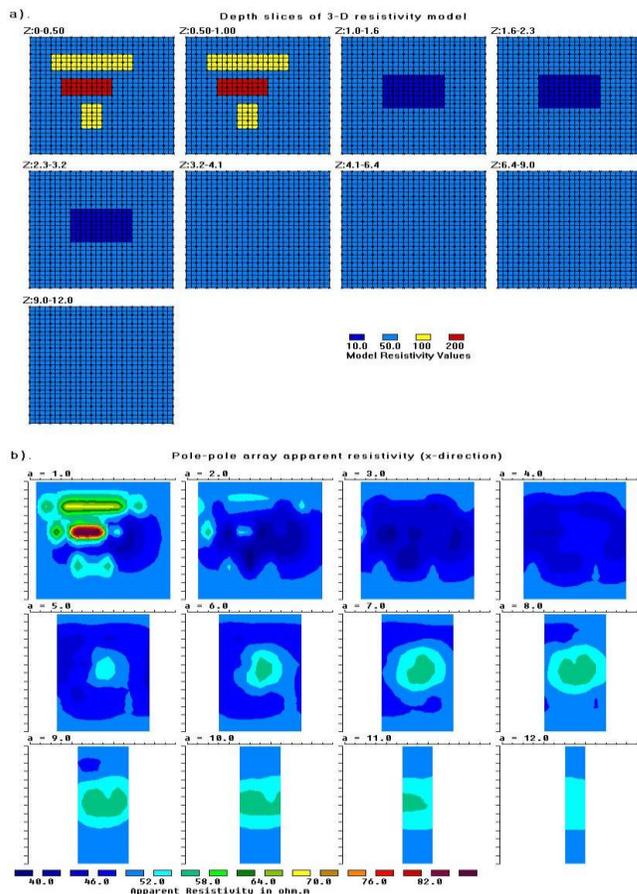


Figura 9. Un modelo 3-D con 4 prismas rectangulares en una cuadrícula de encuesta de 15 por 15. (a) La cuadrícula de diferencias finitas. (b) Pseudosecciones horizontales de resistividad

aparente para la matriz polo-polo con los electrodos alineados en el X- direccion. Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.112).

2.2.8 Algoritmos de inversión 3-D y conjuntos de datos 3-D. En el ámbito académico, a veces surgen preguntas interesantes, en este caso, particularmente, es la definición de un algoritmo de inversión 3-D y lo que constituye un conjunto de datos 3-D. Respecto al algoritmo de inversión 3-D, está puede responderse fácilmente. sin embargo, en el caso al conjunto de datos 3-D, es menos clara. Los valores de resistividad para variar en las tres direcciones, es una característica definitoria de un algoritmo de inversión de algoritmo 3-D es que permite el contraste del modelo con la decir, en el x -, y - y z - direcciones. Esto está en y z - direcciones, pero constante en él y - dirección; y en la inversión 1-D donde la resistividad es la inversión 2-D donde se supone que la resistividad del subsuelo varía solo en la X -programa, consta de celdas rectangulares independientes (Figura 10) donde los valores del modelo son algoritmos (se debe tener en cuenta, que solo se permite cambiar en el z - dirección) (Loke, 2002). El modelo de inversión utilizado por RES3DINV permite variar tres modelos construidos a partir de una serie de inversiones bidimensionales a lo largo de líneas paralelas direcciones simultáneamente, por lo que utiliza una verdadera inversión 3-D. Otra característica definitoria de un algoritmo de inversión 3-D es el uso de un 3-D (Dey y Morrison como se citó en Loke, 2002), “subrutina de modelado directo, como la resistividad de los métodos de elementos finitos y diferencia finita 3D y valores de Silvester y Ferrari, para calcular el modelo aparente matriz jacobiana” (Loke, 2002, p.113).

Entonces en relación, al conjunto de datos "3-D", el algoritmo de inversión se utiliza para invertir la materia, el cual es un conjunto de datos que contiene información significativa en 3-D, siendo otra cobertura que también debe ser en 2-D, para lograr un levantamiento 2-D. Es

necesario tener en cuenta, que para obtener un buen modelo 2-D para el subsuelo, los espaciamientos de los electrodos de datos y en mediciones se realizan con diferentes encuestas de polos como ejemplo, el considerarse “3-D” se propone para conjuntos de datos 3-D, se enumeran en orden decreciente de contenido de información tridimensional. Siguiendo un sistema de clasificación y mediciones en todas las direcciones posibles tal como se muestra (Figura 9a), es decir, como se ve a lo largo de las líneas de la cuadrícula como un conjunto, especificando cuatro categorías:

Categoría 1 - Un levantamiento 3-D ideal con los electrodos dispuestos en una cuadrícula rectangular y con diferentes ángulos a datos 3D “completo”. En esta encuesta, se colocaron 56 electrodos en una faja de 8 por 7 y las líneas de la cuadrícula. El archivo de datos SEPTIC.DAT es un ejemplo de todas las posibles mediciones de 1540 ($56 \times 55 / 2$) realizadas (Loke, 2002).

Categoría 2 - Los electrodos están dispuestos en una rejilla rectangular. Todas las medidas a lo largo del ángulo a las líneas de las líneas de la cuadrícula (es decir, en el X- y Y- direcciones), pero sólo se realiza un número limitado de mediciones en una Figura cuadrícula (como a lo largo de las diagonales de 45 grados para cuadrículas cuadradas como se muestra en medidas limitadas en 10b). El archivo de datos ROOTS7.DAT es un ejemplo de un levantamiento con electrodos en una cuadrícula de 7 por 7 y se las direcciones angulares. En este caso, el levantamiento realizado 49 tendría 1176 medidas. realizaron 468 mediciones. Un conjunto de datos 3D "completo" (Loke, 2002).

Categoría 3 - Las mediciones solo se realizan en las dos direcciones a lo largo de las líneas de la cuadrícula, es decir, en la secuencia de los X- y Y- direcciones, y no se realizan mediciones en ángulo con las líneas de la cuadrícula. Este sistema de electrodos para medición se usa con

frecuencia cuando no hay suficientes nodos en la secuencia múltiple que se muestra en la Figura 10. Los datos cubrir toda el área de estudio de una sola vez (Loke, 2002).

Categoría 4 - Mediciones en una sola dirección (por ejemplo, el X- dirección) a lo largo de una serie de prospecciones IP de depósitos de líneas topográficas paralelas en 2-D. Esta situación es común para los datos de encuestas antiguas, particularmente las realizadas por minerales. Para este tipo de conjunto de datos, una serie de inversiones 2-D suelen ser las líneas de levantamiento en un intento de primera vez. La inversión 3-D se utiliza luego en un conjunto de datos combinados con los datos de todos los efectos D que son significativos obtener nueva información de los datos antiguos y ver si 3- (es decir, si los resultados de las inversiones 2-D son válidos) (Loke, 2002).

El éxito de la inversión 3-D depende en parte del espacio entre las líneas y el tipo de matriz utilizada. Como regla general, el espacio entre las líneas no debe ser más del doble del espacio entre los electrodos unitarios a lo largo de las líneas. Si bien lo ideal es que los datos sean de Categoría 1 o al menos de Categoría 2 para que haya algunos datos angulares disponibles, el programa RES3DINV también aceptará datos que se incluyan en las Categorías 3 y 4. La precisión de los modelos 3-D obtenidos de las Categorías 3 y 4 tipos de datos serán más bajos que los tipos de datos de Categorías 1 y 2, y dependerán en gran medida del espacio entre las líneas y el tipo de matriz utilizada. Sin embargo, incluso para el tipo de datos de Categoría 4, los resultados de la inversión 3D deberían proporcionar un indicador útil sobre si los efectos 3D son significativos. Esto puede proporcionar una verificación de la validez de los resultados obtenidos de inversiones bidimensionales independientes de las diferentes líneas de levantamiento (Loke, 2002).

2.2.9 Un programa de inversión 3-D. La inversión 3-D del conjunto de datos de campo se puede llevar a cabo de una manera similar utilizando el método de mínimos cuadrados con restricción de suavidad utilizado para la inversión 2-D. En la Figura 10a se muestra un modelo utilizado para interpretar el conjunto de datos 3D. El subsuelo se divide en varias capas y cada capa se subdivide en varias celdas rectangulares. Se utiliza un programa de inversión de resistividad 3-D, RES3DINV, para interpretar los datos de levantamientos 3D. Este programa intenta determinar la resistividad de las celdas en el modelo de inversión que reproducirá más fielmente los valores de resistividad aparente medidos del estudio de campo. Dentro del programa RES3DINV, el usuario puede modificar el grosor de las capas. En las Figuras 10b y 10c se muestran otros dos modelos alternativos que se pueden usar con el programa RES3DINV (Loke, 2002).

El segundo modelo de inversión subdivide a la mitad las capas superiores tanto vertical como horizontalmente. Otra alternativa es subdividir las capas superiores a la mitad solo en las direcciones horizontales (Figura 10c). Dado que la resolución del método de resistividad disminuye rápidamente con la profundidad, se ha descubierto que subdividir los bloques solo es beneficioso para las dos capas superiores. En muchos casos, solo es suficiente subdividir la capa superior. Al subdividir las celdas, el número de parámetros del modelo y, por lo tanto, el tiempo de la computadora requerido para invertir el conjunto de datos puede aumentar dramáticamente. Se ha descubierto que subdividir los bloques solo es beneficioso para las dos capas superiores. En muchos casos, solo es suficiente subdividir la capa superior. Al subdividir las celdas, el número de parámetros del modelo y, por lo tanto, el tiempo de la computadora requerido para invertir el conjunto de datos puede aumentar dramáticamente. De esta forma, “se ha descubierto que subdividir los bloques solo es beneficioso para las dos capas superiores. En

muchos casos, solo es suficiente subdividir la capa superior. Al subdividir las celdas, el número de parámetros del modelo...”, por lo tanto, el tiempo de la computadora requerido para invertir el conjunto de datos puede aumentar dramáticamente (Loke, 2002, p.114).

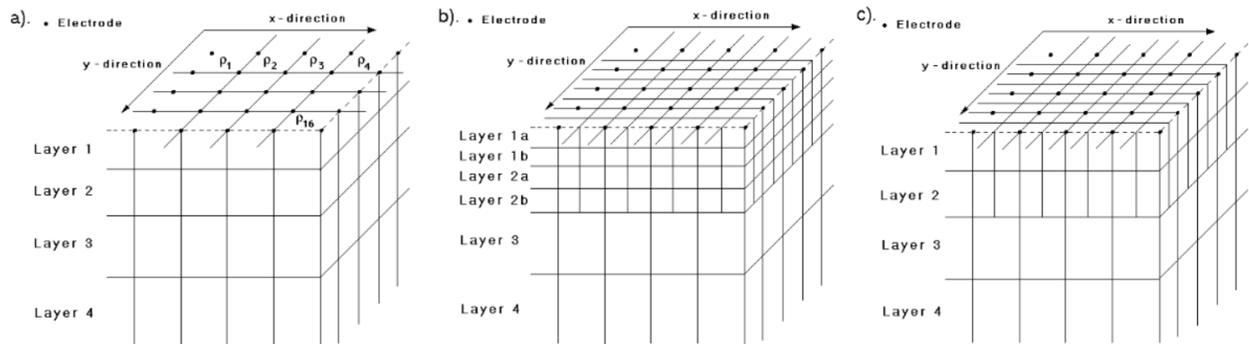


Figura 10. Los modelos utilizados en la inversión 3-D. (a) Modelo estándar donde los anchos de las celdas rectangulares son iguales a los espacios entre electrodos unitarios en el X- y y-direcciones. (b) Un modelo en el que las pocas capas superiores se dividen por la mitad, tanto vertical como horizontalmente, para proporcionar una mejor resolución. (c) Un modelo donde las celdas del modelo se dividen en la dirección horizontal pero no en la dirección vertical.

Fuente: Tutorial 2-D and 3-D electrical imaging surveys, (Loke, 2002, p.114).

2.3 Marco contextual

2.3.1 Ubicación. El área de estudio se encuentra ubicada en la Vereda Chíchira del municipio de Pamplona Norte de Santander, al costado izquierdo de la vía nacional que comunica a Pamplona con el municipio de Chitaga, kilómetro 3+500, a una altura de 3040 m.s.n.m (Ferreira, 2017).

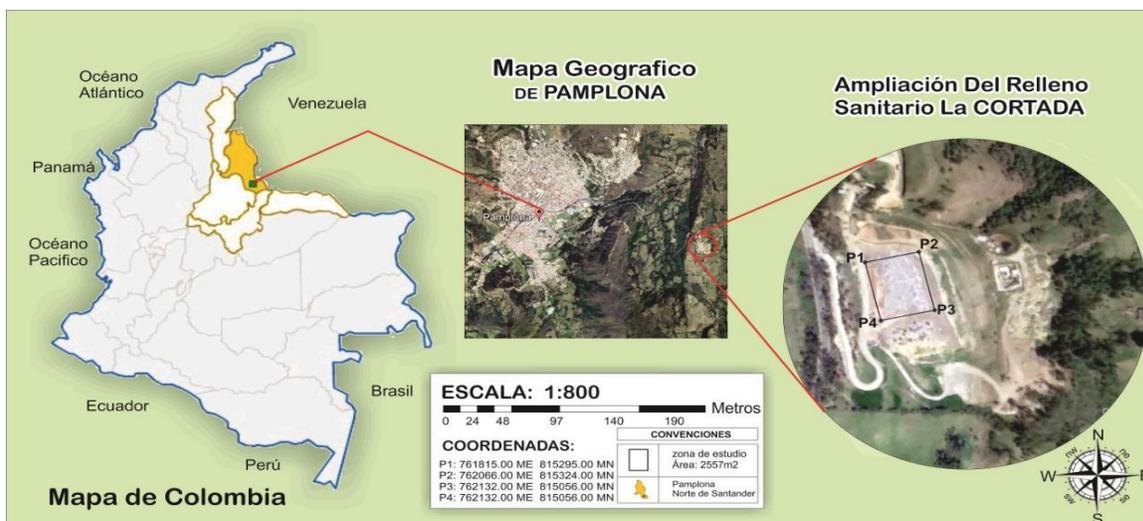


Figura 11. Ubicación geográfica, Relleno Sanitario La Cortada, Pamplona. Fuente: Google Earth 2019.

2.3.2 Localización geográfica y geológica del área. El área de estudio se ubica en la región de la Cordillera Oriental de los Andes, en el noreste colombiano. De rumbo noreste, cambia bruscamente en el área de trabajo, para luego bifurcarse alrededor del extremo sur de la cuenca de Maracaibo. Esta sesión es conocida como Macizo de Santander.

Según el mapa de terrenos geológicos de Colombia se encuentra ubicada en el terreno de Santander, caracterizado por presentar un fallamiento en bloque. Donde se observa fallamiento inverso y de rumbo producto de una fase compresiva debido al levantamiento de la cordillera.

Las fallas de Chitaga, Morro Negro, Pamplona, Mutiscua y Bábea al oriente y las fallas del río Charta, Tona, la Cristalina y Suratá al occidente, son las más representativas (Ferreira, 2017).

El municipio de Pamplona se compone de rocas gneises félsicos, e intrusivos sintéticos, anfibolitas y esquistos pelíticos del precámbrico; sedimentitos pelíticas, semíticas y calcáreas metamorfozadas en facies esquistos verde anfibolita, del paleozoico. Rocas magnéticas ácidas a

intermedias jurásicas y rocas sedimentarias como arenisca (conglomeráticas, guijosas y glauconítica), calizas masivas fosilíferas, shales negras, arcillolitas y depósitos de aluvión, coluvión y glaciarios, del cenozoico (Ferreira, 2017).

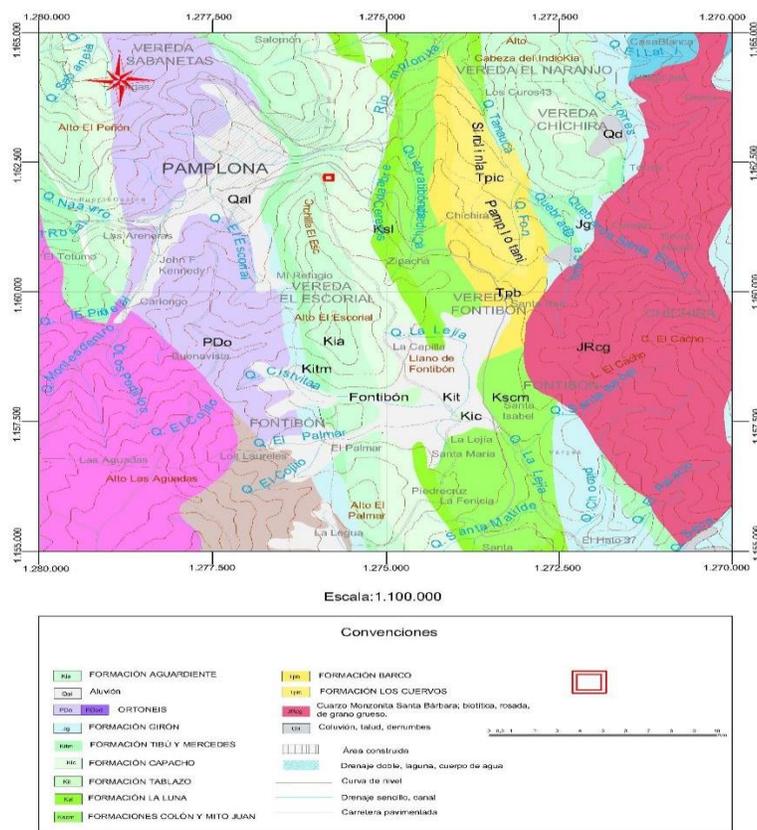


Figura 12. Descripción geológica del área de estudio. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).

Capítulo 3

3. Metodología

Esta investigación es de carácter cuantitativo, consta de cuatro (4) fases, con la salvedad que la primera (1) fase se realizó en el diplomado Geofísica y Geotecnia aplicados a la Ingeniería Civil. Esta tesis es la continuación y culminación de la investigación realizado en el diplomado; al terminar la investigación y reprocesamientos de datos para obtener los respectivos modelos 3-D y cumplir con los objetivos planteados.

3.1 Primera fase: Procesamiento de datos a través del software Res2DInv

Como ejemplo para llevar a cabo el método en el procesamiento de los datos crudos o datos obtenidos en campo se utilizó la línea 1 de las 7 líneas proporcionadas de las cuales la línea 3 y 6 presentó errores de campo. A continuación, se describe paso a paso cada uno de los pasos levados a cabo.

Paso 1. Una vez se ha llevado a cabo la importación al software del archivo correspondiente a la línea 2 en formato “DAT” se verifican los requisitos del sistema donde se observa el rango de valores de resistividad aparente mínimos y máximos.

Paso 2. El siguiente paso es la edición, donde se lleva a cabo un proceso de exterminio o eliminación de datos incorrectos. Con la ayuda de la herramienta “zoom display” se visualiza las líneas horizontales con el fin de eliminar de ellas los puntos que consideramos con ruido sistemático o ruido aleatorio y en esta primera edición obtener la reducción de un porcentaje de error considerable.

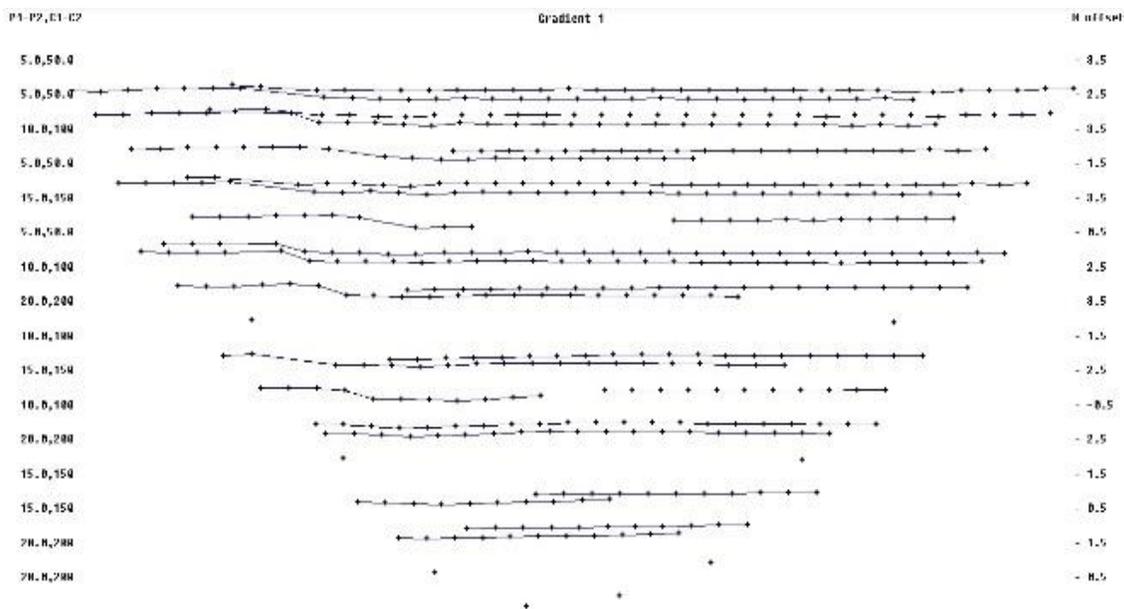


Figura 13. Filtrado de puntos. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv.

Paso 3. A continuación se realiza la configuración de ciertos parámetros para la inversión de los datos y del método de modelado. En los factores de amortiguamiento se muestra los valores iniciales, mínimos, más altos y de incremento del factor de amortiguación seleccionado y en la configuración del método de modelado el tamaño de la malla horizontal y vertical.

Tabla 5. Factores de amortiguamiento.

Valor del factor de amortiguación inicial	0.1500
Valor mínimo del factor de amortiguación	0.0200
Mayor valor de factor de amortiguación para la primera capa	5.00
Valor para aumentar el factor de amortiguación	1.050

Fuente: Autor

Tabla 6. *Configuración del método de modelado.*

Tamaño de la malla horizontal	
Cantidad de nodos para el cálculo de resistividad aparente	4 nodos
Relación de separación mínima de electrodos	1.00
Tamaño de la malla vertical	
Opción de la malla más fina	Malla normal

Fuente: Autor

Paso 4. Una vez realizado las configuraciones antes descritas y otras que se establecen por defecto, se visualiza el modelo extendido que se está usando.

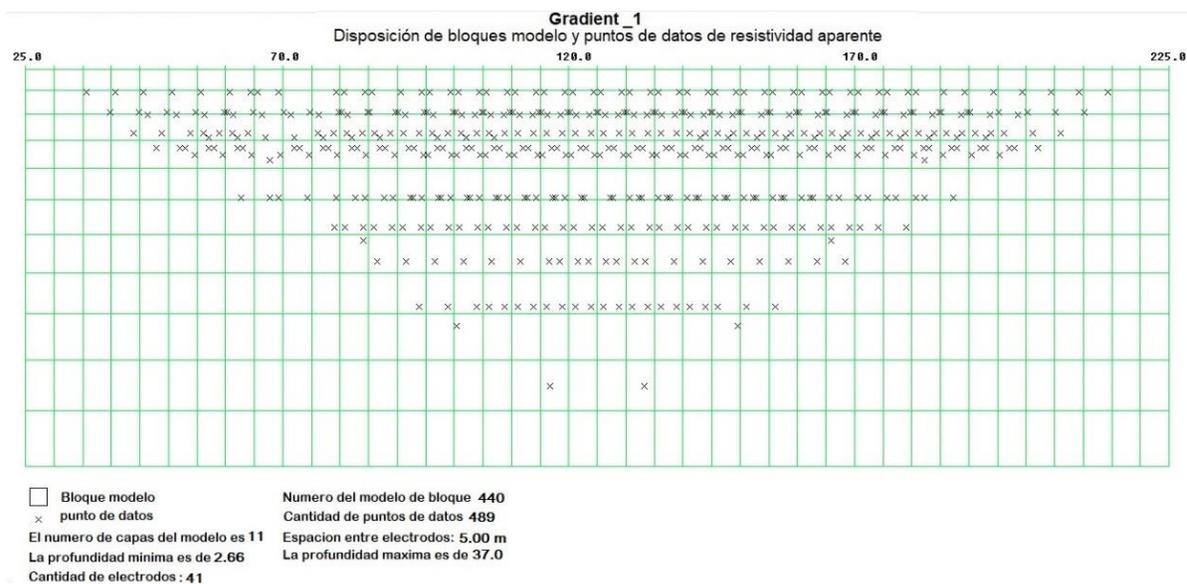


Figura 14. Disposición del modelo y datos de resistividad. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv

Paso 5. Se realiza la inversión. el software Res2DInv como archivo de entrada trabaja con la pseudo sección de resistividades, esto genera un modelo tanto en la dirección vertical como en

la horizontal donde se discretiza una serie de bloques distribuidos de la sección a invertir, luego a cada bloque se le asignan un valor de resistividad y se calcula su respuesta comparándose con los datos de entrada obteniendo un error medio cuadrático. De manera iterativa se van ajustando los valores de resistividad de cada bloque hasta conseguir un error mínimo o alcanzar un nivel máximo de iteraciones y lograr una pequeña diferencia entre errores para iteraciones sucesivas.

En cada iteración cambian los valores de resistividad solamente, ya que el programa usa una distribución mínima de celdas. Estas iteraciones de inversión están basadas en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992). En la Figura 15 se muestra el resultado del procesamiento de la Línea 2 con la versión libre del Res2DInv, con la cual se consiguió un error de 9.9% en el límite de 4 iteraciones, en ella se muestra en la gráfica superior la pseudo sección de resistividades aparentes, en la del medio la pseudo sección de resistividades calculadas y en la inferior la sección de resistividad del modelo inverso.

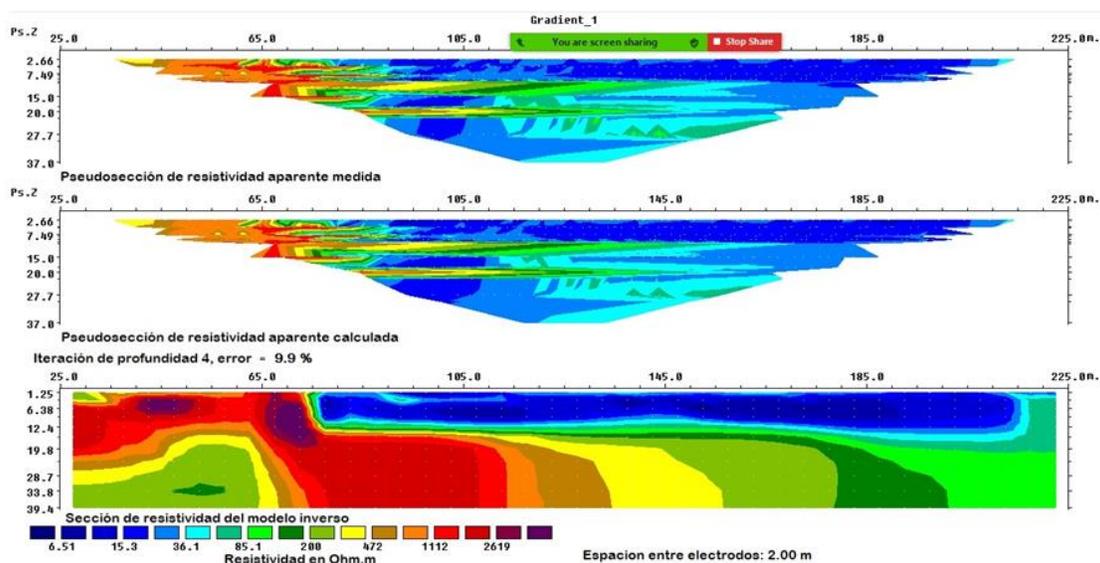


Figura 15. Inversión del modelo de resistividades. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv.

Paso 6. Seguidamente se procedió a la reducción del ruido, para reducir con ello el error RMS con la ayuda de las herramientas virtuales, las cuales nos permiten eliminar los puntos que están presentes en la resistividad aparente medida que no se ajusta a la resistividad.

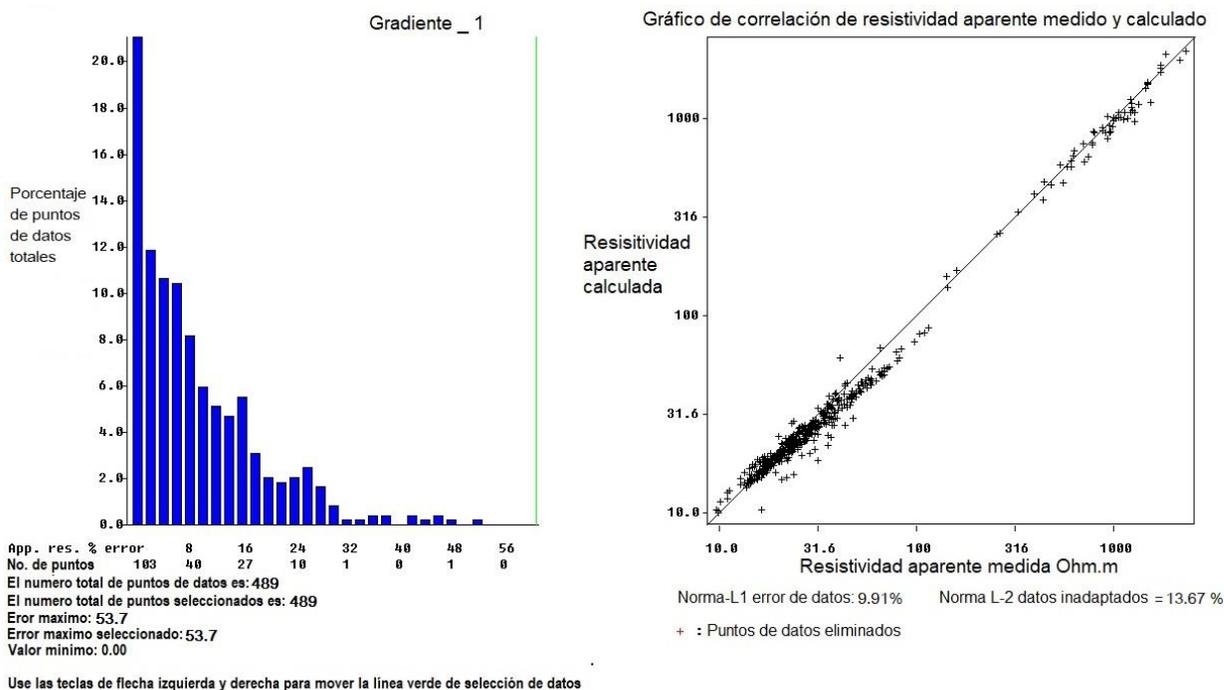


Figura 16. Gráficas RMS. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv.

Paso 7. Una vez el proceso iterativo lleve a la obtención de un porcentaje de error menor al 10% se genera el modelo con topografía, en el cual observamos el perfil del relieve donde se ubican los puntos. Las interpretaciones de las anomalías geofísicas se realizan en términos de modelos geoelectricos simplificados suponiendo que son homogéneas sus propiedades físicas, por esta razón el análisis de la interpretación representa una aproximación de las condiciones geológicas presentes en el área de estudio.

Para el análisis de la línea 2 ubicada en el Relleno Sanitario La Cortada se observa, primeramente, una distribución con un comportamiento homogéneo donde los valores que predominan para los lixiviados están dentro de un rango entre 6 a 15 Ohm.m Como se observa

en la Figura 17, con una altura de 5 a 20 m. Dentro del relleno se logró identificar una posible capa de relleno orgánico con una profundidad de 3 a 15 metros, donde los valores de resistividad para basuras se encuentran entre los 25 y 80 Ohm.m creando una frontera que los divide de los lixiviados.

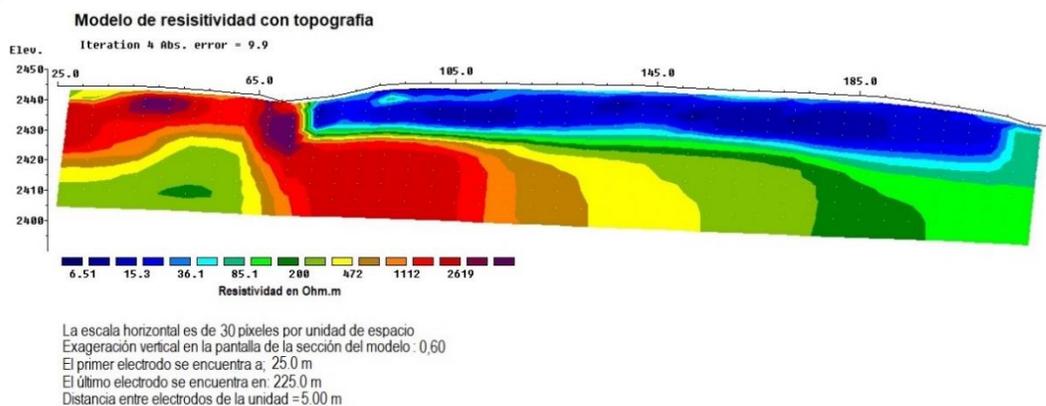


Figura 17. Modelo invertido con topografía línea 1. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv.

3.2 Segunda fase: Procesamiento de datos a través del software Res3DMod

En esta fase se realiza el procesamiento de los datos de resistividad obtenidos en la fase 1 para cada línea trabaja con el software Res3DMod, en la cual los datos de resistividad nos dan los rangos a la cual el modelo 3-D se va a formar para su respectiva inversión en el software Res3DInv. Este es un programa de modelado de IP y resistividad 3-D basado en Windows Este programa calcula los valores de resistividad aparente para un levantamiento realizado con una cuadrícula rectangular de electrodos (Figura 18) utilizando el método de diferencias finitas (Dey y Morrison, como se citó Loke, 2014) o el método de elementos finitos (Silvester y Ferrari, como se citó Loke, 2014, p.5).

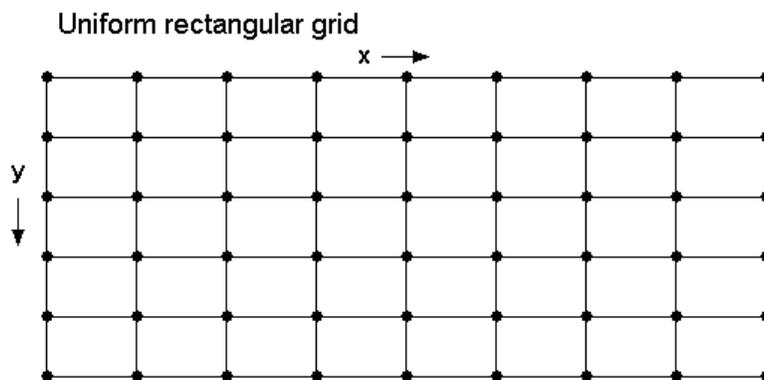


Figura 18. La disposición de los electrodos en un estudio de imágenes de resistividad 3D.

Fuente: Res3dmodx64 ver. 3,04 (Loke, 2014, p.5).

Paso 1. Para usar este programa, debe proporcionar el valor de resistividad de cada celda en la malla 3-D usando un archivo de texto de entrada que se muestra en la tabla 7. La relación entre la ubicación de los electrodos y las celdas en la malla 3D se muestra en la Figura 19. El cual se emplea la línea 7 Zona Clausurada como demostración. El formato de datos para la entrada requerida se describe en la siguiente sección. Se debe tener en cuenta que hay 2 celdas entre los electrodos adyacentes y el grosor de cada capa aumenta con la profundidad. Las resistividades de las celdas en los lados y la parte inferior de la región central del modelo delimitado por la rejilla de electrodos se extienden automáticamente a los lados y la parte inferior de la malla de diferencias finitas utilizada.

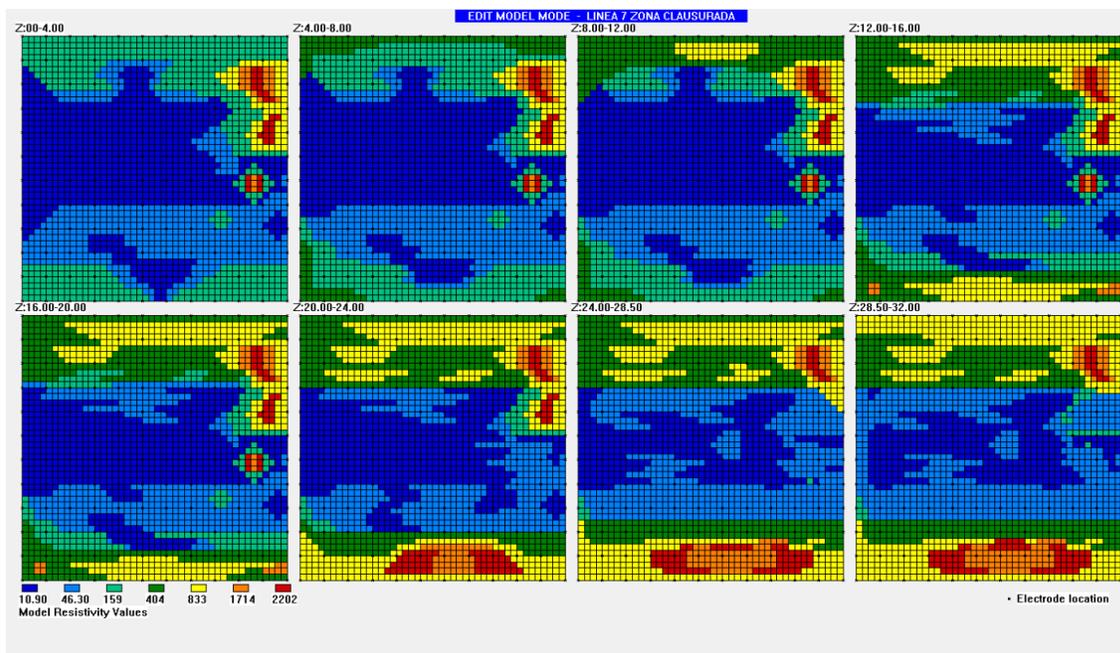


Figura 19. Modelo 3-D LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos. Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 7. El modelo tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la Malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones x y y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	4.0x4.0
Número de valores de resistividad del modelo	7
Valores de resistividad del modelo Número de capas en Ωm	10.9, 46.3, 158.59, 404.2, 832.5, 1714.4, 2202.0
Numero de layers en el modelo	8
Profundidad de sonde establecido	32 mtr

Fuente: Autor

Paso 2. Se realiza la inversión. el software Res3DMod como archivo de entrada trabaja con una malla 3-D con resistividades asignadas en la tabla 7 resistividades, el modelo se corre en la

matriz polo-polo que es la que nos muestra los valores de resistividad aparente, esto genera un modelo en X, Y, y Z. De manera iterativa el programa se va ajustando los valores de resistividad de cada bloque hasta conseguir un error mínimo o alcanzar un nivel máximo de iteraciones que por defecto es 4 con esta última dándome valores menores 3% de error y lograr una pequeña diferencia entre errores para iteraciones sucesivas.

En la Figura 20 se muestra el resultado del procesamiento de la Línea 7 Zona Clausurada polo-polo dirección-X y en la Figura 21 dirección-Y, con la versión libre del Res3DMod, con la cual se consiguió un error menor del 3% en el límite de 4 iteraciones, en ella se muestra en la gráfica superior la pseudo sección de resistividades aparentes, en la del medio la pseudo sección de resistividades calculadas y en la inferior la sección de resistividad del modelo inverso.

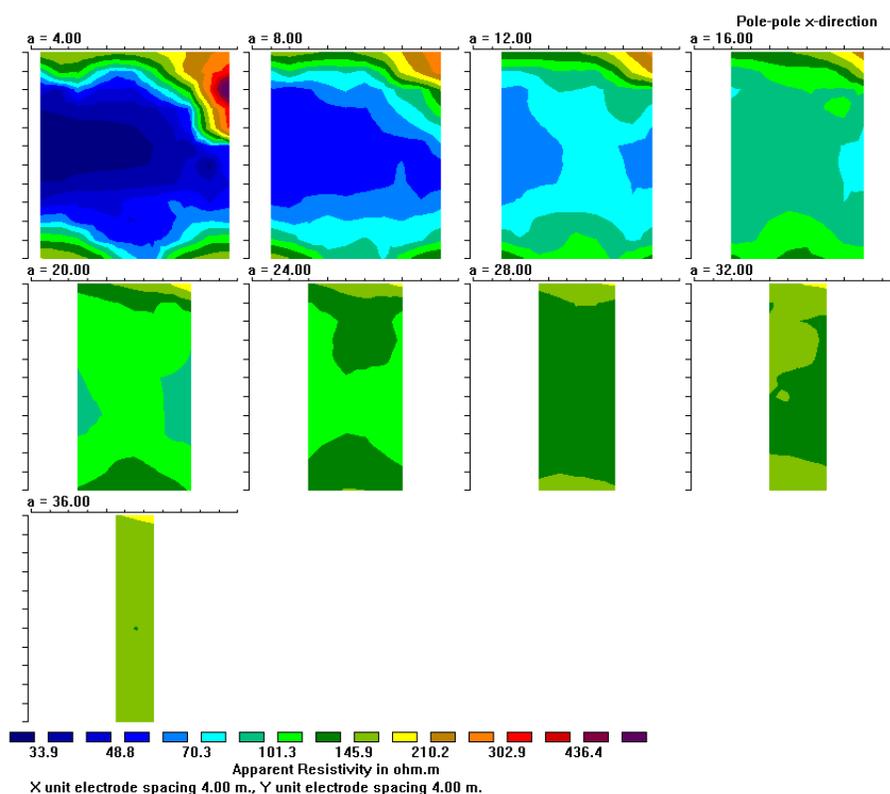


Figura 20. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.

Fuente: Autor. Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

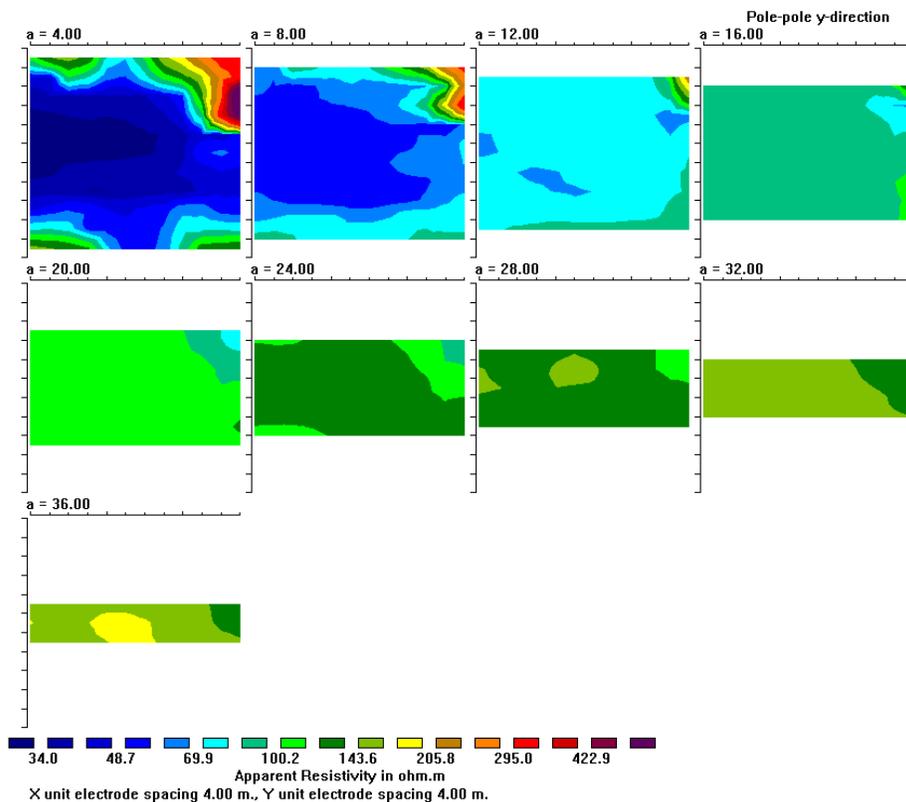


Figura 21. Resistividad Aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.

Fuente: Autor. Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Se guarda los resultados en formato Res3DInv para pasar a la fase 3 el cual se invierte los datos para generar el modelo 3-D.

3.3 Tercera fase: Inversión de datos a través del software Res3DInv

En esta fase se realiza la inversión de los datos de resistividad obtenidos en la fase 2 para cada línea trabaja con el software Res3DInv. La rutina de inversión utilizada por el programa se basa en los mínimos cuadrados restringidos por suavidad método (Loke como se citó en Aarhus GeoSoftware, 2020, p.4). Una ventaja de este método es que el factor de amortiguación

y los filtros de rugosidad se pueden ajustar para adaptarse diferentes tipos de datos. Este programa utiliza el método de Gauss-Newton que recalcula el jacobiano matriz de derivadas parciales después de cada iteración (Loke y Dahlin 2002, Aarhus GeoSoftware, 2020, p.4).

El programa de inversión divide el subsuelo en varios prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas para minimizar la diferencia entre los valores calculados y valores de resistividad aparente observados, sujetos a restricciones seleccionadas (Aarhus GeoSoftware, 2020).

Una medida de esta diferencia viene dada por la raíz del error cuadrático medio (RMS). Sin embargo, el modelo con el error RMS más bajo posible a veces puede mostrar valores grandes y poco realistas. En general, el enfoque más prudente es elegir el modelo en la iteración después de la cual el error RMS no cambia significativamente. Esto suele ocurrir entre la cuarta y la quinta iteración. Esto se puede apreciar en la Figura 4 y 12 (Aarhus GeoSoftware, 2020).

Paso 1. Para usar este programa, debe proporcionar una descripción del formato de datos utilizando el archivo de datos Línea 7 Zona Clausurada.dat, es archivo guarda los valores de resistividad aparente, esto genera un modelo en X, Y, y Z el valor de resistividad de cada celda en la malla 3-D y lee los datos de entrada que se muestra en la tabla 7 solo que estos ya cuentan con los valores de resistividad aparente. La relación entre la ubicación de los electrodos y las celdas en la malla 3D se muestra en la Figura 22. El cual se emplea la línea 7 Zona Clausurada ya invertida y en los tres ejes. Téngase en cuenta que el programa se encuentra predeterminado en el proceso de inversión y que este solo se debe modificar si la malla 3-D es irregular y para el cambio de % error mínimo un 10% RMS que es el indicado pues la dispersión de puntos encuentra dentro de la línea.

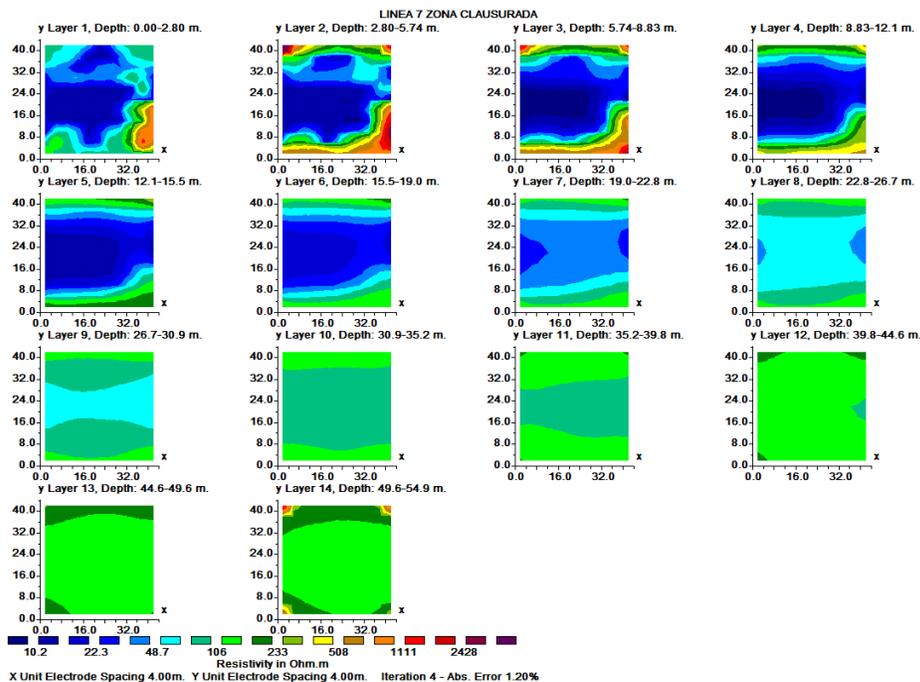


Figura 22. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Secciones transversales horizontales SLICE-XZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

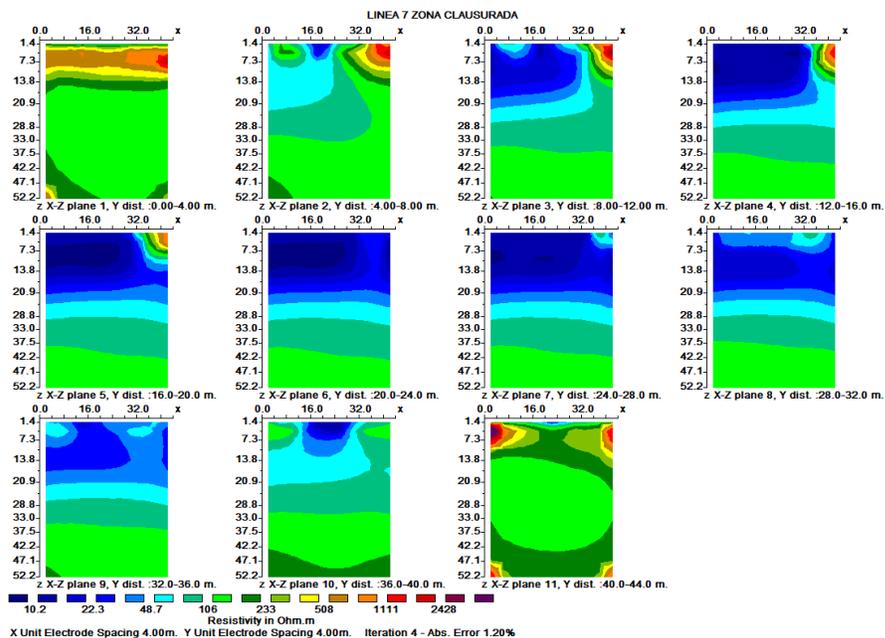


Figura 23. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE

XZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

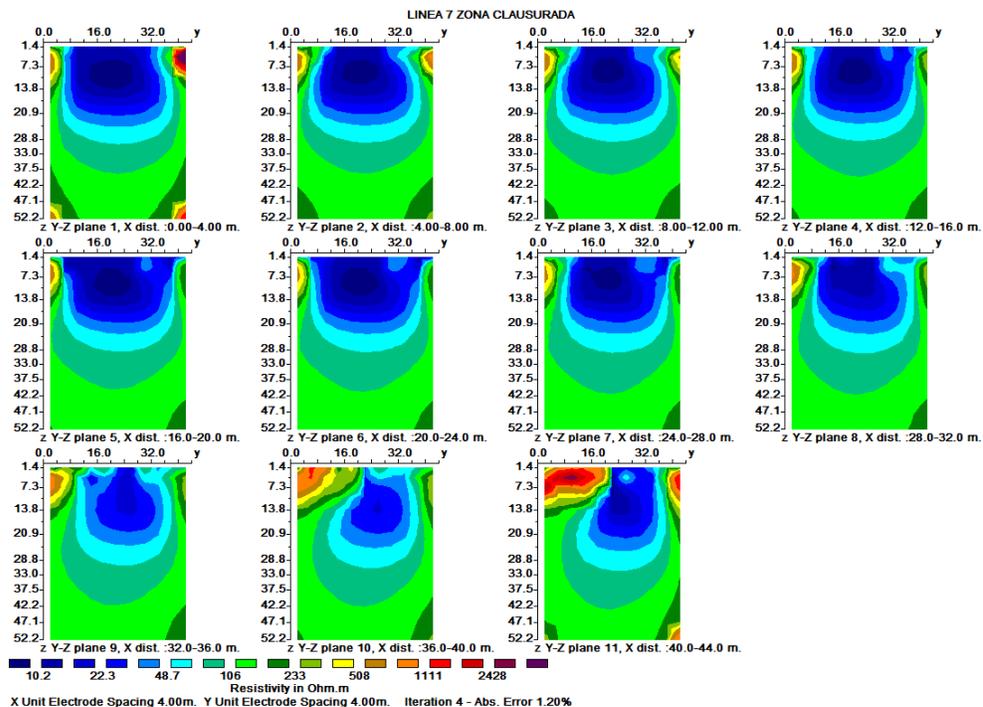


Figura 24. Línea 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE

YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

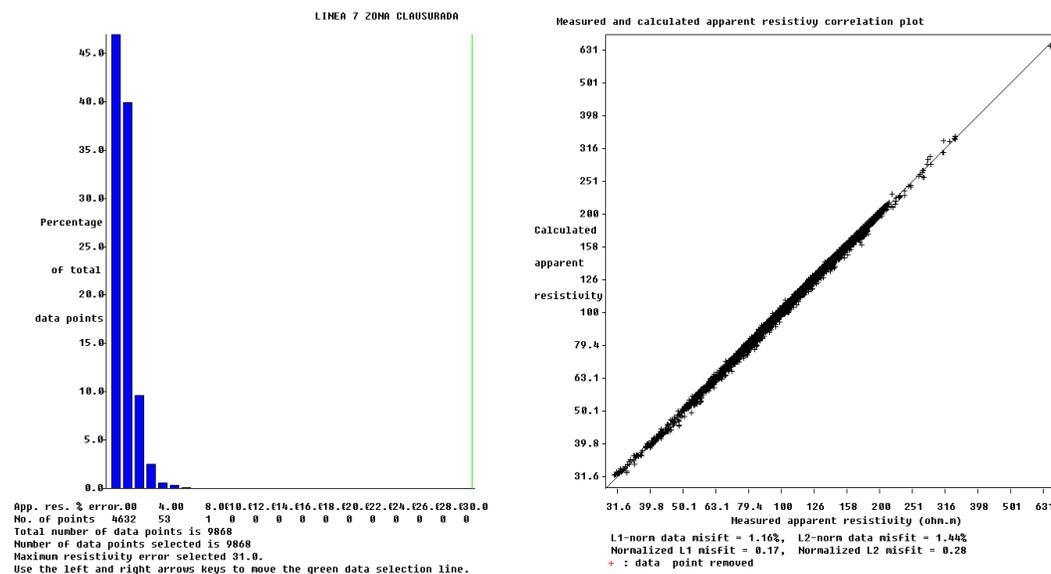


Figura 25. RMS. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

3.4 Cuarta fase: Modelado en 3-D a través del software ParaView

En esta fase solo se recogen los resultados obtenidos en el Res3DInv el cual se puede en el mismo programa modelar, pero por cuestiones de licencia este se puede exportar a ParaView en archivo Línea 7 Zona Clausurada.vtk (vtk) el cual genera el modelo 3-D invertido en los ejes X, Y y Z cumpliendo con el objetivo general.

En esta fase solo se renderiza el bloque 3-D y se muestran resultados como en la Figura 26.

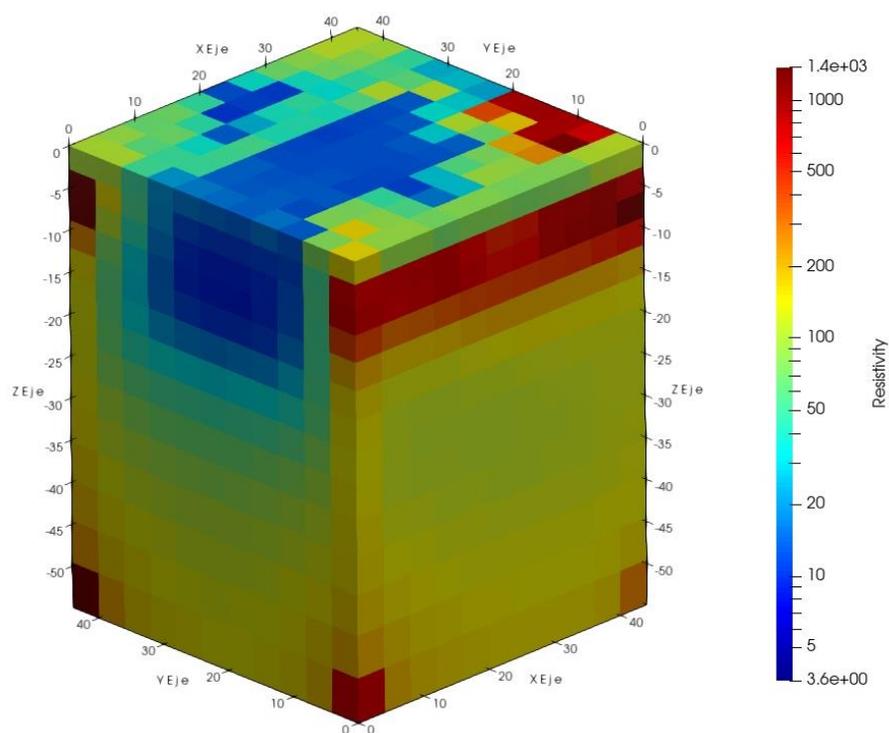


Figura 26. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el Software ParaView.

Capítulo 4

4. Resultados

4.1 Procesamiento de datos a través del software Res2DInv

En esta sección, se tomará en cuenta las propiedades geofísicas, asumiendo, que en cada uno de los elementos y materiales presentes en el relleno son homogéneas. La interpretación de los resultados en cada línea será una aproximación, para este análisis se presentan a continuación el modelo con topografía de cada una de las líneas.

Línea 1. En esta línea se observan varios horizontes, entre ellos uno de resistividades entre 250 a 2600 Ohm.m constituido posiblemente por la presencia de arenas eólicas, el segundo horizonte representaría posibles bolsas de basura con resistividades entre 20 a 200 Ohm.m y un tercer horizonte que estaría clasificado como lixiviados con resistividades entre 6 a 15 Ohm.m con alturas entre 3 a 35 m, además posee una pendiente con un porcentaje considerable que facilita el escurrimiento de los líquidos que se filtran provenientes de las basuras.

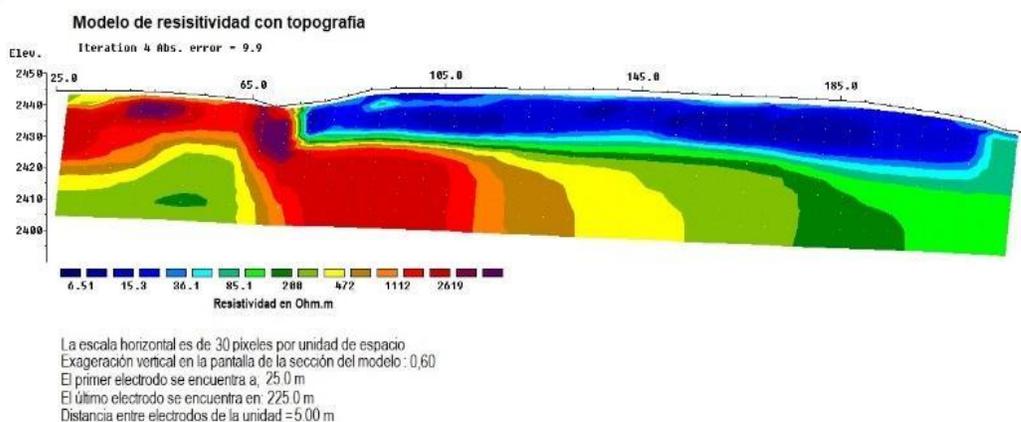


Figura 27. Línea 1 ZONA ACTIVA inversión modelo con topografía. Fuente: Autor.

Línea 2. En la línea 2 podemos observar un horizonte geo-eléctrico perteneciente al suelo natural con alta presencia de limos y un rango resistivo de 20 a 100 Ohm.m. A una profundidad de aproximadamente 15 metros se observa la presencia de unas bolsas de posibles lixiviados con resistividades entre 1 a 10 Ohm.m y bolsas de basuras esparcidas sobre toda la línea con resistividades entre 20 y 100 Ohm.m.

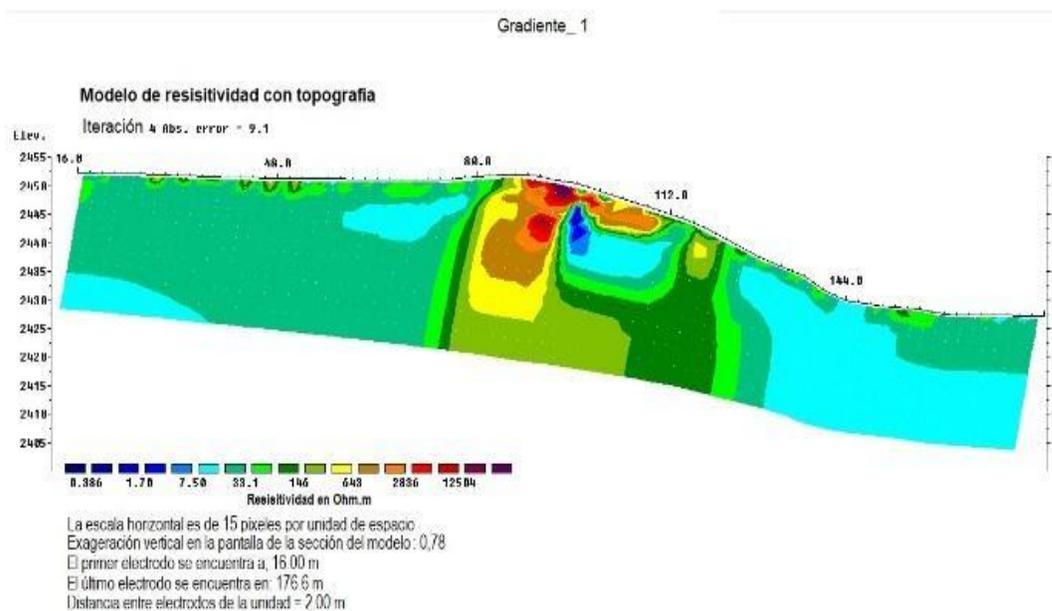


Figura 28. Línea 2 ZONA ACTIVA inversión modelo con topografía. Fuente: Autor.

Línea 4. Para esta línea las resistividades correspondientes a los posibles focos de lixiviados están entre 9 y 20 Ohm.m con alturas desde 1 a 30 metros, alrededor de ellas se observan extensiones de basuras con resistividades entre 40 y 100 Ohm.m.

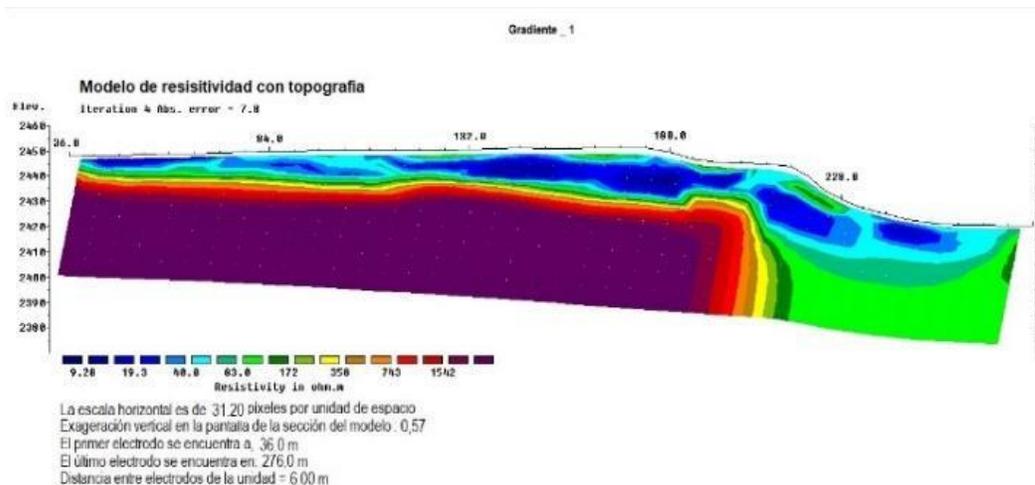


Figura 29. Línea 4 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía. Fuente: Autor.

Línea 5. El horizonte geo-eléctrico que identifica en esta línea las franja de lixiviados está aparentemente muy reducida, se observan a una profundidad de aproximadamente 15 m con rangos de resistividad entre 4 a 20 Ohm.m. Las basuras o lixiviados en formación se observan alrededor con resistividades entre 20 y 50 Ohm.m.

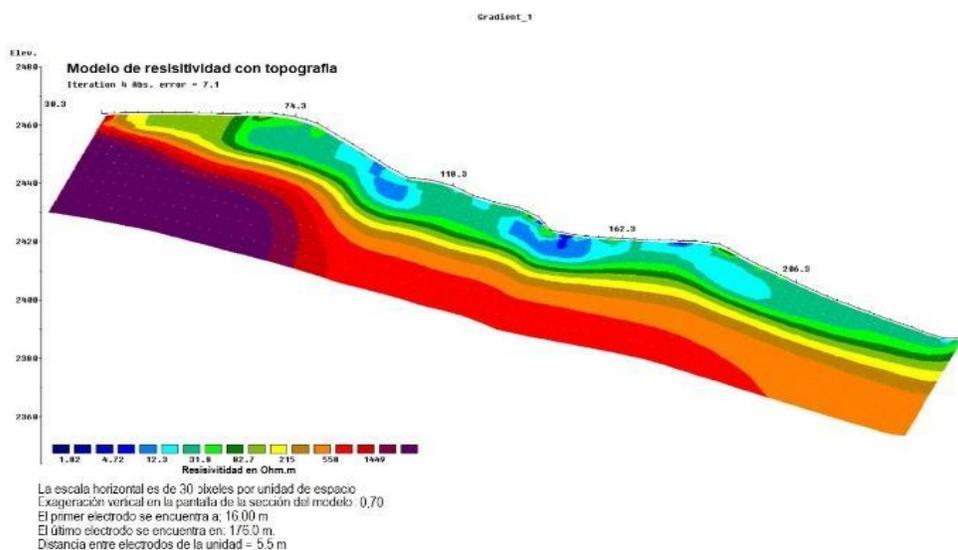


Figura 30. Línea 5 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía. Fuente: Autor.

Línea 7. Esta línea aparentemente representa la zona de mayor concentración de lixiviados los cuales se encuentran ubicados en la parte central de la celda, con alturas desde 10 a 40 m, su rango de resistividad está entre 10 y 20 Ohm.m y de 30 a 90 Ohm.m para los depósitos de basuras.

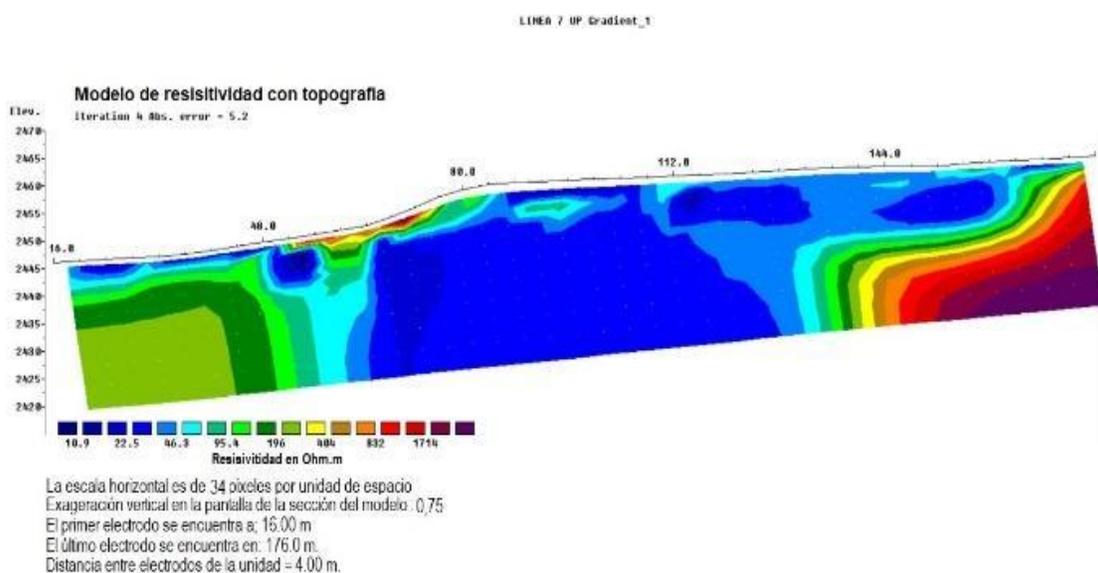


Figura 31. Línea 7 ZONA CLAUSURADA inversión modelo con topografía. Fuente: Autor basado en el Software Res2DInv.

4.2 Procesamiento de datos a través del software Res3DMod

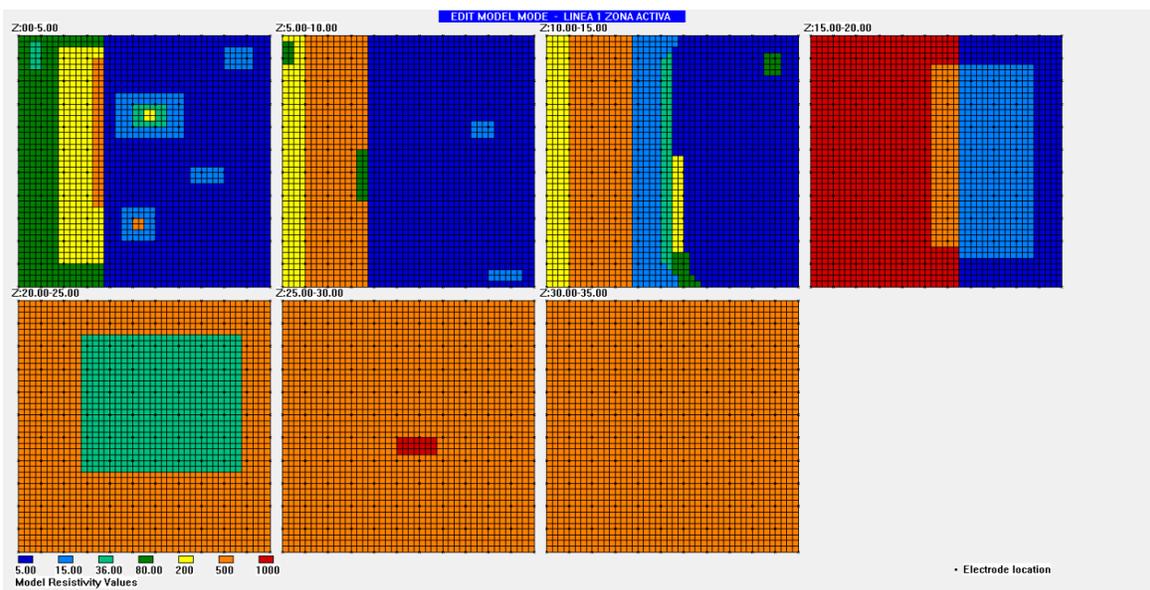


Figura 32. Modelo 3-D LÍNEA 1 ZONA ACTIVA que muestra la ubicación de los electrodos.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 8. El modelo Línea 1 ZONA ACTIVA tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones x y y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	5.0x5.0
Número de valores de resistividad del modelo	7
valores de resistividad del modelo Número de capas en Ωm	5.00, 15.0, 36.0, 80.0, 200.0, 500.0, 1000.0
Numero de layers en el modelo	7
Profundidad de sonde establecido	35 mtr

Fuente: Autor.

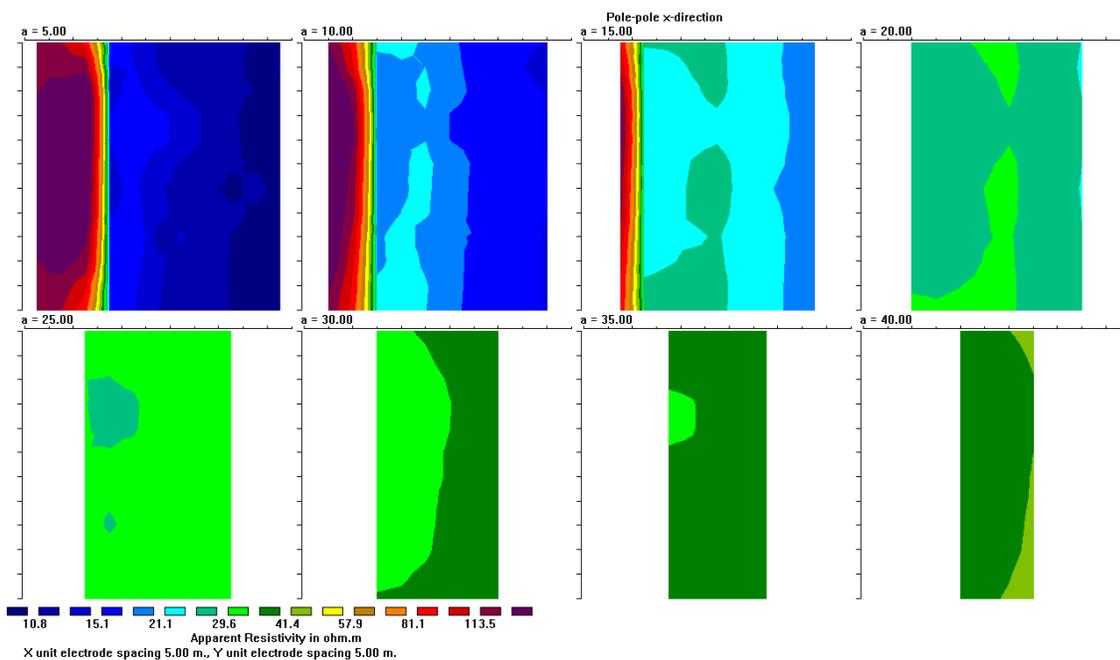


Figura 33. Resistividad aparente LÍNEA 1 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-X. Autor basado en el Software Res3DMod.

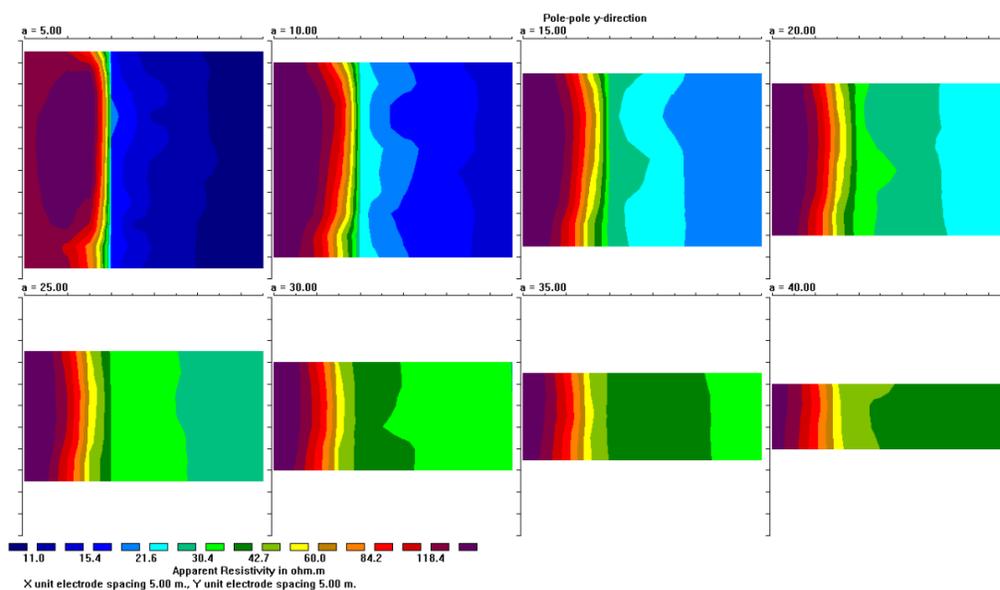


Figura 34. Resistividad aparente LÍNEA 1 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-Y.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

De los datos procesados en la línea 1 Zona Activa el Software Res3DMod, en la cual los datos hay presencia de materiales con resistividades específicamente lixiviados de 10 Ωm , 15 Ωm , 21.1 Ωm , a profundidades de 20 metros, valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajustará para su respectiva inversión, cabe destacar que a profundidades de 5 metros se encontraron resistividades mayores a los 40 Ωm y 100 Ωm respectivamente.

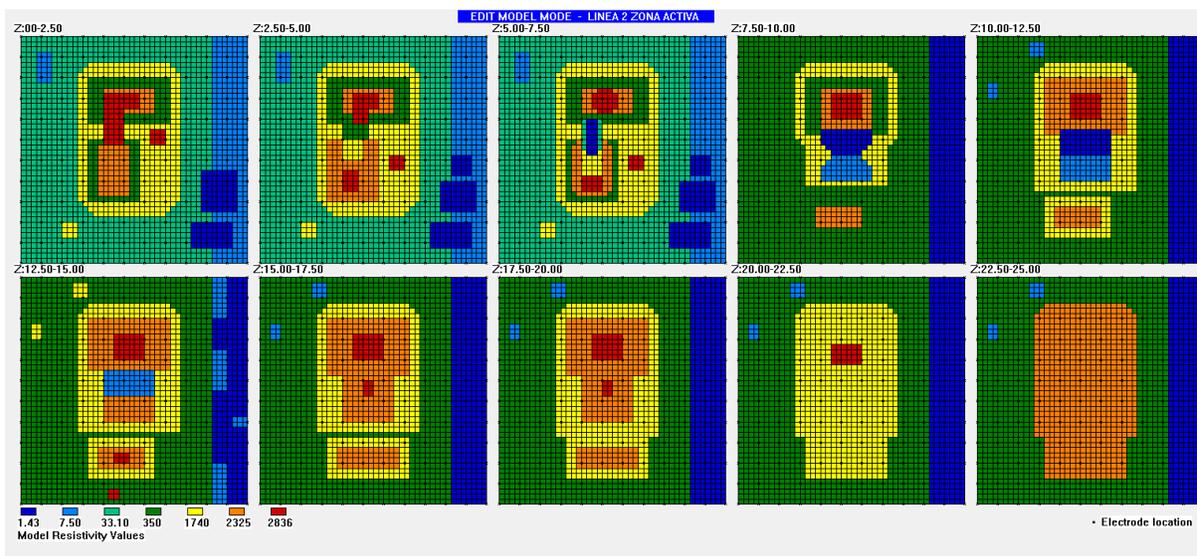


Figura 35. Modelo 3-D LÍNEA 2 ZONA ACTIVA que muestra la ubicación de los electrodos.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 9. El modelo LÍNEA 2 ZONA ACTIVA tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones X y Y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	2.5 x 2.5
Número de valores de resistividad del modelo	7
valores de resistividad del modelo Número de capas en Ωm	1.430, 7.500, 33.1, 349.5, 1739.5, 2325.2, 2836.2
Numero de layers en el modelo	10
Profundidad de sonde establecido	25 mtr

Fuente: Autor.

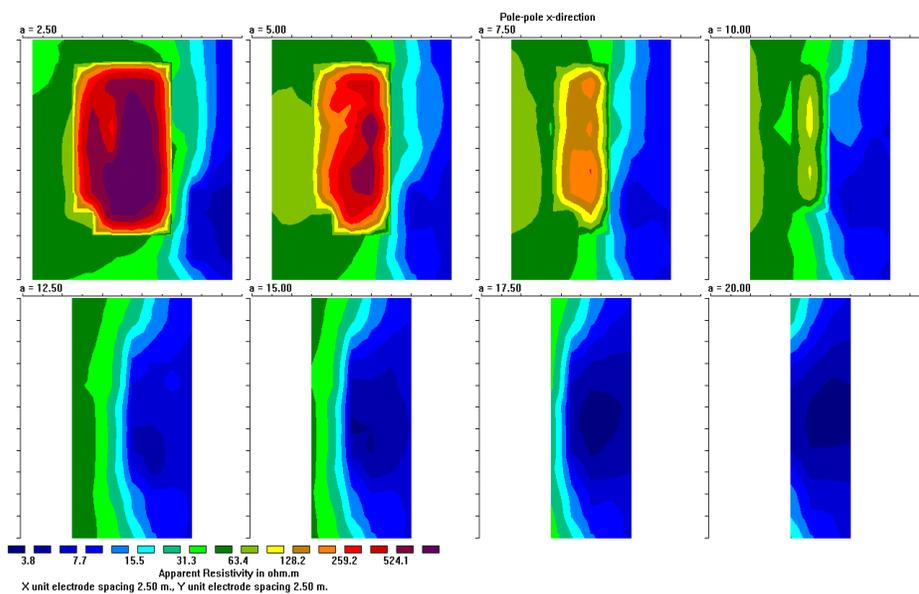


Figura 36. Resistividad aparente LÍNEA 2 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-X. Fuente:

Autor basado en el Software Res3DMod.

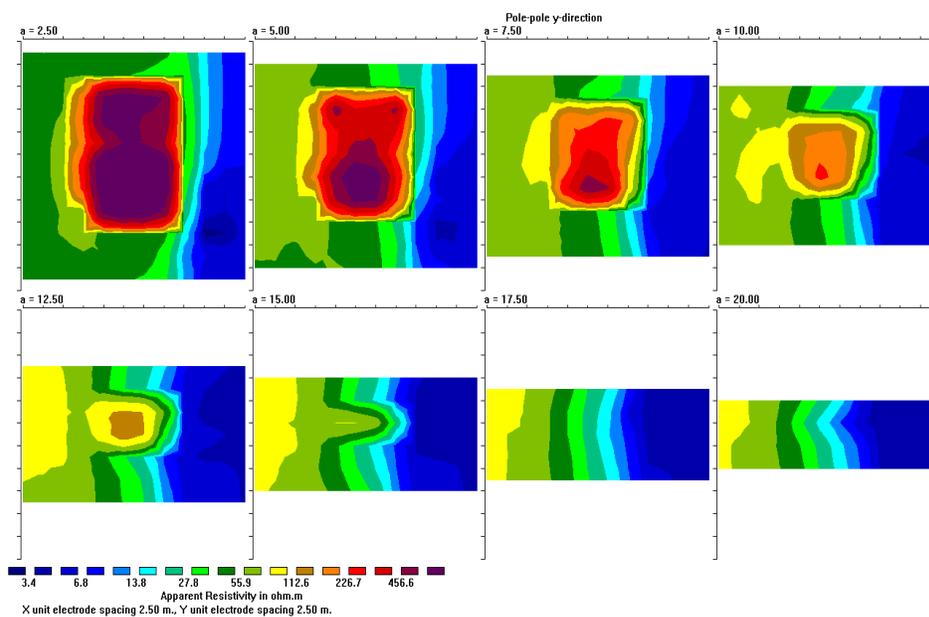


Figura 37. Resistividad aparente LÍNEA 2 ZONA ACTIVA polo-polo dirección-Y. Fuente:

Autor basado en el Software Res3DMod.

De los datos procesados en la línea 2 Zona Activa el software Res3DMod, en la cual los datos hay presencia de materiales con resistividades específicamente lixiviados de $3.8 \Omega\text{m}$, $7.7 \Omega\text{m}$, $15.5 \Omega\text{m}$, $31.5 \Omega\text{m}$ a profundidades de 25 metros, valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv, se observa la presencia de unas bolsas de posibles lixiviados con resistividades entre $3.5 \Omega\text{m}$ a $20 \Omega\text{m}$ la cual el modelo 3-D se ajustará para su respectiva inversión, cabe destacar que a profundidades de 2.5 metros se encontraron resistividades mayores a los $400 \Omega\text{m}$ y $1000 \Omega\text{m}$ respectivamente debido a lo composición del terreno irregular.

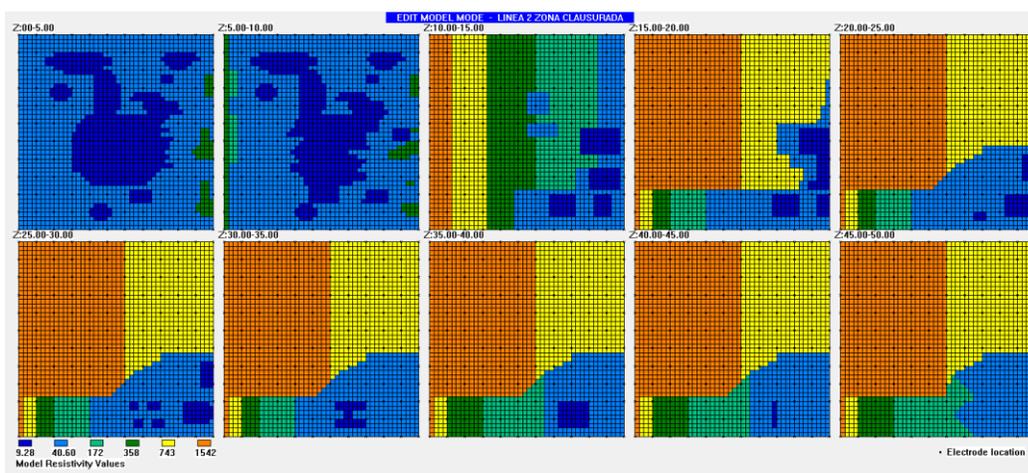


Figura 38. Modelo 3-D LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos. Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 10. El modelo LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12×12 , la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la Malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones x y y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	5.0 x 5.0
Número de valores de resistividad del modelo	6
Vr de resistividad del modelo Núm. de capas en Ωm	9.28, 40.6, 172.0, 358.0, 743.0, 1542.0
Número de layers en el modelo	10
Profundidad de sonde establecido	50 mtr

Fuente: Autor.

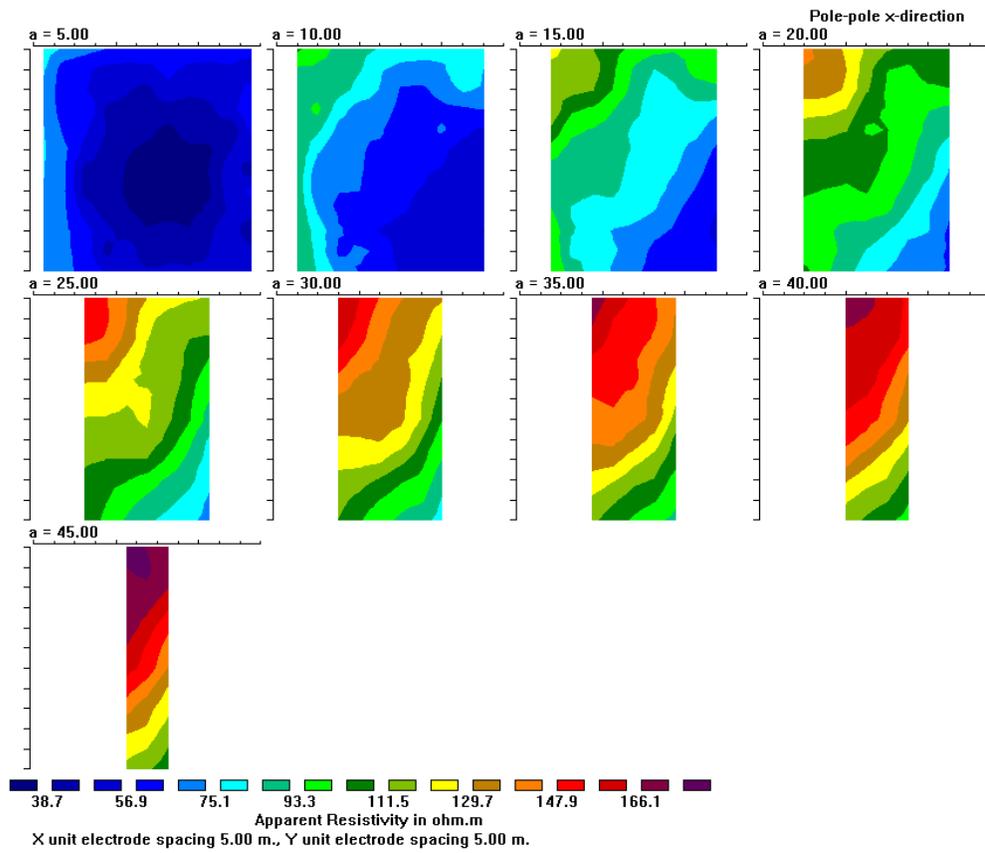


Figura 39. Resistividad aparente LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

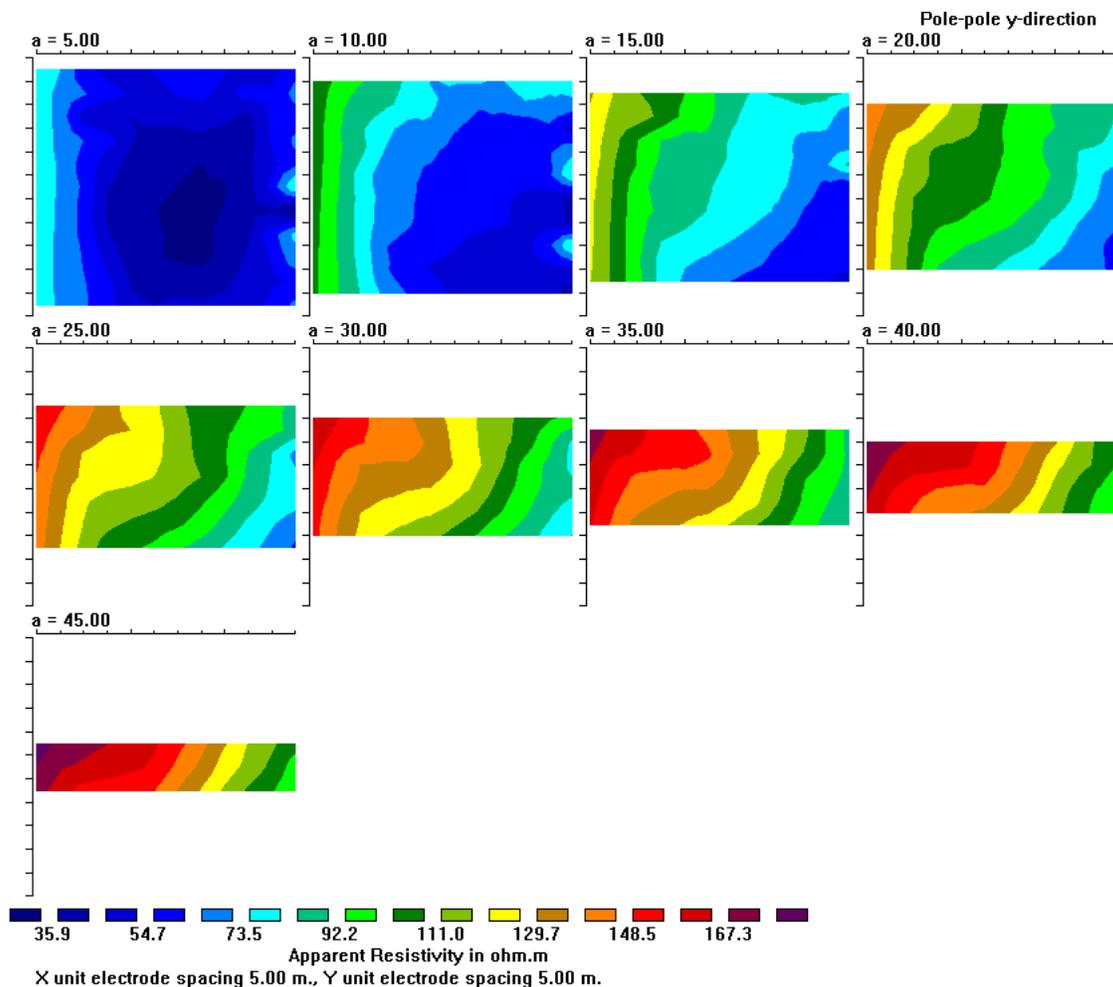


Figura 40. Resistividad aparente LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

De los datos procesados en la línea 4 Zona Clausurada el software Res3DMod, en la cual los datos hay presencia de materiales con resistividades específicamente lixiviados de $9.28 \Omega\text{m}$, $35.9 \Omega\text{m}$, $54.7 \Omega\text{m}$, a profundidades de 40 metros no uniformes en otra se encontraron los mismos valores de lixiviados de 10 a 20 metros, valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajustará para su respectiva inversión, cabe destacar que a profundidades de 15 metros se encontraron resistividades mayores a los $129.7 \Omega\text{m}$ y $200 \Omega\text{m}$ respectivamente.

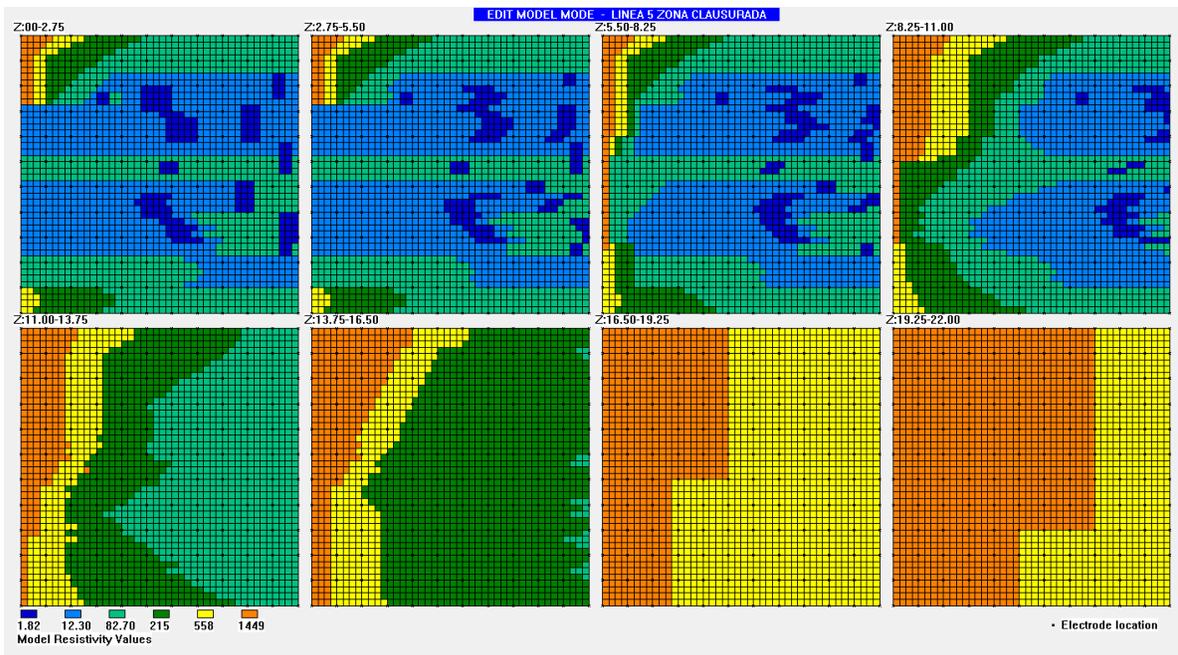


Figura 41. Modelo 3-D LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 11. El modelo LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones X y Y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	2.75 x 2.75
Número de valores de resistividad del modelo	6
Valores de resistividad del modelo Número de capas en Ωm	1.82, 12.30, 82.7, 215.0, 558.0, 1449.0
Numero de layers en el modelo	8
Profundidad de sonde establecido	22 mtr

Fuente: Autor.

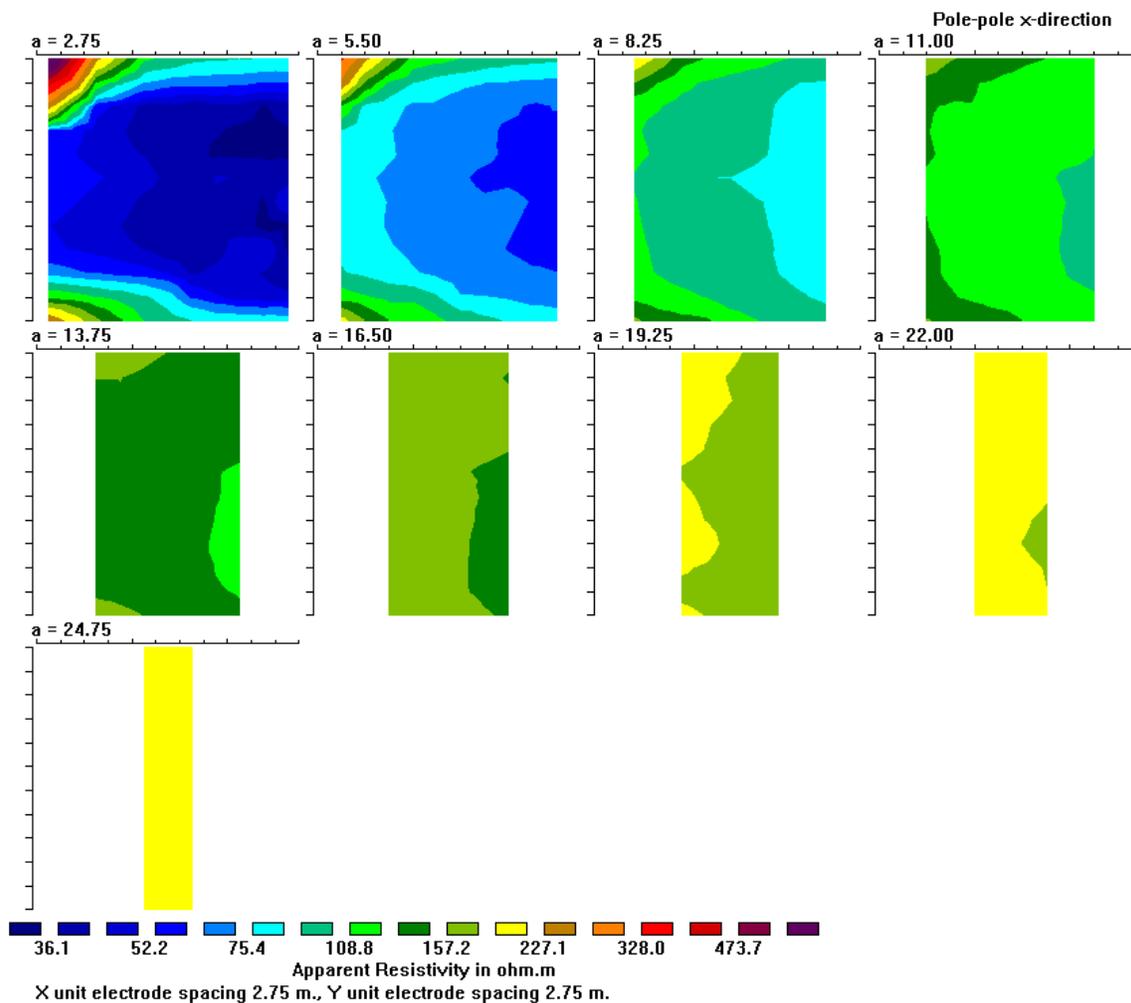


Figura 42. Resistividad aparente LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

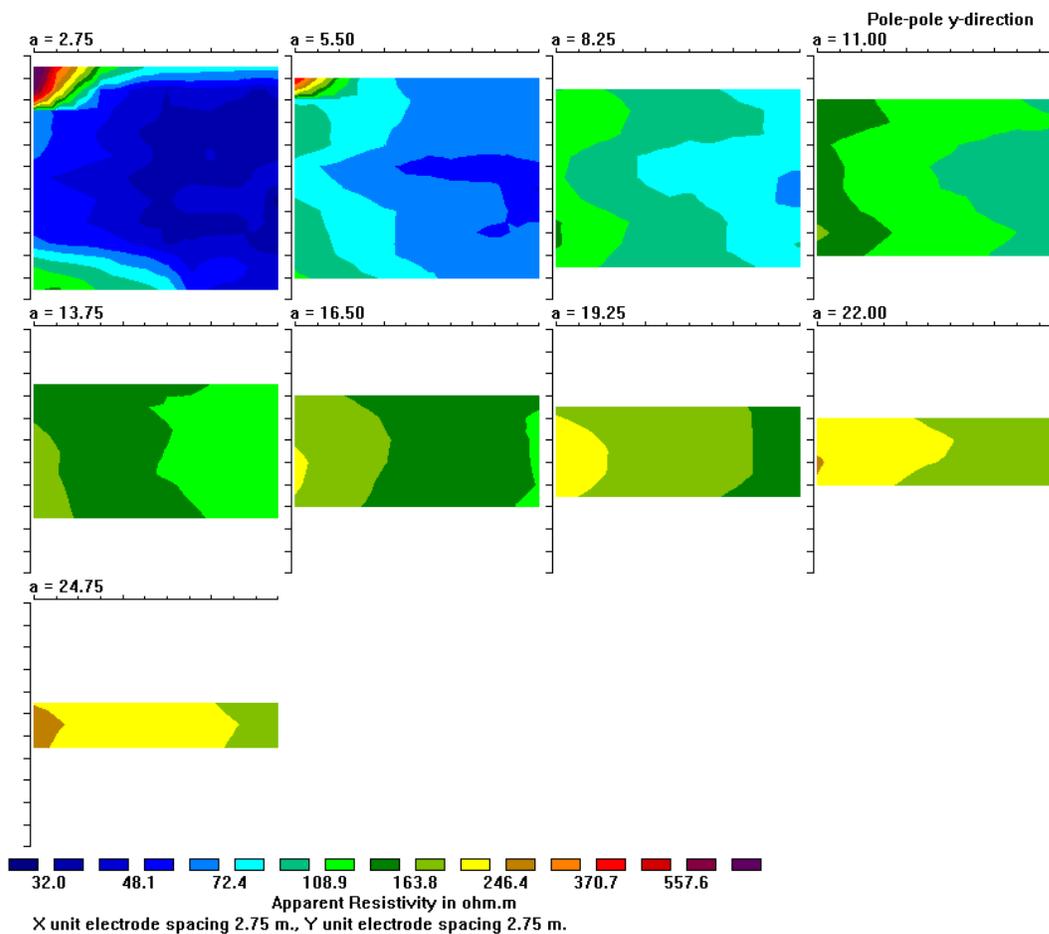


Figura 43. Resistividad aparente LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

De los datos procesados en la línea 5 Zona Clausurada el software Res3DMod, en la cual los datos hay presencia de materiales con resistividades específicamente lixiviados de $6.2 \Omega\text{m}$, $36.1 \Omega\text{m}$, $52.2 \Omega\text{m}$, $75.4 \Omega\text{m}$ a profundidades de 2.75 a 12 metros, valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajustará para su respectiva inversión, cabe destacar que a profundidades de 14 metros se encontraron resistividades mayores a los $246.4 \Omega\text{m}$ y $600 \Omega\text{m}$ respectivamente.

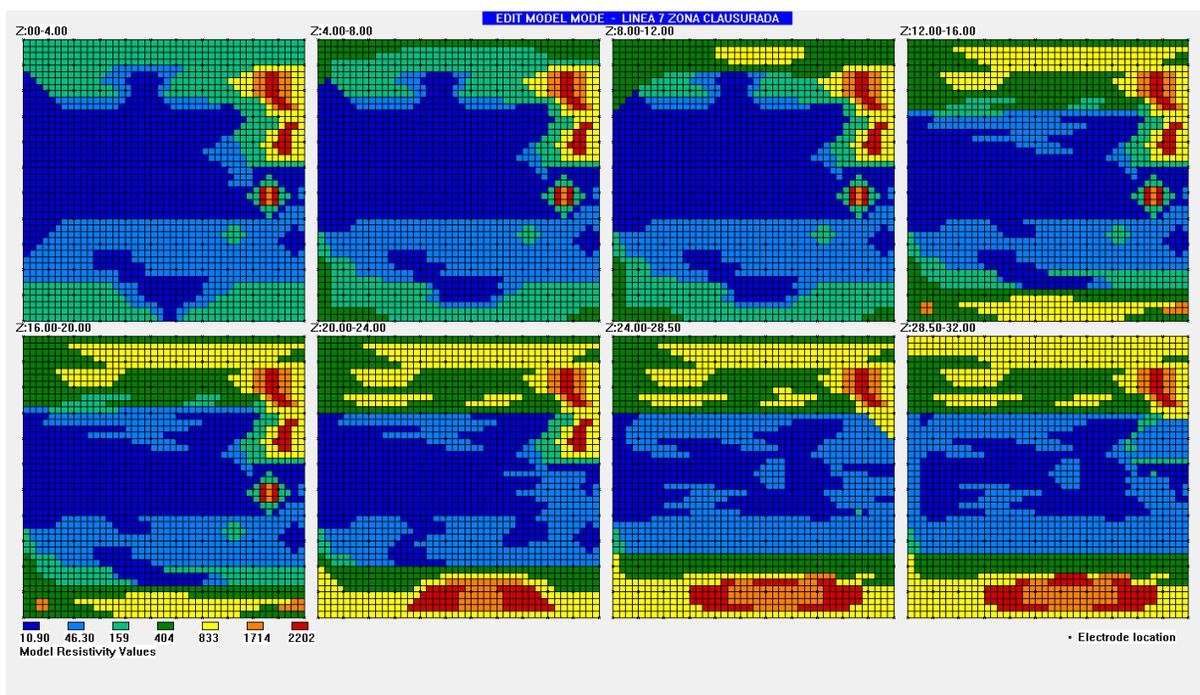


Figura 44. modelo 3-D LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA que muestra la ubicación de los electrodos. Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

Tabla 12. El modelo LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA tiene una cuadrícula de medición de electrodos de 12x12, la matriz polo-polo nos muestra los valores de resistividad aparente.

Tamaño de la malla 3-D	
Número de electrodos en las direcciones x y y, es decir, tamaño de la cuadrícula de la encuesta	12x12
Separación de electrodos en las direcciones x, y	4.0 x 4.0
Número de valores de resistividad del modelo	7
valores de resistividad del modelo Número de capas en Ωm	10.9, 46.3, 158.59, 404.2, 832.5, 1714.4, 2202.0
Numero de layers en el modelo	8
Profundidad de sonde establecido	32 mtr

Fuente: Autor.

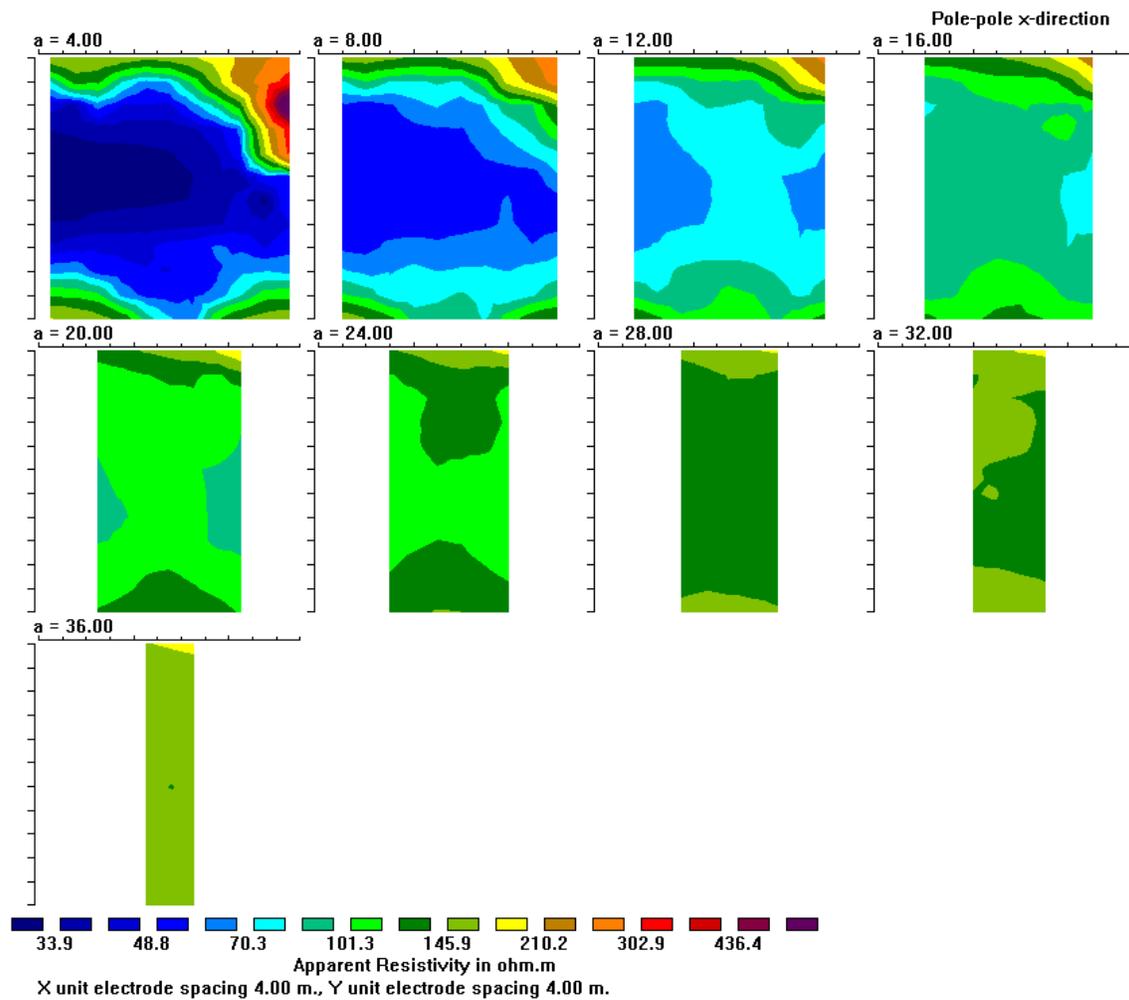


Figura 45. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-X.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

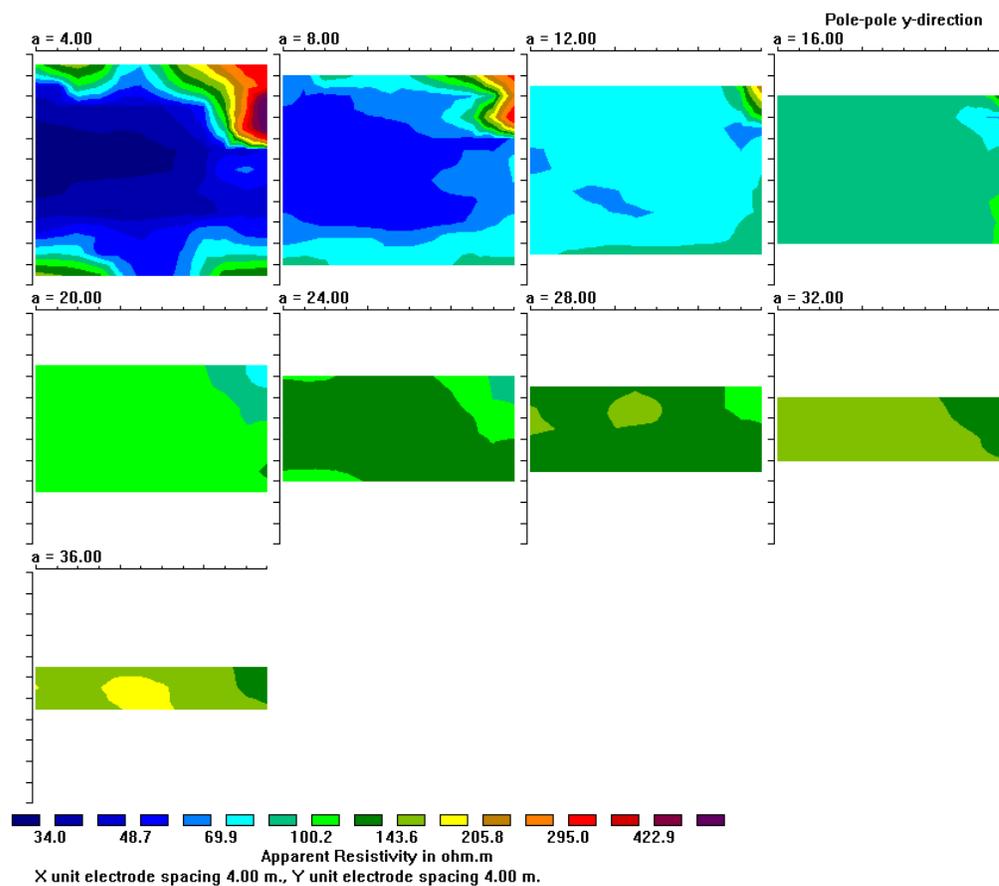


Figura 46. Resistividad aparente LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA polo-polo dirección-Y.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DMod.

De los datos procesados en la línea 7 Zona Clausurada el software Res3DMod, en la cual los datos hay presencia de materiales con resistividades específicamente lixiviados de $10.9 \Omega\text{m}$, $33.9 \Omega\text{m}$, $48.7 \Omega\text{m}$, $69.9 \Omega\text{m}$ a profundidades de 4.00 a 22.0 metros, valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajustará para su respectiva inversión, cabe destacar que a profundidades de 20 metros ese encontraron resistividades mayores a los $205.8 \Omega\text{m}$ y $422.9 \Omega\text{m}$ respectivamente.

4.3 Inversión de datos a través del software Res3DInv

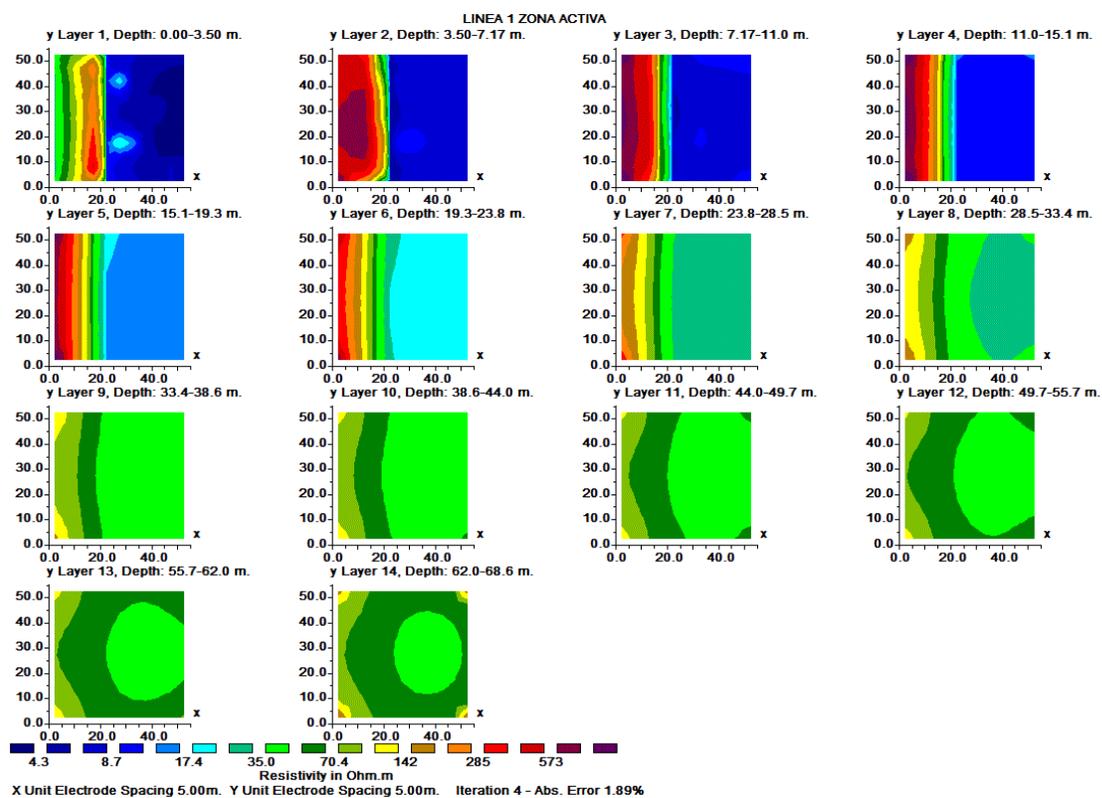


Figura 47. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

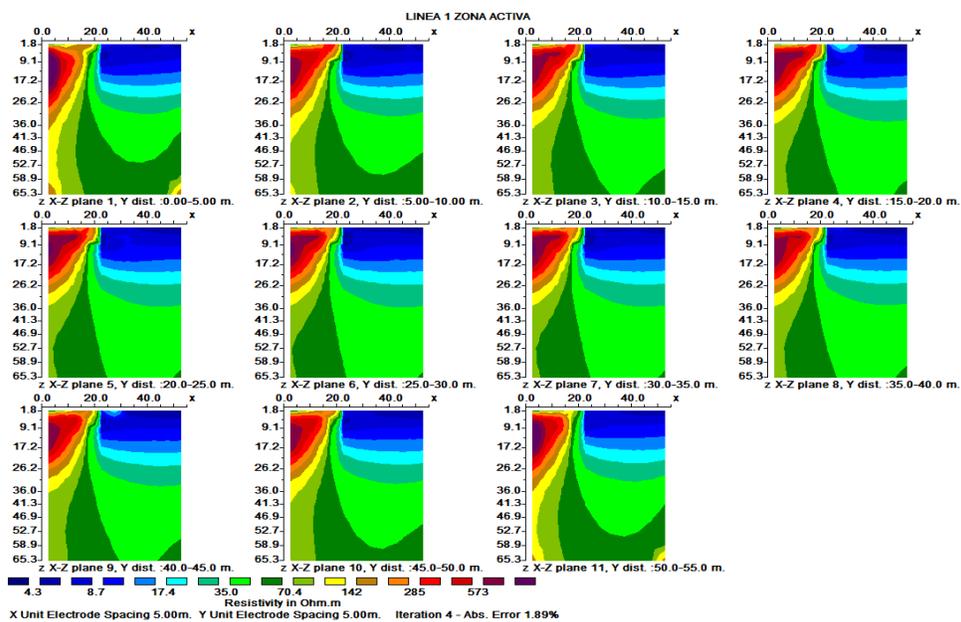


Figura 48. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE XZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

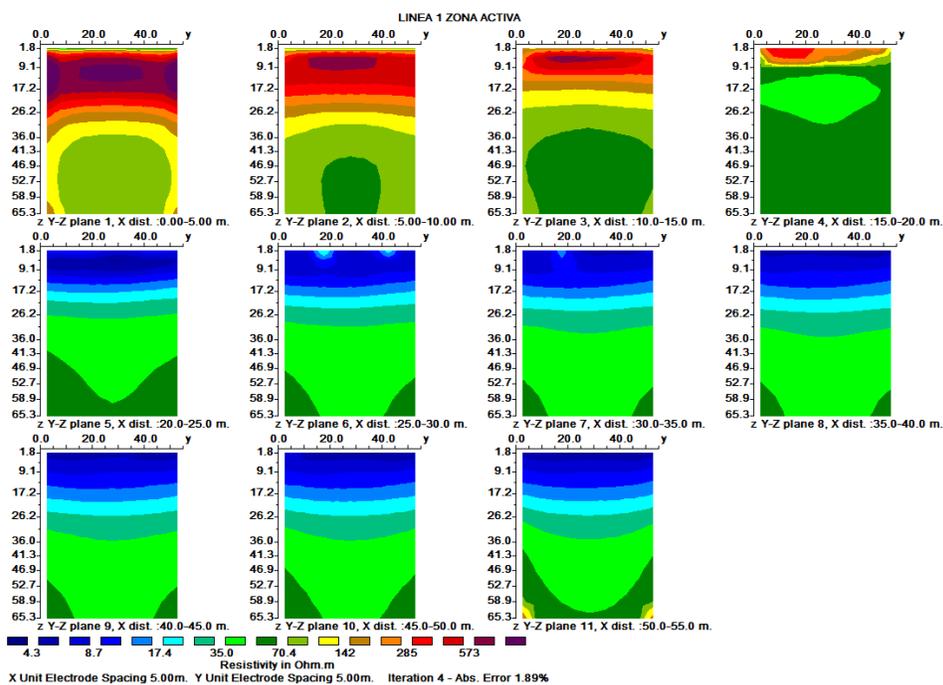


Figura 49. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

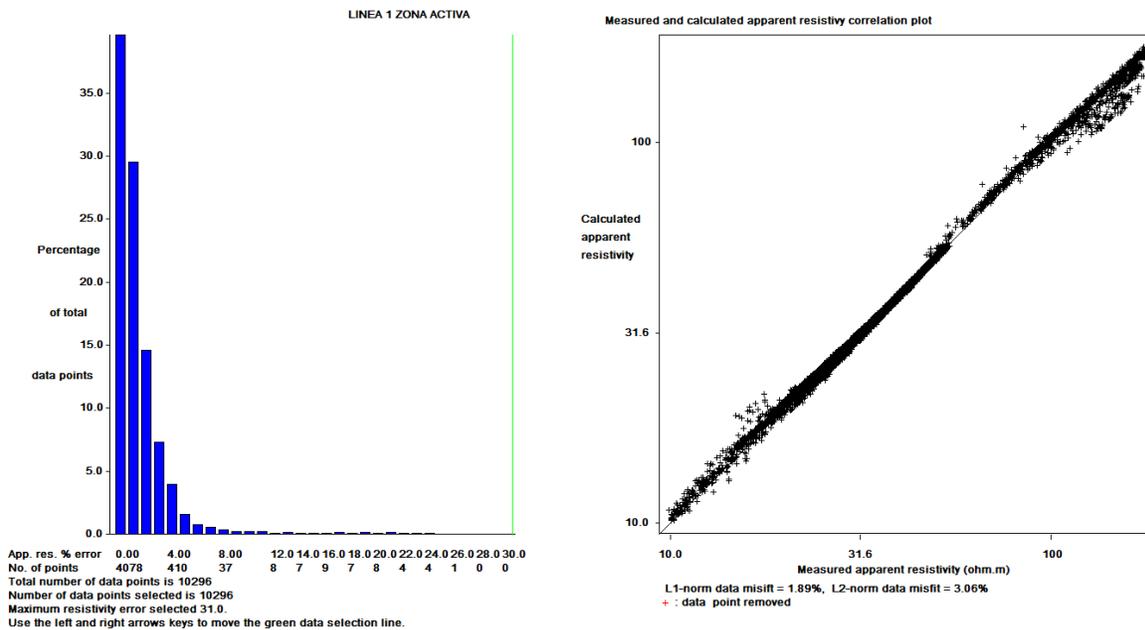


Figura 50. RMS LÍNEA 1 ZONA ACTIVA. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

Los datos de RMS nos sirven para verificar si el modelo está filtrado de errores estáticos o rudo que se puede presentar en campo, para que un modelo filtre adecuadamente y nos modele en los tres ejes X, Y y Z correctamente al diseño que se moldeó en el Res3DMod se debe organizar con la tabla de columnas a la izquierda para poder eliminar el ruido. Para que el programa cuando se alinea el modelo correcto será el que los puntos se encuentren más cerca de la línea presente al lado derecho. La línea 1 la Zona Activa nos muestra que el modelo concuerda con lo hecho en la Figura 27 con el Res2DInv.

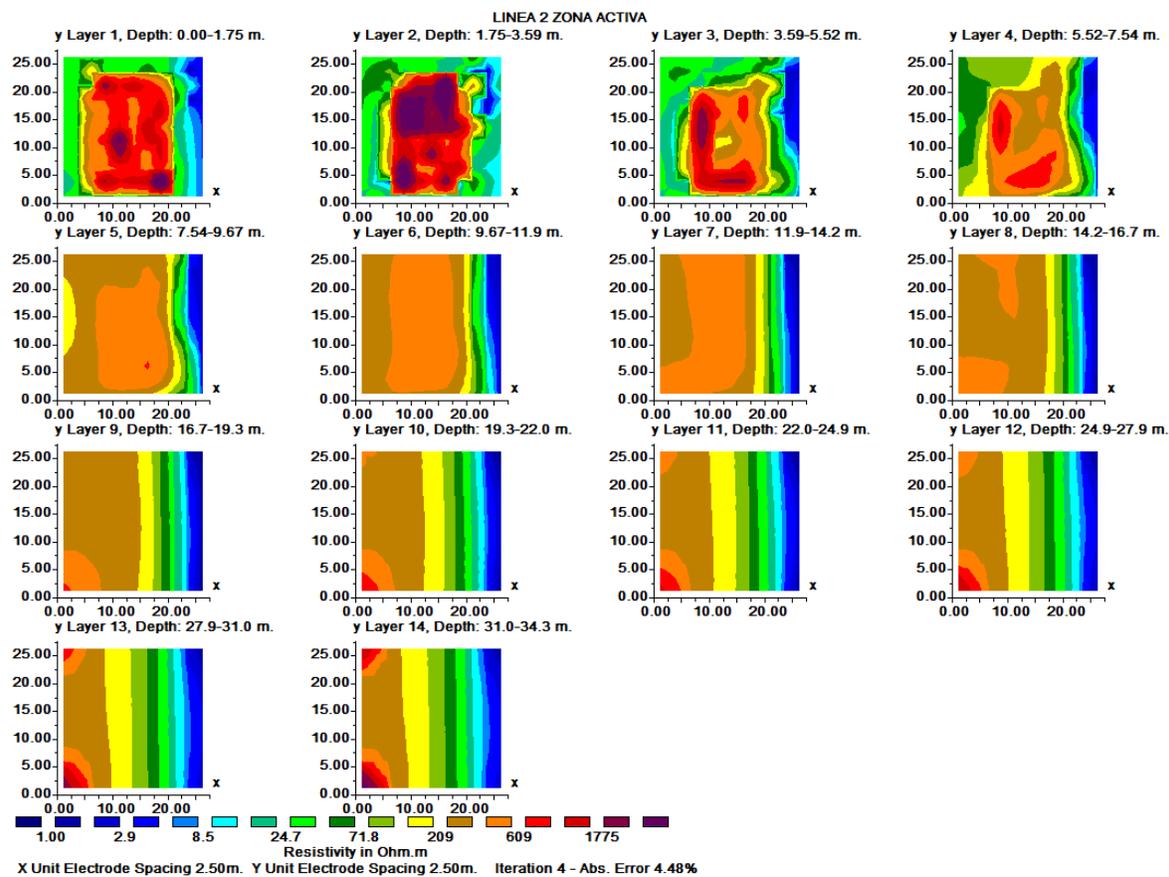


Figura 51. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA, secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

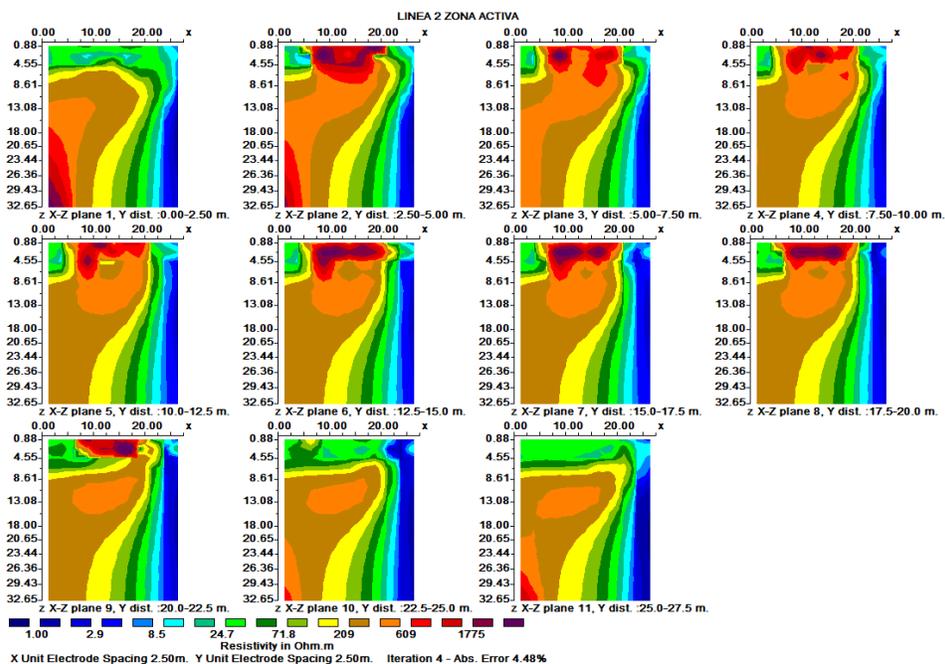


Figura 52. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE XZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

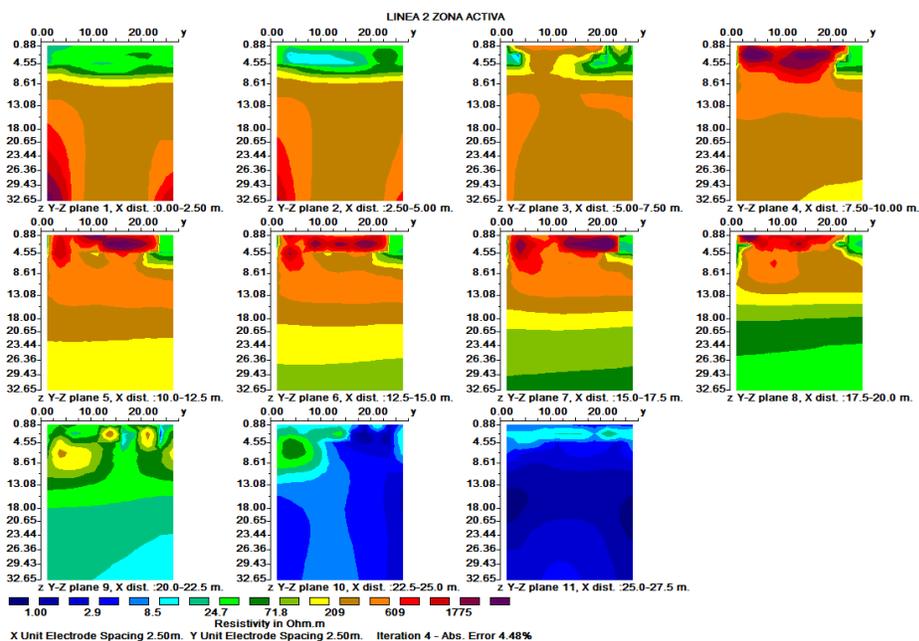


Figura 53. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ.

Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

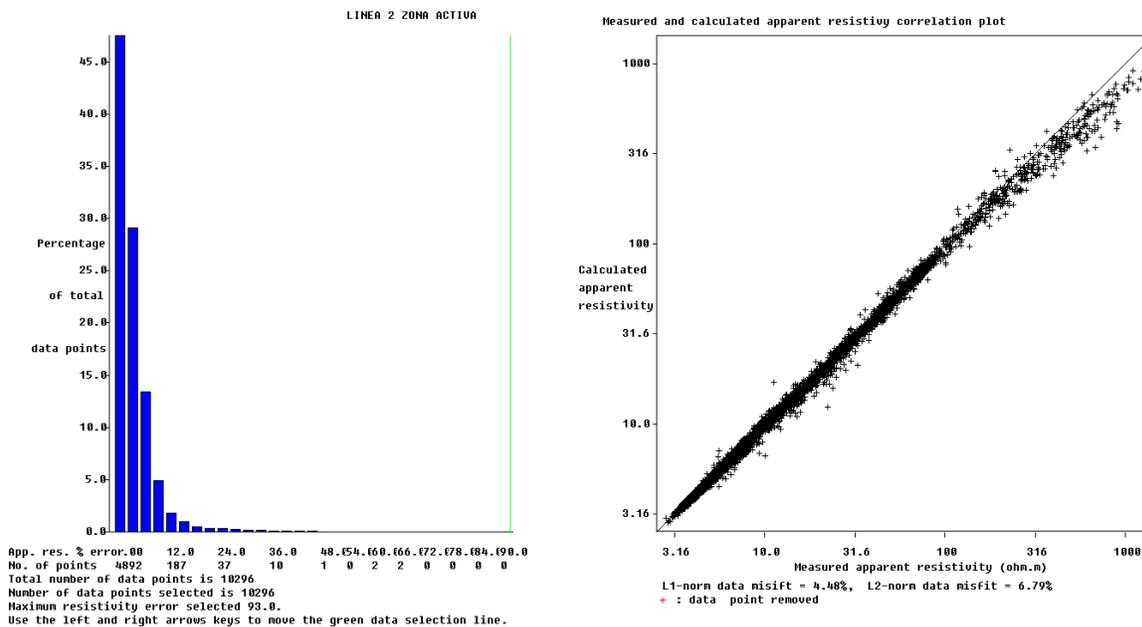


Figura 54. RMS LÍNEA 2 ZONA ACTIVA. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

La línea 2 Zona Activa presenta un mayor rudo que la línea 1 por su Zona Activa y su topografía puesto en los extremos del modelo se encuentra resistividades naturales y en el centro de esta presenta deposito si saturación de lixiviados y que los costados a esta, presenta depósitos con saturación de lixiviados, el modelo concuerda con lo hecho en la Figura 28 con el Res2DInv.

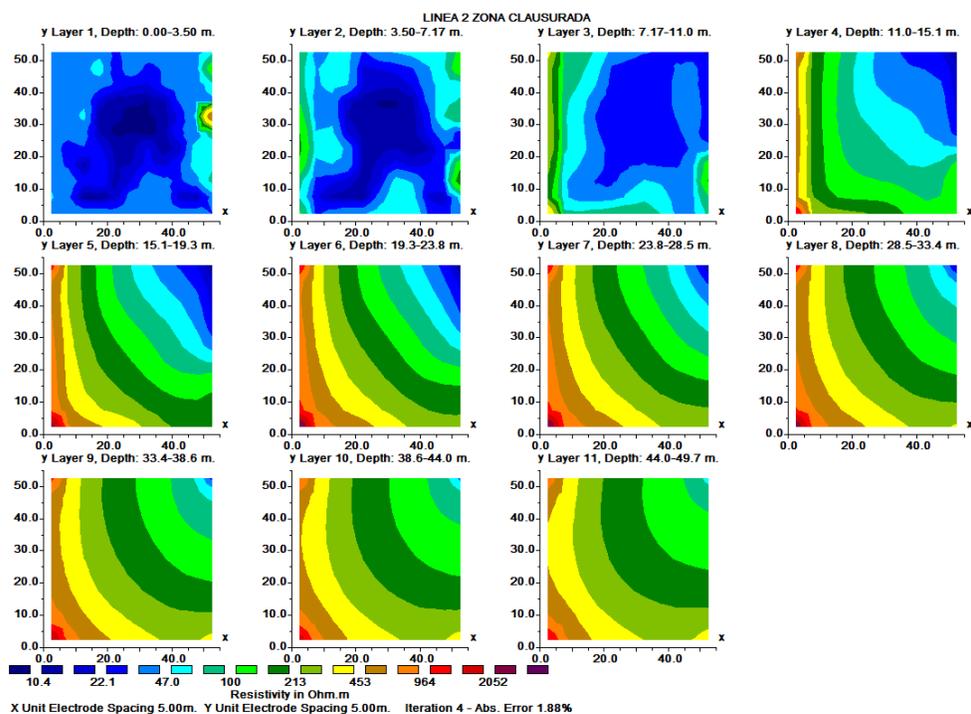


Figura 55. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

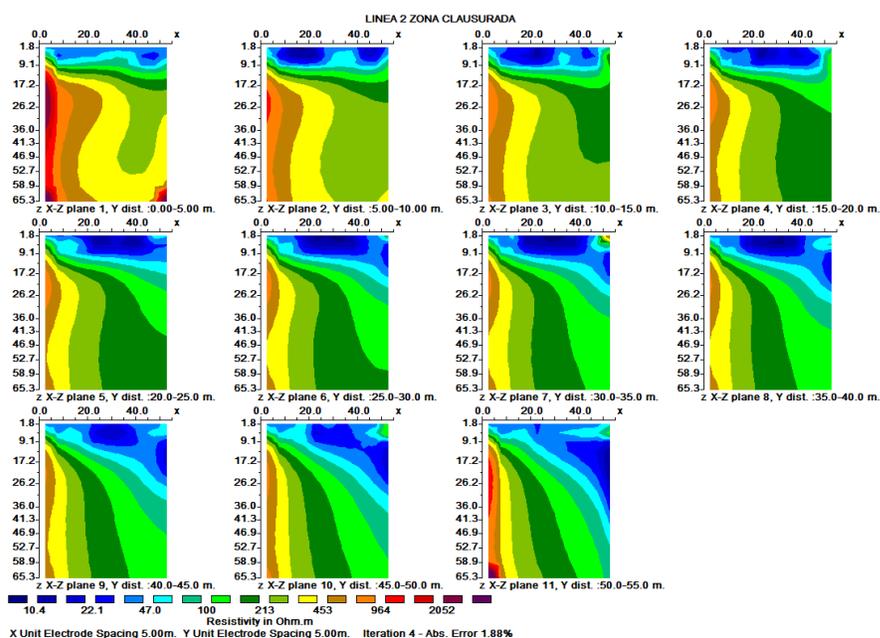


Figura 56. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE-XZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

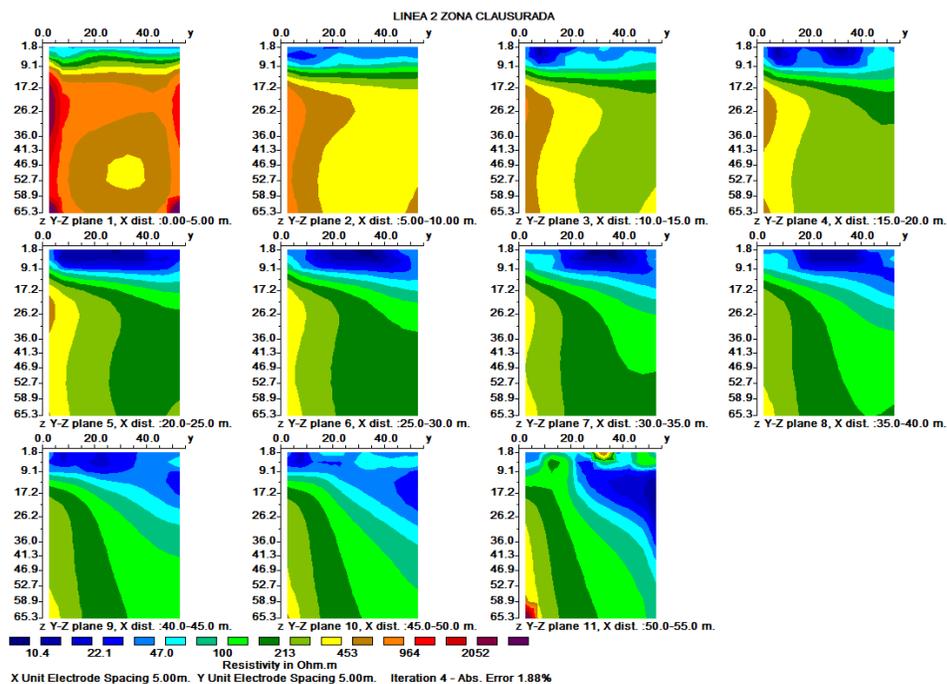


Figura 57. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE

YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

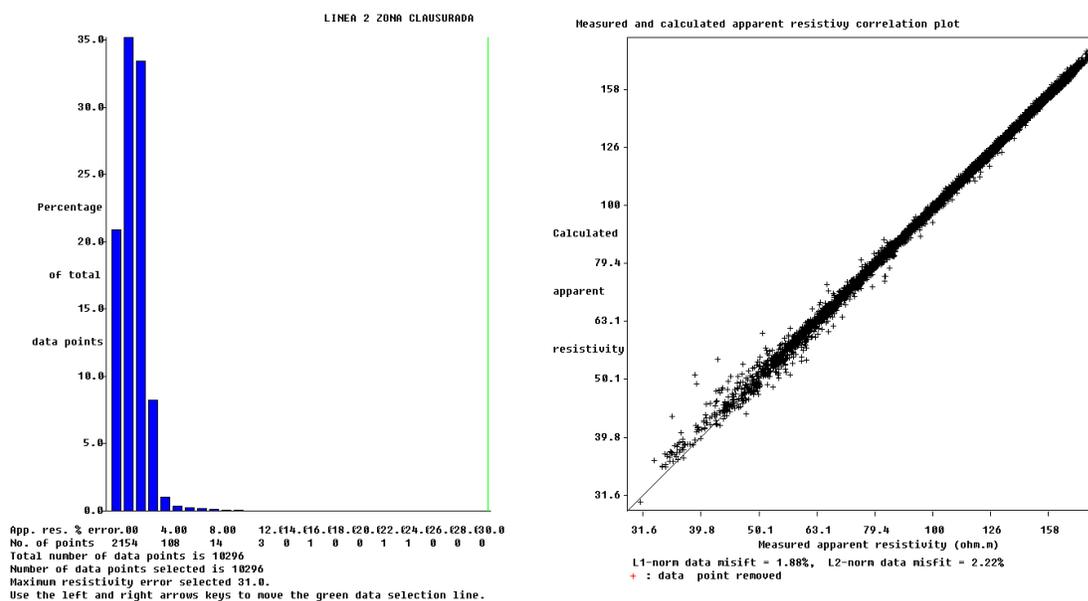


Figura 58. RMS LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA. Fuente: Autor basado en el Software

Res3DInv.

La línea 4 da como resultado de un buen modelo puesto que RMS está dentro del 10% en el que se acondiciono el programa Res3DInv para que la iteración nos quede dentro del el margen del 10%. Respecto del modelo por ser una Zona Clausurada y una topografía no uniforme presenta depósitos saturados a las diferentes profundidades, el modelo concuerda con lo hecho en la Figura 29 con el Res2DInv.

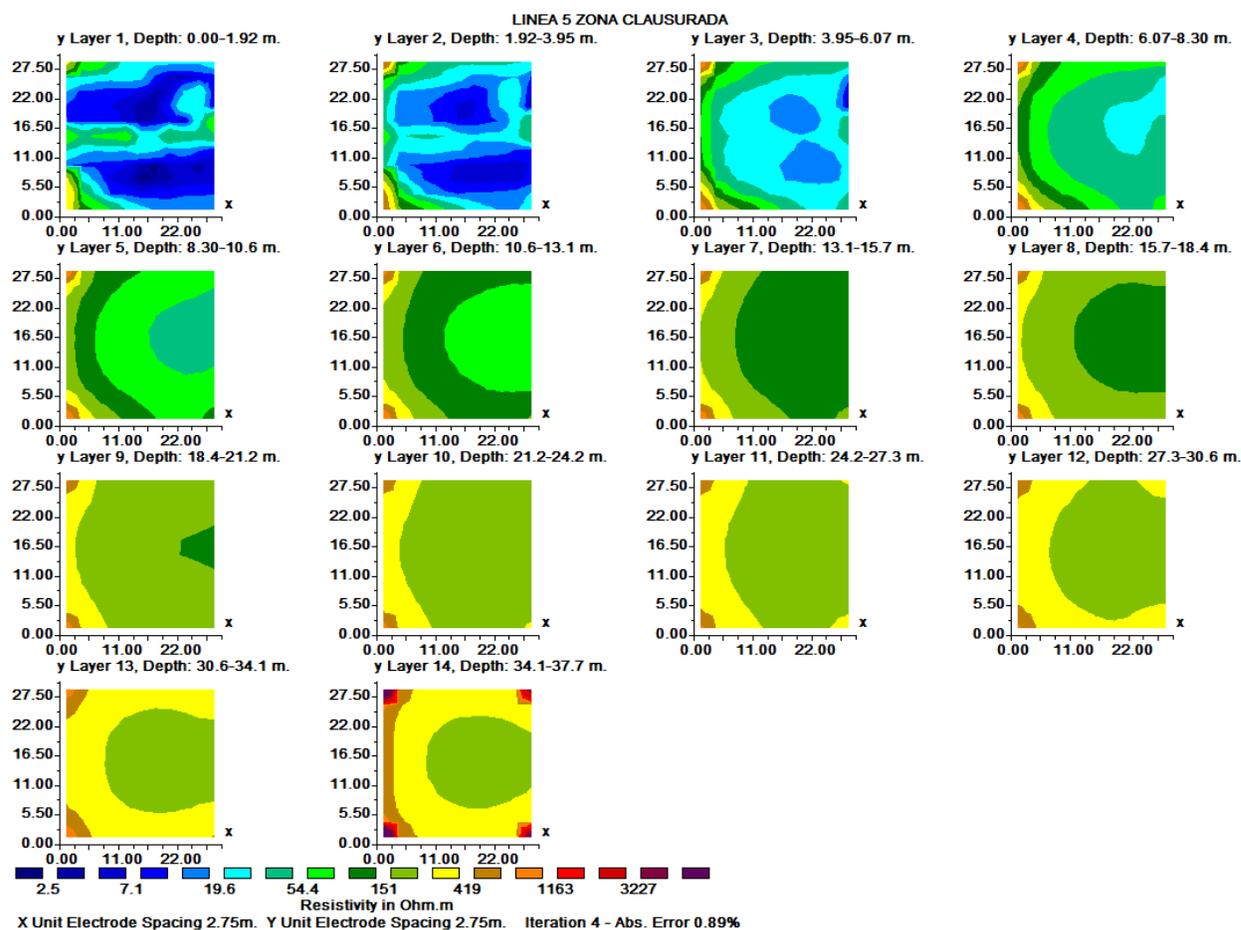


Figura 59. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA secciones transversales horizontales SLICE-XZ-

YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

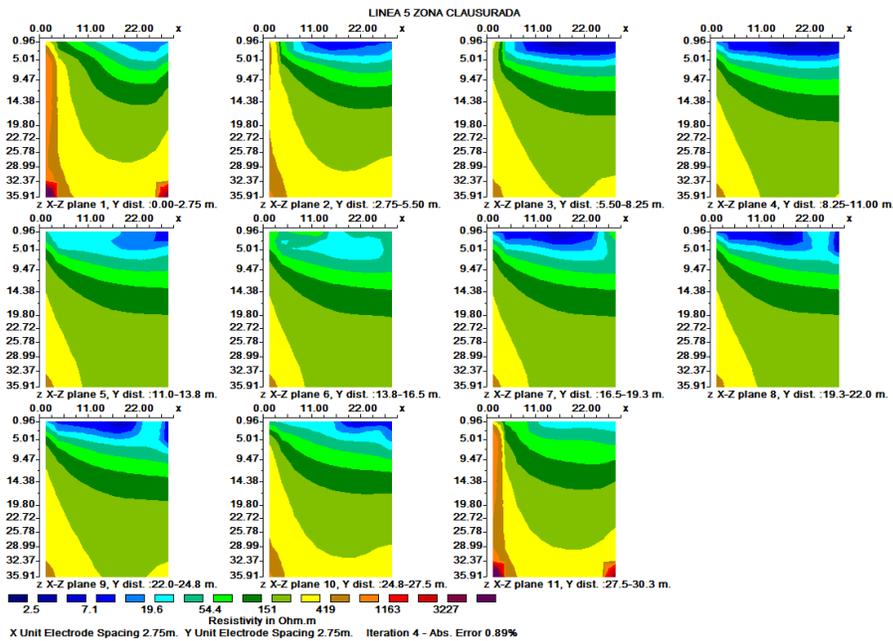


Figura 60. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE

XZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

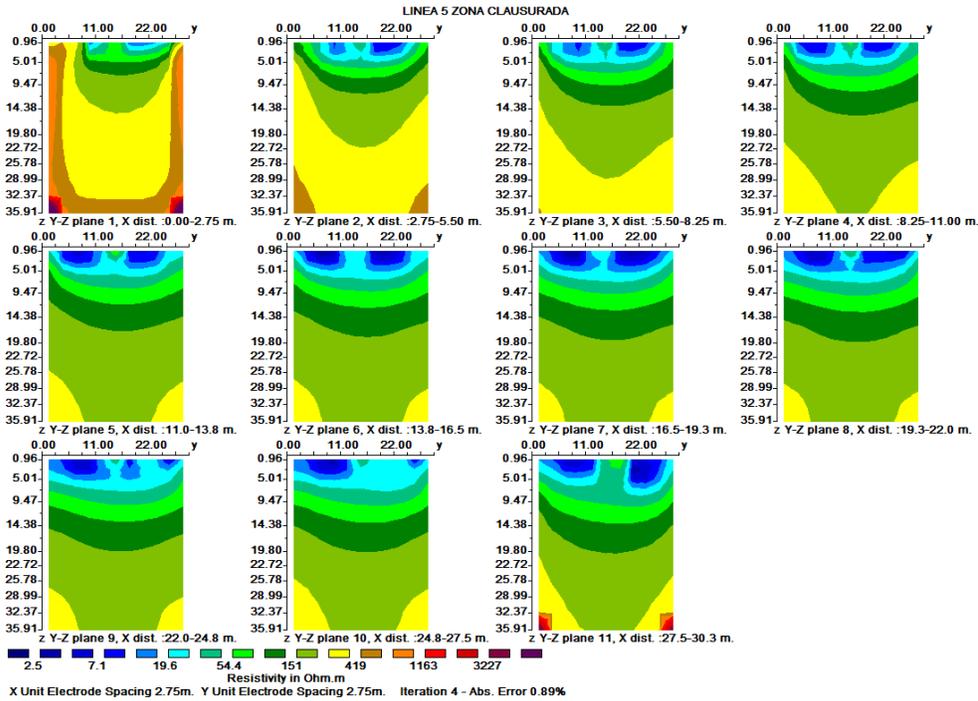


Figura 61. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA inversión secciones transversales vertical SLICE

YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

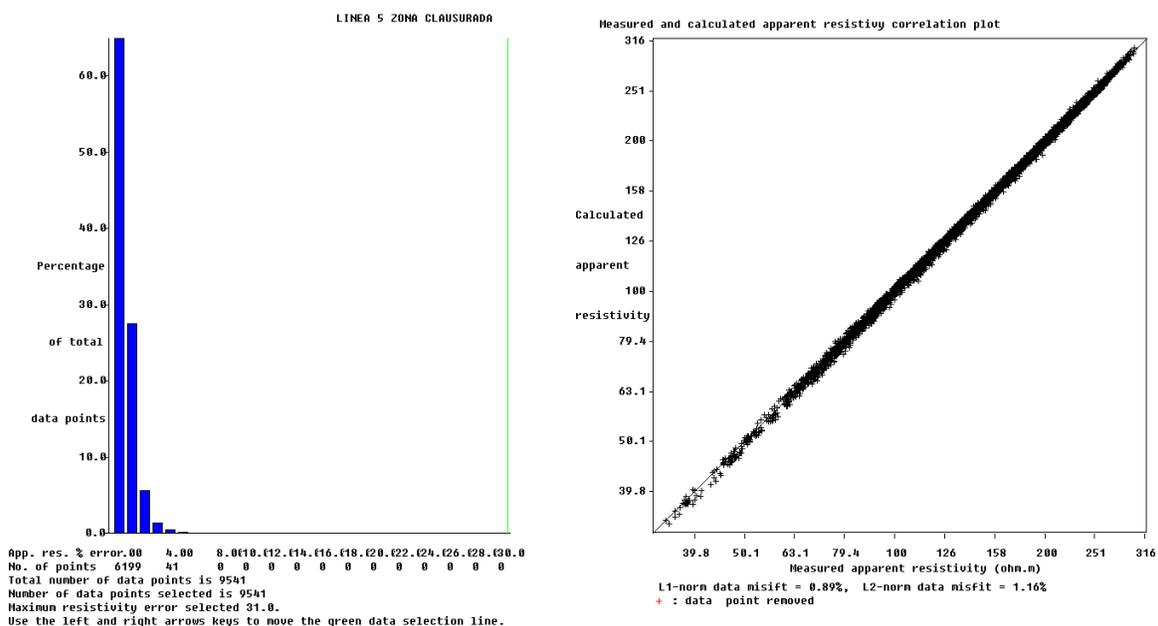


Figura 62. RMS LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

Tal como se puede apreciar en la Figura 62 los RMS están bien calibrados lo cual el rudo está en su rango óptimo para que el modelo concuerde con lo hecho en la Figura 30 con el Res2DInv. Pro ser una zona clausura aun presenta depósitos saturados por lixiviados con resistividades baja la cuales van aumenta a medida que se desciende por cada capa.

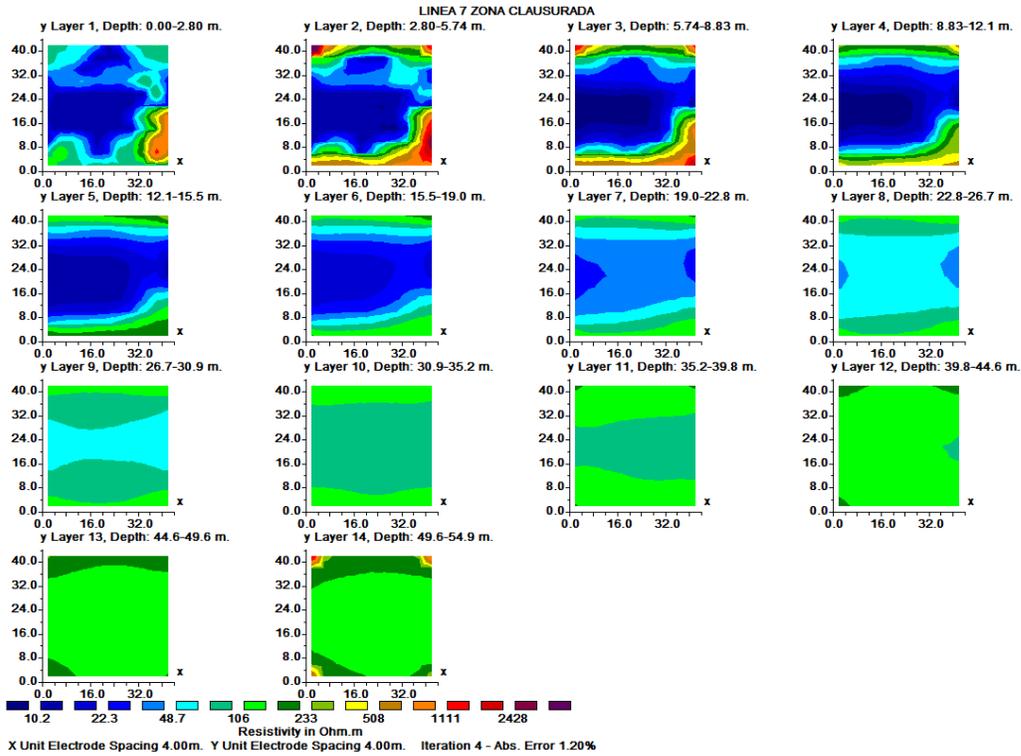


Figura 63. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Secciones transversales horizontales SLICE-XZ-YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

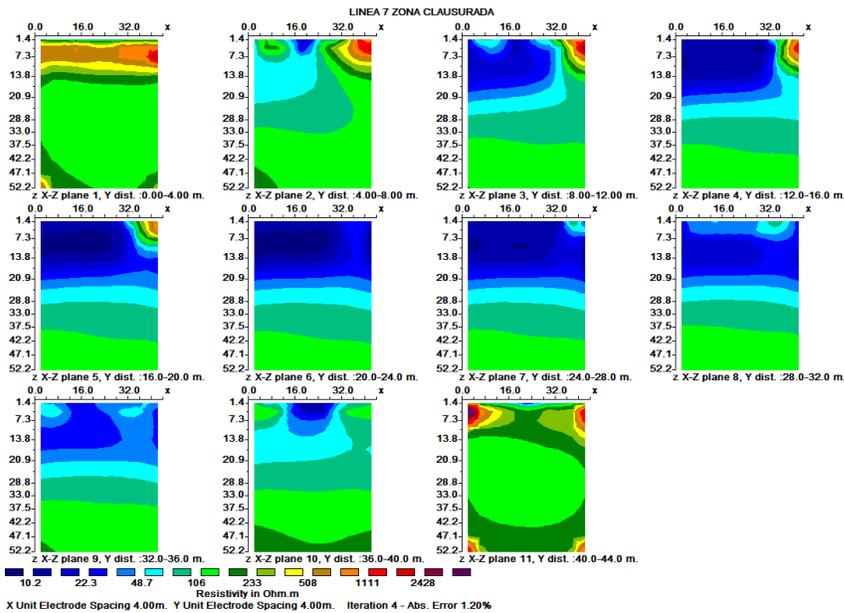


Figura 64. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE-XZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

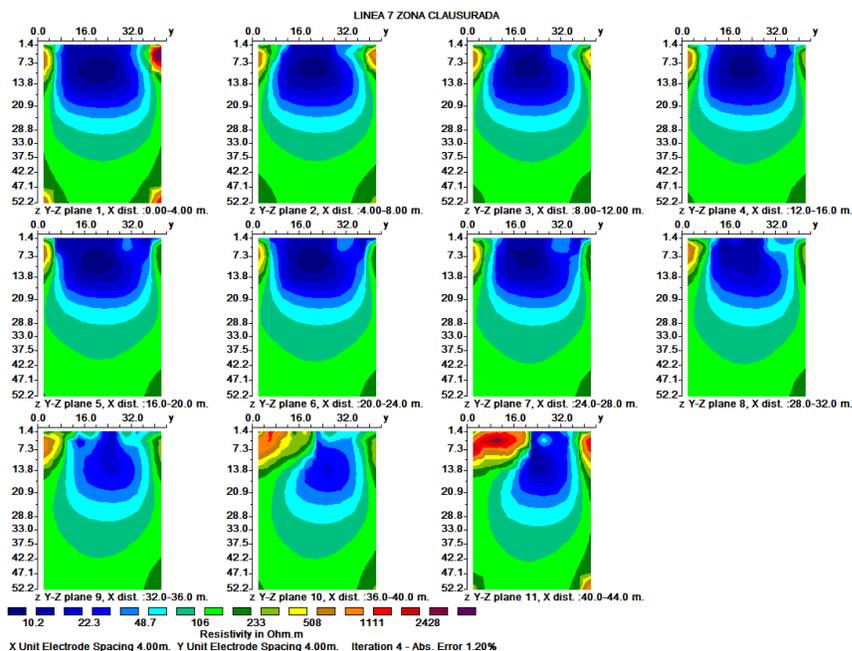


Figura 65. LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA Inversión Secciones transversales vertical SLICE YZ. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

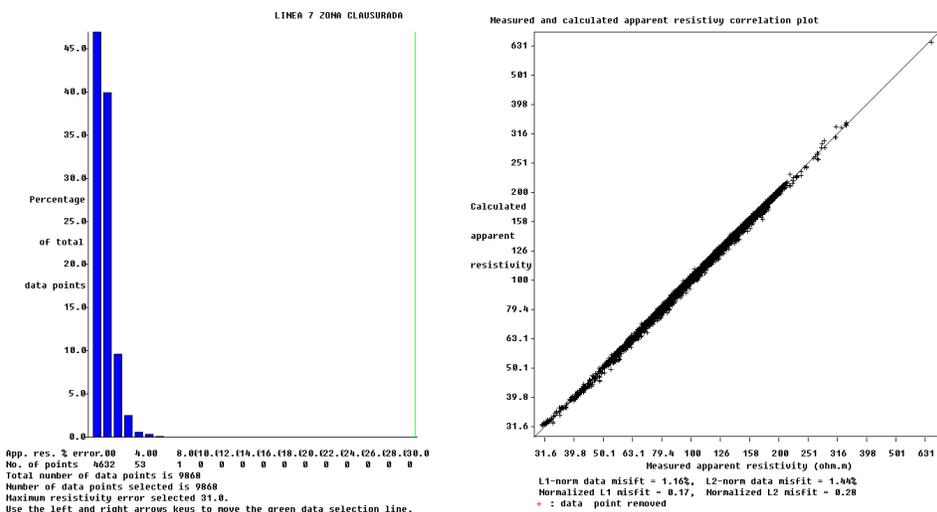


Figura 66. RMS LÍNEA 7 ZONA CLAUSURADA. Fuente: Autor basado en el Software Res3DInv.

Los datos RMS está en el rango adecuado para presentar un modelo que concuerde con lo hecho en la Figura 31 con el Res2DInv. Que por ser Zona Clausurada presenta una dispersión

homogénea en la cual a profundidades de 20 metros se presenta deposito con poca saturación astee que se encuentra las resistividades naturales.

4.4 Modelo en 3-D a través del software ParaView

Por medio del modelo en 3-D, se obtuvo un modelo para cada una de la cinco (5) líneas procesadas, cada línea tiene los ejes demarcado con sus respectivas longitudes. Para la línea 1 se observa un rango de resistividades bajas de $5 \Omega\text{m}$ y $20 \Omega\text{m}$ (ver Figura 67 del modelo 3D), Para la línea 2 se observa un rango de resistividades bajas de $2 \Omega\text{m}$ y $10 \Omega\text{m}$ (ver Figura 68 del modelo 3D), Para la línea 4 se observa un rango de resistividades bajas de $10 \Omega\text{m}$ y $60 \Omega\text{m}$ (ver Figura 69 del modelo 3D), Para la línea 5 se observa un rango de resistividades bajas de $10 \Omega\text{m}$ y $40 \Omega\text{m}$ (ver Figura 70 del modelo 3D). Para la línea 7 se observa un rango de resistividades bajas de $5 \Omega\text{m}$ y $38 \Omega\text{m}$ (ver Figura 71 del modelo 3D).

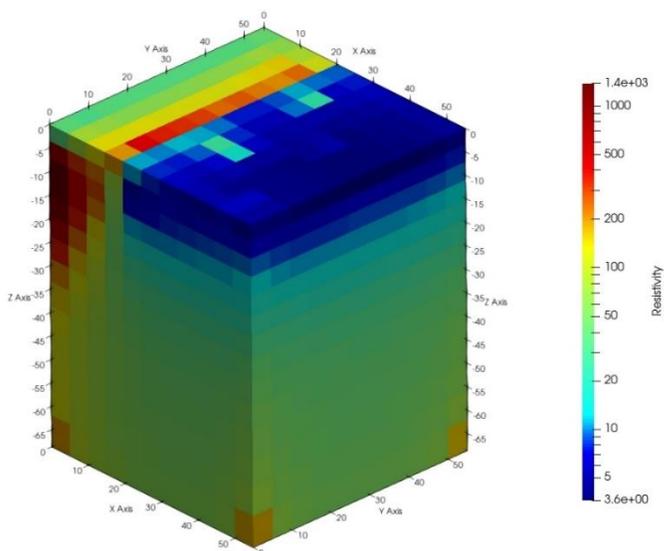


Figura 67. LÍNEA 1 ZONA ACTIVA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el Software ParaView.

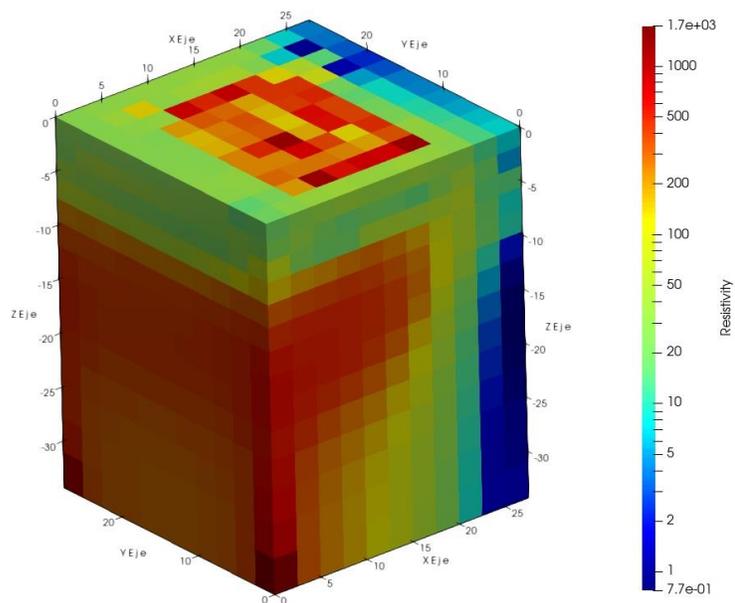


Figura 68. LÍNEA 2 ZONA ACTIVA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el Software ParaView.

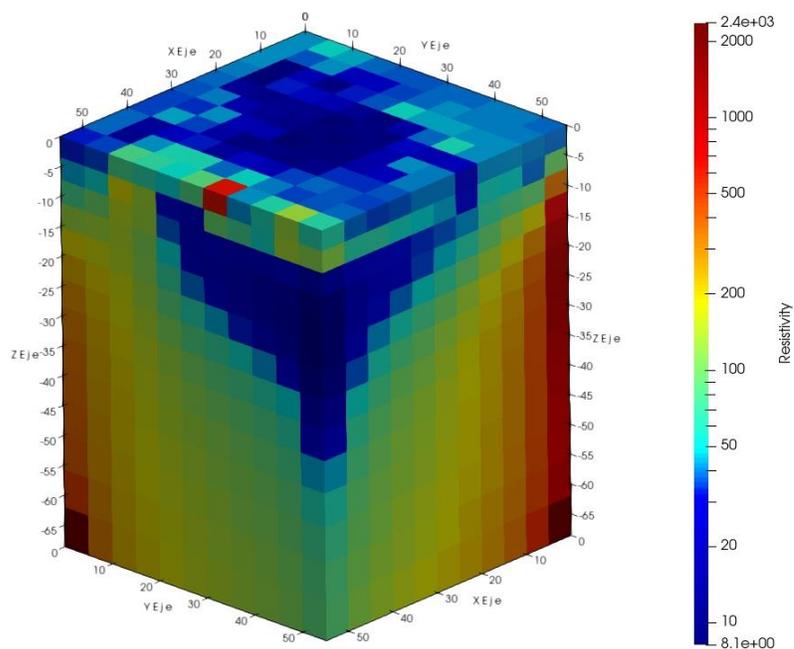


Figura 69. LÍNEA 4 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el software ParaView.

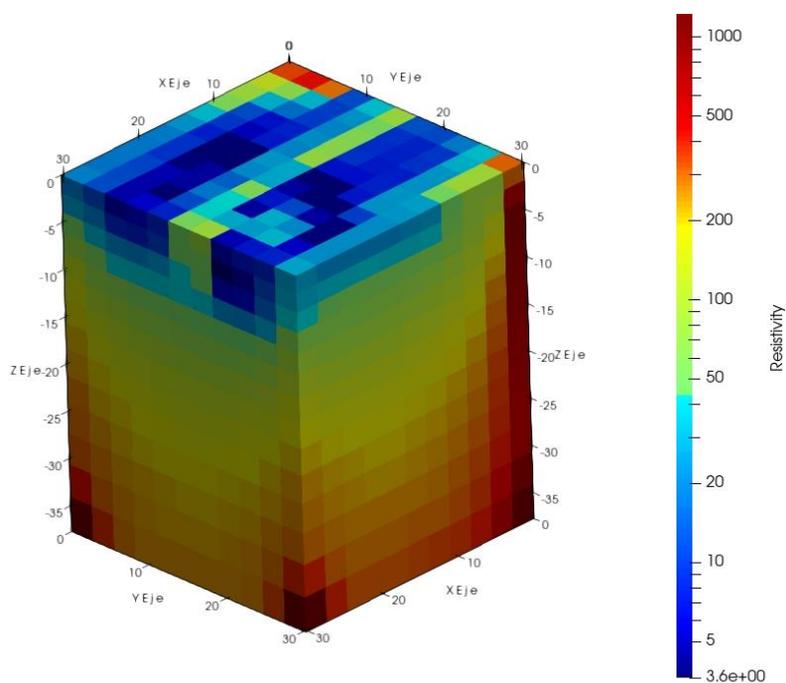


Figura 70. LÍNEA 5 ZONA CLAUSURADA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el software ParaView.

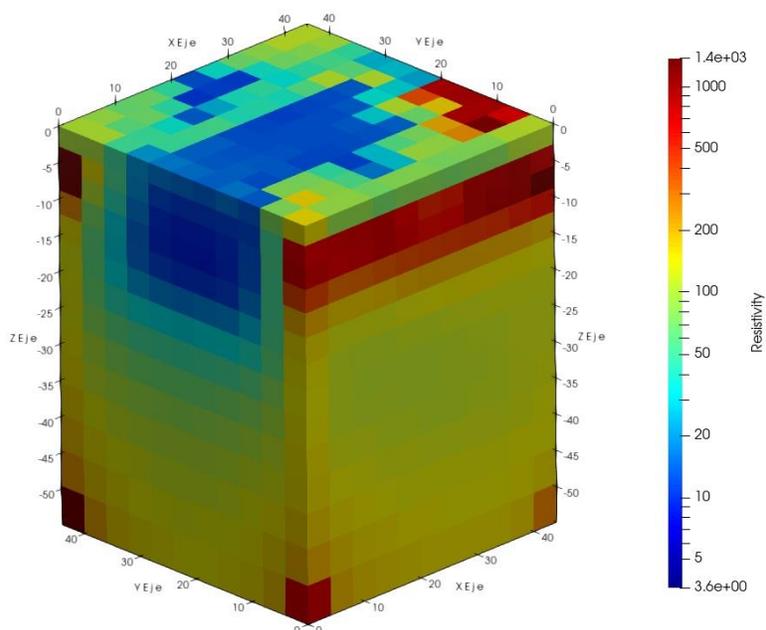


Figura 71. LÍNEA 7 ZONA Autor basado en el software ParaView. CLAUSURADA Modelo 3-D sintético. Fuente: Autor basado en el software ParaView.

Capítulo 5.

5. Análisis de resultados

5.1 Procesamiento de datos a través del software Res2DInv

De acuerdo con los datos procesados para cada una de las cinco (5) líneas, tal como se observa en las Figuras de la 27 a la 31, se tuvo en cuenta las resistividades de los materiales, las cuales se describen a continuación:

Línea 1. En esta línea se observan varios horizontes, entre ellos uno de resistividades entre 250 a 2600 Ohm.m constituido posiblemente por la presencia de arenas eólicas, el segundo horizonte representaría posibles bolsas de basura con resistividades entre 20 a 200 Ohm.m y un tercer horizonte que estaría clasificado como lixiviados con resistividades entre 6 a 15 Ohm.m con alturas entre 3 a 35 m, además posee una pendiente con un porcentaje considerable que facilita el escurrimiento de los líquidos que se filtran provenientes de las basuras.

Línea 2. En la línea 2 se puede observar un horizonte geo-eléctrico perteneciente al suelo natural con alta presencia de limos y un rango resistivo de 20 a 100 Ohm.m. A una profundidad de aproximadamente 15 metros se observa la presencia de unas bolsas de posibles lixiviados con resistividades entre 1 a 10 Ohm.m y bolsas de basuras esparcidas sobre toda la línea con resistividades entre 20 y 100 Ohm.m.

Línea 4. Para esta línea las resistividades correspondientes a los posibles focos de lixiviados están entre 9 y 20 Ohm.m con alturas desde 1 a 30 metros, alrededor de ellas se observan extensiones de basuras con resistividades entre 40 y 100 Ohm.m.

Línea 5. El horizonte geo-eléctrico que identifica en esta línea las franja de lixiviados está aparentemente muy reducida, se observan a una profundidad de aproximadamente 15 m con rangos de resistividad entre 4 a 20 Ohm.m. Las basuras o lixiviados en formación se observan alrededor con resistividades entre 20 y 50 Ohm.m.

Línea 7. Esta línea aparentemente representa la zona de mayor concentración de lixiviados los cuales se encuentran ubicados en la parte central de la celda, con alturas desde 10 a 40 m, su rango de resistividad está entre 10 y 20 Ohm.m y de 30 a 90 Ohm.m para los depósitos de basuras.

5.2 Procesamiento de datos a través del software Res3DMod

Línea 1. De los datos procesados en la línea 1 Zona Activa el software Res3DMod, se tiene que modelar por medio de un archivo de texto el cual es previamente modelada dependiendo de la matriz que trabaje para este modelo se trabajó una matriz 12 X 12 en la cual los datos resistividades se le asigna de acuerdo al modelo que generó el Res2DInv. El Res3DMod genero gran variedad de resistividades como: 10 Ω m, 15 Ω m, 21.1 Ω m, 30 Ω m, 81 Ω m, 113.8 Ω m, a profundidad de capa de 0 a 35 metros ya que el espesor de capa se trabajó a 5 metros.

Línea 2. De los datos procesados en la línea 2 Zona Activa el software Res3DMod, se tiene que modelar por medio de un archivo de texto el cual es previamente modelada dependiendo de la matriz que trabaje para este modelo se trabajó una matriz 12 X 12 en la cual los datos resistividades se le asigna de acuerdo al modelo que generó el Res2DInv. El Res3DMod genero gran variedad de resistividades como: 3.8 Ω m, 7.7 Ω m, 15.5 Ω m, 31.3 Ω m, 63.4 Ω m, 128.2

Ωm , 259.2 Ωm , 524.1 Ωm , a profundidad de capa de 0 a 25 metros ya que el espesor de capa se trabajó a 2.5 metros.

Línea 4. De los datos procesados en la línea 4 Zona Clausurada el software Res3DMod, se tiene que modelar por medio de un archivo de texto el cual es previamente modelada dependiendo de la matriz que trabaje para este modelo se trabajó una matriz 12 X 12 en la cual los datos resistividades se le asigna de acuerdo al modelo que generó el Res2DInv. El Res3DMod genero gran variedad de resistividades como: 38.7 Ωm , 56.9 Ωm , 75.1 Ωm , 93.3 Ωm , 111.5 Ωm , 129.7 Ωm , 147.9 Ωm , 166.1 Ωm , a profundidad de capa de 0 a 50 metros ya que el espesor de capa se trabajó a 5 metros.

Línea 5. De los datos procesados en la línea 5 Zona Clausurada el software Res3DMod, se tiene que modelar por medio de un archivo de texto el cual es previamente modelada dependiendo de la matriz que trabaje para este modelo se trabajó una matriz 12 X 12 en la cual los datos resistividades se le asigna de acuerdo al modelo que generó el Res2DInv. El Res3DMod genero gran variedad de resistividades como: 52.2 Ωm , 75.4 Ωm , 108.8 Ωm , 157.2 Ωm , 227.1 Ωm , 328.2 Ωm , 473.7 Ωm , a profundidad de capa de 0 a 22 metros ya que el espesor de capa se trabajó a 2.75 metros.

Línea 7. De los datos procesados en la línea 7 Zona Clausurada el software Res3DMod, se tiene que modelar por medio de un archivo de texto el cual es previamente modelada dependiendo de la matriz que trabaje para este modelo se trabajó una matriz 12 X 12 en la cual los datos resistividades se le asigna de acuerdo al modelo que generó el Res2DInv. El Res3DMod genero gran variedad de resistividades como: 33.9 Ωm , 48.8 Ωm , 70.3 Ωm , 101.3 Ωm , 145.9 Ωm , 210.2 Ωm , 302.9 Ωm , 436.4 Ωm a profundidad de capa de 0 a 32 metros ya que el espesor de capa se trabajó a 4 metros.

5.3 Inversión de datos a través del software Res3DInv

Se obtuvo un modelo para cada una de la 5 línea procesada, cada línea tiene los ejes demarcado con sus respectivas longitudes. En el aspecto más importante en el que trabajamos es en identificar la y reconocer las resistividades asociadas a los depósitos saturados por lixiviado como se presenta por medio de la vista en los ejes X, Y y Z del cual completa el modelo 3D y ver que representa en los 5 modelos.

Línea 1. De los datos procesados en la línea 1 Zona Activa el software Res3DInv, en la cual los datos hay presencia de depósitos saturados por lixiviados con las siguientes resistividades 10 Ωm , 15 Ωm , 21.1 Ωm , a profundidad de capa de 20 metros, en la cual por ser una Zona Activa estos valores indican que estos depósitos de basuras se encuentran saturados valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo, 3-D se ajusta para su inversión, cabe destacar que a profundidades de 5 metros se encontraron resistividades mayores a los 40 Ωm y 100 Ωm presencia suelo natural dispuesto por la topografía del terreno respectivamente.

Línea 2. De los datos procesados en la línea 2 Zona Activa el software Res3DInv, en la cual los datos hay presencia de depósitos saturados por lixiviados con las siguientes resistividades 3.8 Ωm , 7.7 Ωm , 15.5 Ωm , 31.5 Ωm a profundidad de capa de 25 metros, al igual también se encontraron depósitos de basura con poca o ninguna saturación por lixiviados la cual presento resistividades de 150 Ωm a 400 Ωm , valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv la cual el modelo 3-D se ajusta para su inversión, cabe destacar que a profundidades de 2.5 metros se encontraron resistividades mayores a los 400 Ωm y 1000 Ωm respectivamente debido a lo composición del terreno irregular.

Línea 4. De los datos procesados en la línea 4 Zona Clausurada el software Res3DInv, en la cual los datos hay presencia de depósitos saturados por lixiviados con las siguientes resistividades 9.28 Ωm , 35.9 Ωm , 54.7 Ωm , a profundidades de capa 40 metros no uniformes en otras secciones se encontraron los mismos valores de lixiviados de 10 a 20 metros, principalmente porque la información no presenta topografía. Por ser una Zona Clausurada los valores de las resistividades son mayores puesto hay depósitos con saturaciones mínimas de 54.7 Ωm a 100 Ωm muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajusta para su inversión, cabe destacar que a profundidades de 15 metros se encontraron depósitos con resistividades mayores a los 129.7 Ωm , 200 Ωm y 500 Ωm respectivamente.

Línea 5. De los datos procesados en la línea 5 Zona Clausurada el software Res3DInv, en la cual los datos hay presencia de depósitos saturados por lixiviados con las siguientes resistividades 6.2 Ωm , 36.1 Ωm , 52.2 Ωm , 75.4 Ωm a profundidades de capa 2.75 a 12 metros, se encontraron depósitos pocos saturados 90 Ωm y 110 Ωm , valores muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajusta para su inversión, cabe destacar que a profundidades de 14 metros a hasta donde se termina el modelo se encontraron resistividades mayores a los 246.4 Ωm , 600 Ωm y 1000 Ωm respectivamente.

Línea 7. De los datos procesados en la línea 7 Zona Clausurada el software Res3DInv, en la cual los datos hay presencia de depósitos saturados por lixiviados con las siguientes resistividades 10.9 Ωm , 33.9 Ωm , 48.7 Ωm , 69.9 Ωm a profundidades de capa 4.00 a 22.0 metros, en los cuales presenta resistividades con depósitos pocos saturado con valores 69.9 Ωm a 123.5 Ωm muy cercanos a los obtenidos en el software Res2DInv a la cual el modelo 3-D se ajusta para su inversión, cabe destacar que a profundidades mayores 22 metros ese encontraron resistividades no saturadas mayores a los 205.8 Ωm , 422.9 Ωm y 1000 Ωm respectivamente.

5.4 Modelo en 3-D a través del software ParaView

En esta sección, se obtuvo un modelo 3D para cada una de la 5 línea procesada, cada línea tiene los ejes demarcado con sus respectivas longitudes y valores de resistividad finales.

Línea 1. Zona Activa se observa un rango de resistividad bajas las cuales son apropias de los lixiviados de 5 Ωm , 20 Ωm , 50 Ωm a profundidades de 22 metros, así como se encuentra resistividades de 90 Ωm 400 Ωm a profundidades mayores de 22 metros, y en la cual se pueden encontrar suelo natural.

Línea 2. Zona Activase observa un rango de resistividad bajas las cuales son apropias de los lixiviados de 2 Ωm , 10 Ωm , 30 Ωm , a profundidades de 10 metros, así como se encuentra resistividades de 100 Ωm , 200 Ωm , en el centro la cuales se presenta como depósito no saturados a profundidades mayores de 2.5 metros y en la cual se pueden encontrar suelo natural a 15 metros de profundidad con resistividades de 150 Ωm , 290 Ωm , 500 Ωm . 1000 Ωm .

Línea 4. Zona Clausurada se observa un rango de resistividad bajas las cuales son apropias de los lixiviados de 10 Ωm , 20 Ωm , 50 Ωm a profundidades de 5 metros, así como se encuentra esas resistividades a 35 metros de profundidad puesto que el terreno presenta caída irregular se muestran también depósitos pocos saturados con resistividades mayores a 50 Ωm y profundidades de 12 a 40 metros de profundidad y en la cual se pueden encontrar suelo natural de 20 a 42 metros de profundidad con resistividades de 200 Ωm , 400 Ωm , 1500 Ωm .

Línea 5. Zona Clausurada se observa un rango de resistividad bajas las cuales son apropias de los lixiviados de 5 Ωm , 20 Ωm , 40 Ωm a profundidades de 10 metros, así como se encuentra resistividades de 90 Ωm , 400 Ωm , 1000 Ωm a profundidades mayores de 12 metros, y en la cual se pueden encontrar suelo natural.

Línea 7. Zona Clausurada se observa un rango de resistividad bajas las cuales son apropias de los lixiviados de 5 Ωm , 20 Ωm , 30 Ωm a profundidades de 18 metros, así como se encuentra depósitos con baja saturación con resistividades de 60 Ωm , 90 Ωm , 120 Ωm a profundidades mayores de 25 metros, y en la cual se pueden encontrar suelo natural con resistividades de 150 Ωm , 230 Ωm , 480 Ωm . 930 Ωm .

6. Conclusiones

La principal ventaja de un modelo 3D es la visualización de los valores de resistividad asociados con sus respectivos espesores de capas, para identificar caracterización e identificación de las resistividades presentes en tanto zonas activas como zonas clausuradas, zonas saturados por lixiviados y zonas de residuos sólidos en el Relleno Sanitario “La Cortada” ubicado en la Vereda Chíchira del municipio de Pamplona, Norte de Santander. De esta forma, este estudio evita la manipulación de los suelos por medio de sondeos o perforaciones que no entregan información a través de la visualización en un modelo 3D.

Con el programa Res3DMod la reprocesamiento de las respectivas cinco (5) líneas, es ideal, el cual permite ingresar los valores de resistividad obtenidos con Res2DInv y asignar esos valores a espesores de capas que se añadan; lo cual, permite en un posterior programa generar un modelo sintético 3D.

Los resultados obtenidos mediante el procesamiento, un enfoque aproximado a la realidad sobre la ubicación, tamaño y estructura de diferentes elementos presentes en el relleno. Se identificaron los depósitos saturados de los lixiviados tanto en Zona Activa como una Zona Clausurada a través de sus resistividades, las cuales en promedio estuvieron en rangos entre los $1 \Omega\text{m}$ - $20 \Omega\text{m}$ para las zonas activas y $10 \Omega\text{m}$ - $50 \Omega\text{m}$ para zona clausuradas.

En los depósitos con poca saturación o ninguna, se presenta a mayor profundidad zonas activas presentando resistividades de $400 \Omega\text{m}$ - $1000 \Omega\text{m}$ y zona clausuradas de $200 \Omega\text{m}$ - $500 \Omega\text{m}$ respectivamente a profundidades de capa mayores a 12 - 20 metros dependiendo de alguno de las 5 líneas en composición y topografía.

Una vez terminado el procesamiento de datos por el programa Res3DMod y de haber realizado el análisis de los resultados a partir de interpretación de líneas 2D con el método de resistividad eléctrica para la exploración geofísica del Relleno Sanitario la Cortada, dio como resultado un procesamiento y un enfoque muy aproximado a la realidad sobre la ubicación, tamaño y estructura de diferentes elementos presentes en el relleno.

A la hora de invertir los datos obtenido de las cinco (5) líneas por el programa Res3DMod a Res3DInv el cual invierte esos datos el cual el programa Res3DMod nos permite asignarles profundidades a las capas. Lo cual el Res3DInv al invertirlo nos genera esa información en tres ejes para posteriormente genera un modelo 3D a partir de la interpretación de una línea 2D.

El Res3DInv es ideal, nos permite invertir los datos para que los resultados obtenidos, sean las resistividades aparentes reales que se presenta en el relleno, nos permita por medio un modelo en los ejes X, Y y Z la visualización de la resistividad, caracterización e identificación asignadas a un espesor de capa, en este caso de los depósitos saturados y no saturados por lixiviados que se presente en zonas activas y zonas clausuradas en un modelo 3D.

Los resultados aquí obtenidos dieron procesamiento a un modelo 3D muy aproximado a la realidad sobre la ubicación, tamaño y estructura de las zonas activas y las zonas clausuradas dando visualización de la conformación de los deposito saturados y no saturados por lixiviados presentes en el Relleno Sanitario “La Cortada” ubicado en la Vereda Chíchira del municipio de Pamplona, Norte de Santander.

El Res3DInv al invertir los datos obtenidos por el Res3DMod modela prestando a tención a los espesores de paca de las 5 líneas, esto se enfatiza porque el Res3DMod se encarga de priorizar los valores de resistividad obtenidos en los primeros metros de profundidad. En

cambio, el Res3DInv prioriza los espesores de capa, esta información permite eliminar ruido que se presente que afecte en la inversión e iteraciones que este realice.

La principal ventaja de un modelo 3D es la visualización de los valores de resistividad asociados con sus respectivos espesores de capas. El cual permite ver el comportamiento del Relleno “La Cortada” tanto en una zonas activas y clausuradas, y cómo en estas zonas clausuradas se comporta los lixiviados a través del tiempo y cómo estos depósitos en piensan a aumentar la resistividad asociadas a los lixiviados en comparación a los valores de resistividad encontrados en las zonas activas, y el comportamiento en las zonas activa a acumulaciones masivas de depósitos saturados por lixiviados con resistividades muy bajas.

Referencias

- Aarhus Geosoftware. (2020). RES3DINVx64 ver. 3.18. Basic, Professional and Enterprise versions with multicore and 64-bit support for Windows 7/8/10 Rapid 3-D Resistivity & IP inversión using the least-squares method.
- Álvarez Barrientos, E. (2015). *Tomografía eléctrica resistiva 3d en la caracterización del subsuelo bajo*. Tesis grado de en Ingeniería Estructuras Civiles Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma. México. Recuperado en https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000729659
- Aracil Ávila, E., Porres Benito, J.Á., Espinosa González, A.B. Maruri Brouard, U., Vallés Iriso, J., García Castillo, L., Ibáñez García, S. (2005). *Aplicación de la tomografía eléctrica para la caracterización de un deslizamiento de ladera de un vertedero*. (Eds) VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas Inestables: Valencia, España. Universidad de Valencia y UPC. España. doi:http://www.geoigeo.com/descargas/Tomografia_electrica_deslizamiento_vertedero.pdf.
- Biosca Valiente, B. (2011). *Optimización de los procesos de medidas e interpretación de la tomografía geo-eléctrica en la prospección superficial*. Tesis Doctoral. Ingeniero de Minas. Departamento de Ingeniería Geológica, E.T.S Ingenieros de Minas de Madrid, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=101613>
- Business WordPress Themes. (2020). “Geofísica”. Recuperado de <https://ingenieriageofisica.com/método-del-campo-electrico-natural>.
- Carrasco García, P. (2013). *Avance en técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información*. Tesis

Doctoral. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca. España.
Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=87129>

Cervantes Ricalde, B.A. (2017). *Aportes de la aplicación de la tomografía eléctrica y del georadar en la investigación del deslizamiento de Lidecko en los Cárpatos Occidentales, República Checa*. Rev. Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 34 (2). México. doi:http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742017000200105

Cifuentes Nava, G., Cabrer, R., Andrade, A., y Hernández Quintero, H. (2017). Tomografía de resistividad eléctrica 3d en la catedral de Morelia, México. Rev. Arqueología Iberoamericana. Vol. 36. pp. 29-35. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321038651_tomografia_de_resistividad_electrica_3d_en_la_catedral_de_morelia_mexico

Cruz Alanís, C.Z. (2016). *Tomografías de resistividad eléctrica 3D en la pirámide del Castillo en Chichén Itzá, Yucatán, México*. Tesis de Grado en Ingeniería Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma. México. Recuperado de [https://repositorio.unam.mx/contenidos/tomografias-de-resistividad-electrica-3d-en-la-piramide-del-castillo-en-chichen-itza-yucatan-mexico-348453?c=Vve9O3&d=false&q=*.*\)&i=2&v=1&t=search_1&as=4](https://repositorio.unam.mx/contenidos/tomografias-de-resistividad-electrica-3d-en-la-piramide-del-castillo-en-chichen-itza-yucatan-mexico-348453?c=Vve9O3&d=false&q=*.*)&i=2&v=1&t=search_1&as=4)

Cuevas Cosme, S. (2014). *Estudio de tomografía eléctrica en el arroyo la mexicana localizado en cananea sonora para determinar el contacto sedimento – roca*. Tesis de Grado en Ingeniería Geofísica. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Instituto Politécnico Nacional. México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14973/Estudio%20de%20tomograf%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20en%20el%20arroyo%20la%20mexicana%20localizado%20en%20Cananea%20Sonora%20para%20determinar%20el%20contacto%20sedimento-roca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Hinojosa Carvajal, Y.D. (2017). *Aplicación de métodos geoelectricos en zonas clausuradas y activas del relleno sanitario regional "La cortada", Municipio de Pamplona, Norte de Santander, Colombia*. Trabajo de investigación como requisito de grado en ingeniería civil, Facultad de Arquitectura e Ingeniería. Universidad de Pamplona. Colombia. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/339507421_metodos_geofisicos_aplicados_a_la_de_celdas_activas_y_clausuradas_del_relleno_sanitario_la_cortada_norte_de_santander
- Loke, M.H. (2014). 3-D resistivity & IP forward modeling, using the finite-difference and finite-element methods. RES3DMOD ver. 2.14 y RES3DMODx64 ver. 3.04, for Windows XP/Vista/7/8.
- Loke, M.H. (2002). Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. Geoelectrical. Copyright (1996-2002).
- López Hidalgo, A.A. (2012). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D)*. Rev. Instituto Geofísico Sismológico Ing. F.S. Volponi. Facultad de Ciencias Exactas, Física y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. Argentina. doi: <https://www.geotomosoft.com/Articulo.pdf>
- Mancilla Vesga, H.R. (2017). *Caracterización geofísica de las zonas clausuradas y en operación, en las instalaciones del relleno sanitario regional la cortada municipio de Pamplona Norte de Santander, a partir, de la aplicación de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)*. Trabajo de grado presentado como para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Colombia. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/476164382/Mancilla-2017>
- Marín Herrera, E.D. y Avendaño Hernández, F.D. (2017). *Prospección Geofísica Ambiental aplicada a la infiltración de lixiviados en un relleno sanitario, bajo la adaptación de*

- sondeos eléctricos verticales de resistividad y polarización inducida, para obtener tomografías geoelectricas profundas y modelo 3D.* Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Catastral y Geodesta. Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5176>
- Martínez Pagán, P. (2006). *Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la región de Murcia.* Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=49827>
- Mendoza, B. (2019). *Localización de elementos arqueológicos en la necrópolis Puruhá de Payacucho (Rumicruz, Riobamba, Ecuador) mediante análisis de tomografía eléctrica.* Rev. Arqueología Iberoamericana Vol. 43, pp.12-19. doi: <http://laiesken.net/arqueologia/>.
- Pellicer Jiménez, E. (2015). *Caracterización mediante tomografía del deslizamiento de Toledo (Oviedo).* Trabajo final Master. Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo. España. Recuperado de https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/33870/TFM_Esperanza%20Pellicer%20Jimenez.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- Perdomo, S. (2009). *Tomografía Eléctrica en apoyo de la investigación Arqueológica.* tesis de grado en ingeniería geofísica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad nacional de la Plata, argentina, 2009. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26461>
- Plata Torres, J.L. (2005). *Tomografía Geoelectrica: Desarrollo para la caracterización de acuíferos.* Ministerio de Educación y Ciencia, Programas Nacional de I+D: Recursos

- Naturales. España, REN2002-04538-C02-(01-02). Recuperado de http://info.igme.es/SidPDF%5C112000%5C159%5CTomo%20I%5C112159_0001.pdf
- Suárez, J., y Zúñiga, H. (2013). *Detección de capas de desechos con métodos geoeléctricos: caso Relleno Sanitario Río Azul, Costa Rica*. Revista Geológica América Central, Vol, 49(2013). Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0256-70242013000200011&lng=es&nrm=iso
- Subterránea. *Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT)*. Recuperado de <https://subterranea.cl/ert/>
- Torres Peña, J.A., Cantillo Romero, J.R. y Contreras, M.A. (2018). *Métodos geofísicos aplicados a la de celdas activas y clausuradas del relleno sanitario "La Cortada" (Norte de Santander)*. Rev. Ambiental, Agua, Aire y Suelo, Vol. 1-2107. Recuperado de http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/3210
- Valencia, C.E. (2017). *Caracterización y modelamiento 3D a través de tomografía eléctrica en el relleno sanitario de la ciudad de Chancay Lima*. Tesis de grado en ingeniería Geofísica, Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5032>