

Determinación de la distribución más probable del contaminante cadmio, en suelos cacaoteros, mediante aproximación multi enfoque de geofísica somera, geología, química analítica y estadística: Un estudio de caso en una parcela en Arauquita, departamento de Arauca



NOMBRE MAESTRANDO

Leonardo Javier Benavides Erazo

TRABAJO DE GRADO

NOMBRE DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADO

PhD. Sandra Esperanza Sánchez Sierra Universidad de Nariño.

NOMBRE DEL CODIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Dr. Daniel Bravo, PhD. en Geomicrobiología (Suiza) AGROSAVIA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

AÑO 2024

DEDICATORIA

A mi querida esposa Catherine y a mi amada hija Nathalie, les dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud, por creer en mí, por ser mi constante apoyo y fortaleza. Gracias por su paciencia, su comprensión y los sacrificios que hicieron posible este logro.

Leonardo Javier Benavides Erazo

Tabla de contenido

Índice de Ilustraciones.....	6
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	8
Índice de Mapas.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PROBLEMA DESCRIPCION Y FORMULACION.....	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 Generales.....	17
4.2 Específicos.....	17
5. MARCO REFERENCIAL.....	18
5.1. LAS ECUACIONES DE MAXWELL EN UN MEDIO ISOTROPO Y EN UN MEDIO ANISOTROPO.....	18
5.2. Método Geoelectrico. La tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones (2D ERT). ...	19
5.2.1 La resistividad eléctrica p.....	19
5.2.2. Resistividad eléctrica de metales pesados en suelos.....	22
5.3. Variaciones de la resistividad eléctrica con otros parámetros físico-químicos.....	23
5.3.1. La resistividad eléctrica y la porosidad.....	24
5.3.2. La resistividad eléctrica y la compactación del suelo.....	26
5.3.3. Tortuosidad.....	26
5.3.4. La Resistividad Eléctrica, el pH y el Contenido de Agua en el Suelo.....	28
5.3.5. La resistividad eléctrica y el contenido mineralógico del suelo.....	31
5.3.6. La resistividad eléctrica y la ley de Archie.....	31
5.4. La resistividad aparente e inversión de datos.....	32
5.5. Inversión de datos.....	32
5.6. Generación y análisis de tomografías geoelectricas.....	33
5.7. Detección de metales pesados por espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo de tipo óptico (ICP-OES).....	33
5.7.1. Generalidades del ICP-OES.....	34
5.8 Resumen. Geología general de la zona y ubicación de la zona prospectada.....	35
5.8.1 Geología general de Arauquita.....	35
5.8.2. Ubicación de la zona de estudio.....	37
6.1 Trabajo de Campo.....	39

6.1.1 Tendido de Ristras de Prospección Geoeléctrica Método Wenner α	40
a.- Espaciado entre electrodos.	40
b. Resolución de la ERT 2D Wenner α	40
c. Ventajas del arreglo Wenner α	40
d. Desventajas del arreglo Wenner α	40
e. Principales aplicaciones del arreglo Wenner α	40
f. Procedimiento en campo para la aplicación del método Wenner α	40
6.1.2. Generación de Tomografía 2D-3D (In Situ).	41
6.1.3. Toma de Muestra de Suelo.	42
6.2. Laboratorio de Física de Suelos.	42
6.2.1. Preparación y Secado de las muestras para análisis de física de suelos.	42
6.2.2 Medición del pH y del porcentaje de saturación de la muestra de suelo.	43
6.2.3. Volumen de suelo saturado	44
6.2.4. Arreglo experimental y medición de resistividad.	44
6.3. Aplicación de la Ley de Archie y Determinación de la Porosidad.	46
6.4. Calibración de la sonda de medición de resistividad tetraelectrónica.	47
6.5. Laboratorio de Química Analítica.	47
6.6. Análisis del problema Inverso y Tratamiento de Datos.	48
7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	51
7.1. Resultados obtenidos en Campo	51
7.2. Resultados obtenidos en Laboratorio de Física de Suelos.	54
7.2.1. Medición del pH y el porcentaje de saturación en la muestra de suelo.	54
7.2.2. Determinación de volumen de agua para saturación de muestra de suelo.	54
7.2.3. Volumen de suelo saturado.	54
7.2.4. Medición de resistividad eléctrica en laboratorio de física de suelos	55
7.4. Aplicación de la ley de Archie y determinación de la porosidad.	59
7. 5. Mediciones de resistividad en muestra de suelo con complemento de Cd a diferentes concentraciones.	62
7.5.2 Generación de la función ponderada, con coeficientes normalizados con respecto al factor de dispersión R2	66
7.6. Generación e interpretación de las tomografías de resistividad eléctrica 2D (ERT 2d predictivas)	69
7.7 Descripción de las ERT 2D predictivas:	70
8. Discusión de resultados	73

9. CONCLUSIONES	79
10. RECOMENDACIONES	83
11. AGRADECIMIENTOS	84
12. BIBLIOGRAFÍA	86

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Precipitaciones e Inundaciones.	38
Ilustración 2. Tendido de las líneas	41
Ilustración 3. De acuerdo al método tetraelectródico Wenner.	49
Ilustración 4. Tomografías obtenidas en campo In Situ.....	53
Ilustración 5. Curva de calibración.	56
Ilustración 6. Curva con datos experimentales para calibración	57
Ilustración 7. Resistividad del suelo saturado.	60
Ilustración 8. Factor de formación.	62
Ilustración 9. Funciones de regresión.....	65
Ilustración 10. Funciones de regresión.	66
Ilustración 11. Datos discretos.	68
Ilustración 12. Comparación entre los datos medidos y la función ponderada.....	68
Ilustración 13. ERT predictiva.	71
Ilustración 14. Distribución de la conductividad.	72

Índice de Figuras.

Figura. 1. Porosidad del suelo para modelo de suelo con diferentes contenidos de arcilla.	25
Figura. 2. Transversal 2D que se asemeja a una muestra de roca o suelo, con un espacio poroso completamente saturado de electrolitos en negro y una matriz de roca en blanco.	27
Figura. 3. Se observa las flechas que indican la dirección del campo eléctrico.	27
Figura. 4. Medio poroso idealizado con un único tubo tortuoso de longitud L'	28
Figura. 5. Modelo de la EDL que se forma en una superficie mineral neta con carga negativa	29
Figura. 6. Influencia del pH en la solubilidad de nutrientes en suelo mineral y en suelo orgánico. .	30

Índice de Tablas.

Tabla 1. Tabla periódica de los elementos. Los metales y algunos metaloides.	22
Tabla 2. Determinación experimental de la resistividad eléctrica para soluciones conductoras.	55
Tabla 3. Datos experimentales de Resistividad a diferentes Concentraciones de NaCl.	56
Tabla 4. Datos de resistividad de suelo saturado y resistividad de solución saturante	59
Tabla 5. Resumen de los datos de medición de resistividad eléctrica y la estadística	63

Índice de Mapas.

Mapa. 1 Unidad cartográfica del suelo que corresponde Arauquita, Arauca.	36
Mapa. 2 Ubicación geográfica de Arauquita- Arauca- Colombia.	37
Mapa. 3 Ubicación Granja Santa Elena	38
Mapa. 4. Granja Santa Elena Tres líneas de prospección	38

1. INTRODUCCIÓN.

La Geofísica somera o Geofísica Ambiental y los métodos electromagnéticos; específicamente, la tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones, (ERT 2D, por sus siglas en inglés de two dimensional, Electrical Resistivity Tomography), (Bravo, D., & Benavides-Erazo, J. (2020) faculta la formulación de una aproximación multi-enfoque, como lo afirma Samouëlian, A., et. al., (2005), tanto para el trabajo en campo; como en laboratorio, que permite determinar, la presencia y probable distribución del metal pesado, contaminante cadmio (Cd), en suelos cacaoteros, y es que la presencia de Cd en el cultivo, genera una problemática no solo en la salud humana y la economía de la región, sino como lo asegura Bravo, D. et. al (2024); la necesidad de llenar ese otro vacío en la investigación como lo es: una vez identificadas, la cuantificación de contaminante y determinada su distribución espacial en el subsuelo; la ausencia de estrategias para minimizar la presencia de Cd en la cadena de valor;

El Cd es uno de los metales pesados y contaminante traza para el cultivo de cacao. La presencia de altos niveles de contenido de cadmio, en el suelo o subsuelo destinado al cultivo de cacao, define dos escenarios de problemáticas bien diferenciadas y de alcances considerables:

El primer escenario se refiere al carácter toxicológico para la salud humana y la ingesta de productos de cacao contaminado por Cd, Godt J, et al 2006, indica que el Cd es un el elemento toxicológico para la salud humana tipo I, de riesgo cancerígeno. El segundo escenario, tiene que ver con la economía y el mercado internacional de cacao; debido a regulaciones sanitarias severas, los valores prohibitivos que ha impuesto la Unión Europea (UE), máximo consumidor de cacao en el mundo; frente a las concentraciones de cadmio en los productos y derivados del cacao (Resolución 844/2014 de la UE), que entraron en vigencia en el 2019, han provocado que los productores vean amenazadas sus exportaciones.

La contaminación del suelo y el subsuelo por el Cd, ya sea por actividad trópica o antrópica, es un problema que cada día va haciéndose más creciente y más agudo, por lo tanto, requiere de ser muy bien determinado y caracterizado, sobre todo en predios destinados al cultivo del cacao; con el fin de establecer no solo la dimensión en superficie y en profundidad, sino también, posibles fuentes contaminantes, su abundancia y su propensión de distribución en el subsuelo. (Chaney, R. L., Ryan, J. A., Li, Y. M., & Brown, S. L. (1999)).

El problema de cacao contaminado con cadmio, es problema no solo en Colombia, sino, de los países productores a 10° Norte y 10° Sur del ecuador del continente americano, por ejemplo Chávez E, et al. 2015, manifiesta que en un estudio realizado en Ecuador, sobre 9 fincas y considerando diferentes profundidades, concluyó que todos los sitios muestreados, contenían Cd total recuperable,

de 0.6 mg kg^{-1} , por encima del nivel crítico de la US EPA (U.S. Environmental Protection Agency), fijado, para suelos agrícolas en $0,43 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que indica que se produce contaminación por Cd.

Debido a que el cadmio tiene propiedades físicas, y su facilidad para formar cationes Cd^{2+} en el suelo, resulta conveniente un método que tenga en cuenta las características, como son su naturaleza conductiva, su capacidad iónica para formar compuestos por adsorción física, sorción o desorción; contribuyendo a una acumulación en los sustratos orgánicos e inorgánicos, y produciendo cambios en la resistividad eléctrica de los materiales componentes del subsuelo, es por estas razones que el método geofísico de estudio a aplicar, debe ser aquel que permita el análisis de la resistividad eléctrica, este estudio se denomina Geoeléctrica.

Como factores a tener en cuenta en la selección del método geofísico pertinente, para alcanzar el objetivo, también están, la profundidad y el tamaño de la zona radicular de las plantas de cacao, por cuanto es desde allí, donde la planta se nutre y sufre la contaminación (Chávez et al., 2015), es en esa zona; en la cual se requiere la determinación de la existencia y posible distribución del metal pesado cadmio o de sus compuestos más comunes. (Rodríguez Albarracín, H. S. (2017)).

Benyassine, et al 2017, indica que se ha utilizado esta herramienta, para determinar las vías preferenciales de los flujos de lixiviados, cargados de metales pesados. Gabarrón et al 2020, evaluaron la utilidad de la 2D ERT para determinar, acumulación de metales cerca de la superficie.

Este nuevo método de diagnóstico, exploración y detección, requiere de una aproximación multi enfoque, por cuanto los métodos electromagnéticos de la Geofísica aplicada (i.e, 2D ERT), se debe apoyar también, en diferentes análisis de valores de resistividad y de contenidos del metal traza, así pues, el análisis de laboratorios de física de suelos: proporciona valores de resistividad de muestras de suelo, la metodología de la medición de resistividad en laboratorio, está descrita en el test standard ASTM G-57 (2012) y (Besson, A., et.al. (2004)). Análisis Geoquímico: mediante el análisis químico-analítico, de laboratorios de suelos; por la técnica de espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo de emisión óptica (i.e., ICP-OES), para la medición de los valores de contenido de Cd, en las muestras de suelo, permitirá establecer los valores de contaminante por Cd, en las mismas muestras. (Bravo, D., et. al. (2022) y Chávez, E., et. Al. (2016)). El reconocimiento geológico: determinará la historia o la evolución geológica y nos permitirá enfocarnos, concretamente, en el estudio y caracterización del tipo de suelo y/o de subsuelo prospectado, y tener en cuenta los estudios previos como se determinó en Bravo, D & Benavides-Erazo, (2020), que proporciona evidencia de que la técnica 2D-ERT es una herramienta útil para comprender la distribución del Cd y proporciona una visión general precisa del problema a nivel de granja. Mediante la geoestadística se correlacionaron; las relaciones estrechas entre, resistividad eléctrica, pH del suelo, procedencia y cantidad de contaminantes por Cd, tanto en campo, como en las muestras de suelo en laboratorio.

Los resultados obtenidos, permitieron determinar los parámetros de la distribución en el subsuelo, tales de la contaminación por el metal pesado Cd, o de sus compuestos más comunes como, por ejemplo; carbonato de cadmio (CdCO_3) y/o sulfato de cadmio (CdSO_4) por cuanto el Cd se encuentra formando compuestos; tanto en subsuelo como en los suelos destinados al cultivo del cacao.

La naturaleza no destructiva de los métodos geoeléctricos; es crucial, por cuanto además de asegurar ningún tipo de daño de los ecosistemas bióticos y abióticos, permitirían alcanzar, el objetivo de la investigación. La herramienta 2D ERT permitirá observar gráficamente los contrastes de las diferentes resistividades eléctricas, que posee un subsuelo dependiendo de los materiales constituyentes y/o componentes por sustratos, proyectando un perfil gráfico en dos dimensiones del subsuelo, con las diferentes distribuciones de resistividades. (Plati, C., Loizos, A., & Gkyrtis, K. (2020)).

Este trabajo de tesis describe la manera, como se determinó una novedosa ruta metodológica, con el objetivo de descubrir el rumbo de la distribución, más probable, del contaminante Cd, en el suelo de cultivo y se aplicó a un suelo de una parcela del municipio de Arauca, cuyo principal cultivo es el cacao, se muestran los resultados de asertividad y confirmación del método. Esta nueva ruta metodológica requiere de cinco acciones: 1) Se analiza las tomografías logradas al aplicar la herramienta 2D ERT; para la ubicación y detección en campo, de una muestra de suelo disturbada, representativa del suelo prospectado. 2) La muestra se somete al análisis químico para determinar cuantitativamente la presencia y la abundancia de Cd, por la técnica de espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y, el análisis físico de la muestra permite determinar: el tipo de suelo, el grado de saturación, el grado de acidez y porosidad, los valores de resistividad eléctrica ante variaciones de: pH, nivel de saturación, grado de salinidad y cantidad de dopante de Cd; algunas de estas propiedades físicas del suelo se determinan aplicando la ley de Archie. 3) Conocidas las variaciones de la resistividad eléctrica, se realiza estadísticamente un tratamiento no lineal de los datos, para establecer la función matemática más aproximada, al comportamiento de esas variaciones. Se analizan las características geológicas de la zona, para justificar la presencia del contaminante y las posibles fuentes de contaminación, así como también, los tipos de compuestos más comunes de Cd, para ese tipo de suelo y que pueden servir como, material dopante para el estudio del comportamiento de la resistividad para ese tipo de suelo. 4) Encontrada la función matemática no lineal, se extrapola para hallar el valor de la resistividad a las condiciones naturales del suelo. 5) Determinado el valor de resistividad eléctrica del suelo para las condiciones iniciales y sabiendo el contenido de Cd en el suelo, se ubican; en las mismas tomografías del suelo o subsuelo, la distribución de ese valor encontrado de resistividad y se genera la tomografía predictiva. Para mayor realce, se colorea y se señala la distribución de ese valor de resistividad en las tomografías 2D ERT del terreno.

El presente trabajo de investigación; tuvo como finalidad: primero, servir como modelo a seguir en este tipo de investigación, segundo; determinar, el o los estratos, del subsuelo comprometidos con este tipo de contaminante y tercero, brindar una herramienta de base, para abrir discusiones; frente al análisis de probables fuentes contaminantes y de probables factores de remediación.

En Colombia la corporación colombiana de investigación agropecuaria AGROSAVIA, viene liderando una serie de investigaciones tendientes a esclarecer y mitigar, el fenómeno cadmio en cacao. Este proyecto está enmarcado dentro del Macroproyecto titulado: 'IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS AGROFORESTALES Y VINCULACIÓN DE AVANCES EN EL MANEJO AGRONÓMICO Y POS-COSECHA DE NUEVOS CLONES, PARA MEJORAR PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DEL CACAO EN EL DEPARTAMENTO DE ARAUCA' con código BPIN 2018000100148, aprobado por Minciencias ante el fondo del Sistema General de Regalías, para el departamento de Arauca. Es un proyecto de Agrosavia, en consorcio con Fedecacao y la Gobernación de Arauca. El aporte es particular con respecto a lo que ocurre en suelos cultivados con respecto a la distribución del cadmio a nivel de predio o finca, También denominada unidad productiva UPA.

2. PROBLEMA DESCRIPCION Y FORMULACION.

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es el segundo cultivo de importancia en la agricultura colombiana después del café (Feola et al. 2015, Bravo et al. 2018 y Eitzinger et al. 2018). Colombia representa aproximadamente el 1% de la producción de Cacao a nivel mundial; sin embargo, desde el gobierno y el sector privado, se han realizado diferentes esfuerzos para mejorar, aumentar la producción, y promover la competitividad de Colombia; a nivel internacional (Oxford Business Group, 2014). La mayor producción de cacao en Colombia, se concentra en Santander, que representa el 25% de la producción del país, Nariño con el 11 %, Antioquia con el 10 % y Arauca con el 9 % (Gobierno Digital Colombia, 2017). El departamento de Santander es el principal productor de cacao a nivel nacional, con una participación del 41% del total de la producción, seguido por Antioquia con una participación del 9%, Arauca, Huila 8% cada uno, Tolima con 7% y Nariño en un 6%. (Gobierno Digital Colombia, 2019, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural junio 2019).

Este trabajo tiene por objeto determinar la existencia y la distribución espacial, más probable, del contaminante cadmio; utilizando una aproximación multi-enfoque, de carácter diagnóstico, exploratorio y de detección; basado en los métodos electromagnéticos de la geofísica aplicada específicamente la tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones, la física de suelos, la química analítica y la estadística. Aplicado a un estudio de caso en el municipio de Arauquita, departamento de Arauca.

La corporación colombiana para la investigación agropecuaria AGROSAVIA formula un macroproyecto de investigación para trabajar en colaboración con las asociaciones de productores COOPCACAO, COOMPROCAR La Delicia, y COOPROCO, en los municipios de Tame, Saravena, Arauquita y Fortul, Sistema General de Regalías (SGR) Cacao Arauca: con el objetivo de favorecer el desarrollo del sector cacaotero en el departamento de Arauca. Convenio AGROSAVIA, Gobernación de Arauca y Fedecacao a través del Sistema General de Regalías. La necesidad de asegurar un producto de cacao, libre de contaminante por cadmio, requiere de un decidido estudio que determine la existencia, tanto cuantitativamente en el sentido de determinar las cantidades de cadmio en suelo, como cualitativamente en el sentido de revelar, la más probable distribución de contaminante en el suelo y/o subsuelo.

3. JUSTIFICACIÓN.

La resistividad eléctrica de los suelos, depende de los componentes sólidos, el agua intersticial, la microestructura, la porosidad, el intercambio catiónico o aniónico, el pH del suelo; que establece el tipo de suelo, básico o ácido, así como también, las características ambientales de los suelos. Existen diferentes métodos geofísicos tanto en campo como en laboratorio, para medir la resistividad eléctrica y esta propiedad física, está íntimamente ligado a los materiales componentes de un suelo. Para Kabata-Pendias, A (2004), El suelo, es una mezcla heterogénea de diferentes organismos y sustancias minerales, orgánicas y órgano-minerales, presentes en tres fases: sólida, líquida, gaseosa. Lo que implica, que los metales pesados, se encuentran en diferentes especies, según estén unidos externa o internamente, a varios componentes del suelo, o en la fase líquida. Kabata-Pendias, asegura que la solubilidad de los elementos, por lo tanto, su concentración en la solución del suelo, depende del equilibrio de solubilidad. Dicho equilibrio no es fácil predecir, por lo tanto, con el fin de evaluar la especiación o las formas de unión de los elementos traza en el material del suelo, se han desarrollado diferentes procedimientos analíticos, incluidos los métodos de extracción sucesiva que se aplican ampliamente para la especiación de los metales traza, estos análisis químicos, acompañados de la 2D ERT, se puede configurar como una herramienta diagnóstica. (Bravo, D. & Benavides-Erazo, J (2020) y Benyassine, E. M., et al. (2017))

El presente trabajo es de alta importancia, por cuanto permitiría lograr, una ruta metodológica para la investigación de la contaminación de los suelos, por metales pesados; abundancia, distribución y proponer posibles causas, y formas de mitigar el problema. Esta herramienta, de gran eficiencia, no invasiva y no destructiva, para el diagnóstico de la presencia de contaminante Cd en suelos, destinados al cultivo del cacao, será de manera significativa, un gran apoyo a la cacaocultura de Arauca, al servir como elemento positivo, en la tecnificación de la cadena de valor cacao/chocolate.

El propósito de los estudios de resistividad eléctrica, es determinar la distribución de resistividad eléctrica en el volumen de suelo sondeado. Las corrientes eléctricas generadas artificialmente se suministran al suelo y se miden las diferencias de potencial resultantes. Los patrones de diferencia de potencial proporcionan información sobre la forma de las heterogeneidades del subsuelo y de sus propiedades eléctricas. Los métodos eléctricos utilizan corrientes continuas o corrientes alternas de baja frecuencia para investigar las propiedades eléctricas del subsuelo. De acuerdo a Ekine, A., & Emujakporue, G. (2010), el método de la resistividad eléctrica, se utiliza en el estudio de discontinuidades horizontales y verticales, en las propiedades eléctricas del terreno, así como, en la detección de cuerpos tridimensionales de conductividad eléctrica anómala. Para (Zhao, K. (2010)), la 2D ERT, se ha utilizado habitualmente, en investigaciones hidrogeológicas, y de ingeniería; para investigar la geología del subsuelo poco profundo. Para el presente trabajo, nos permitirá determinar, en campo, el comportamiento de resistividad eléctrica en el suelo, y en las coordenadas en las cuales

exista mayor contraste de resistividad, nos indicará y consentirá obtener una muestra disturbada representativa del suelo.

La presencia de cadmio (Cd) en los suelos de cultivo, es un tema de gran preocupación, y más aún, en ciertas áreas donde se cultiva cacao en Colombia, como, por ejemplo, en el Dpto. de Arauca, en el cual, la falta de tecnificación en la cadena de valor cacao/chocolate, requieren de formas de diagnóstico no invasivas, no destructivas y sobre todo, extensivas, que permitan un costo-beneficio atractivo para su incorporación. Por lo tanto, se deben considerar métodos de diagnóstico basados en las propiedades geofísicas del suelo, como la resistividad de los suelos, para correlacionar y comprender la dinámica del metal con otros parámetros físicos y químicos de las áreas enriquecidas con Cd. De ahí que la evaluación de Instrumentación y Medidas de Laboratorio permitirán inferir un proxy para estudiar su distribución y dinámica a través de los cambios físicos de los compuestos similares al Cd presentes en suelos enriquecidos o contaminados. (Bravo, D., & Benavides-Erazo, J. 2020).

4. OBJETIVOS.

4.1 Generales.

Evaluar un método multi-enfoque, de diagnóstico, exploración y detección; que permita analizar la distribución más probable del contaminante cadmio, en subsuelo cacaotero de una finca; del municipio de Arauquita, departamento de Arauca.

4.2 Específicos.

1. Analizar el comportamiento de la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, hasta una profundidad de 2 m., mediante la técnica geofísica 2D ERT, en un predio de la hacienda Santa Elena del municipio de Arauquita, departamento de Arauca.
2. Analizar variaciones de la resistividad eléctrica con otros parámetros físico-químicos, en las muestras de suelo, tomadas en el punto de mayor contraste de resistividad en campo.
3. Correlacionar la resistividad eléctrica encontrada en campo, con cuantificación del Cd, por la técnica de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES, Optima 5300 DV, Perkin-Elmer, EE. UU.), y las mediciones de resistividad eléctrica, en muestras de suelo, dopadas con Cd; en el laboratorio de física de suelos.
4. Interpretar las tomografías de resistividad eléctrica, que definen la ruta más probable de distribución del cadmio, en el subsuelo cacaotero; caso de estudio en un predio de la Granja Santa Elena, en el municipio de Arauquita, departamento de Arauca.

5. MARCO REFERENCIAL.

Por tratarse de un estudio de Geofísica, necesitamos basar nuestros argumentos en la teoría general electromagnética, aplicada de la manera más ajustada, a la geoelectrica en dos dimensiones, teniendo en cuenta las características propias del suelo y las condiciones de saturación, porosidad, sedimentación, es por esto que se requiere como acercamiento y pauta general el abordaje físico y matemático al problema planteado.

5.1. LAS ECUACIONES DE MAXWELL EN UN MEDIO ISOTROPO Y EN UN MEDIO ANISOTROPO.

El ajuste requerido de las ecuaciones de campo electromagnético, se debe precisamente al tipo de aplicación que se realizará en esta investigación, como lo es la aplicación del método geoelectrico en corriente continua (CC), o como se desea hacer entender; las técnicas de CC, podrían describirse mejor como: que emplean corriente continua variable en el tiempo. (Zhdánov, M. S. (2017)), en la caracterización de los tipos de resistividades presentes en el suelo y/o en muestras de suelo, se debe entender que en los suelos, aparecen muchas fuentes de voltaje en CC, el potencial espontaneo es uno de ellos, y es por lo tanto necesario establecer una firma de reconocimiento a nuestra señal; asegurando que la frecuencia, sea lo suficientemente baja, para que la variación del campo magnético con el tiempo sea nula, es decir, así el término $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ en las ecuaciones de Maxwell, pueda ser ignorado.

Por otro lado, cuando se emplean cuatro contactos óhmicos o simplemente electrodos, dos para inyectar nuestra señal de corriente continua, y otros dos para medir voltaje o potencial, se hace con la finalidad de medir la respuesta del medio a esa señal. Ahora bien, la manera de cómo se inyecta la señal, para obtener esa respuesta, presenta varios métodos, bien para investigar los cambios de polarizabilidad del suelo en sentido vertical, como en sentido horizontal a profundidad aproximada constante. (Orellana, E. 1974)

En la presente investigación, se determinaron las resistividades eléctricas aparentes, debidas a los materiales y/o compuestos existentes en el subsuelo, y en muestras de suelo, empleándose tanto en campo, como en laboratorio el método tetraelectrónico Wenner por cuanto es el método que mejor permite detectar cambios de resistividad horizontal, como lo expresan en sus trabajos de investigación, Loke, M. H. (2004). Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993) y en laboratorio tiene un excelente comportamiento de repetitividad instrumental, por ejemplo, ver a Abdulsamad, F. et. al., (2016), se considera que la desviación respectiva de su media representa la repetibilidad de las mediciones y, por tanto, su incertidumbre, es por esto que se ajustó a la consecución de ese objetivo. El desarrollo que se hará de las ecuaciones de maxwell para obtener la expresión de la ley de Ohm

para el caso macroscópico, que lo definiremos como el caso en el cual el comportamiento de los campos eléctrico y magnético, no depende de la dirección o el sentido de la señal de CC, su respuesta es aproximadamente constante, esta definición nos garantiza, por un lado; como se comprobó en las mediciones, una gran repetitividad en los valores medidos para un gran número de mediciones y por otro lado, mayor simpleza en el tratamiento matemático, al considerar el medio isótropo (Orellana, E. 1974).

En el anexo 1, se realiza un tratamiento físico más riguroso de las ecuaciones de Maxwell y de la resistividad eléctrica, en medios homogéneos isótropos y anisótropos. Es oportuno mencionar que, si se desea hacer un estudio más riguroso del tema, se debe considerar, el caso microscópico, el cual, ya debe tratarse como un medio anisótropo, y por lo tanto se debe estudiar las características físicas como los tensores de esfuerzo, los tensores de deformación, los tensores de resistividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, características físicas como la porosidad, la compactación, el pH en los componentes del suelo y los contenidos mineralógicos. (Orellana, E. 1974) y (Zhdánov, M. S. 2017). Ver Anexo 2 para el tratamiento físico de la resistividad en un medio no homogéneo.

Para el presente caso solo se considera el caso de medio isotrópico, por cuanto no existen, en el medio a estudiar, evidencias de anomalías geológicas, Las longitudes mínimas, donde se instalan las líneas de prospección, que se requieren en los estudios geoeléctricos; comparadas a las longitudes de la complejidad de las formaciones geológicas, permite considerar el medio como isotrópico, para este estudio de caso. Por lo tanto, los efectos de orientación y la anisotropía de la formación pueden no ocultar la respuesta de las formaciones superficiales, lo que induce mayor simplicidad en la interpretación, que si se presentaran formaciones geológicas importantes. En este caso, el diseño del estudio de campo debe planificarse cuidadosamente para superar o reducir los efectos de orientación en la interpretación.

5.2. Método Geoeléctrico. La tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones (2D ERT).

5.2.1 La resistividad eléctrica ρ .

La resistividad eléctrica ρ y/o su inversa la conductividad eléctrica σ , son propiedades físicas intensivas; propias de un material y resultan cuando en el material existe una interacción con el flujo de cargas eléctricas generado por una diferencia de potencial, es decir, Cuando se aplica un potencial eléctrico a un medio material, la resistividad eléctrica, es la respuesta propia de ese material, en la formación de líneas equipotenciales y tubos de corriente transversales, que se puede

cuantificar como $\rho = R \cdot A/L$, donde R es la resistencia eléctrica del material en Ohm, A es el área de sección transversal del tubo en m^2 e L es la longitud del material, medida en m y ρ es la resistividad del medio o material y se mide en Ohm.m (Kraus, J.D. 1986). Mas adelante nos centraremos en las consideraciones teóricas para su medición tanto en campo como en laboratorio.

Tomografía significa representación de un corte o sección, específicamente en Geofísica, alude a una imagen en dos dimensiones (largo y profundidad), de un corte transversal del suelo, en la cual, se observa la distribución continua, de la propiedad física intensiva, de la resistividad eléctrica; la cual depende de los componentes particulados del suelo, porosidad, cantidad de agua, gases entre otros. Para su determinación se requieren de una configuración básica, compuesta por cuatro electrodos enclavados en el suelo a una misma profundidad: A, M, N, B, dos electrodos externos A, B (por convención); de transmisión por los cuales se inyecta una corriente conocida, casi continua y los electrodos internos M, N (por convención); de recepción en los cuales se mide la diferencia de potencial. Para determinar esta imagen de resistividades en el subsuelo, se requiere de la toma de medidas en superficie, pero dirigidas a múltiples profundidades a lo largo de un perfil, esto se logra, instalando en el terreno, y a una misma profundidad unas varillas de acero austenítico, estas aseguran que al paso de la corriente eléctrica casi continua, mediante pulsos rectangulares de corriente o corriente alterna a una frecuencia baja, no sufrirán polarización eléctrica, la cual podría producir lecturas contaminadas; estas varillas de 0.45 m. de longitud y de 0.01 m. de diámetro, reciben el nombre de electrodos, en el presente trabajo se trabajará con 36 electrodos, los que se disponen formando una línea recta, y como de entre varias configuraciones, en las que, para la toma de una medición, se requiere la intervención de cuatro (4) electrodos, se escogió la configuración tetraelectrónica Wenner alfa, por cuanto presenta una mejor sensibilidad y una resolución vertical buena, al igual que una resolución horizontal aceptable, Loke, M. H. (2004). Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993)., modelaron la contribución de la señal eléctrica, evidenciando que este tipo de arreglo en presencia de capas horizontales tiene muy buena resolución vertical. Por su parte, Reynolds, J. M. (2011), estima que esta configuración presenta: buena resolución vertical, pobre profundidad de penetración y una moderada conveniencia para la realización de sondeos eléctricos verticales. La configuración electródica Wenner alfa, presenta una serie de parámetros, entre los cuales está, la disposición equiespacial, de todos los electrodos que participan de una medición, todos los electrodos están conectados, mediante un cable múltiple, a un selector computarizado, que envía una corriente externa conocida, a los electrodos de transmisión, que son los electrodos más externos, y produce una diferencia de potencial o voltaje entre los electrodos de recepción, que se encuentran en el medio, entre mayor sea el equiespaciamento entre los electrodos, mayor será la profundidad de medición o prospección. El modelo Wenner Alfa, define una serie de mediciones que se realizan, para obtener la tomografía 2D, en la cual no se consideran los cambios de resistividad en la dirección perpendicular, pero como las mediciones presentan un carácter volumétrico, las variaciones de resistividad que existan a ambos lados del perfil, se reflejarán en las pseudosecciones

con menores dimensiones y contrastes de resistividad. Por lo tanto, las pseudosecciones de resistividades obtenidas mediante esta técnica, serán mejores en tanto, el suelo presente mayor homogeneidad, en la dirección perpendicular al perfil de la tomografía. Las pseudosecciones, son definidas por el tipo de configuración, de la disposición de electrodos elegido, y para la construcción de la tomografía de resistividad eléctrica en dos dimensiones, es supremamente importante, tanto los valores de medición de resistividad aparente, en cada punto del mallado de pseudosecciones, como el calculado, con el menor error, entre pseudosecciones vecinas. Ver la Ilustración 3, para observar la malla de pseudosecciones y de mediciones en la configuración Wenner alfa y ver la Ilustración 5, para observar el resultado de las mediciones de resistividad aparente y el resultado de las resistividades aparentes calculadas entre pseudosecciones con el menor error y el máximo suavizado. Para la medición en campo y aplicando la configuración Wenner Alfa, se calcula la resistividad aparente como: $\rho = 2\pi aR$; con a separación entre electrodos y R la resistencia eléctrica, y la profundidad de los electrodos b ; cumple con la condición $a > b$, pero en laboratorio esta condición es imposible cumplirse y es la profundidad b mucho mayor que la separación entre electrodos y se requiere de un ajuste, ya propuesto por Wenner y posteriormente por (Wenner, 1916 y Faleiro, E., Asensio, G., & Moreno, J. (2016)

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Ecuación 1. Factor de ajuste para mediciones de resistividad para $b > a$.

5.2.2. Resistividad eléctrica de metales pesados en suelos.

Aunque existe una gran discusión acerca de la definición única y precisa de metales pesados, por cuanto la disponibilidad de estos en los suelos sólo puede existir y entenderse en soluciones líquidas, reconoceremos como metal pesado a aquellos elementos que presentan un peso específico elevado, como lo manifiesta Appenroth, K. J. (2010), y se reconocen como se muestra en la tabla periódica:

Ia																VIIIa					
1 H	IIa															IIa	IVa	Va	VIIa	VIIa	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne				
11 Na	12 Mg	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb				IIb	IIb	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112	113	114	115	116						

Lanthanides:

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Actinides:

Tabla 1. Tabla periódica de los elementos. Los metales y algunos metaloides incluidos en el nuevo término "metales pesados" están enmarcados. Tomado de Appenroth, K 2010

Para la definición de "metales pesados" (1) el bloque de los elementos de transición (centro) (2) los elementos de tierras raras (serie de lantánidos, serie de actínidos en la parte inferior) y (3) los elementos del grupo de plomo en el lado derecho de la tabla forman los tres subgrupos que lo constituyen. (Appenroth, K.,2010).

La contaminación por metales pesados y/o metaloides, ya sea trópica o antrópica es tan evidente que las zonas urbanas y rurales presentan un potencial problema en la bioacumulación. Alloway (2012.) afirma que: En general, los suelos en sitios industriales, pueden tener distintos grupos de contaminantes de metales pesados, que dependen de las industrias respectivas y sus materias primas y productos. Los suelos en todas las áreas urbanas generalmente están contaminados con plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd) y cobre (Cu) provenientes del tráfico, la pintura y muchas otras

fuentes urbanas no específicas. Aunque la composición de metales pesados de los suelos agrícolas tiende a estar más estrechamente gobernada por el material original, las entradas de fuentes tales como la deposición de partículas de aerosol transportadas atmosféricamente a larga distancia de la combustión de combustibles fósiles y otras fuentes, aplicaciones de materiales orgánicos y los contaminantes en los fertilizantes también pueden ser significativos, a esto se une la contaminación por sedimentación y más aún al presentarse en los suelos; los desbordamientos de los ríos. La eliminación de Pb de la gasolina y las pinturas, los cambios en el tipo y la estructura de las industrias y las estrictas normas sobre emisiones atmosféricas y descargas de aguas residuales han resultado en una reducción general de las cargas de metales pesados que llegan a los suelos en muchos países. Sin embargo, la contaminación histórica aún afecta los suelos en muchas áreas y puede tener impactos durante décadas o incluso siglos después, sobre todo en países donde los controles a las emisiones de gases, sólidos y líquidos; son precarios o inexistentes. (Alloway, B. J. (Ed.122). (2012)).

La resistividad eléctrica ha sido ampliamente utilizada para evaluar las propiedades geotécnicas de suelos contaminados con metales pesados, debido a su método de medición en el subsuelo, de carácter no destructivo, continuo y que cubre amplias zonas. Fundamentalmente, la técnica ERT es idónea en la detección de metales pesados, tanto en la capa superior como en el subsuelo (Bravo y Benavides-Erazo, 2020). En comparación con otras técnicas, como los gradientes difusos dinámicos en películas delgadas (DGT) o los métodos portátiles de difracción de rayos X, que también son técnicas no invasivas in situ (Adler et al., 2020; Purwadi, I., (2021).), la precisión de la ERT es mayor (Vásconez-Maza, M. D., et al., 2019). En recientes estudios se ha confirmado que la técnica ERT es muy eficaz, (con un contenido de Cd en el suelo de 1,6 mg/kg en promedio) y bien correlacionada ($R^2 = 0,82$) para evaluar el cadmio en suelos cacaoteros en Colombia (Gil et al., 2021). Asimismo, la ERT se considera un “proxy” para mapear y monitorear el flujo de contaminantes en el nivel del subsuelo, ya que puede evaluar los cambios geoeléctricos espaciales y temporales inducidos por este movimiento de contaminantes (Caterina, D., et. al. (2017)). En el campo, y debido a la heterogeneidad del suelo, la resistividad eléctrica se define como la resistividad de un terreno imaginario homogéneo e isotrópico, por lo que se denomina resistividad aparente ' ρ_a ', (Loke et al., 2003).

5.3. Variaciones de la resistividad eléctrica con otros parámetros físico-químicos.

Son muchos los parámetros biológicos, físicos y químicos, que tienen relación con la resistividad eléctrica; y que sus variaciones producen también variaciones en menor o mayor grado, es por ello, que se requiere delimitar y considerar, aquellas que, por su importancia en la estructura edafológica

del suelo, requieren mayor atención; por ello consideraremos como principales propiedades físicas, que tienen relación directa con la resistividad eléctrica a: la porosidad, la compactación, el pH y el contenido de agua, y el contenido mineralógico. Conocer esto, nos permitirá establecer los límites para los cuales las grandes variaciones, de contenido mineralógico, se logren, con pequeñas variaciones de los otros parámetros.

5.3.1. La resistividad eléctrica y la porosidad.

La estructura del suelo en la que se presenta la disposición de los minerales, gases y líquidos; todos ellos coexistiendo a una escala, y definiendo unas propiedades físicas, químicas y biológicas muy específicas para cada tipo de suelo, es la que nos interesa investigar. Precisamente la caracterización de las propiedades físicas de un tipo de estructura de suelo en el campo o en el laboratorio, se centra en la medición de densidad aparente, porosidad, conductividad, resistencia a la penetración (Roger-Estrade, J, 2004)

La resistividad eléctrica de los suelos saturados, depende de la resistividad de las partículas del suelo, de la resistividad de la superficie a través de la doble capa y de la resistividad del electrolito. En los suelos costeros, una alta salinidad del agua intersticial anula la conductividad de las partículas y la conductividad de la superficie (Kim, J. H., et al. 2011).

Existe una relación entre porosidad, compactación, contenido de arcilla, salinidad y resistividad eléctrica como lo expone tanto teóricamente como experimentalmente (Seladji, S. et. al. 2010) y (Kim, J. H., et. al 2011), esto nos permite determinar la porosidad por métodos eléctricos, midiendo la resistividad del suelo a medida que se la satura con un fluido de saturación, con pH aproximado a 7 pH, por ejemplo, una solución preparada con cloruro de sodio NaCl a una concentración constante de 0.9 %.

En la figura 1 a) se observa como la curva de porosidad del suelo, es decreciente cuando existe mayor cantidad de suelo arenoso y/o limoso, y menor cantidad de arcilla; llega a su mínimo cuando la mezcla se desarrolla entre contenido de arena, limo y arcilla; a continuación, la curva de porosidad es creciente, a medida que en el contenido de suelo arcillo-arenoso se aumenta el contenido de arcilla, es decir, entre mayor presencia de arcilla mayor porosidad.

En la figura 1 b) se observa la variación de la resistividad eléctrica, con cambios en suelos con diferentes contenidos de arcilla - arena y porcentaje de porosidad del suelo; con los cambios para diferente contenido de agua salada, en la muestra de suelo. Se observa que se trata de una figura Log, Log; en la abscisa se encuentra la variable de contenido de agua salada (NaCl) (g/L) y en la variable ordenada se encuentra la resistividad eléctrica (Ohm m), la inclinación de la recta con pendiente negativa, nos revela una dependencia en función potencial, con potencia negativa y nos asegura que la resistividad del suelo disminuye potencialmente con el contenido de salinidad, la

figura 1 b), muestra el comportamiento de la resistividad eléctrica para una familia de curvas en las que en cada una han cambiado los porcentajes de contenido de arcilla-arena, y de porosidad del suelo, la recta decreciente, obsérvese la línea continua en negro, que se obtiene para suelo compuesto con alto contenido de arenas y la línea discontinua en negro con alta saturación de agua salada. Kim, J. H., et al. (2011)., realizaron mediciones de porosidad mediante mediciones de resistividad eléctrica y señalan que esta técnica puede usarse eficazmente para la evaluación de porosidad en pruebas de laboratorio.

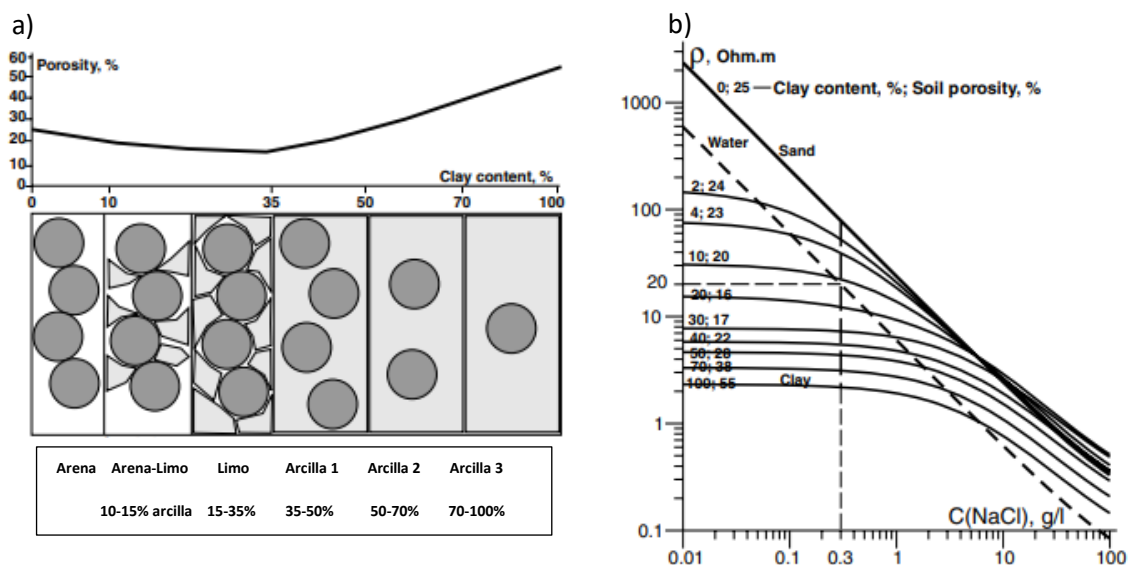


Figura. 1. a) Porosidad del suelo para modelo de suelo con diferentes contenidos de arcilla. b) Resistividad eléctrica para diferentes mezclas de suelo. (Tomado de Shevvin, V. et. al. 2006)

Archie (1942) relacionó la porosidad del suelo con la resistividad eléctrica (inversa de la conductividad eléctrica) de la siguiente manera:

$$F = \frac{\rho_b}{\rho_w} = a n_T^{-m}; n_T = 1 - \frac{d_s}{d_g}$$

Ecuación 2. Factor de formación y expresión para la porosidad. (Ley de Archie (1942))

Donde F es el factor de formación y siendo ρ_b y ρ_w resistividad del suelo saturado y resistividad del poro de agua, respectivamente, a y m son constantes empíricas que dependen del tipo de suelo y/o material, n_T es la porosidad, d_s y d_g son la densidad aparente del suelo y densidad específica de grano. (Kim, J. H., et. al 2011) y (Seladji, S. et. al. 2010) y (Samouëlian, A., 2005). (26)), nos infiere que podemos determinar el factor de formación F , al medir las resistividades de suelo saturado y su respectiva resistividad de agua saturante, y que a su vez al determinar experimentalmente el factor

de formación F estaremos determinando la porosidad aparente del suelo, entre otras propiedades. Ver Anexo 2 para un desarrollo más riguroso de la Ley de Archie.

5.3.2. La resistividad eléctrica y la compactación del suelo.

Existen técnicas para determinar en campo el grado de compactación del suelo, mediante el análisis de muestras de suelo: El análisis de los parámetros petrofísicos derivados de los datos experimentales sugirió que: (i) la tortuosidad eléctrica del suelo arcilloso agrícola se vio significativamente afectada por la compactación y (ii) el suelo forestal, tenía una microestructura singular, desde el punto de vista eléctrico, y tenía zonas conductoras aisladas; asociadas con arcilla incrustada en un medio poco conductor, compuesto principalmente de solución de suelo y granos de cuarzo. Existen técnicas de laboratorio, que hacen uso de las mediciones de las resistividades, tanto de suelos saturados, como de los fluidos; que producen la saturación, y determinan compactación en suelos de baja cohesión, como lo son los suelos agrícolas, en los que el principal medio conductor es la conductividad electrolítica del agua y ésta a su vez, se encuentra relacionada con el medio intersticial, o el medio poroso del suelo. (Kowalczyk, S., et. al. 2014), (Seladji, S., 2010) y (Samouëlian, A., 2005). Mansourian, D., Cornelis, (2020), realiza un estudio en laboratorio y en campo, en el que determina las variaciones de la resistividad eléctrica en suelos arcillosos con la compactación, determinando que la resistividad puede aumentar con la compactación del suelo, debido a la disminución de la porosidad y que existe relación con la resistencia a la penetración.

La compactación del suelo afecta de manera directa a la porosidad del suelo, a la relación de huecos por donde fluye el agua intersticial y a la densidad aparente, por lo tanto, cualquier variación en uno de ellos, está definiendo cualitativamente el grado de compactación del suelo. (Kowalczyk, S, et. al. 2014). Pruebas realizadas en suelos arcillosos, determinaron, que la resistividad eléctrica de la arcilla compactada es anisótropa., Abu-Hassanein, Z (1996)), Seladji, S. (2010).

5.3.3. Tortuosidad.

Si consideramos una muestra con poros y con fluido de saturación como se muestra en la figura 2, en la cual los poros están indicados en color blanco y los huecos saturados con color negro, es por estas comunicaciones intersticiales de fluido donde los iones cargados definen un tubo de corriente que presenta una tortuosidad de longitud $L' \geq L$, donde L es la longitud del segmento considerado.

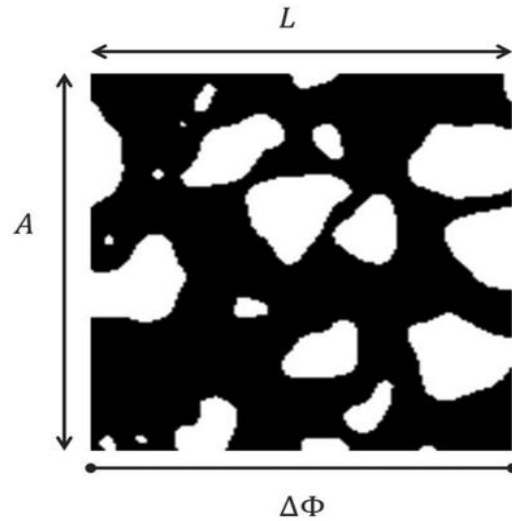


Figura. 2 transversal 2D que se asemeja a una muestra de roca o suelo, con un espacio poroso completamente saturado de electrolitos en negro y una matriz de roca en blanco, de longitud L con una diferencia de potencial aplicada entre los lados verticales de la muestra. (Tomada de Berg, C. F., et. al. 2021)

La tortuosidad es un descriptor geométrico, que nos permite inferir el flujo de cargas eléctricas en el interior de un material poroso. Una línea de campo eléctrico es una línea desde la entrada hasta la salida que siempre es paralela al campo eléctrico, como se visualiza en la figura 3,

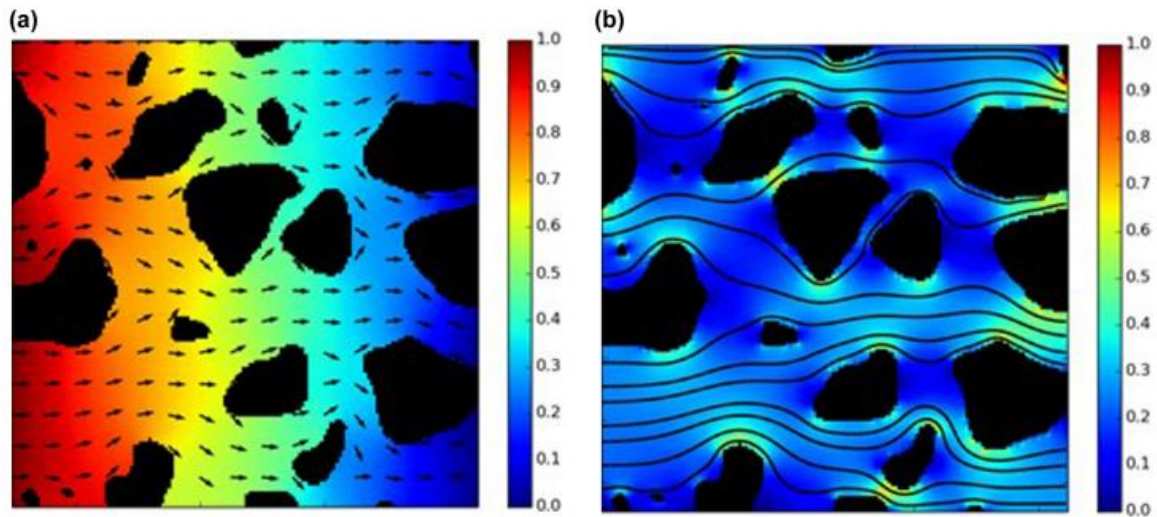


Figura. 3. Se observa las flechas que indican la dirección del campo eléctrico $E = -\nabla\Phi$, donde los colores muestran el potencial eléctrico subyacente. (3.a) indica: El potencial es 1 a la izquierda y 0 a la derecha. (3.b) Líneas que indican la familia de líneas de campo eléctrico a través del espacio poroso, donde los colores de fondo representan la magnitud normalizada del campo electrostático: $E = \nabla\Phi$. (Tomada de Berg, C. F., et. al. 2021).

Si consideramos una muestra de roca o suelo en el cual se presenta la situación descrita, en la figura. 3.a), se puede pensar en un principio en un tubo conductor de flujo de electrolitos, como se muestra en la figura 3.b) con un tubo de tortuosidad de longitud L' . La longitud real L_G de una línea de campo eléctrico G dentro de los poros de la muestra de roca o suelo, es más larga que la longitud de la

muestra de roca L . En otras palabras, la línea de campo eléctrico es tortuosa y la magnitud se describe mediante la tortuosidad $\tau(G) = L_G/L$ de la línea de campo.

En la figura 4. se observa un único tubo tortuoso de longitud L' en el interior de una caja de lado L y por tanto la tortuosidad $\tau = L'/L$, en la que $L_G \cong L'$ y por lo tanto, el potencial aplicado $\Delta\Phi$ entre la longitud de la línea de campo, da la intensidad del campo eléctrico, $E' = \Delta\Phi/L'$ definiendo en este tubo una densidad de corriente $J' = \sigma \cdot E' = \sigma \cdot \Delta\Phi/L'$, que será $1/\tau = 1/(L'/L)$ veces más pequeño que si se tratara de un tubo tortuoso recto de longitud L para el cual $J = \sigma \cdot \Delta\Phi/L$.

En ese tubo tortuoso recto la conductividad efectiva será $\sigma_0 = \phi\sigma_w$. Para un tubo tortuoso que aumenta su volumen en el factor, $(1/\tau)$ y también disminuya la conductancia en el mismo factor, actúan juntos para disminuir la conductividad efectiva del medio, definiendo la conductividad efectiva como: (Berg C.F., 2012 y Berg C.F., et. al. 2022)

$$\sigma_0 = \sigma_w \phi \tau^{-2}$$

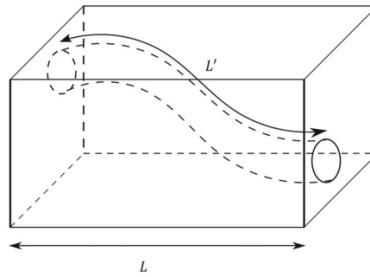


Figura. 4. Medio poroso idealizado con un único tubo tortuoso de longitud L' en el interior de una caja de lado L . (Tomado de Berg C. F., et. al (2022))

5.3.4. La Resistividad Eléctrica, el pH y el Contenido de Agua en el Suelo.

El nivel ácido o básico de los suelos, también es un factor que influye en la medición de la resistividad del suelo: Las propiedades químicas del suelo, como el pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CEC), la salinidad del suelo se puede determinar de manera eficiente mediante la resistividad eléctrica del suelo. El principio básico para obtener la resistividad química del suelo a través de la resistividad eléctrica, es medir la corriente que fluye entre las sondas que es inversamente proporcional a la resistencia del suelo, cuando se aplica un voltaje constante a una de las dos sondas colocadas en el suelo, o para medir directamente la resistividad eléctrica usando ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias en suelos. Para este propósito, se utilizaron métodos de autopotencial (SP), método de sonda de cuatro electrodos, perfilado eléctrico (EP), sondeo eléctrico vertical (VES) y perfilado electromagnético sin contacto (NEP) para medir las

propiedades eléctricas del suelo. (Murad, O. F. (2012). Binley A., et al. (2020) define la doble capa eléctrica EDL (por sus siglas en inglés de Electric Double Layer) como la zona de actividad de cargas entre la superficie mineral con el espacio poroso interconectado con los fluidos de cargas formadas por iones cargados, en la figura 5, se observa con referencia al Cuarzo, que es el mineral más abundante en los suelos no consolidados y cercanos a la superficie, esta actividad de cargas eléctricas positivas, se realiza cuando el pH es menor que el pH de punto cero, y de cargas negativas cuando el pH es mayor que el pH de punto cero, lo que nos da una idea de la importancia del pH en la actividad de flujos de carga eléctrica intersticial en los componentes del suelo. Binley A., et al. (2020)

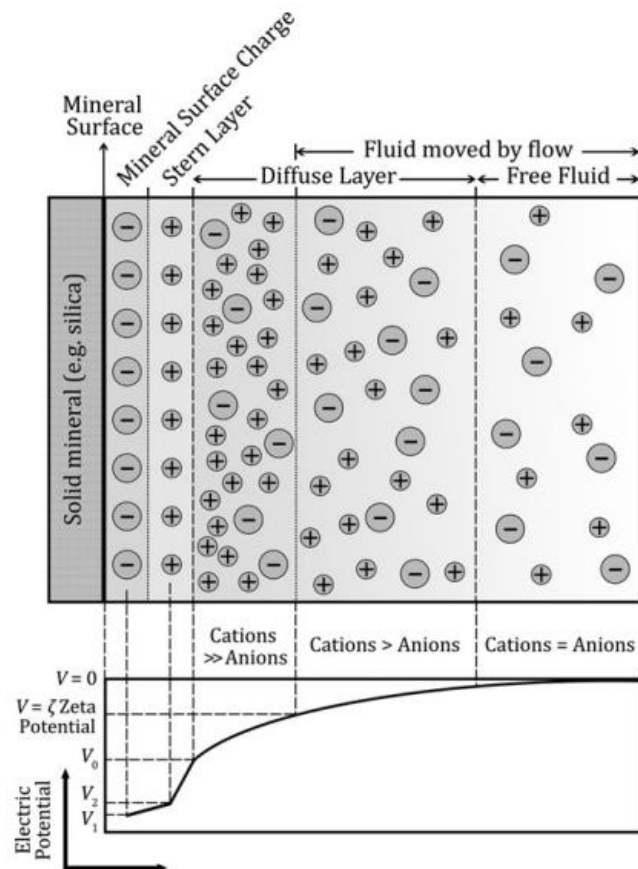


Figura. 5. Modelo de la EDL que se forma en una superficie mineral neta con carga negativa (el caso más común cuando el pH del agua subterránea es mayor que el punto de carga cero) muestra la distribución del potencial V con la distancia desde la superficie (Tomado de Binley A., 2020)

Es muy importante determinar el tipo de pH que posee el suelo, y como se forman los nutrientes a partir del suelo mineral, en el cual se puede tratar de un suelo o sustrato orgánico o inorgánico, por cuanto conjuntamente con el comportamiento de la concentración de hidrógenos en el suelo se presentara una facilidad para disolver los nutrientes minerales, ver figura 5.

En la figura 6, se observa como la solubilidad de nutrientes en los diferentes pH de suelos, de acuerdo a trabajos como Curtis D., et al., (2016) y Sharpley A. (1991) La materia orgánica disuelta

(DOM) es un sustrato importante para los procesos biológicos del suelo. Los cambios en el pH del suelo por adiciones de ácidos y bases, como la aplicación de fertilizantes amoniacales y cal, pueden alterar la capacidad de los suelos para retener cationes y aniones.

Por otro lado, la investigadora Willemsen, J, asegura que la adsorción de contaminantes orgánicos por minerales arcillosos, se puede predecir mediante software molecular, aprovechando el hecho de que las arcillas son adsorbentes de alta superficie específica, y se encuentran de forma abundantes en suelos naturales. La adsorción se observa principalmente en las superficies basales exteriores con una fuerte relación inversa entre el grado de adsorción y la densidad de carga de la superficie de la arcilla, ya que las moléculas contaminantes ocupan preferentemente los parches sin carga más hidrófobos en cada superficie. El análisis detallado de la energética de adsorción revela grandes contribuciones entrópicas favorables a la adsorción. Willemsen, J. A. (2021).

El incremento del contenido de agua del suelo implica una disminución en la resistividad eléctrica del suelo. Esta relación entre el parámetro eléctrico de la resistividad y las cargas móviles presentes en la solución suelo, obedece a una ecuación exponencial de la ley de Boltzmann. Cuando el contenido de agua está por debajo del rango de agua de película capilar, se observa la relación más clara entre la resistividad eléctrica y el contenido de agua, lo que permite estudiar el suelo y las aguas subterráneas. Con un alto contenido de agua, es detectable la dependencia de la resistividad eléctrica; del contenido de aniones intercambiables, el pH y algunas otras propiedades, (Pozdnyakov, A. I., 2006) y (Samouëlian, A., 2005).

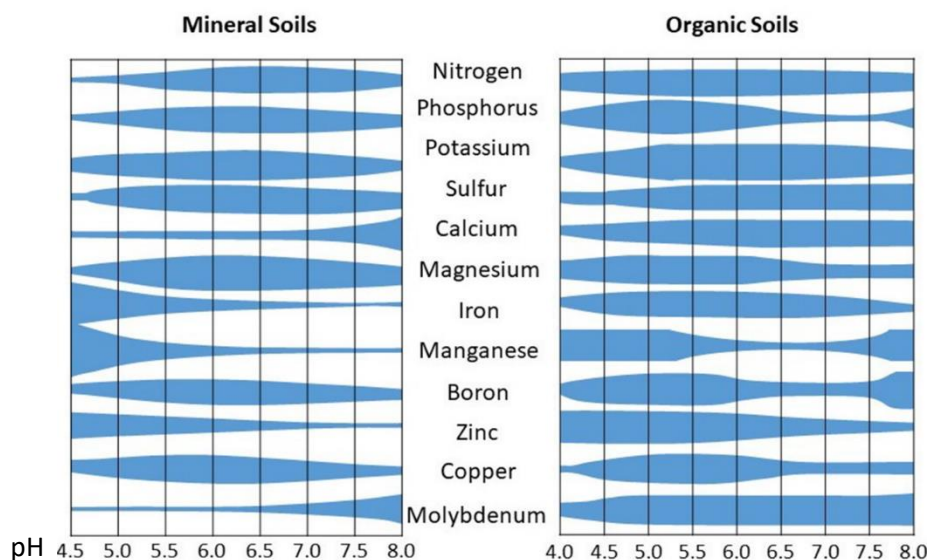


Figura. 6. Influencia del pH en la solubilidad de nutrientes en suelo mineral y en suelo orgánico. (Tomado de Kumaragamage, D., Warren, J., & Spiers, G. (2021).). La grafica indica el intervalo de pH para los cuales la capacidad del suelo de solubilizar los nutrientes minerales es mayor o menor (Hartemink, A. E., & Barrow)

La figura No. 6, indica el intervalo de pH, para los cuales la capacidad del suelo, de solubilizar los nutrientes minerales, es mayor o menor. (Hartemink, A. E., & Barrow, N. J. (2023)).

$$\sum_{i=1}^m \frac{N_i}{N_{i0}} = \exp \left(-\varphi \sum_{i=1}^m \frac{v_i e}{kT} \right)$$

Ecuación 3. Esta relación entre el parámetro eléctrico de la resistividad y las cargas móviles presentes en la solución suelo, ecuación exponencial de la ley de Boltzmann.

$\sum_{i=1}^m N_i/N_{i0}$ es la densidad relativa de las cargas eléctricas móviles, v_i es la valencia del i-ésimo ion e es la carga del electrón, k es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta, φ es el potencial eléctrico, que está relacionado con la ley de Ohm con la resistividad eléctrica. (Pozdnyakov, A. I., 2006)

5.3.5. La resistividad eléctrica y el contenido mineralógico del suelo.

Se han reportado ensayos, realizados con muestras, en los cuales se observa que la resistividad eléctrica depende de una gran variedad de propiedades físicas: La resistividad eléctrica es una función de una serie de propiedades del suelo, incluida la naturaleza de los constituyentes sólidos (distribución del tamaño de las partículas, mineralogía) (Samouëlian A.,(2005)), disposición de los vacíos (porosidad, distribución del tamaño de los poros, conectividad), grado de saturación del agua (contenido de agua), resistividad eléctrica del fluido (concentración de soluto) y temperatura. El medio de aire es un aislante (es decir, infinitamente resistivo), la resistividad de la solución de agua es una función de la concentración iónica, y la resistividad de los granos sólidos está relacionada con la densidad de cargas eléctricas en la superficie de los constituyentes. Estos parámetros afectan la resistividad eléctrica, pero de diferentes maneras y en diferentes grados. Se han realizado experimentos de resistividad eléctrica para establecer relaciones entre la resistividad eléctrica y cada una de estas características del suelo. (Samouëlian, A., (2005)) y (Banton, O., et. al. (1997)). y Soares Gerscovich, D. M., & Vipulanandan, C. (2023).

En particular, estudios como el de (Zha, F, et al.(2021)), en los que han analizado efectos significativos de los iones de metales pesados, sobre las propiedades geotécnicas del suelo contaminado, que podrían predecirse utilizando la resistividad del fluido de los poros, de una manera más efectiva, los mismos autores reportan entre otras conclusiones; que el deterioro de las propiedades geológicas del suelo, después de la contaminación por metales pesados ,se atribuyen a la reducción del espesor de la doble capa difusa de partículas del suelo.

5.3.6. La resistividad eléctrica y la ley de Archie.

Debido a la naturaleza de este tipo de suelo, y concretamente, la respuesta del suelo a la saturación, y ya que, se está investigando la resistividad del suelo, considero de gran importancia, como fuente de información y de análisis, aplicar la ley empírica de Archie, la cual nos brindará mayor conocimiento general del tipo de suelo en cuanto a textura, estructura, contaminantes o alteraciones y porosidad, saturación, compactación y fertilización. (Werban, U. (2009). Debido a las características de inundación que presentan los suelos de esta zona, es necesario realizar un análisis muy detallado de los resultados que arroje la aplicación de la ley de Archie a las muestras de suelo.

Se determina el factor de formación ver Anexo 1 B.

5.4. La resistividad aparente e inversión de datos.

Existe una gran variedad de programas computacionales que, a partir de una cantidad de datos de los valores de resistividad aparente, la cual se define, debido a la gran cantidad de materiales presentes en el suelo y el subsuelo que hacen que exista una gran variedad de resistividades y por medio de ello, se ha desarrollado una técnica rápida para la inversión de datos de levantamientos de tomografía de resistividad eléctrica. Esta técnica se basa en el método de mínimos cuadrados con restricciones de suavidad y produce un modelo de subsuperficie 2-D que está libre de distorsiones en la pseudosección de resistividad aparente causada por la geometría de la matriz de electrodos utilizada. Se utiliza un modelo de tierra homogéneo, como modelo inicial, para el cual, se pueden calcular analíticamente los valores de la derivada parcial de la resistividad aparente. Las pruebas con una variedad de modelos, y datos de estudios de campo, muestran que, esta técnica es insensible al ruido aleatorio, siempre que, se use un factor de amortiguamiento, lo suficientemente grande, y que puede resolver, estructuras que causan anomalías superpuestas en la pseudosección (Loke, M. H., & Barker, R. D. (1995)).

5.5. Inversión de datos.

La inversión de datos, se realiza con la finalidad de sugerir, una probable distribución continua, entre los datos puntuales de resistividad eléctrica medidos en el subsuelo, y los datos calculados. Dahlin, T., & Loke, M. H. (2018). Nos indican que, la inversión de datos da como resultado, modelos que muestran secciones verticales de variación, de resistividad, para cada una de las líneas prospectadas. Estos cálculos presentan una incertidumbre que se debe corroborar entre las diferencias de los datos medidos y los datos calculados, observando que su discrepancia se la menor posible. Las secciones de resistividad indican cambios que se interpretan como cambios de capa

superficial con menor resistividad, lo que probablemente puede estar asociado con capas de suelo de diferente espesor y composición. Dahlin, T., & Loke, M. H. (2018)., Bernstone, C., et al. (2000). Para el presente trabajo la inversión de datos se realiza con el programa ResIPy el cual presenta una etapa de preprocesamiento, en el cual se puede efectuar un filtrado manual de datos, si requiere, en la etapa de inversión se pueden realizar los ajustes de si se desea realizar una inversión por Pseudo Marquardt, Regularized Inversion with Linear Filtering, Regularized Inversion with Quadratic Filtering o Qualitative Solution, se define el target_decrease que es un número real que permite al usuario especificar la reducción relativa del desajuste en cada iteración. se puede crear una de dos tipos de mallas de inversión cuadrilátera o triangular.

Debido a que existen infinitas soluciones, se opta por aproximar los datos y el modelo a la más probable solución del problema es decir el mejor ajuste ente los datos medidos, los calculados para determinar los más probables valores esperados. Dahlin, T., & Loke, M. H. (2018).

5.6. Generación y análisis de tomografías geoelectricas.

La solución del problema inverso, en geoelectrica, se trata de un gráfico, que recrea la distribución continua de valores de resistividad eléctrica, indicando variaciones suaves, o contrastes bruscos de los valores de resistividad, que se diferencian por los valores de resistividad eléctrica a los cuales se les asocia una tonalidad de color, en escala lineal o logarítmica, que, a su vez, implican presencia de diferentes tipos de materiales, constituyentes del subsuelo. A estos mapas de distribución de resistividad eléctrica se les denomina: Tomografía de Resistividad Eléctrica en 2 Dimensiones o 2D ERT. Como su nombre lo indica, la tomografía nos representa un corte transversal, o perfil de terreno, en el cual se observan: los contrastes de resistividad en diferentes colores, a diferentes longitudes y profundidades de la línea de prospección, la escala de colores con los rangos de resistividad, también las tomografías de los valores de resistividad aparente medida y la calculada, por pseudosección. Ver figura de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D. (, (ERT 2D)).

5.7. Detección de metales pesados por espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo de tipo óptico (ICP-OES).

El instrumento que actualmente presenta los mejores resultados en la medición de contenidos de metales pesados es la técnica de las técnicas espectrométricas, y para el caso de cacao, particularmente la espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo; ya sea de tipo óptico (ICP-OES) o acoplado a masas (ICP-MS); o incluso, la última tecnología en espectrometrías, que es acoplada a masas y con láser de ablación (ICP-MS-LA) (Rodríguez-Giraldo et al., 2022). Esta técnica

ha sido ampliamente estudiada y aplicada en estudios con diferentes matrices del cultivo o sistema de cacao; como lo son: el suelo, el tejido vegetal de cacao, como hojarasca, hojas frescas, raíces, tallo; o particularmente los granos de cacao en sus diferentes estadios; analizando Cd desde la semilla fresca en la mazorca de cacao; pasando por las fermentaciones de los granos, hasta nibs y cascarilla (Bravo et al., 2022).

En física un plasma puede ser definido como un sistema estadístico cualquiera, que contenga partículas móviles cargadas. Como lo establece Ichimaru, S. (2018), esta definición permite considerar no solamente plasma en los gases, sino también en sólidos; el fenómeno electrónico en semiconductores, semimetales y metales, pueden ser vistos como efecto plasma en sólidos. En el caso de la distribución de electrones en semimetales y metales, la densidad es tan alta que debemos tener en cuenta la degeneración provocada por el principio de Pauli. En consecuencia, los electrones de conducción degenerados que se encuentran en los metales blandos, se denominan plasma cuántico.

5.7.1. Generalidades del ICP-OES

La técnica analítica ICP-OES, que como lo manifiesta Khan et al. (2022), es una técnica analítica potente, versátil y avanzada con excelentes propiedades de detección. Debido a sus características extraordinarias, se ha empleado ampliamente para el análisis de una amplia variedad de elementos químicos, con gran éxito. Comparado con la técnica inductively coupled plasma-mass-spectrometry ICP-OES la ICP-MS, ofrece el menor tiempo de detección, límites de detección más bajos, un rango dinámico lineal más amplio, y una mayor tolerabilidad de la matriz, así como interferencias químicas insignificantes y una precisión de partes por trillón (ng kg^{-1}). La casa Perkin Elmer, asegura que puede manejar múltiples variedades de muestras, incluidos líquidos acuosos, inorgánicos, orgánicos y sólidos también. Khan et al. 2022, asegura en un reporte reciente, evidenciaron que la técnica ICP-OES, se ha usado en varias determinaciones analíticas, incluyendo análisis de alimentos, investigaciones agrícolas, estudios geológicos, análisis de drogas/metabolitos y ciencias ambientales y forenses. Para la detección de Cd, esta técnica se ha utilizado con gran éxito, como lo señalan Chaves, E. et al. (2010), para la determinación de Cd en suelos cacaoteros del Ecuador, igualmente Bravo D. et al. (2022) para la cuantificación de Cd en suelos cacaoteros de Colombia.

En la problemática de Cd en cacao, se evalúan unos rangos de cadmio dependiendo de la matriz. Por ejemplo, para suelos se puede encontrar valores desde 0.1 hasta 30 mg kg^{-1} del metal (Bravo & Braissant 2022). Para el caso de hojas, puede ser 4 veces más de estos valores (Chávez et al., 2016) o incluso en granos se pueden encontrar valores de hasta 6 u 8 mg kg^{-1} (Bravo et al., 2023 Submitted, Bravo, comunicación personal). En este sentido, es muy importante en los métodos espectrométricos, ya sean de tipo ICP-OES o ICP-MS, el límite de cuantificación (LOQ) y el límite de

detección (LOD) (Bravo & Benavides-Erazo 2020; Bravo et al., 2022); así como tener materiales de referencia certificados, como los internacionales tipo NIST y los europeos ERM (ERM-branded materials).

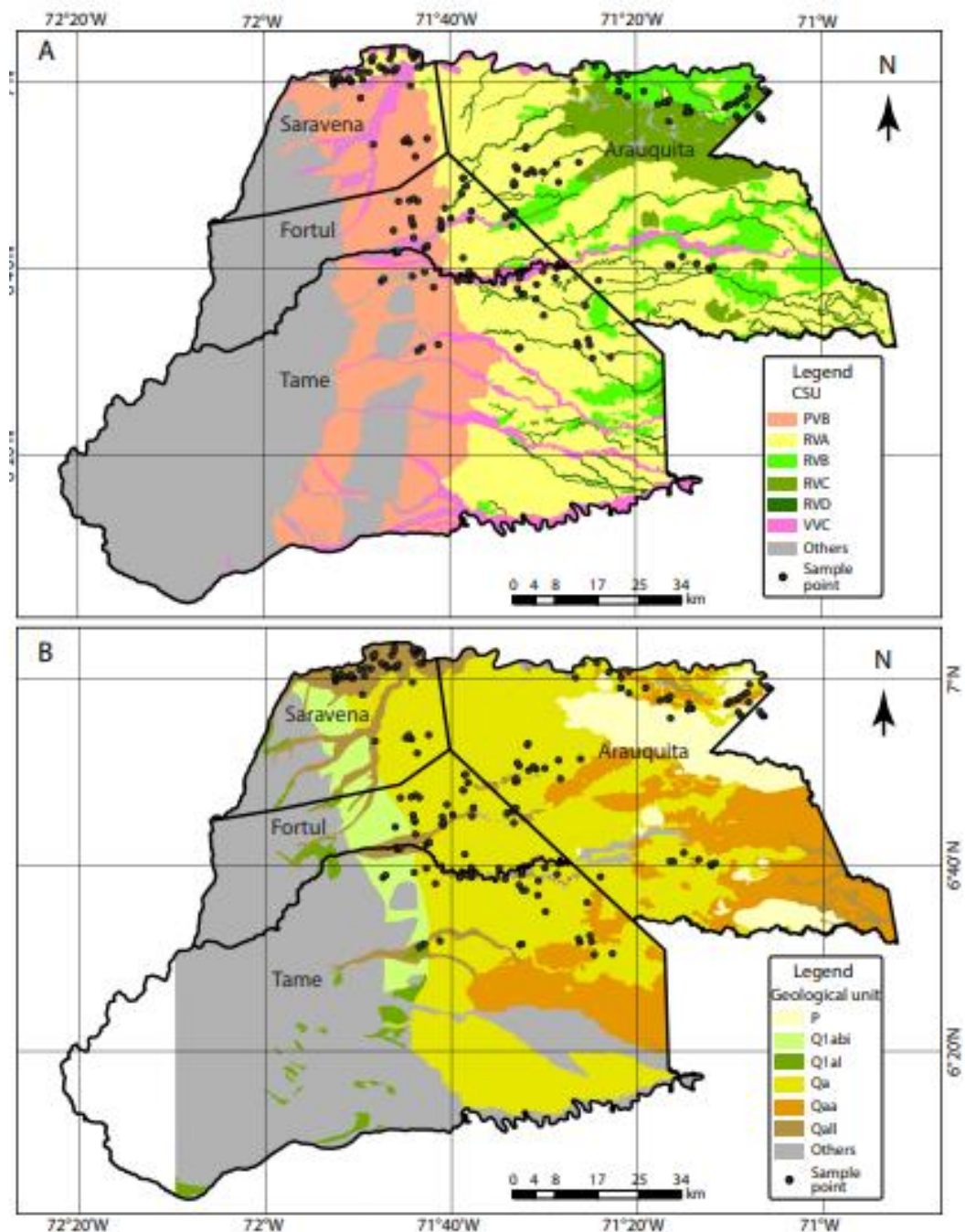
5.8 Resumen. Geología general de la zona y ubicación de la zona prospectada.

5.8.1 Geología general de Arauquita

Arauquita, con un área de 1780 Km², está localizada al noroccidente del departamento de Arauca ver Mapa No.1, en el extremo norte de la cuenca de Antepaís de los Llanos Orientales de Colombia, y hace parte de la Peneplanicie de la Orinoquia. En el área afloran unidades aluviales de edad cuaternaria, en especial depósitos aluviales en Llanuras Inundables (Qall), en Planicies Extensas (Qa), en Llanuras Inundables Asociados a Material Orgánico (Qaa), y Depósitos de Orillares (Qao). La geología del subsuelo comprende una plataforma débilmente inclinada hacia el oeste, configurada sobre un zócalo de rocas Precámbrico- Paleozoicas sobre el cual reposa una espesa sucesión de sedimentitas meso-cenozoicas de origen marino costero a continental. El estilo estructural está definido por la presencia de fallas normales de edad Paleozoica, las cuales configuran un notorio rasgo tectónico-estratigráfico conocido como el "Graben de Arauca". Estas fallas en general, evidencian un evento de reactivación durante el Paleógeno-Neógeno. Las muestras de suelos permiten observar un tipo de suelo franco-arcillosos, propios en esta parte de los Llanos Orientales y que se derivan de sedimentos recientes de origen aluvial, caracterizados por alto contenido de hierro y aluminio, y la pérdida por lixiviación de minerales básicos esenciales para el desarrollo de la vegetación debido al exceso de humedad durante la época de lluvias. En consecuencia, los suelos presentan un alto grado de acidez con el desarrollo frecuente de lateritas debido a la alternancia entre el estancamiento de las aguas y la desecación del suelo (IGAC, 1991). La actividad económica está restringida a la explotación de hidrocarburos, a la agricultura y a la ganadería extensiva. En el área se presentan tres fenómenos naturales que generan amenaza para la población y la infraestructura, como son las inundaciones, el socavamiento lateral de los ríos y los sismos. (De Casanare, y. Arauca Colombia. INGEOMINAS, Instituto colombiano de geología y minería. 2010).

En el mapa 1 se puede observar las unidades cartográficas del suelo (UCS) de Arauca se describen a continuación, ver mapa 1. A): PVB=conos aluviales en piedemonte; RVA=terrazas en llanura alimentaria; RVB=llanuras de desbordamiento en llanura alimentaria; RVC=huecos en llanura alimentaria; RVD=valles en llanura alimentaria; VVC=planicies en valle aluvial. Y la descripción de

las unidades geológicas, (UG), mapa 2. B): P=bordes de humedales; Q1abi=depósitos de abanicos inferiores; Q1al=depósitos aluviales antiguos; Qa=depósitos aluviales en llanuras extensas; Qaa=depósitos aluviales de llanura alimentaria asociados a material orgánico; Qall=depósitos de llanura alimentaria. Otros=otros CSU o unidad geológica. Bravo et al. (2024)

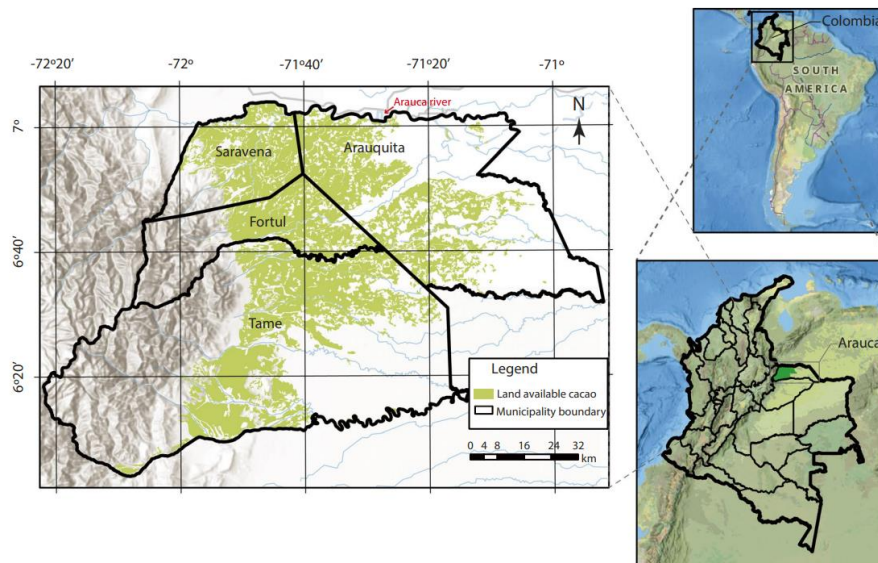


Mapa. 1. A) Unidad cartográfica del suelo, (UCS), prestar observar la zona de la UCS correspondiente a la unidad RVB. B) Unidades geológicas, observar las unidades Qa y Qaa. Son las unidades a las cuales corresponde Arauquita, Arauca. Tomado de Bravo et. al., (2024)

5.8.2. Ubicación de la zona de estudio.

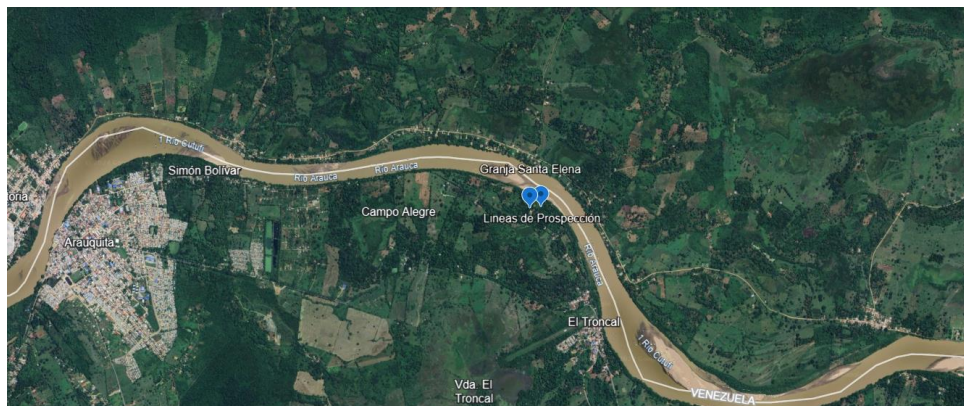
La Granja Santa Elena se encuentra hacia la parte oriental, en la entrada del municipio de Arauquita por la vía principal, con coordenadas de georreferencia: $7^{\circ}01'56''\text{N}$ $71^{\circ}23'22''\text{W}$, observar el mapa 2, en el que se puede apreciar la proximidad de la rivera del río Arauca, con la zona de estudio y con mayor detalle, la ubicación de las líneas prospectadas geo eléctricamente, en el mapa 3, se puede observar i) la cercanía del predio a la rivera del río Arauca y ii) la orientación, este a oeste, de las tres líneas geoelectricas.

Debido al gran volumen de precipitaciones de lluvia intensa durante el año 2023, que causaron inundaciones, la prospección se vio aplazada por tres ocasiones la primera de enero a marzo debido a problemas de orden público en la región, que no brindaban las garantías mínimas para realizar el trabajo de campo y en dos ocasiones de marzo a junio, por altas precipitaciones e inundaciones que se registraron en la zona ver la Ilustración 1, en la que se puede observar que i) el periodo seco o moderadamente seco, durante el cual hubiese sido el más idóneo para recolectar los datos de campo, la falta de garantías en la seguridad de la vida y de los equipos, no lo permitieron y ii) el volumen de precipitaciones durante el año, que impidieron el ingreso a la zona de trabajo de campo, iii) el tiempo climático de julio, permitió realizar las líneas de prospección a mediados de julio del 2023. I



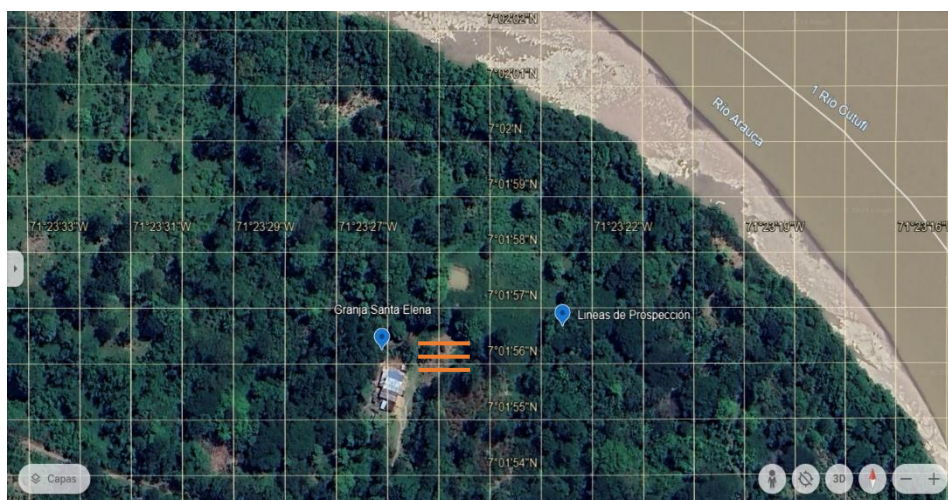
Mapa. 2 Ubicación geográfica de Arauquita- Arauca- Colombia. Tomado de Bravo et. al., (2024)

En el mapa 3 se aprecia la ubicación general de la hacienda Santa Elena, en donde se definió el predio a estudiar.



Mapa. 3 Granja Santa Elena 7°01'56"N 71°23'22"W. Tomado de Google Earth (Ver 10.49.0.0)

En el mapa 4 se puede apreciar los cultivos de cacao, las líneas de prospección definidas para el estudio y la proximidad a la riera del rio Arauca.



Mapa. 4. Granja Santa Elena Tres líneas de prospección en 7°01'56"N 71°23'22"W. Tomado de Google Earth (Ver 10.49.0.0)

En la ilustración 1 se observa los valores de las precipitaciones en el año 2023

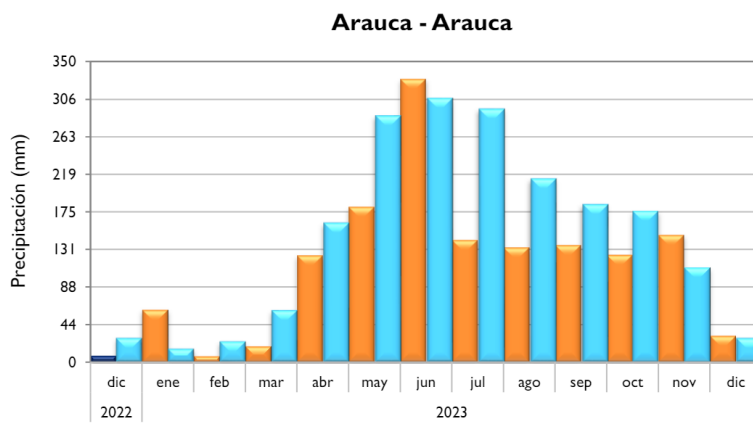


Ilustración 1. Precipitaciones e Inundaciones. (Tomado de Boletín Climatológico. IDEAM (2023))

6. METODOLOGÍA.

Para alcanzar el objetivo específico 1, se necesitó, de un trabajo de campo, que requirió aplicar la herramienta de la ERT 2D, en un predio de la hacienda Santa Elena, del municipio de Arauquita, departamento de Arauca, y de acuerdo al tipo de terreno, se puede requerir el levantamiento topográfico. Una vez analizadas las tomografías de las tres líneas de prospección se determinan los puntos de mayor contraste de resistividades y se determinan tanto la longitud, con respecto al centro de toma de datos, como de profundidad, con respecto a la línea de prospección, con esta información se obtienen las muestras de suelo.

El objetivo específico 2, exige el trabajo en los laboratorios de química analítica de Agrosavia y en el laboratorio de Física de Suelos de la Universidad de Nariño; en el primero se determinan, por medio de ICP-OES, los valores totales del metal pesado cadmio, presente en las muestras de suelo, tomadas en campo, en el segundo; se determinan los valores de resistividad eléctrica, tratando de variar sólo el contenido mineralógico, con el suministro de material contaminante de cadmio, de alta pureza, diluido en un ácido, que por su cantidad y su grado de dilución, no cause variación en la medida de la resistividad.

Los objetivos específicos 3 y 4 requieren de los resultados encontrados en los objetivos específicos 1 y 2 y con ellos se requiere de la fase de procesamiento y análisis de los datos encontrados con la finalidad de argumentar los resultados y de construir las tomografías predictivas, que permitirán observar la distribución del cadmio en ese suelo.

6.1 Trabajo de Campo.

En campo se determinarán los sitios de muestreo más relevantes, por cuanto serán los que presentan un alto contraste en los valores de las resistividades, lo cual se observará al analizar la tomografía del predio. La ubicación para el registro de la tomografía, que fue estudiada previamente, según las escorrentías del agua lluvia y, tratando de ubicar los puntos en campo en donde se formen los depósitos de sedimentos y en los cuales se puedan acumular los materiales o componentes del suelo, se observará que se definen tres puntos en todo los terrenos: un primer punto que es a la entrada o en la parte más alta del terreno, un segundo punto que es la plantación en sí y un tercer punto que corresponde a los puntos de acumulación o sedimentación. En cada uno de estos puntos se realizarán la toma de datos según el método Wenner α , con estos datos se procederá a la generación de las tomografías de resistividad eléctrica (ERT) mediante el programa de inversión ResIPy, y se determinarán por análisis de contraste, in situ, las direcciones de los puntos de muestreo tanto longitud horizontal como profundidad y número de línea, con referencia a las líneas de prospección.

6.1.1 Tendido de Ristras de Prospección Geoeléctrica Método Wenner α

a.- Espaciado entre electrodos.

El equiespaciado entre electrodos se determina teniendo en cuenta la profundidad de estudio y el número de electrodos, para el presente trabajo nos interesa la zona radicular de la planta, la cual la llamaremos profundidad específica z_e , y nos interesa trabajar aproximadamente a 2.13 m de profundidad, de acuerdo a Loke et al., (2010), la relación entre la profundidad específica z_e y la longitud de la transecta L , es de 0.173; entonces la longitud de la línea será:

$$\frac{z_e}{L} = 0.173; \text{ de donde, si } z_e = 2.13 \text{ m entonces } L = 12.31 \text{ m}$$

Y, por lo tanto, el espaciado eléctrico será:

$$a = \frac{L}{n-1}; \text{ para este estudio } n=36 \text{ electrodos, } a = 0.35 \text{ m}$$

b. Resolución de la ERT 2D Wenner α .

La resolución horizontal está determinada por la longitud equiespacial, que para este tipo de estudio es de $a = 0.35 \text{ m}$. Resolución lateral razonablemente buena. Sensitivo a cambios verticales en la ρ del subsuelo, bajo el centro del arreglo. Loke y Barker (1996b)

c. Ventajas del arreglo Wenner α .

Profundidad de investigación aproximada del 20% de la longitud total del tendido, $z_e = 2.13 \text{ m}$., para este tipo de estudio. Ideal para estructuras horizontales. Su intensidad de señal es fuerte. Esto puede ser un factor decisivo si el estudio es hecho en áreas con alto nivel de ruido ambiental. Loke y Barker (1996b) y Dahlin et al. (2002)

d. Desventajas del arreglo Wenner α .

Es menos sensitivo a cambios horizontales de la resistividad ρ . Su densidad de datos es muy pobre. Pobre en la detección de estructuras verticales. Pobre cobertura horizontal. Dahlin et al. (2002).

e. Principales aplicaciones del arreglo Wenner α .

Ideal para mapear estructuras horizontales, sills o estratos sedimentarios. Loke y Barker (1996b) y Dahlin et al. (2002), Chaali, N., Bravo, D., et. al. (2022) y para nuestro caso, debido al tipo de suelos sedimentarios que existen en la zona de estudio, es el argumento fundamental para elegirlo.

f. Procedimiento en campo para la aplicación del método Wenner α .

Una vez seleccionados los predios y las ubicaciones en dichos predios, se procederá a tender las tres transectas definidas por tres ristras I y las tres ristras II formando tres líneas rectas, cada línea estarán separadas entre ellas por 1 m, y los electrodos en cada línea estarán separados 0.35 m; se debe prestar atención que entre las ristras I y II, también exista una separación de 0.35 m, de tal manera que el equipo de control se ubicará en el centro, Las ristras se tienden con dirección del

oeste hacia el este. ver Mapa 3. (Bravo, D., & Benavides-Erazo, J. (2020) y (Chaali, N., Bravo, D., et. al. (2022)).

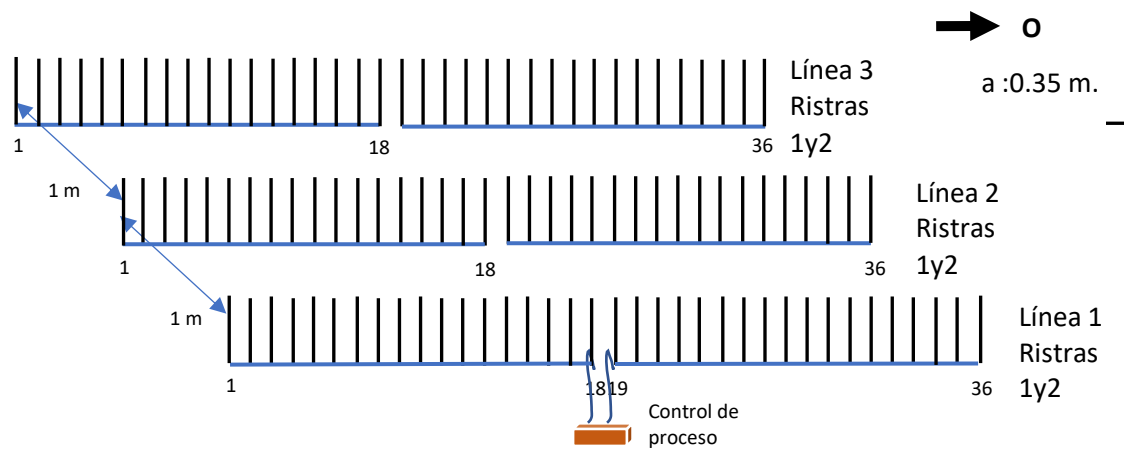


Ilustración 2. Tendido de las líneas, cada línea se compone de dos ristras y cada ristra está conectada a 18 electrodos: A las ristras I se conectaron los electrodos de 1 al 18 y a las ristras II se conectarán los otros 18 electrodos del 19 al 36 electrodos con distancia entre electrodos de 0.35 m. (Fuente propia)

6.1.2. Generación de Tomografía 2D-3D (*In Situ*).

Se toman las 198 mediciones correspondientes a la medición de los valores de resistividad por cada línea de prospección, de acuerdo al arreglo Wenner α para 36 electrodos, y se alojarán en el formato previamente preparado, los datos permitirán, en el mismo campo, observar las distribuciones de las resistividades aparentes, según la existencia de los materiales que constituyen ese subsuelo. Los datos se tomarán en formato requerido para el programa ResIPy Protocol DC o también en formato Res2dInv (2D/3D) de Geotomo, entre otros, y se realizará la inversión de datos para obtener la tomografía 2D (*In Situ*) en el programa ResIPy Ver 3.4.5, este programa permite, con dos líneas medidas, realizar una aproximación 3D y con esto se obtienen más argumentos para el análisis de datos. Esta acción se requiere para establecer el punto del subsuelo prospectado, que presenta mayor contraste y, por tanto, el punto donde confluyen gran cantidad de materiales constituyentes del subsuelo y son el objeto de nuestra búsqueda o muestra. Una vez realizadas las 198 mediciones de resistividad aparente por cada línea, se encontrarán las tomografías de campo, en las que se presentan los valores con alto contraste, y más cercanos desde la superficie, lográndose determinar el punto de muestreo. de suelo: 2 kg de suelo para medición de resistividad en laboratorio de suelos y 3 kg para el laboratorio de química analítica ICP OES, se procede de acuerdo a las norma técnicas para la extracción de la muestra y para su almacenamiento.

Toma de datos y generación de la tomografía In Situ, se realiza el levantamiento de datos de tres líneas separadas entre sí 1 m, y la separación entre electrodos de 0.35 m; como se observa en la Ilustración 3, la profundidad de investigación es de hasta 2.26 m, y una longitud por línea de 12.25 m de acuerdo al arreglo Wenner.

6.1.3. Toma de Muestra de Suelo.

Para determinar propiedades Físicas y Químicas, se requiere de muestras de suelo perturbado, estas se extraen de acuerdo a la norma técnica, que consisten en, una vez determinado el punto de muestreo mediante la tomografía lograda en el estudio de Geoeléctrica; se debe realizar una calicata pedogenética, la cual permite la inspección visual del contenido de humedad de suelo, en la zona de raíces del cultivo, lo que entrega una idea de la disponibilidad de agua para las plantas, permite ver grado de compactación del terreno, profundidad del suelo, presencia o no de capas impermeables, ver estructura y textura, y el tomar muestra de cada horizonte del suelo, para enviarlas a un laboratorio, permite recopilar información química acerca de ese suelo. Una calicata pedogenética, consiste en la realización, sobre el suelo de estudio, de una excavación de 1 m x 1 m x profundidad de muestreo, de tal manera que queden expuestos los horizontes de que se compone el suelo. (Bravo D., et al. 2018)

6.2. Laboratorio de Física de Suelos.

Una vez obtenidas técnicamente las muestras de suelo, según la norma NTC 3656, cada muestra deberá tener 2000 g de muestra de suelo disturbada. Se embalarán y se colocarán en bolsa plástica de cierre hermético con su correspondiente identificación y se reservará en la nevera de icopor con el gel refrigerante. (Bravo D, Benavides-Erazo J., (2020)).

6.2.1. Preparación y Secado de las muestras para análisis de física de suelos.

Para todas las mediciones que se requieran muestra de suelo para la medición de propiedades físico químicas, se procedió así, se aseguró que la muestra de suelo esté correctamente etiquetada y cuantificada, en este caso, 300 g, se extendió la muestra de suelo en una bandeja de secado limpia y plana. Se distribuye uniformemente el suelo en una capa delgada para facilitar el proceso de secado. Si la muestra contiene piedras, raíces u otros materiales grandes que no se desean en el análisis, se deberá retirarlos manualmente antes del secado, se colocará la bandeja con la muestra

de suelo en un horno de secado precalentado a una temperatura moderada, entre 105°C y 110°C. Este proceso se realiza para la cantidad de suelo y por su contenido de humedad, durante 24 h. se monitorea cada 8 h el proceso de secado para evitar la sobre-sequedad, lo que podría alterar las propiedades del suelo. se continuará secando la muestra hasta que su cantidad de masa se estabilice, lo que indica que se ha eliminado la mayor parte de la humedad. Este punto se alcanza cuando las mediciones de peso de la muestra son consistentes durante un período prolongado, una vez que la muestra esté completamente seca, se retirará la bandeja del horno y se dejará enfriar a temperatura ambiente antes de manipularla o almacenarla. Esto evita cualquier cambio en la humedad debido a la condensación, en balanza analítica extraer los 270 g de muestra.

6.2.2 Medición del pH y del porcentaje de saturación de la muestra de suelo.

A. Medición de pH.

La muestra se somete a mediciones de pH, obteniéndose valores ácidos o básicos, esto nos permitirá elegir el tipo de matriz contaminante de Cd; que mejor se acople al tipo de suelo, y se aplicará el protocolo para análisis de resistividad eléctrica, de muestras de suelo de acuerdo al método tetraelectródico.

Se toman de la muestra seca 50 gramos, se tamiza por malla de 2mm, con esto descartaremos trozos de madera o piedras que podrían estar presentes de la muestra tamizada, se toma aproximadamente 10 g de muestra de suelo, y se disuelve con aproximadamente 20 mL de agua bidestilada y desionizada, se agita y se deja reposar por 5 minutos, para lograr la total disolución de los nutrientes y la sedimentación de los sólidos no solubles, se debe asegurar que el bulbo y la unión de referencia de la sonda HI9814 (Hanna Instruments HI9814 Groline Multiparameter probe, previamente calibrada con solución pH 6.86±0.24), debe estar totalmente sumergida en la muestra, éste proceso se repite 3 veces para obtener tres lecturas de pH de la muestra de suelo, se determina el pH del suelo mediante promedio de las mediciones.

B. Volumen de agua para determinar porcentaje de saturación muestra de suelo

Se procedió a depositar en un tubo de ensayo una cantidad de masa de 5 mg de suelo y se depositó con una micropipeta cantidades de 1 mL de agua desionizada y bidestilada, e inmediatamente se realizaba agitación, así hasta llegar a la cantidad para la cual se presenta la máxima saturación,

6.2.3. Volumen de suelo saturado

Se lava y seca cuidadosamente el picnómetro de 50 ml. con agua desionizada y bidestilada, con la cual se desarrolla todo el proceso, se pesa el picnómetro, limpio y seco, utilizando la balanza analítica y se obtuvo un peso, que será el "Peso del picnómetro vacío" (P_{vacio}). Por otro lado, se preparó la muestra de suelo: se toman 10. g de la muestra de suelo, ya lista para análisis de laboratorio. Se Tritura la muestra para que logre una consistencia uniforme, se pesa una cantidad conocida de la muestra de suelo seco, utilizando la balanza analítica; este será el "Peso de la muestra de suelo seco" (P_{mss}). Para determinar el volumen del picnómetro con agua, se llena el picnómetro con agua desionizada y bidestilada, hasta el tope y se coloca el tapón, se seca cuidadosamente la parte exterior del picnómetro para eliminar cualquier exceso de agua, se pesa el picnómetro lleno de agua utilizando la balanza analítica que será el "Peso del picnómetro lleno de agua" (P_w). Se determina el volumen de agua desplazada por la muestra de suelo, para esto se vierte el agua del picnómetro y se seca cuidadosamente la parte interior, se colocó la muestra de suelo dentro del picnómetro utilizando un embudo, se llena el picnómetro con agua destilada hasta el tope y se coloca el tapón, se seca cuidadosamente la parte exterior del picnómetro para eliminar cualquier exceso de agua, se pesa el picnómetro lleno de agua y muestra de suelo utilizando la balanza analítica y se anota su peso, que fue el "Peso del picnómetro lleno de agua y suelo" (P_{ws}). Se calcula la saturación así: se calcula el volumen de agua desplazada por la muestra de suelo, utilizando la siguiente fórmula: Volumen de agua desplazada = $P_{ws} - P_v - P_{ms} + P_w$, la saturación del suelo se calcula dividiendo el volumen de agua desplazada por el volumen total del picnómetro (volumen de agua desplazada / volumen del picnómetro), y luego multiplicando por 100 para obtener el porcentaje de saturación. %

6.2.4. Arreglo experimental y medición de resistividad.

A.- Calibración de la sonda tetraelectrónica.

Para realizar la calibración de la sonda de medición de la resistividad eléctrica se procederá de la siguiente manera:

Se lava con el agua destilada y desionizada, con que se realizaran todas las mediciones; todas las partes de la sonda incluidos los electrodos, las paredes internas y externas, y su correspondiente tapa, así como también las terminales que se conectan a los electrodos, esto se hace para evitar la contaminación cruzada en laboratorio. Una vez la sonda esté completamente seca, se conectarán los electrodos de la sonda a los terminales del resistivímetro UNIT 510, mediante cables coaxiales de 40 cm de longitud, teniendo cuidado de la polaridad de las terminales de corriente y de potencial. Se depositan 20 mL de la

solución NaCl al 0.9 %, observando que los electrodos estén completamente sumergidos en la solución, se esperan 3 min y se procede a la medición del valor de la resistividad eléctrica, suministrando una corriente constante de 0.050 mA con una fuente programable BK Precision 9104 y se registró el voltaje obtenido en un multímetro UNI - T UT71D esto se repitió por 5 veces. De las cuales se tomará el promedio. A continuación, se depositaron 9 veces 10 mL de la solución de NaCl al 0.9 % y por cada vez se esperarán 3 min para realizar 10 mediciones de las cuales se tomará el promedio.

B.- Medición de resistividad eléctrica del NaCl a diferentes concentraciones.

Se preparan soluciones de NaCl a diferentes concentraciones desde 0.1 % hasta 0.9 % y para cada concentración se repite el paso anterior en la misma sonda tetraelectrónica, con el fin de obtener la curva de calibración.

Arreglo experimental.

El arreglo experimental consistirá en definir dos muestra de suelo con 200 g, como probeta de control, las que fueron sometidas a medición de resistividad, cambiando solo contenido agua bi destilada y la otra cambiando solo contenido de ácido HNO_3 y una muestras de 200 g de suelo, como probeta experimental, en la que se dopará con diferentes contenidos del estándar de cadmio, en las cuales debido al dopaje, existirán cambios del valor de resistividad eléctrica que responderá a: cambios de acides, cambios en el contenido mineralógico y de la cantidad de agua. Para todas las muestras se dejaron constantes la porosidad y la compactación, por cuanto al tratarse de un mismo suelo con alto contenido de arcilla, estos parámetros permanecen constantes.

Las mediciones de resistividad en laboratorio, de muestras de suelo de la finca de cacao, se ajustan a procesos de pequeña escala que como lo indica (Bosch, D. (2016)) los experimentos de laboratorio son necesarios para investigar los procesos a pequeña escala que rigen la interacción compuestos de Cd-suelo-salmuera. También proporcionan un medio para calibrar los resultados provenientes de métodos geofísicos a escala de campo.

Antes de la calibración, las primeras mediciones se realizarán en muestras de suelo, sin enmienda de Cd. El objetivo de realizar una calibración, fue correlacionar los valores de resistividad, con el contenido de Cd de muestras de suelo, modificadas con reactivos puros de Cd. Sería de esperar que estos valores, se encontraren en suelos enriquecidos o contaminados con Cd. Se utilizará un control de fuente de Cd. La fuente soluble, será la solución de estándar de cadmio 1000 mg kg^{-1} (Matrix: HNO_3 al 2 %, concentración $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$, calidad analítica $\geq 99.99 \%$ p/p de pureza, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.). se mezclará suavemente durante 10 min a temperatura ambiente usando un vórtex, para 50 mL de solución preparada con el contaminante, de acuerdo a la literatura, Gil, J.P. et. al, para la cantidad máxima de Cd en granos, la muestra de suelo puede aportar un máximo de 0.8 mg Cd por cada 1000 g de suelo. Para el caso de 250 g de muestra el máximo contenido de Cd

será de 0.2 mg Cd; el diseño experimental se elaboró de tal manera que, por cada 5ml de solución contaminante, se deposite un total de 0.02 mg de Cd, previamente se realiza la capacidad de saturación de la muestra de suelo, obteniéndose una saturación en proporción de 5 mg de suelo por 8.8 mL de agua desionizada y bidestilada, por lo que se eligió como unidad de solución los 5ml. La resistividad eléctrica se mide y cuantifica, como los valores medios de una matriz de cuatro electrodos Wenner, de acuerdo con el protocolo G 57 de la Sección Americana de la Asociación Internacional para Pruebas de Materiales (ASTM 2012).

Para cada medición de resistividad en las muestras de suelos, en cada uno de la secuencia de dopado, se obtendrán un total de 30 mediciones por cada adición de contaminante. El tiempo de relajación y/o de filtrado de la solución contaminante en la muestra de suelo y su correspondiente mezcla durarán 5 min, las 30 mediciones, se procesarán mediante el método de normalización de Gauss, de donde se obtiene el valor de la media, con sus respectivas desviaciones estándar y el error.

Debido al cambio de unidades significativo que se realiza para las distancias entre electrodos a y su profundidad b , se requiere ajustar las mediciones de laboratorio, por cuanto en campo se puede asegurar que $a > b$, y la resistividad aparente se determina mediante la relación $\rho = 2\pi aR$; pero en el tratamiento tetraelectródico, en laboratorio se cumple que $b > a$ y por lo tanto se deberá emplear la relación: (Wayal, V., et al., (2021) y Wenner, F. (1916).)

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

ρ : Resistividad (Ohm.m);

a : distancia entre electrodos (m);

R : Resistencia(m);

b : profundidad (m)

Ecuación 4. Relación para determinar la Resistividad eléctrica en el laboratorio.

Esto se hace, con la finalidad de determinar la reacción del suelo ante la presencia del suplemento de cadmio suministrado y así alcanzar el segundo objetivo planteado, en la presente investigación. Este dato del comportamiento de la resistividad eléctrica de la muestra, ante los cambios únicamente de dopado de mineral contaminante, nos permitirá determinar, por regresión no lineal, el valor mínimo de resistividad al que se tiende, como reacción de la muestra a la presencia de contaminante.

6.3. Aplicación de la Ley de Archie y Determinación de la Porosidad.

Para aplicar la ley de Archie a las muestras de suelo, si bien las dos leyes de Archie, suponen que la conducción en la matriz de rocas o de suelo, es exclusivamente debida a las soluciones que se encuentran entre los poros de ellas, solución de poro, no se han hecho mayores esfuerzos para comprobar la idoneidad y aplicabilidad de la ley de Archie a los estados saturados o no saturados de los suelos.

6.4. Calibración de la sonda de medición de resistividad tetraelectrónica.

Para realizar la calibración de la sonda de medición de la resistividad eléctrica se procede de la siguiente manera:

Se lavó con el agua destilada y desionizada, con que se realizaran todas las mediciones; todas las partes de la sonda incluidos los electrodos, las paredes internas y externas, y su correspondiente tapa, así como también las terminales que se conectan a los electrodos, esto se hace para evitar la contaminación cruzada en laboratorio. Una vez la sonda estuvo completamente seca, se conectaron los electrodos de la sonda a los terminales del resistivímetro UNIT 510, mediante cables coaxiales de 40 cm de longitud, teniendo cuidado de la polaridad de las terminales de corriente y de potencial. Se depositan 20 mL de la solución NaCl al 0.9 %, observando que los electrodos estén completamente sumergidos en la solución, se esperan 3 min y se procede a la medición del valor de la resistividad eléctrica, suministrando una corriente constante de 0.050 mA con una fuente programable BK Precision 9104 y se registró el voltaje obtenido en un multímetro UNI - T UT71D esto se repitió por 5 veces. De las cuales se tomó el promedio. A continuación, se depositaron 9 veces 10 mL de la solución de NaCl al 0.9 % y por cada vez se esperaron 3 min para realizar 10 mediciones de las cuales se tomó el promedio.

Los valores de la medición de resistividad eléctrica a una temperatura ambiente de 20°C se realizan de acuerdo a los trabajos desarrollado por Russell, E. J., (2010), para mediciones de la resistividad eléctrica en muestras de arcillas, por el método tetraelectrónico, se relacionan en la siguiente tabla y se comparan con el valor teórico de 72.3 ± 5.7 (Ohm m).

6.5. Laboratorio de Química Analítica.

Para determinar la textura del suelo, se recolecta un conjunto de muestras de suelo, perturbado de 1 kg de cada uno de las nueve calicatas pedogenética. Las muestras de suelo, se pasaron por diferentes tamices utilizando un agitador automático, durante 5 min. El tamaño de partícula, se midió en suelo seco al aire < 2 mm, siguiendo la metodología propuesta en otro lugar (Bouyoucos, 1962). Este método se logra utilizando un hidrómetro (ASTM Soil Hydrometer 152H; Temp. 20 °C), previa

eliminación de carbonato con tratamiento HCl y de materia orgánica con 30% H₂O₂ (Bravo & Benavides-Erazo 2020).

El análisis químico, se realiza en muestras de suelo, obtenidas de calicata pedogenética, en diferentes sitios de campo. Las muestras serán analizadas para las siguientes propiedades: pH, H₂O determinado por el método potenciométrico (Peech, 2016). El pH se mide en una solución suelo-agua (1:2,5 p/v) utilizando un electrodo InLab Max Pro (Automatic Titrator T90, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, EE. UU.).

El elemento traza presente en las muestras de suelo se determinan mediante la técnica analítica: ICP-OES: la muestra de suelo para ser sometida al análisis por ICP-OES, requiere de un tratamiento, el cual sugerido por Chávez E.S, et al. (2015), se equilibran 2 g de suelo con las siguientes relaciones suelo-reactivo: 1:10 y 1:4 y tiempo de equilibrio de 5 y 60 min, respectivamente para HCl y NH₄OAc. Las concentraciones de Cd en digestores de suelo o extractos, se determinaron por triplicado usando espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente.

Para evaluar, la concentración pseudo-total de metales, las muestras de suelo se secan a una temperatura no superior a 40 °C, y luego se tamizan a través de un tamiz de 0,5 mm. Un (1) g de cada muestra es mineralizado por digestión cerrada utilizando ácido nítrico (HNO₃) - ácido clorhídrico HCl (7:1 v/v), siguiendo el método EPA 3051. La digestión se lleva a cabo como lo señala Bravo D.A. et al. (2020), utilizando un equipo digestor por microondas Milestone Ultrawave (Milestone ultraWAVE, Sorisole, Bergamo, Italia). Después de la digestión, las muestras de suelo serán filtradas para su respectiva cuantificación, mediante espectrómetro de plasma acoplado inductivo con emisión óptica - ICP-OES (Thermo Scientific ICAP 6000, Waltham, Massachusetts, EE. UU.). La eficiencia de los procesos de digestión, se evalúan en términos del porcentaje de recuperación, frente a los conteos determinados para un material de referencia para suelos, (muestra ISE 961-Wepal, Wageningen, Países Bajos), determinado a través de la relación entre el Cd presente en los extractos de las muestras de suelo y la concentración pseudo-total presente en el material de referencia del suelo, después de ser expuesto a la digestión ácida. (Bravo, D., & Benavides-Erazo, J. (2020) y (Chaali, N., Bravo, D., et. al. (2022)).

Para la medición de la conductividad eléctrica (CE) en laboratorio de geoquímica, se medirá en agua desionizada en una relación de 1:5 de suelo: suspensión de agua, p/v (Hardie, M., & Doyle, R. (2012). La CE se medirá con un sensor de conductividad In Lab 720 (Automatic Titrator T90, Mettler Toledo, Columbus, Ohio, EE. UU.).

6.6. Análisis del problema Inverso y Tratamiento de Datos.

Los datos de resistividad eléctrica en campo, corresponderán a mediciones puntuales y/o discretas, que se obtienen de suministrar al suelo, corriente eléctrica externa, y medir el voltaje en cada punto,

o lo que se define como pseudosecciones, mediante la geometría lineal del mallado y tendido de electrodos, se definirá una constante geométrica, propia para cada tipo de arreglo tetraelectródico, para el desarrollo de este trabajo, se elige el método tetraelectródico Wenner alfa, que define una serie de parámetros propios, a este tipo de arreglo, se obtiene para cada pseudosección, el valor medido de la resistividad aparente, este conjunto de mediciones, definen también, un conjunto de valores calculados, de acuerdo a: el método tetraelectródico Wenner, el equiespaciado de electrodos, la cantidad de electrodos y la profundidad. Ver Figura 8. Ver Ilustración 2 y 3.

A la determinación más probable, de los parámetros del método tetraelectródico Wenner alfa, mediante, los datos de resistividad aparente, medidos por pseudosección, y los datos de resistividad aparente, calculados por pseudosección, se le denomina solución del problema inverso, como lo indica Biosca, B. (2012), en su tesis doctoral. Como se advierte, la solución del problema inverso no es única, pues la solución del problema inverso, puede proporcionar infinidad de soluciones. Para el presente caso se trata de determinar la estructura y característica del subsuelo, en cuanto a posibles materiales constituyentes del subsuelo, a partir de datos de resistividad eléctrica.

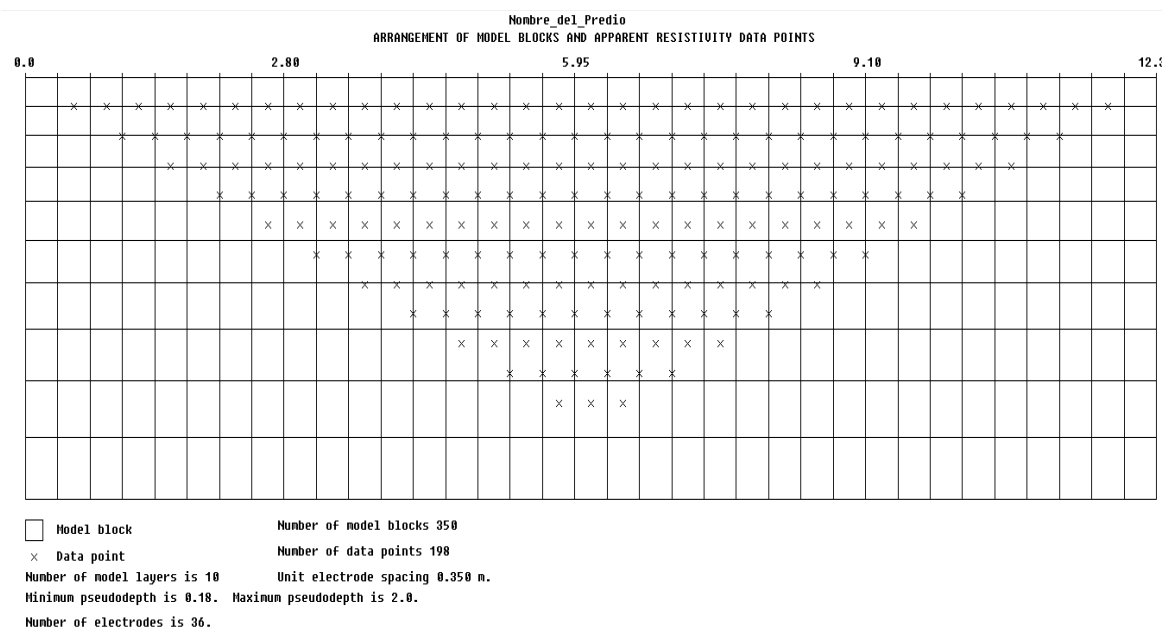


Ilustración 3. De acuerdo al método tetraelectródico Wenner, para 36 electrodos, se definen 350 bloques, 198 puntos de datos o mediciones que se distribuyen en el subsuelo como se indica con el símbolo x, numero de capas o estratos definidos: 10, tamaño del pseudosección mínima: 0.18 m., profundidad máxima de pseudosección 2.26 m. longitud máxima horizontal 12.5 m. Fuente Manual 2D 3D Luke, H.L. (2021).

El proceso computacional de la inversión de datos, se realiza mediante la utilización del programa ResIPy un software donado por el Dr. Guillaume Blanchy. Blanchy G., et al. (2020) quien, es uno de los desarrolladores del programa ResIPy (<https://hkex.gitlab.io/resipy/>), programa computacional, para proporcionar un enfoque más intuitivo y fácil de usar, para la inversión de datos geoeléctricos, utilizando una interfaz gráfica de usuario GUI. (GUI: La Interfaz gráfica de usuario o GUI (por sus

siglas del inglés: Graphic User Interface, es el entorno visual de imágenes y objetos mediante el cual una máquina y un usuario interactúan. Es una interfaz de uso eficiente y manejo lo más sencillo posible, que además de ser clara, es intuitiva en cuanto a la interacción usuario y software.), de código abierto y una interfaz de programación de aplicaciones (API: El término API es una abreviatura de Application Programming Interfaces, que en español significa: interfaz de programación de aplicaciones. Se trata de un conjunto de definiciones y protocolos que se utiliza para desarrollar e integrar el software de las aplicaciones, permitiendo la comunicación entre dos aplicaciones de software a través de un conjunto de reglas.) de Python. ResIPy, utiliza los códigos de inversión maduros, R2/cR2 para ERT e IP, respectivamente. La GUI de ResIPy, facilita la importación de datos, el filtrado de datos, el modelado de errores, la generación de mallas, la inversión de datos y el trazado de modelos inversos.

ResIPy es una herramienta de análisis, modelado e inversión de datos geofísicos que permite tener control total sobre parámetros de modelado/inversión en una interfaz gráfica de usuario intuitiva. ResIPy proporciona una plataforma en una interfaz de usuario no lineal. ResIPy permite modelar e invertir datos de IP y resistividad 2D y 3D, ResIPy proporciona una rutina de limpieza de datos exhaustiva mediante el filtrado de datos y el modelado de errores lo cual permite mejorar la inversión de datos. ResIPy se ha utilizado con éxito en múltiples situaciones de campo y modelado utilizando tanto la GUI como la API. (Blanchy, G., et. al. (2020)).

7. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

7.1. Resultados obtenidos en Campo

Se determinaron las tomografías de campo, en las que se presentaron los valores con alto contraste, y más cercanos desde la superficie, lográndose determinar el punto de muestreo, en la línea 3 a una profundidad de $1.25 \text{ m} \pm 0.10 \text{ m}$; y con respecto al electrodo numero 7; se procedió a extraerse la muestra de suelo: 2 kg de suelo para medición de resistividad en laboratorio de suelos y 3 kg para el laboratorio de química analítica ICP OES, se procedió de acuerdo a las norma técnicas para la extracción de la muestra y para su almacenamiento.

Análisis de las tomografías obtenidas.

La ERT 2D de la línea 1, en la ilustración 4 a) permite observar una gama de colores que corresponden a diferentes valores de resistividad, los cuales gracias al programa de inversión, representa la distribución más probable de resistividades, de acuerdo a los datos medidos, los calculados y los determinados por regresión y técnicas de tratamiento de datos, los valores de resistividad eléctrica aproximadamente se representan mediante gamas de colores, en los cuales los colores hacia el azul oscuro, presentan valores de baja resistividad y hacia el color rojo oscuro, representan valores de alta resistividad.

La línea 2, en la ilustración 4 b), presenta una tomografía de una riqueza espectral de colores, desde el azul con una resistividad de $13.84 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ hasta el color rojo oscuro a los $1561 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$; el proceso de inversión permite observar una distribución continua de colores o de resistividad, un alto contraste de resistividades, indica que existe diferentes tipos de materiales y que sus resistividades eléctricas, van entre un rango de $13.84 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ hasta $1561.53 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, es decir la variación de los valores de resistividad, se presentan como respuesta a la presencia de varios componentes estructurales del subsuelo, se destaca también los valores bajos de resistividad o regiones de alta conductividad eléctrica, que es el inverso de la resistividad eléctrica, debidos a presencia de saturaciones por fluidos líquidos muy seguramente agua, por cuanto se trata de zonas expuestas a inundaciones por lluvias y fluviales por el río Arauca, el cual se encuentra a 30 m de la zona de estudio, que a su vez, presenta una topografía completamente plana. La anomalía de interés, se encuentra en la línea de prospección geoelectrica número 2, en la ilustración 4 se observan las tres tomografías de cada una de las líneas, ubicadas en la posición $7^{\circ}01'56''\text{N } 71^{\circ}23'22''\text{W}$. A continuación se analizan las tomografías obtenidas.

En la tomografía obtenida en la línea de prospección geoelectrica 1, ilustración 4: a) Se observa entre los electrodos 4 a 10 y a una profundidad entre $0.90 \pm 0.01 - 2.26 \pm 0.01 \text{ m}$ la presencia de un material denso con valores de resistividad entre $22.00.0 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$ y $9.50 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$ con

dimensiones aproximadas de 2.1 m de largo y 1 m de profundidad. Los detalles de variaciones de resistividad se pudieron revelar al aplicar un filtro logaritmo base e, que el programa de inversión ResIPy contiene, las tomografías reales muestran presencia de alta saturación, como se muestra en la tomografía d) que corresponde a la tomografía sin filtro logarítmico; en la tomografía de la línea 3 ilustración 4 c), se observa una continuidad de las otras dos líneas, en cuanto a la continuación de la franja próxima a la superficie, se observan una formación fluida concentrada espacialmente a una profundidad entre 0.3 m y 1m.

En la ilustración 4 b) tomografía de la línea 2, el electrodo 18 a nivel superficial se observa un valor elevado de resistividad producto de presencia de roca sedimentaria con valores de resistividad de entre $13.00 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$ y $16.00 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$, entre los electrodos 15 a 22 y a una profundidad entre $0.86 \pm 0.01 \text{ m}$ y $1.87 \pm 0.01 \text{ m}$, se observa una anomalía en la resistividad; con fluctuaciones de $1.50 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$ a $7.10 \pm 0.05 \text{ Ohm m}$ corresponde a materiales consolidados y/o formaciones franco-arcillosas consolidadas. Más adelante, entre los electrodos 29 a 32 y a una profundidad entre $1.42 \pm 0.01 \text{ m}$ y $2.00 \pm 0.01 \text{ m}$, se observa la difusión de material con fluctuaciones de resistividad entre $146.99 \pm 0.05 \text{ Ohm cm}$ a $479.10 \pm 0.05 \text{ Ohm cm}$.



Medición en campo de la resistividad eléctrica.

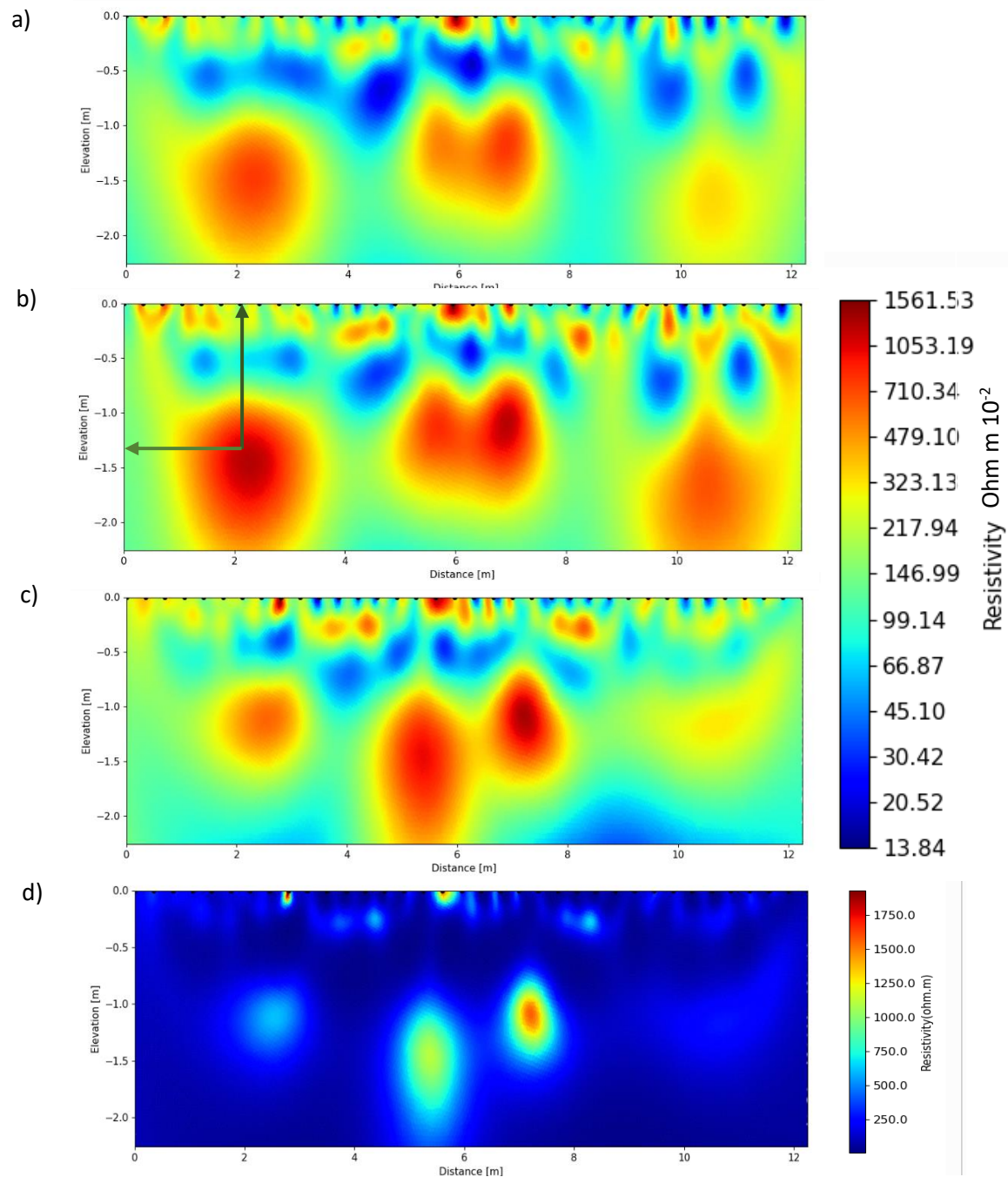


Ilustración 4. Tomografías obtenidas en campo In Situ a) Línea 1 con filtro b) Línea 2 con filtro c) Línea 3 con filtro y d) Línea 3 sin filtro; con el objeto de detectar el punto con mayor contraste de resistividad eléctrica, punto donde se obtuvo la muestra de suelo, se puede observar alta saturación y valores bajos de resistividad, menores o iguales a 350 Ohm cm. , se eligió la línea 2 en el electrodo 7 y a una profundidad de 1.25 m, como muestran las flechas en la tomografía b). En la tomografía d) se observa la tomografía real obtenida de la línea 3 tomografía c), sin aplicar el filtro logaritmo base 10. (Tomografías Generadas y Procesadas con el software ResIPy ver 3.45)

7.2. Resultados obtenidos en Laboratorio de Física de Suelos.

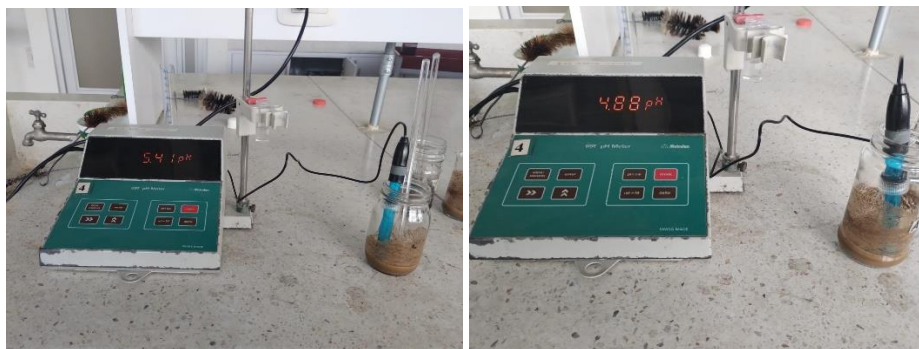
7.2.1. Medición del pH y el porcentaje de saturación en la muestra de suelo.

Medición de pH

Se midieron el pH a tres muestras de suelo, se obtuvieron los siguientes resultados:

Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
5.40 pH	5.41 pH	5.45 pH
Valor promedio del pH del suelo 5.42 pH		

se obtuvo un valor de 5.42 pH, lo que indica una condición de pH de suelo fuertemente ácido. De acuerdo a los trabajos de Kicińska, et al. (2022) lograron demostrar que la acidificación del suelo, provocó un aumento significativo en la movilidad de los metales en el siguiente orden $Cd > Zn > Pb$, lo cual sugiere una gran movilidad del catión Cd^{2+}



Medición en laboratorio de química de suelos del pH de muestras de suelo.

7.2.2. Determinación de volumen de agua para saturación de muestra de suelo.

Descripción	Cantidad
Muestra de suelo	5 mg
Cantidad de agua destilada y desionizada	8 mL
Densidad del suelo en saturación	0.625 kg.m^{-3}

7.2.3. Volumen de suelo saturado.

Descripción	Sigla	Peso/Vol
Picnometro vacio. 50 mL	Pv	10.0 g

Peso de la muestra de suelo seco	Pmss	10.0 g
Peso picnómetro lleno de agua	Pw	60.0 g
Peso del agua	w	50 g
Volumen de agua desplazada	Vw	50 mL
Peso del picnómetro lleno de agua y suelo seco	Pws	66.0 g
Peso de la muestra de suelo y agua	mssw	56 g
Peso del agua en el picnómetro con suelo	Pwms	46
Volumen de aire =Volumen de agua desplazada	Vad	50 mL
Volumen suelo saturado=Vol agua desplazada	Vss	50 mL

7.2.4. Medición de resistividad eléctrica en laboratorio de física de suelos

A.- Calibración de la sonda tetraelectrónica.

En el laboratorio de física de suelos, se realizaron las mediciones de resistividad eléctrica en soluciones de NaCl, a diferentes concentraciones que se resumen a continuación en la tabla 2

*Tabla 2. Determinación experimental de la resistividad eléctrica para soluciones conductoras (NaCl al 0.9%) Método de Van der Paw * El término 4π se debe a que la corriente eléctrica se inyecta en un volumen esférico. (Fuente. Propia)*

Cantidad de NaCl al 0.9% (ml)	Voltaje ΔV (Voltio)	Corriente I (A)	$\Delta V/I$ (Ω)	$4\pi a \cdot \Delta V/I$ ($\Omega \cdot m$)
20	0.009	0.0015	6.00	75.40
30	0.011	0.002	5.50	69.10
40	0.015	0.003	5.00	62.83
50	0.023	0.004	5.75	72.25
60	0.025	0.005	5.00	62.85
70	0.033	0.006	5.50	69.15
80	0.034	0.007	4.86	61.05
90	0.047	0.008	5.88	73.85
100	0.05	0.009	5.56	69.85

Los datos de resistividad eléctrica Vs diferentes volúmenes de NaCl diluido al 0.9% de la tabla 2, se han graficado en la ilustración 5 la curva es una recta que tiende al valor constante de resistividad, para esta sonda de $69.96 \pm 3.52 \text{ Ohm} \cdot m$.

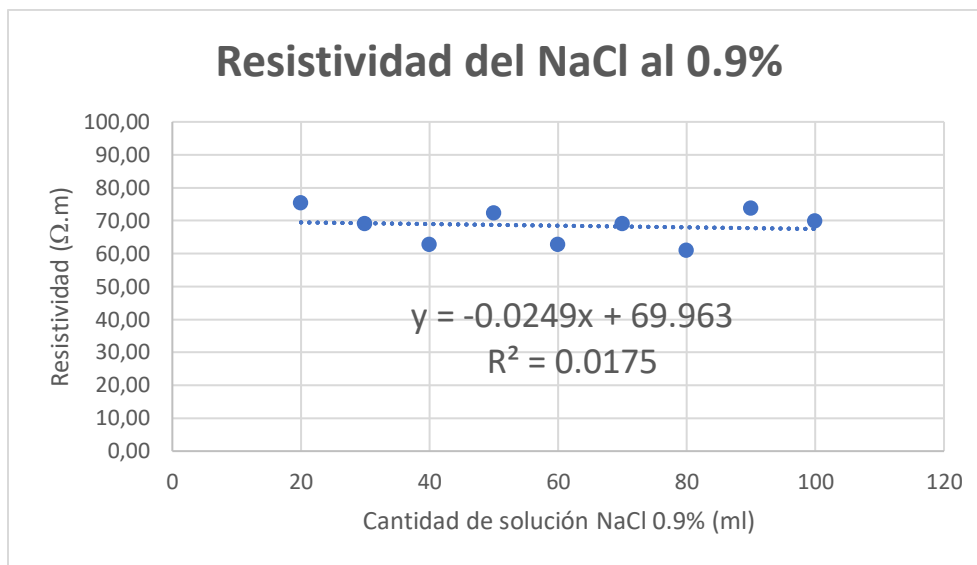


Ilustración 5. Curva de calibración. Resistividad de la solución de NaCl al 0.9% (Fuente. Propia)

B.- Curva de calibración de la sonda tetraelectrónica.

En la tabla 3 se observan los datos adquiridos con la sonda tetraelectrónica, para diferentes concentraciones de NaCl y se representan en la ilustración 6,

Tabla 3. Datos experimentales de Resistividad a diferentes Concentraciones de NaCl. (Fuente. Propia)

Concentración NaCl %	Resistividad (Ohm.m) ± 2.7
0.1	5.1010
0.2	2.7300
0.3	1.6520
0.4	1.3470
0.5	1.2080
0.6	1.1000
0.7	0.9300
0.8	0.8110
0.9	0.7400

obteniéndose una tendencia potencial, se puede observar la coincidencia de valores entre el dato del valor de resistividad del NaCl al 0.9 % que fue de $74.00 \pm 2.70 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ y el valor de $70 \pm 4 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$, obtenido en la misma sonda, pero medido específicamente para la muestra de NaCl al 0.9 % de concentración.

La curva de calibración y la ecuación de dicha curva, ver ilustración 6; definen la ecuación de ajuste del instrumento de medición de cuatro electrodos por el método tetraelectródico: $y = 62.05x^{-0.895}$ donde x es la concentración de NaCl y y es la resistividad eléctrica:

En la ilustración 6 se pueden observar la tendencia de los datos de resistividad eléctrica, medidos en la sonda tetraelectródica para diferentes concentraciones de NaCl. De acuerdo a los resultados reportados, el dispositivo de medición de resistividad por el método tetraelectródico (Datsios, Z. G., et al. (2017), para determinar el error experimental y el error porcentual, nos referimos a los datos obtenidos en las tablas 2 y 3, así como también en las ilustraciones 5 y 6, la sonda electródica empleada en esta investigación; presenta un error instrumental de 2.7 Ohm.m, como se comprueba a continuación, haciendo $x=0.9$ en la ley de tendencia, encontrada para los datos medidos de la tabla 3 e ilustración 6, se tiene:

Valor teórico: $= 0.66398x^{-0.861} = 0.7270 \Omega m$

Valor Experimental= $0.700 \Omega m$

Error experimental= $\pm 0.027 \Omega m$

Error porcentual= 4 %

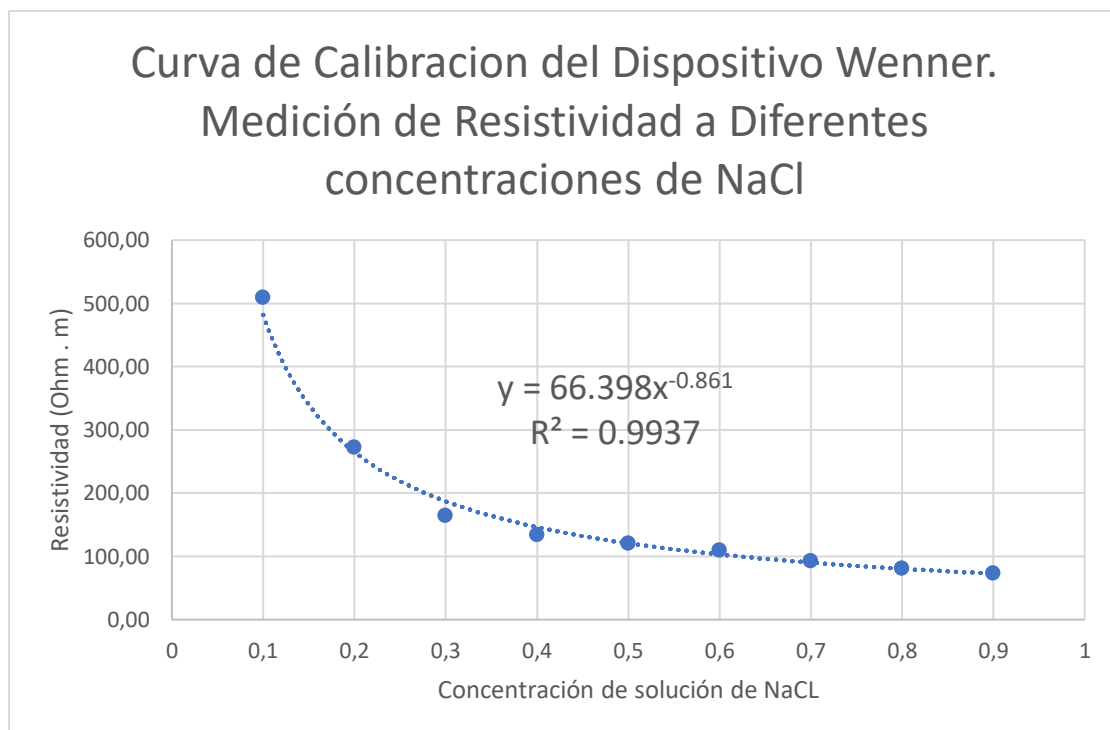


Ilustración 6. Curva con datos experimentales para calibración del dispositivo de cuatro electrodos método Wenner.



Medición en laboratorio de física de suelos de resistividad eléctrica en función de concentración de NaCl diluido en agua ultra pura.

7.4. Aplicación de la ley de Archie y determinación de la porosidad.

Para ello se miden las resistividades de suelo saturado y de solución saturante a diferentes concentraciones. Datsios, Z. G, et. al (2017).

Tabla 4. Datos de resistividad de suelo saturado y resistividad de solución saturante. (Fuente. Propia)

Cantidad de suelo (mg)	Cantidad de NaCl de Saturación (mL)	Resistividad de Suelo ($\Omega.m$) ρ_s	Resistividad de NaCl de Saturación ($\Omega.m$) ρ_w	ρ_s / ρ_w
5	5	8.7080	9.2100	0.95
10	10	4.4420	4.0770	1.09
15	15	2.7950	2.4250	1.15
20	20	1.9280	1.6270	1.19
25	25	1.5950	1.2470	1.28
30	30	1.2370	1.0410	1.19
35	35	103.40	0.8739	1.18
40	40	0.9512	0.7545	1.26
45	45	0.8789	0.6634	1.32
50	50	0.7288	0.6069	1.20
55	55	0.6408	0.5503	1.16
60	60	0.5962	0.5038	1.18

La dependencia lineal entre la resistividad del suelo y la resistividad del suelo saturado con la solución de NaCl al 0.9%, ρ_s y ρ_w determinan una porosidad limitada propia de arenas gruesas o de suelos franco arcillosos, con alto contenido de arenas gruesas, la relación lineal, de la forma:

$$\rho_s = 1.0617\rho_w - 29.417$$

Este tipo de relación lineal, ver ilustración No. 8, implica que la resistividad del suelo no solo depende de la resistividad del agua que lo satura, sino que también está influenciada por otros factores, como la porosidad, el contenido de arcilla, y la conectividad de los poros y el contenido mineral. Si se fija el valor mínimo de resistividad del fluido saturante $\rho_w=27.7074$ Ohm m que coincide numéricamente con la incertidumbre de porosidad $\pm 27.7074\%$, consideramos solo valores reales de porosidad, es decir valores tales que $\rho_w/\rho_s > 1$ y tomando el promedio $\rho_w/\rho_s = 0.8354$, por lo tanto, aplicando también la expresión de Archie para determinar la porosidad:

$$\phi = \left(\left(\frac{a\rho_w}{\rho_s} \right) \right)^{1/m} \quad \text{donde } \phi: \% \text{ Porosidad}; a: \text{factor geométrico } a = 1.3549$$

$$\text{y } m = 2$$

$\phi = (0.8490) * 100\% - 27.7074\% = 55.83\% \approx 56\%$; valor de porosidad propio de los suelos tipo franco arcilloso.

La pendiente 1.0617: Este valor cercano a 1, sugiere que la resistividad del suelo está muy influenciada por la resistividad de la solución de NaCl al 0.9 %, pero con un factor ligeramente superior. Esto es indicativo de un suelo donde la matriz mineral no tiene una gran contribución adicional a la resistividad total, lo cual es típico de suelos franco arcillosos o con bajo contenido en minerales conductores.

El intercepto -29.42 Este valor negativo indica que incluso si la resistividad de la solución de saturación fuese baja, la resistividad del suelo no disminuiría proporcionalmente, lo que podría deberse a la presencia de una cierta cantidad de resistividad inherente del suelo, quizás por compactación o cementación que no está relacionada directamente con la resistividad de la solución.

El tipo de suelo que presenta una relación muy cercana a 1 y un factor intercepto negativo son indicativos de suelos franco arcilloso con componentes mineralógicos que hacen un suelo de conductividad alta o de resistividad baja, alto contenido de arenas que otorgan la alta porosidad.

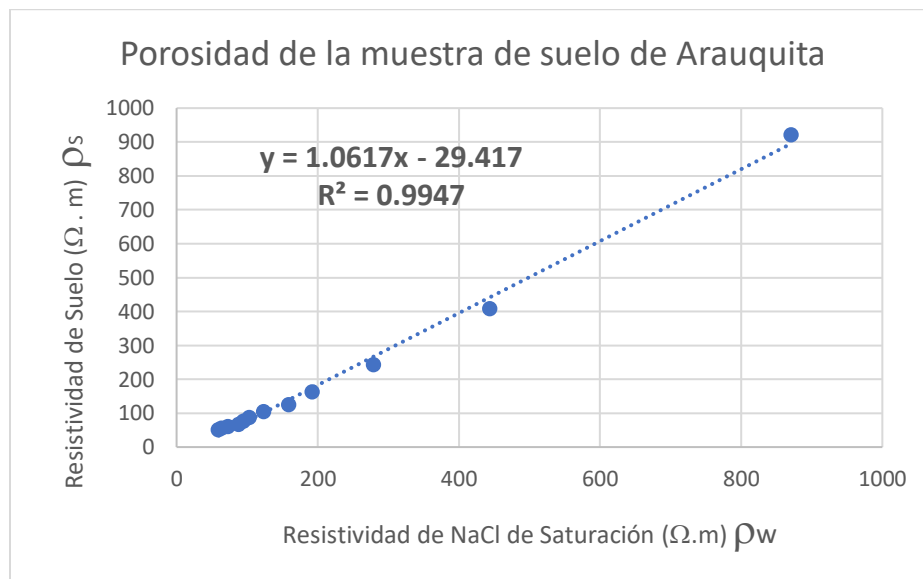


Ilustración 7. Resistividad del suelo saturado en función de la Resistividad de solución saturante

Para el análisis del factor de formación, nos basamos en la relación potencial encontrada al observar el comportamiento de la comparación entre las resistividades tanto de saturación como del suelo Vs. El contenido de suelo: s, ver ilustración 8, la cual es de la forma:

$$\frac{\rho_w}{\rho_s} = 1.1318 * s^{-0.087}$$

Que comparada con la ley general de Archie:

$$\rho_s = F \cdot \rho_w \cdot S^n$$

Donde F es el Factor de formación, ρ_s es la resistividad de la formación en este caso es muestra de suelo de Arauquita, de la ley de Archie, ρ_w es la resistividad de la formación saturada, S es la saturación y el exponente n es se denomina exponente de saturación, depende del tipo de suelo.

Entonces

$$\frac{\rho_w}{\rho_s} = \frac{1}{F \cdot S^n}$$

Y, por lo tanto:

$$F = 0.8834; \quad n = 0.087$$

Esto nos permite determinar el tipo de suelo así, para la Textura del suelo: un factor de formación, F , menor que 1 puede indicar la presencia de arcillas o minerales conductores en el suelo. Las arcillas suelen reducir la resistividad del suelo debido a su alta conductividad.

Estructura del suelo: Debido a que F es cercano a 1, indica un tipo de suelo más bien homogéneo, con tamaño de grano y poro no muy variables.

Contaminación y alteración: Un valor de F bajo, como el que se obtenido, podría también sugerir la presencia de contaminantes o sales adicionales que aumentan la conductividad del suelo.

La relación entre F y la resistividad también puede reflejar cómo la porosidad y la saturación del suelo afectan su resistividad. El factor de formación cercano a 1 nos indica un suelo con alta porosidad y saturación. Ver Shah, P. H., & Singh, D. N. (2005), como también, Rosli, N., et al. (2020), y a Datsios, Z. G., et. al. (2017).

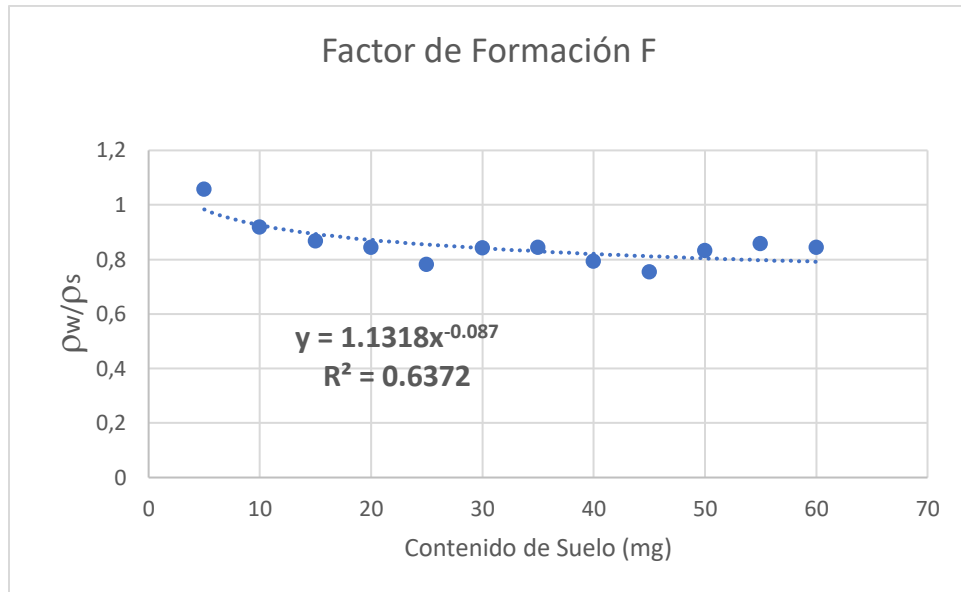


Ilustración 8. Factor de formación para diferentes contenidos de suelo y solución saturante.

7. 5. Mediciones de resistividad en muestra de suelo con complemento de Cd a diferentes concentraciones.

Los resultados se sometieron al análisis de estadística descriptiva, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Resumen de los datos de medición de resistividad eléctrica en Ohm. m y la estadística descriptiva. (Fuente Propia)

	Concentración Cd (mg)									
	0.28	0.56	0.84	1.12	1.4	1.68	1.96	2.24	2.52	2.8
Valor Medio Medido (Ohm m)	4.36	2.35	2.29	2.17	2.02	1.64	1.58	1.56	1.49	1.44
Error típico	1.52	3.35	1.72	2.82	2.60	0.69	0.79	1.07	1.02	1.06
Mediana	4.36	2.35	2.29	2.17	2.02	1.64	1.58	1.56	1.50	1.44
Moda	8.21	1.80	9.29	1.52	1.40	1.37	4.24	1.58	1.55	1.57
Desviación estándar	6.74	3.26	8.63	231.11	1.97	1.38	1.80	3.33	3.02	3.27
Varianza de la muestra	-0.49	-0.96	-1.04	-0.22	-0.08	1.03	4.19	11.75	0.30	0.29
Curtosis	0.37	-0.28	0.28	-0.69	-0.64	-0.62	1.46	-3.04	-0.79	-0.87
Coficiente de asimetría	31.50	62.50	31.50	60.00	56.50	16.00	22.00	31.00	22.00	22.50
Rango	4.35	2.32	2.28	2.13	1.98	1.63	1.58	1.53	1.48	1.42
Mínimo	4.38	2.38	2.31	2.19	2.04	1.64	1.60	1.56	1.50	1.45
Máximo	12.65	6.80	6.65	6.28	5.85	4.75	4.59	4.52	4.33	4.17
Suma	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00
Cuenta	4.38	2.38	2.31	2.19	2.04	1.64	1.60	1.56	1.50	144.70
Mayor (1)	4.35	2.32	2.28	2.13	1.98	1.63	1.58	1.53	1.48	1.42
Menor (1)	3.12	1.69	1.35	1.58	1.53	1.41	1.16	1.22	2.09	1.22
Nivel de confianza (95.0%)										

Los datos de la tabla No. 5, permiten determinar las funciones que presentan una mejor regresión, a los datos de medición obtenidos, y permiten generar las respectivas funciones de regresión y los factores de dispersión R^2 , como se indica en la Ilustración 9, como se observa las funciones de regresión que peor factor de dispersión o R^2 presentan son la función exponencial con $R^2= 0.7269$ y la función lineal con $R^2= 0.6462$, debido a esto se descartan y solo se consideran las funciones polinómica grado 5 con $R^2= 0.9877$ es la función de regresión que mejor se ajusta a los datos, la función potencial con $R^2= 0.9264$ y la función logarítmica con $R^2= 0.8595$. Las tres funciones y sus factores de dispersión se muestran en la Ilustración 10.



Medición en laboratorio de química de suelos, de resistividad en función de contenido de Cd.

7.5.1. Descripción de las gráficas obtenidas

Con respecto a las gráficas obtenidas de los datos de resistividad Vs concentración de contaminante Cd, se verifica que tienen un comportamiento decreciente de forma potencial, es decir, se trata de funciones que al aumentar el contaminante mejora la conductividad, con diferente factor de dispersión R^2 , con tres funciones con valores entre 0.8 a 0.9 y dos funciones con valores de 0.6 a 0.7, en la que mejor se ajusta es la de polinomio grado 5, seguida de la potencial y logarítmica, y las de peor ajuste la lineal, seguida de la exponencial.

Se debe encontrar una función que mejor se ajuste a los datos experimentales, con el objetivo de determinar con mejor aproximación, la función que determine la relación experimental entre resistividad eléctrica de la muestra del suelo, como función de respuesta; a la presencia de concentración de contaminante de Cd.

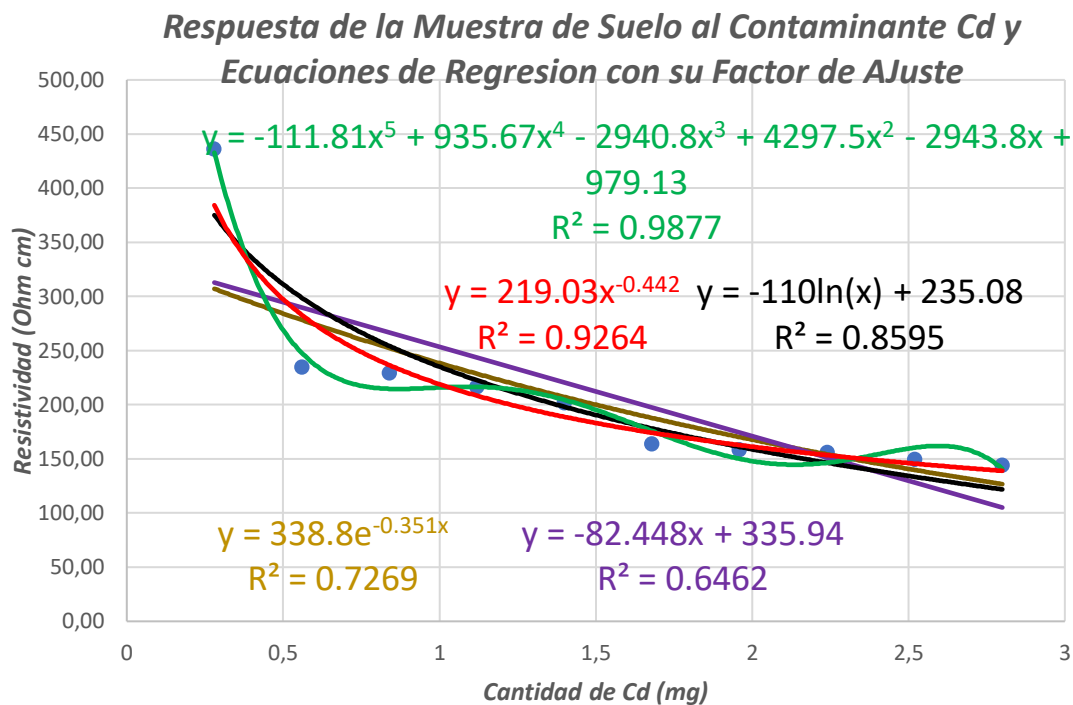


Ilustración 9. Funciones de regresión y sus ecuaciones y sus factores de dispersión R^2 . (Fuente. Propia)

La ilustración 10 muestra las tres funciones que mejor se ajustan a los datos experimentales de medición de resistividad en muestras de suelo con el suplemento de Cd a diferentes concentraciones, es decir con un $R^2 > 0.8$

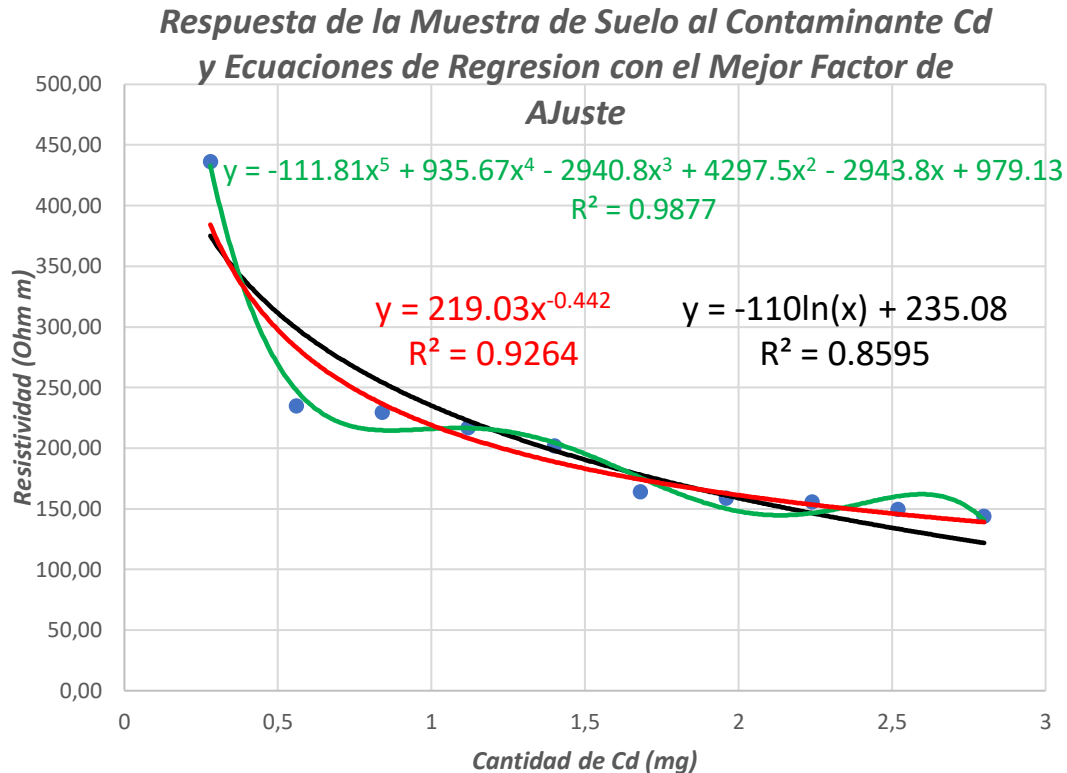


Ilustración 10. Funciones de regresión que mejor se ajustan a los datos de medición de la resistividad eléctrica en la muestra de suelo. (Fuente. Propia)

7.5.2 Generación de la función ponderada, con coeficientes normalizados con respecto al factor de dispersión R^2

Con las funciones obtenidas y sus factores de dispersión R^2 , se determina una función general no lineal que mejor se ajuste a los datos y que mejore el coeficiente de dispersión. A partir de las funciones no lineales que mejor factor de dispersión presentan, se debe encontrar una función ponderada, con coeficientes normalizados con respecto al factor de dispersión R^2 .

Dadas las funciones no lineales, con sus correspondientes factores de dispersión al cuadrado:

$$F1(x) = -110\ln(x) + 235.08; \text{ con } R_1^2 = 0.8595;$$

$$F2(x) = -111.81x^5 + 935.67x^4 - 294.08x^3 + 429.75x^2 - 294.38x + 979.13; \text{ con } R_2^2 = 0.9877 \text{ y}$$

$$F3(x) = 219.03x^{-4.42} \text{ con } R_3^2 = 0.9264$$

Se debe determinar una Función ponderada, con coeficientes normalizados y optimizados, tal que: para determinar los coeficientes reales Alpha, Beta y Gamma que minimicen el error y optimicen la descripción de la distribución de los datos experimentales, se pueden utilizar técnicas de regresión. Una opción es realizar una regresión lineal ponderada, donde los pesos sean proporcionales al inverso del error cuadrático de cada función individual.

Para esto se calculan los errores cuadráticos para cada función no lineal F_1 , F_2 y F_3 utilizando el factor R^2 como medida de bondad de ajuste. Se puede definir el error como la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por cada función, a continuación, se invierte los errores cuadráticos calculados para obtener los pesos para cada función, se normalizan estos pesos para asegurar de que sumen 1 por último se multiplica cada función por su peso correspondiente y se suman los resultados para obtener la nueva función F . La nueva función F será una combinación ponderada de las funciones originales, donde Alpha, Beta y Gamma son los coeficientes respectivos de F_1 , F_2 y F_3 :

$$F = \alpha R_1^2 F_1 + \beta R_2^2 F_2 + \gamma R_3^2 F_3$$

Ecuación 5. Función ponderada y normalizada

Este proceso dará una combinación óptima de las funciones originales que mejor describen la distribución de los datos experimentales, minimizando el error cuadrático total.

Donde los coeficientes α , β y γ , se deben elegir de tal forma que permitan que la función ponderada, con coeficientes normalizados, al reemplazar la variable experimental y de tal manera que los datos calculados, coincidan con los experimentales; el factor de peso es el coeficiente de dispersión al cuadrado,

Los coeficientes se determinaron mediante la rutina de Python, en el Anexo se encuentra el programa desarrollado para determinar los coeficientes de la función general; y así determinar la función óptima F , que para este caso es:

$$F(x) = 0.9623(-1.1181 * x^5 + 0.93567 * x^4 + 29.408 * x^3 + 42.975 * x^2 + 29.348 * x + 9.7913) - 0.000651(-1.10 * \ln(x) + 2.3508) + 0.1042(2.19.03 * x^{-0.442})$$

Ecuación 6. Función ponderada, con coeficientes normalizados con respecto al factor de dispersión R^2

Donde x es la concentración de Cd y $F(x)$ es el valor de la resistividad eléctrica o respuesta de la muestra de suelo a la presencia de Cd.

Esta función en el límite cuando x tiende a 0.1, es decir, cuando a la muestra de suelo se la dopa con 0.1 mg de Cd la respuesta de la muestra de suelo será de 7.29 Ohm m

Esta nueva función, así definida presenta un factor de dispersión de $R^2 = 0.9937$, En la tabla No. 5 se registran los datos y se pueden comparar en la Ilustración No. 9

Concentración de Cadmio (mg)	Datos Medidos (Ohm m)	Datos Calculados (Ohm m)
0.1		7.2888
0.28	4.3618	4.3210
0.56	2.3464	2.4839
0.84	2.2938	2.1471
1.12	2.1659	2.1554
1.4	2.0180	2.0354
1.68	1.6377	1.7571
1.96	1.5842	1.5086
2.24	1.5576	1.4738
2.52	1.4930	1.6094
2.8	1.4384	1.4228

Ilustración 11. Datos discretos correspondientes a las mediciones de resistividad y datos calculados para las concentraciones de Cd analizadas. (Fuente. Propia)

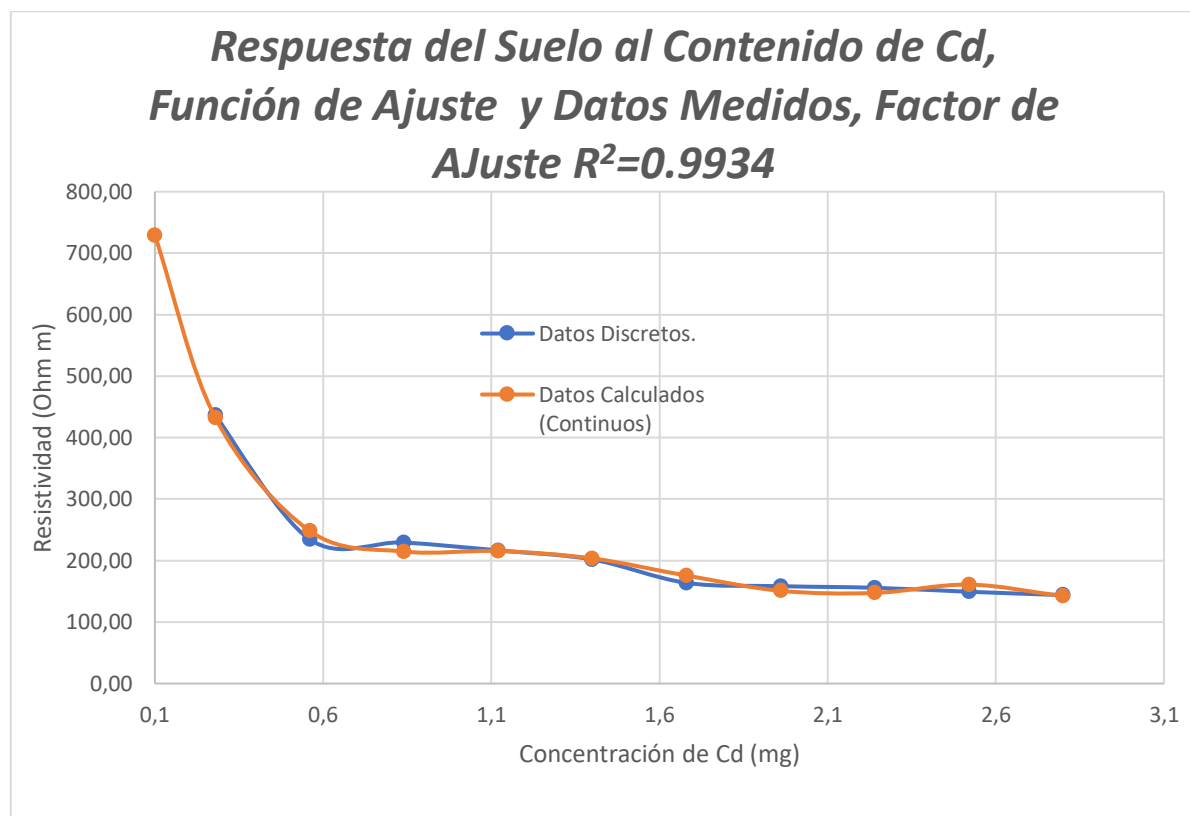


Ilustración 12. Comparación entre los datos medidos y la función ponderada, la tendencia del valor de resistividad de la función para un contenido de Cd 0.1 mg. (Fuente. Propia)

Con la información encontrada de la reacción, en cuanto a la resistividad eléctrica, de la muestra de suelo a la presencia de Cd en una concentración mínima de 0.1 mg, es decir la resistividad eléctrica

tiende a 7.29 ± 0.12 Ohm m; se construyen las Tomografías de Resistividad -Eléctrica 2D (TRE 2D) predictivas, es decir en las cuales se puede señalar la ruta más probable de distribución de Cd o de sus compuestos más comunes como se muestra en la ilustración No. 13.

7.6. Generación e interpretación de las tomografías de resistividad eléctrica 2D (ERT 2d predictivas)

En las tomografías de resistividad eléctrica 2D, (ERT 2D, siglas en inglés y TRE 2D, siglas en español), predictiva se observa que los cationes de cadmio Cd^{+2} se encuentran recubriendo la superficie de otros materiales más consolidados y se puede observar que estas formaciones pueden ser llevadas a cabo a fluidos electrolíticos que provienen de la parte más superficial y que explican la baja resistividad eléctrica de este tipo de suelo. La gran resolución que brinda el programa de inversión, permite observar que la escorrentía de material proviene de la superficie; lo que hace inferir, que el cadmio puede provenir desde la superficie, ya sea por depósitos sedimentarios, debidos a grandes cantidades de sedimentos depositados durante las diferentes inundaciones, que han tenido lugar en este tipo de suelos. Las formaciones puntuales a que tienen lugar las formaciones de concentraciones de Cd pueden deberse como ya se mencionó a la actividad de doble capa que tiene lugar entre los cationes y la superficie de material franco arcilloso a una profundidad de entre los 1.15 m y los 1.85 metros con una longitud promedio de 1.0 m, Ver ilustración No. 14 línea 1 una segunda concentración de Cd se observa en dos sectores, entre las profundidades de 0.85 m a 1.90 m con una longitud de entre 1.0 m a 1.5 m.

En las ERT 2D predictivas, y de acuerdo a los datos extraídos de la muestra, y de su respuesta a la presencia de Cd dopado, así como también de las ERT 2D realizadas en campo; podemos evidenciar la presencia, en el subsuelo estudiado, de Cd o de sus compuestos más comunes, en medio ácido, la cuantificación de mg de Cd por kg de suelo, no es posible realizarse, debido a que la resolución que se requiere para ello, debería ser mucho mayor a la que la ERT 2D puede brindar. La ruta de distribución del contaminante Cd o de sus compuestos más comunes en medio ácido, que nos permite analizar la ERT 2D predictiva, es: i) al parecer procede por gravedad desde la superficie hacia la profundidad de entre 1.0 m a 2.26 m, en donde existen formaciones o material sedimentario consolidado. ii) la zona de mayor presencia es a 1.75 m de profundidad en promedio, desafortunadamente es la zona de alimentación de la plantación de cacao, por lo que muy probablemente los cultivos en estas zonas presentan contaminación con esta traza contaminante de Cd. r1 y 2, también se puede observar cómo se forman algunos depósitos de material con resistividad entre los 7.40 a 7.90 Ohm m valores para los cuales el presente estudio ha determinado que representa valores para los cuales el suelo responde a la presencia de cadmio o de sus compuestos más comunes.

7.7 Descripción de las ERT 2D predictivas:

La ERT 2D predictiva de la Línea 1 muestra en la superficie formaciones de material con valores de resistividad de 7.40 a 7.90 Ohm m distribuidos discretamente, a lo largo de los 12.5 m de longitud y con afloramiento de este tipo de material en la longitud de 6m, y 7m, entre las longitudes de 1m a 4 m y a una profundidad de entre los -0.75 m y los 2.26 m se observa una primera formación principal de forma circular con valores de 7.40 a 7.90 Ohm m presentando mayor intensidad entre las profundidades de -1.25 m a -1.75 m lo cual permite inferir que este material se encuentra formando parte de un material de alguna consolidación o en proceso de consolidación, esto puede entenderse como acumulación de material contaminante de Cd. Entre las longitudes de 5 a 7.5 m y a una profundidad de entre 0.75 a 2.0 m se observa una segunda formación principal consistente a su vez en dos formaciones una en proceso de consolidación y otra más consolidada, las dos presentan una forma elíptica y en su entorno se pueden observar las zonas de agregación de material con los valores de resistividad de 7.40 a 7.90 Ohm m., Entre las longitudes de 9.0 a 12.0 y a una profundidad entre 0.25 m a 2.26 m, se observa la tercera formación principal, de una material en agregación con estos valores de resistividad, pero es particularmente interesante; prestar atención a como las tres formaciones principales, el material de agregación a nuestro juicio procede desde la superficie. En la ERT 2D predictiva de la Línea 2 persisten las formaciones principales de la Línea 1, con fuerte evidencia de la agregación del material desde la superficie en la formación principal 1, a la izquierda de la ERT 2D predictiva y 3, a la derecha de la misma, en la región central, se mantiene el contraste de resistividad entre los valores de 7.40 Ohm m a 7.90 Ohm m. En la ERT 2D predictiva de la Línea 3, las formaciones principales 1 y 3 aparecen más atenuadas, pero en la central se observa mayor concentración de material con resistividad de 7.90 Ohm m, ver ilustración No. 13.

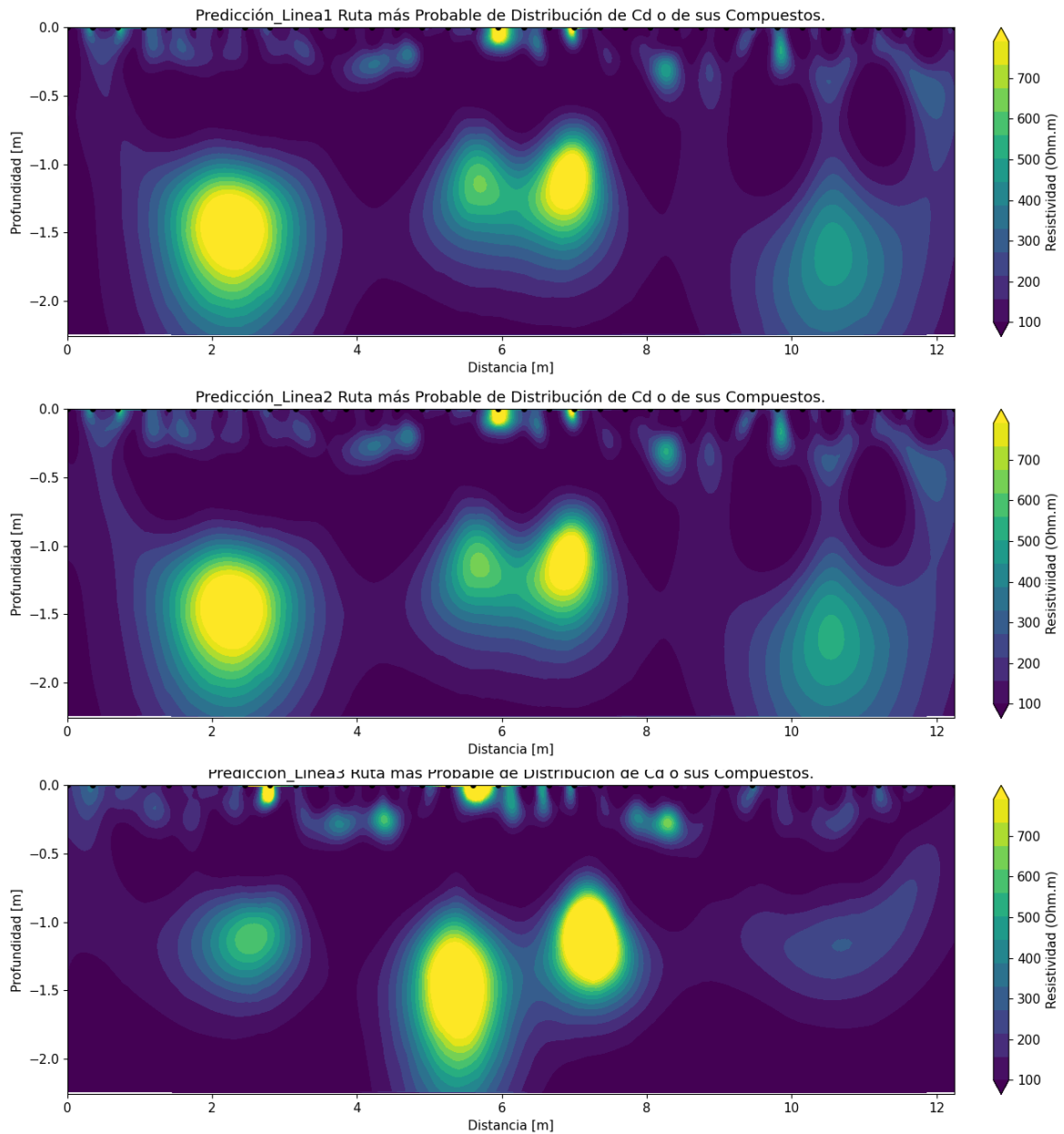


Ilustración 13. ERT predictiva para las líneas 1,2 y 3; el color más externo que rodea al amarillo intenso representa la ruta más probable de distribución de Cd o sus Compuestos más comunes. (Tomografías Generadas y Procesadas con el software ResIPy ver 3.4.5.)

Es interesante observar la tomografía que se obtiene al considerar la conductividad eléctrica ver Ilustración 14, obsérvese que se aprecia una muy alta conductividad, y algunos elementos desde una profundidad de 0.25 m hasta la superficie con un rango de conductividad de entre 80 a 130 mS.m^{-1} . La tomografía predictiva ilustración 14 muestra la distribución más probable del contaminante Cd^{+2} , diluido y/o formando otros compuestos y la ruta dinámica de transporte catiónico.

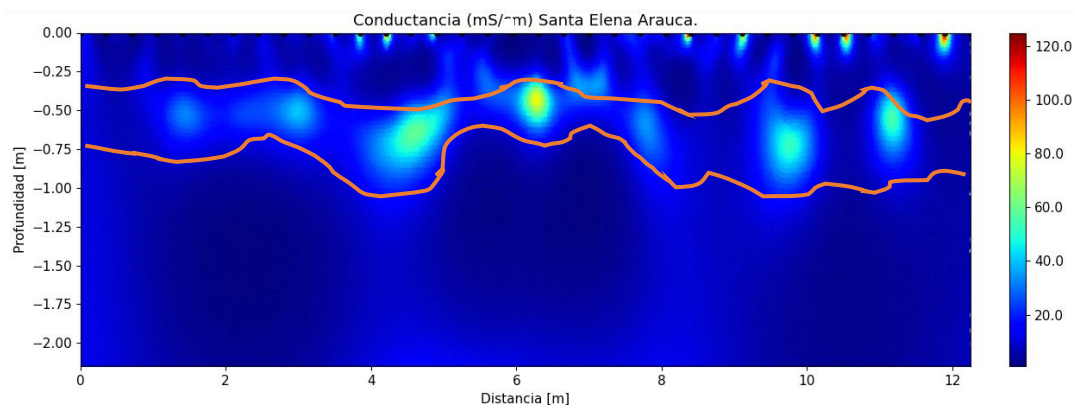


Ilustración 14. Distribución de la conductividad, se puede apreciar la alta conductividad a nivel superficial, aproximadamente entre los 25cm a 0.75cm y hacia la superficie, con valores entre 80 a 130 mS/m. (Fuente propia).

8. Discusión de resultados

Discusión de las (ERT-2D)

Al observar las tomografías sin filtro logarítmico, se observan distribuciones donde la saturación o alto porcentaje de humedad del suelo, no permite diferenciar a simple vista las diferentes distribuciones de resistividades debidas a los diferentes materiales. Como se puede observar la tomografía de la ilustración 4 d) en la cual existe una gran abundancia de resistividad baja y no permite observarse mayor contraste de resistividad. Para mejorar la apreciación de los contrastes de resistividades, o de colores, que corresponden a los componentes estructurales del suelo, se requirió aplicar un filtro logaritmo natural.

Las tres ERT 2D obtenidas en el predio de la hacienda Santa Elena, observar las tomografías en la ilustración 4 a), b), c), permiten apreciar una franja de resistividad baja, de tonalidad azul claro, entre la profundidad 0.5 m a 1.0 m con valores de resistividad en escala logarítmica entre los 0.6045 Ohm.m y los 0.7545 Ohm.m que, en la escala lineal o real correspondería a los valores entre 7.20 Ohm.m hasta los 7.90 Ohm.m, que se encontró para el valor medido, como respuesta de la muestra de suelo ante el suplemento de Cd. Esta franja se podría asumir como la franja envolvente de flujo catiónico muy cercano a las superficies de las formaciones detectadas, las que sirven de sustrato a la formación de material sedimentario más consolidado que se aprecia en tonalidades de diferentes colores: verde, amarillo, naranja y rojo.

Discusión de las ERT-2D predictivas.

Una vez que se ha determinado el valor de resistividad para el cual la muestra de suelo responde ante el suplemento de Cd suministrado, que fue de 7.20 Ohm.m a 7.90 Ohm.m, se analiza la distribución de este valor de resistividad en las tomografías que se observan en la ilustración 4 a), b) y c), a continuación en el programa Reslpy se realiza un filtrado de color correspondiente o equivalente a este valor, obteniéndose un contraste único, para este caso el valor que corresponde a la más probable distribución de Cd o de sus compuestos más comunes, es la capa más exterior que rodea a las formaciones más consolidadas, de color amarillo, como se observa en la ilustración 13. En la cual se puede observar la dirección de estos tubos de transporte al parecer tienen alcances hasta la superficie y están en forma de fluido rodeando a los materiales de mayor densidad y resistividad. La ERT predictiva, permite establecer: que los niveles de cadmio disponible para el cultivo de cacao, se encuentra cercano a los valores de resistividad de 7.29 ± 0.12 Ohm m que se encuentra entre las profundidades de 0.85 m – 2 m, con algunos puntos dispersos y afloración puntual de 0 a – 0.15 m de profundidad, con muy bajo contenido de Cd, pero se presenta mayor contenido, probablemente por acumulación en la profundidad de –1.75m, como se presenta en la Ilustración 13. Aproximadamente entre los 0.25 a 1.00 m de profundidad, lo cual está en completa

concordancia con el análisis de cada una de las tomografías analizadas, y nos permite inferir que la zona conductiva se encuentra hacia la parte más a la superficie, en la zona del sustrato donde se forma la doble capa, el valor de la conductividad en esta zona se encuentra entre los 12 a los 80 mS cm⁻¹,

Por otro lado, si se observa la tomografía de conductividad en la ilustración 14, podemos observar que nos evidencia una franja de alta conductividad, entre los - 0.25 m a - 1.00 m de profundidad, rodeada por la zona de menor conductividad,

Discusión frente a la regresión no lineal.

Se buscó una función que mejor representara, el valor de la resistividad eléctrica en función de la concentración de complemento de Cd, la cual fue encontrada por regresión no lineal. La regresión no lineal aplicada en el presente trabajo, se realizó tratando de aprovechar el máximo ajuste dado por su R², que presentaron las funciones: potencial, logarítmica y polinómica grado 5, de 0.9264, 0.8595 y 0.9877, respectivamente; para este rango de valores.

Al suponer la existencia de una función que mejor se ajuste a los datos, que se forme a partir de la suma ponderada de las tres funciones y que el factor peso de cada función sea cada uno de los R²; ver ecuación 5, se determinaron los coeficientes (para la determinación de los coeficientes se realizó una rutina de programación en PYTHON); que mejor ajuste presentaron para el rango de valores y se obtuvo la ley general de la función que representa la regresión no lineal de los datos considerados en la tabla. 5, ver ecuación 6

Discusión para qué sirve esta técnica en el estudio de Cd en subsuelo cacaotero.

Esta técnica tiene utilidad tanto en las acciones diagnóstica como en la de post remediación, por cuanto en la acción diagnóstica, permite observar la distribución del contaminante Cd en el subsuelo, y en la de post remediación, permitirá determinar eficiencias y zonas de acumulación, también permite prestar atención a otros componentes inherentes del suelo como son su estrato orgánico, de acuerdo a lo tratado en este trabajo, la seguridad de tener en cuenta los resultados de este trabajo redundarán en la posibilidad reconocer las más probables zonas de concentración, las rutas más probables de movilidad del contaminante.

Si bien la técnica de incorporar las medidas de resistividad eléctrica, para muestras suplementadas con el metal pesado Cd, y transportar estos resultados al estudio más general realizado en campo, mediante la ERT 2D, ya se ha aplicado a otros tipos de suelo cacaotero, como se presenta en los trabajos de Bravo & Benavides-Erazo (2020); y Gil et al.,(2021), la presente aplicación a este tipo de suelo en Arauquita, Arauca; presenta una nueva característica como lo es el tipo de suelo franco arcilloso que se consolidan a partir de sedimentación causada por inundaciones del río Arauca, como se muestra Bravo D., et al. (2024).

Los elementos de trazabilidad y profundidad de contaminación obtenidos por la geofísica somera en este tipo de trabajo, necesariamente interdisciplinar, permitirán hasta su alcance, realizar un diagnóstico geoelectrico y propondrá establecer zonas del subsuelo, que una vez estudiadas e investigados los otros campos del conocimiento, fundamentalmente como el microbiológico y así aplicar las enmiendas o los métodos de remediación que se consideren idóneos, para este tipo de suelo y a la profundidad que este estudio recomienda. para acciones de remediación y mitigación del problema del contaminante Cd, lo que repercutirá en la garantía del derecho a la seguridad alimentaria de la población de Arauca y Colombia y al mismo tiempo redundará en obtener un mejor producto.

La curva de la ilustración 5, que se obtiene al graficar los datos de resistividad Vs cambios de volumen de solución, de la tabla 2, y medidos por la sonda tetraelectrónica; muestra una tendencia constante al valor de 70 Ohm m, como debería esperarse para la propiedad eléctrica intensiva e intrínseca de la resistividad eléctrica de los materiales, la cual permanece constante sin importar la variación de volumen de material. El error en la medición de la resistividad eléctrica; de acuerdo al valor teórico de 62.5 Ohm m, Atkins, et al. (2023) y al valor medido, con sistema tetraelectrónico o de cuatro puntas que fue de 70.0 Ohm m; es de ± 7.5 Ohm.m.

El presente trabajo ha logrado implementar y ejecutar una ruta o metodológica para contribuir al entendimiento de la distribución más probable del contaminante Cd en el subsuelo cacaotero de Arauca, y en particular de un predio de la granja Santa Elena del municipio de Arauquita, destinado al cultivo de cacao, se propone la más probable ruta contaminante, al igual, ha permitido determinar su más probable ruta de distribución y establecer el más probable rumbo del origen de agregación o concentración de Cd en el subsuelo, puesto que la adsorción de cationes de Cd^{+2} en sustratos tanto orgánicos como inorgánicos son posibles, por cuanto la sedimentación causada por el desbordamiento del río Arauca ofrece estos agregados a la matriz franco arcillosa; ahora bien la formación de fluidos líquidos en la porosidad del suelo, permite la formación de tubos conductores de tortuosidad suficientemente largo como para definir valores de conductividad alta, el pH que demuestra la característica ácida de estos suelos, contribuye a la adsorción de los cationes del metal pesado Cd^{+2} en la superficie de los sustratos y muy cercanos al intersticio entre la formación de la doble capa, esto explica la alta conductividad de los suelos.

En presente investigación, realizada en suelos agrícolas destinados al cultivo de cacao, se requirieron, tanto de un análisis cuantitativo como cualitativo, ya sea por contaminación, específicamente de Cd o en general de metales pesados o por elementos traza y sus compuestos naturales, que causen cambios o modificaciones en los valores de resistividad eléctrica, y los resultados obtenidos, nos permite inferir que la ruta de investigación aplicada es una muy viable metodología a seguir, en suelos franco arcillosos con pH entre 4 a 5, es decir, suelos ácidos, que

han sufrido alta saturación y depósitos de sedimentos debido a inundaciones. Las causas de esta acidez la explican el aspecto geológico de la zona, y la sedimentación de estos suelos, la explica las constantes inundaciones: que en esta zona viene dándose desde el Paleógeno-Neógeno.

De acuerdo al análisis de la literatura científica consultada, los análisis de resistividad en las muestras de suelo, tanto en campo como en laboratorio y los análisis químicos, obtenidos por ICP-OES, nos permiten interpretar geofísicamente: que la contaminación por el metal pesado Cd se debe entre otros, a la facilidad que presenta el suelo; tanto por su característica ácida (pH entre 4 -5), como por su nivel de saturación (47 %) y sedimentación, al igual que su tipo de estructura franco arcillosa, la cual define un porcentaje de porosidad específico; favoreciendo la capacidad de intercambio catiónico, y por ende, a la formación de cationes Cd^{+2} , los cuales son los responsables de la existencia de una doble capa en la superficie de los minerales porosos en el interior del suelo, y con ello y en su interior, a la formación de tubos tortuosos de flujo de corrientes de cargas de iones de Cd^{+2} , que resultan conjuntamente: con los potenciales electrostáticos, los campos eléctricos y la presencia de electrolitos; la disminución de la resistividad o el aumento de la conductividad del suelo. Esto concuerda con el trabajo recientemente reportado por Bravo et al., (2024) donde argumenta que tanto el proceso de sedimentación es el principal origen geológico para la presencia del Cd en el cultivo de cacao. Particularmente observándose un gradiente norte sur, desde las líneas de costa del río Arauquita, que inunda las fincas ubicadas al norte de los municipios, en particular a este respecto, Bravo et al. 2024, señala que: la unidad RVB ver mapa 2, tiene una posición geográfica singular en el área de estudio, principalmente en el noreste en el sector denominado 'Las Islas', en el municipio de Arauquita, rodeando la corriente principal y los ramales del río Arauca, sitio influenciado por depósitos provenientes de la Cordillera de los Andes (principalmente por el complejo montañoso denominado Montaña Santandereana). Este hallazgo es similar al estudio de Gramlich et al. (2018), quienes indicaron que las altas concentraciones de Cd en el suelo de las fincas de cacao estaban asociadas con suelos aluviales de materiales sedimentarios (como los presentados en la unidad RVB), lo que puede explicarse por las mayores concentraciones de Cd que generalmente se encuentran en rocas sedimentarias en comparación con las rocas ígneas."

El anterior análisis nos permite inferir, que el método geoelectrico y el análisis químico, como métodos base de estudio, son los más idóneos para explicar la respuesta eléctrica del suelo, ante la presencia de material dopante de Cd, como se observa en la curva del comportamiento del suelo ante la presencia del mineral Cd en diferentes proporciones Vs la resistividad eléctrica, encontrada para la muestra de suelo de Arauquita, analizada en laboratorio de resistividad eléctrica de suelos; como se observa en la Ilustración 13; esto siempre y cuando se conserven los parámetros naturales del suelo: porosidad, compactación, saturación, temperatura y pH, y el dopante de Cd suministrado en forma diluida en ácido a bajo porcentaje, de tal manera que no afecte a la matriz ácida natural del suelo en estudio.

Los niveles de presencia de Cd en las muestras de suelo de Arauquita, que también requirieron de un tratamiento de secado adicional y que fueron medidos por la técnica ICP MS; determinaron valores entre 0.73 a 1.12 mg kg⁻¹, (Bravo, D., et al., 2024), los mismos autores aseguran que las concentraciones de cadmio en sedimentos de canales de riego pueden variar de 0 a 16 mg kg⁻¹ (Chávez et al., 2015), donde más de 0,5 mg kg⁻¹ de Cd disponible se considera contaminado, lo cual permiten concluir que están por encima de los niveles permisibles por las normas de seguridad internacional para suelos destinados a la agricultura. Los niveles presentes de Cd, y los valores de resistividad en la ERT 2D, también permiten determinar la magnitud de la campaña de mitigación y de remediación de estos suelos y nos sugiere que la profundidad óptima para estas acciones se encuentra entre los 0.6 m y 1.50 m.

Aspectos no tenidos en cuenta en el presente trabajo.

Es de mucha importancia, tener en cuenta el papel crucial que juegan; a la contribución del problema de la formación de la traza contaminante, y en general en la dinámica de la contaminación por metales pesados, como el cadmio (Cd). en suelos; las interacciones entre la macrobiota y el microbiota con el suelo.

En resumen, la interacción entre macrobiota y microbiota con el suelo es fundamental para regular la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad del cadmio en el suelo. Estas interacciones pueden tanto mitigar como exacerbar los efectos de la contaminación por cadmio, dependiendo de las condiciones específicas del suelo y del ecosistema en cuestión. Berg, G., & Cernava, T. (2022) y Dotaniya, et al. (2020)

El presente estudio no pretende indagar las complejidades que conlleva el tener en cuenta la inmensidad del problema, al considerar macros y micros ecosistemas en interacción con el suelo. El presente trabajo, solo pretende indagar e intentar construir una ruta de análisis para investigar la trazabilidad y distribución, en el suelo, del metal pesado contaminante cadmio.

La ruta metodológica es muy posible aplicarla por parcela, para controlar los niveles de Cd, con la finalidad de servir de control en la acumulación en el suelo del contaminante Cd y así definir los periodos de remediación. Este problema de acumulación de Cd, como se expone, se debe a la confluencia de varios factores, la alta sedimentación de los suelos, causada por los desbordamientos de los ríos y en especial del río Arauca, el alta acidez del suelo debido a los periodos alternantes de secos a muy húmedos con lo cual se presentan estancamientos de las aguas y la desecación del suelo y la bioacumulación en los frutos de cacao. En la presente ruta metodológica aplicada a los suelos de Arauca que presentan niveles de saturación elevados, es de mucha importancia la aplicación de la ley de Archie, por cuanto la riqueza de información que se puede extraer, de aplicar las dos leyes, es supremamente prolífica, por cuanto con la medición de la resistividad del suelo

saturado, la resistividad de la solución saturante el nivel de saturación del suelo, es posible determinar el factor de formación, el exponente de formación y con estos datos se puede determinar textura del suelo, estructura del suelo, contaminación y alteración, porosidad y saturación. (Hossain K, et al. (2022) y Berg CF, (2022)).

El presente trabajo se realizó desde un enfoque investigativo y de profundización, por cuanto se necesitó de muestreo, mediciones en campo y en laboratorios, se contó con los recursos en campo y laboratorios óptimos para aplicarlos en el logro del objetivo trazado. Si bien la parte investigativa ha sido aplicada en otras zonas del país, en la zona de Arauquita, con un tipo de suelo característico y, con características muy diferentes; un clima y una elevación del relieve muy apto para el cultivo de cacao, no había sido utilizada, y los resultados son beneficiosos para la ampliación de la investigación, toda vez que la naturaleza ácida del suelo y su alta conductividad requirió de un mayor análisis, además de plantear y considerar una metodología diferente,

Para el análisis matemático de la respuesta del suelo a la presencia del contaminante Cd o de sus compuestos más comunes en la matriz ácida de suelo, se debió incluir un análisis de regresión no lineal para obtener la función con mejor aproximación a los datos obtenidos en el laboratorio de suelos, llamada función ponderada y normalizada con respecto al factor de dispersión, al cuadrado (R^2), a partir de tres funciones que mejor R^2 presentaron, y se requirió de un programa en PYTHON. para determinar los coeficientes de ajuste.

Adicional a lo anterior, la implementación de un software de inversión como ResIPy brindó mayor riqueza en cuanto a filtros y construcción de malla de inversión triangular, lo cual mejoró el RMS, pues en todas las tomografías se trabajó con menos de 10 iteraciones, permitiendo determinar un RMS menor a 2., lo que esto coadyuvo a mejorar la resolución de las ERT 2D., redundando en una mejor extracción de datos y análisis de los mismos.

Las tomografías predictivas se refieren a la formación en imagen, de las zonas con valores de resistividad obtenidas en laboratorio y que se debe a la reacción físico química del suelo ante la presencia de elemento mineral traza de metal pesado Cd, y para un mejor contraste, este valor de resistividad se resalta con color amarillo, las diferentes distribuciones de este valor de resistividad en concreto señalan la ruta más probable de presencia de contaminante cadmio.

Por otro lado, es necesario anotar que, para el desarrollo del trabajo de campo, se requirió redefinir el cronograma de actividades, debido a dos factores preponderantes e insalvables como lo fueron la situación de orden público de la zona de acceso al sitio de la actividad de campo, y el marcado incremento de precipitaciones que causaron inundaciones en las mismas zonas de acceso a la parcela de prospección geoelectrica.

Con respecto a la tomografía de conductividad podemos decir que corrobora lo antes analizado de la resistividad, por cuanto nos permite observar, más allá de la alta conductividad que presenta este terreno, la forma envolvente a nivel superficial y hacia el subsuelo, de los elementos de alta resistividad, brindando elementos que nos permiten concordar con el modelo de doble capa y de capa difusa o de fluido de cationes con alta adsorción a nivel superficial y con distribución vertical. Zhang H., et al. (2020)

Nuestra aproximación multi enfoque de Geofísica somera para determinar la distribución mas probable del contaminante Cd y específicamente del catión Cd^{+2} , demostró ser prometedor en la predicción de la biodisponibilidad de Cd en el suelo con un de pH entre 4-5 y con características de alta humedad.

Discusión acerca de lo que le falta perfeccionar a la técnica.

Es indiscutible que, debido a la importancia de los efectos de la Biología, la geología, las interacciones físicas y químicas; en el suelo; se requiere de la intervención interdisciplinaria, de tal manera que se aporte con las herramientas más sensibles, más modernas y de máxima resolución.

El perfeccionamiento de la técnica, se vería muy mejorada con mayor investigación, de las resistividades de los microbiotas en interacción con el Cd; que se dan al interior del suelo, esto contribuiría con mayor resolución espectral de las tomografías, que se podría dar; considerando el tratamiento de la resistividad compleja, el análisis muestral en laboratorio hasta la determinación del tipo de microbiota que interacciona con el Cd.

Con el estudio de la interacción entre: microorganismos, cadmio y variación de resistividad del suelo; la técnica podría ser cada vez más depurada en laboratorio de suelos y traída al campo para monitorear los procesos de biodegradación del Cd, o también, para seguir la ruta de flujo catiónico del Cd^{2+} , esto permitiría, por un lado, determinar las zonas de mayor impacto y/o de mayor bioacumulación, así como también y por otro lado, permitiría ayudar a escoger el método de remediación más adecuada.

9. CONCLUSIONES

Se determinó una novedosa herramienta en la que confluyen la geofísica somera, por tratarse de una profundidad de 2.15 m, geología, laboratorio de física de suelos, laboratorio de química analítica y la estadística, el cual consiste de 5 acciones:

1) Análisis de la distribución más probable de la resistividad en campo, de acuerdo a los materiales, que constituyen el suelo de cultivo y por observación de diferencia de contraste en la distribución de

la resistividad eléctrica se determina la línea, la profundidad y la posición con respecto a la línea prospectada del electrodo, se determina el punto de muestreo.

2) Las muestras de suelo se trasladan, siguiendo los protocolos para ello, a los laboratorios de física de suelos y de química analítica, en el laboratorio de física de suelos se determina el pH, capacidad de saturación de agua bidestilada, calibración de sonda tetraelectrónica para determinación de variación de resistividad con cambios de dopado de Cd, cambios de resistividad ante cambios de cantidad de suelo y de fluido saturante, aplicación de la ley de Archie para determinar el tipo y las características del suelo.

3) Reconocimiento geológico de la zona de estudio, la información proporcionada es muy valiosa por cuanto más allá de decirnos las características geológicas del suelo, vislumbra potenciales fuentes contaminantes u orígenes de la aparición del material traza contaminante, además de indicar existencia de amenazas geológicas en la zona.

4) Toda la información cuantitativa requiere de una correspondiente correlación estadística, que permita explicar e interpretar las relaciones de las variables consideradas y la influencia de ellas en la solución de problema, requiriendo para ello de un análisis no lineal.

5) Con toda la información científica allegada, es factible determinar mediante las tomografías prospectadas, la ruta de distribución más probable del flujo de cationes y/o de su adherencia o adsorción en sustratos orgánicos y/o inorgánicos en el subsuelo y por lo tanto permite la generación de la tomografía predictiva, en la cual se distingue la profundidad y el flujo de intercambio catiónico más probable del contaminante Cd en suelo de cultivo de cacao.

La muestra obtenida por medio del método de tomografía de resistividad eléctrica ERT 2D, contiene presencia de alto contenido de arcillas, arenas, limos y material orgánico; lo cual da significado al alto contraste de resistividad eléctrica, presente en ese punto y en la línea 2 de prospección geoelectrica y detectado en las tomografías de campo a una profundidad de 0.40 m.

De conformidad con los valores de pH (4 – 5) obtenidos se pudo concluir que se trata de un tipo de suelo ácido, motivo por el cual, requirió de dopantes o contaminantes en una matriz acida de baja concentración, y en aras de no alterar, de manera significativa, el pH original de la muestra, para este caso en concreto, fue necesario utilizar ácido nítrico HNO_3 rebajado al 2%, que, para la cantidad de suelo (100 g), no se evidencia un cambio significativo, es decir se trata de dejar invariante al pH o fluctuaciones que tiendan a mayor acides.

La distribución de Cd en el subsuelo; se determinó de acuerdo a la respuesta en resistividad eléctrica de la muestra de suelo, ante variaciones sucesivas de contaminante o material de dopado suministrado. El valor límite mínimo de esta respuesta se obtuvo mediante análisis de regresión no

lineal y como corte de la función representativa, con el eje de valor de la resistividad eléctrica; en una curva resistividad eléctrica Vs Concentración de contaminante $7.29 \pm 0.12 \text{ Ohm m}$

Los ensayos experimentales y de modelización realizados, sugieren una gran variación de la resistividad eléctrica con los contenidos de agua salina (NaCl al 0.9%), concentraciones mineralógicas (hasta de 0.8 mg.kg^{-1} , en medio ácido HNO_3 al 2%) porcentaje de porosidad (hasta 69.5%) y de la compactación (de hasta 410 MPa). Así las cosas, se evidencia que, para todas estas propiedades físicas, la resistividad disminuye, y, en consecuencia, estos tipos de suelo presentan, en condiciones de campo, baja resistividad o alta conductividad eléctrica. Lo anterior, se extrae y corrobora con los resultados de las tomografías obtenidas en campo.

El método aplicado: Aproximación Multi Enfoque de Geofísica Somera, Geología, Física de Suelos, Química Analítica y Estadística, tanto en campo como en el laboratorio, permite obtener la ERT 2D predictiva, y para este caso en concreto, para este tipo de contaminante y de suelo con ayuda del programa de inversión idóneo la ERT 2D predictiva (ResIPy), se obtuvo la ruta más probable de la distribución del contaminante cadmio, en profundidad y superficie. La ERT 2D predictiva, anteriormente referenciada; se obtiene realzando, en color amarillo, las secciones para las cuales los valores de resistividad eléctrica de la ERT 2D en campo coinciden con el valor obtenido de los datos analizados estadísticamente y determinados experimentalmente en los laboratorios, que fue de $7.28 \pm 0.12 \text{ Ohm m}$.

De acuerdo a las ERT 2D de predicción; es evidente la presencia de Cd en el subsuelo prospectado, y se extrae que, la profundidad de agregación o acumulación, se encuentra entre los $-0.25 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$ a los $-2.261 \text{ m} \pm 0.1 \text{ m}$, también permite determinar la ruta más probable de infiltración del contaminante Cd o sus compuestos más comunes, desde la superficie hacia la zona de acumulación entre los $-1.25 \text{ m} \pm 0.05 \text{ m}$ a los $-1.75 \text{ m} \pm 0.05 \text{ m}$. Se puede concluir que de acuerdo a la naturaleza de este tipo de suelo de alta porosidad, por la presencia de altos porcentajes de arenas, y altos niveles de filtración, los mecanismos de transporte del contaminante Cd en el subsuelo, es en la adsorción de cationes Cd^{+2} , por las superficies de los tubos conductivos de alta tortuosidad y aprovechando la fluides existente en los intersticios porosos, gracias a la abundancia de fluidos líquidos de saturación, presentando una alta conductividad eléctrica.

En las tomografías de resistividad eléctrica 2D se puede advertir la ruta más probable de distribución de CD, o de sus compuestos más comunes, la cual se basa tanto en el valor equivalente de la resistividad medida en campo, como en la que corresponde a la reacción de la muestra de suelo de esa zona, a la presencia de Cd, por cuanto el valor de la resistividad en campo coincide con el trabajo realizado por Bravo, et. al. 2024, en el cual, además de concordar con el tipo de suelo franco arcilloso, determinado en el laboratorio de suelos, de características ácidas y en el cual se encuentran cantidades de Cd de hasta $0.79 \pm 0.05 \text{ mg kg}^{-1}$, por el método de fluorescencia de rayos X.

En el desarrollo del presente proyecto fue de gran acierto, aplicar las leyes de Archie, modificadas para la aplicación en suelos saturados, por cuanto mediante ellas se pudo determinar, a partir de mediciones de resistividad que el suelo procedente de Arauquita se determina un factor de formación $F = 0.884$ y exponente de formación $n = 0.087$, y un índice de saturación que indica la presencia de arcillas o minerales de alta conductividad, presenta un suelo de tipo más bien homogéneo, con tamaño de grano y poro no muy variables, sugiere la presencia de contaminantes o sales adicionales que aumentan la conductividad, el suelo es de tipo franco-arcilloso con modificación de matriz a una con mayor contenido de arena, de alta porosidad, con presencia de arcillas con alto contenido mineralógico, entre los que se destaca la formación de la doble capa con formaciones catiónicas, entre las que existe el Cd^{+2} .

Se determinó una función no lineal, que se ajustó a los datos medidos en el laboratorio de física de suelos con una calidad de ajuste de $R^2=0.96$, se calculó la función para determinar la resistividad ante la mínimo de cantidad de dopante de Cd, que corresponde al nivel normal del suelo y calculado por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP – MS, el cual arrojó un valor mínimo de $0.73 \text{ Cd mg kg}^{-1}$ y un valor máximo de $1.12 \text{ Cd mg kg}^{-1}$ y hasta valores mayores de $1.12 \text{ Cd mg kg}^{-1}$, ver Bravo D., et al. (2024), por otro lado, la función matemática encontrada permite determinar una resistividad correspondiente a $7.29 \pm 0.12 \text{ Ohm m}$; para ese valor mínimo de contenido de Cd.

10. RECOMENDACIONES.

El desarrollo del presente trabajo, nos faculta para invitar a seguir trabajando y profundizando en este campo de investigación, tanto teórica como instrumentalmente y consideramos, de mucha importancia, tener en cuenta para futuros estudios en este tipo de suelos, los siguientes aspectos y su argumentación.

Incluir análisis estadístico por Kriging, esta herramienta permitiría mejorar considerablemente el análisis de las tomografías geoeléctricas, destacando aún más, los puntos de mayor concentración contaminante. La distribución espacial de contaminantes por el metal pesado Cd, se puede interpolar utilizando el método kriging y el variograma ajustado correspondiente a el valor de resistividad encontrado en laboratorio de suelos, y así se determinarán cuantitativamente las zonas del área de estudio con más altas o bajas del contaminante traza, ver, por ejemplo: Mendecki, M. J., et. al. (2020), en esta investigación se apoyan en métodos avanzados de geoestadística, para determinar rutas de distribución, en el suelo, del contaminante plomo por antigua actividad minera de la zona de estudio.

Mejorar análisis estadístico mediante desarrollo de algoritmos de machine learning y/o IA, actualmente ya se encuentra a disposición análisis de grandes volúmenes de información, que permitirían determinar las características físico químicas del subsuelo, y su afinidad para formar determinados tipos de compuestos contaminantes de un metal pesado en particular.

Mejorar la instrumentación necesaria para el desarrollo experimental de la determinación y medición de las variaciones de resistividad eléctrica, con la porosidad y con la compactación; para valores de suelo agrícola en diferentes niveles de saturación.

Realizar la tomografía predictiva 3D, el avance en los tipos de software, permite mejorar día a día los procesos, y actualmente se vienen desarrollando nuevos programas; que permiten a partir de los datos de tres tomografías 2D, no colineales y que ofrezcan una periodicidad mínima, desarrollar representaciones 3D, esto unido a las anteriores consideraciones, permitirían determinar in situ la afectación de un terreno estudiado por contaminación con metales pesados.

Para mejorar la resolución de los resultados, debido a que se trata de un estudio que requiere mucha resolución para mejorar el detalle de la zona de subsuelo afectada y la distribución de esta afectación se recomienda realizar la ERT 2D, trabajando, además de la resistividad real, la resistividad compleja. La resistividad compleja puede proporcionar información valiosa sobre la naturaleza estructural e hidráulica de los medios porosos y los fluidos contenidos en dichos medios. El valor ambiental de dicha propiedad es obvio. Kemna, et al. (2000).

11. AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo está enmarcado dentro del Macroproyecto titulado: 'IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS AGROFORESTALES Y VINCULACIÓN DE AVANCES EN EL MANEJO AGRONÓMICO Y POS-COSECHA DE NUEVOS CLONES, PARA MEJORAR PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD DEL CACAO EN EL DEPARTAMENTO DE ARAUCA' con código BPIN 2018000100148, aprobado por Minciencias ante el fondo del Sistema General de Regalías, para el departamento de Arauca. Es un proyecto de Agrosavia, en consorcio con Fedecacao y la Gobernación de Arauca.

Para el análisis de laboratorio físico de suelos de las muestras se tuvo la colaboración del personal del departamento de química y de física del laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño.

La presente investigación se realiza como requisito de grado, gracias al aval del programa de postgrado en Geofísica del departamento de física de la Universidad de Nariño.

12. BIBLIOGRAFÍA

1. Abdulsamad F, Florsch, N., Schmutz, M., & Camerlynck, C. Assessing the high frequency behavior of non-polarizable electrodes for spectral induced polarization measurements. *Journal of Applied Geophysics*. (2016). ;135, :449-55.
2. Abu-Hassanein ZS, Benson, C. H., & Blotz, L. R. Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of geotechnical engineering*. (1996). ;122(5), :397-406.
3. Alloway BJE. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability Media. SSB, editor(2012).
4. Amabile A, Lopes, B. D. C. F. L., Pozzato, A., Benes, V., & Tarantino, A. An assessment of ERT as a method to monitor water content regime in flood embankments: The case study of the Adige River embankment. *Physics and Chemistry of the Earth*. (2020).120, (102930.).
5. Appenroth KJ. Definition of “heavy metals” and their role in biological systems. *Soil heavy metals*. (2010). :19-29.
6. Archie GE. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*. (1942). ;146:54-62.
7. Banton O, Cimon, M. A., & Seguin, M. K. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of America Journal*. (1997). ;61(4), :1010-7.
8. Benyassine EM, Lachhab, A., Dekayir, A., Parisot, J. C., & Rouai, M. An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*,. Facultad de Agronomía. (2017); 22(4).
9. Berg CF. Re-examining Archie's law: conductance description by tortuosity and constriction. *Physical Review E*,. (2012). ; 86(4), :046314.
10. Berg CF, Kennedy, W. D., & Herrick, D. C. Conductivity in partially saturated porous media described by porosity, electrolyte saturation and saturation-dependent tortuosity and constriction factor. *Geophysical Prospecting*. (2022). ;70(2), :400-20.
11. Bernard-Ubertosi M, Dudoignon, P., & Pons, Y. Characterization of Structural Profiles in Clay-Rich Marsh Soils by Cone Resistance and Resistivity Measurements. *Soil Science Society of America Journal*. (2009).73(1), :46-54.
12. Bernstone C, Dahlin, T., Ohlsson, T., & Hogland, H. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology*. (2000). ;39,.360-71.
13. Besson A, Cousin, I., Samouëlian, A., Boizard, H., & Richard, G. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research*. (2004). ;79(2),: 239-49.
14. Bhattacharya P. Direct current geoelectric sounding: Principles and interpretation. Elsevier. (2012).
15. Biosca Valiente BODlpdmeidltgelps. Optimización de los procesos de medida e interpretación de la tomografía geoelectrica en la prospección superficial Universidad Politécnica de Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; (2012).

16. Blanchy G, Saneiyani, S., Boyd, J., McLachlan, P., & Binley, A. ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Computers & Geosciences*. (2020). ;137.
17. Börner FD, Schopper, J. R., & Weller, A. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements¹. *Geophysical prospecting*. (1996). ;44:583-601.
18. Bosch DL, J.; Queralt, P.; Bellmunt, F.; Luquot, L.; Gouze, P. Core-scale electrical resistivity tomography (ERT) monitoring of CO₂ – brine mixture in Fontainebleau sandstone. *J Appl Geophys* 2016.;130, :23–36.
19. Bouyoucos GJ. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*. (1962). ;54(5), :464-5.
20. Bravo D, Pardo-Díaz, S., Benavides-Erazo, J., Rengifo-Estrada, G., Braissant, O., & Leon-Moreno, C. Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *Journal of applied microbiology*. (2018). ;124(5), :1175-94.
21. Bravo D, & Benavides-Erazo, J. The use of a two-dimensional electrical resistivity tomography (2D-ERT) as a technique for cadmium determination in cacao crop soils. *Applied sciences*. (2020). ;10(12), :4149.
22. Bravo D, Santander, M., Rodríguez, J., Escobar, S., Ramtahal, G., & Atkinson, R. 'From soil to chocolate bar': identifying critical steps in the journey of cadmium in a Colombian cacao plantation. *Food Additives & Contaminants*. (2022). :1-15.
23. Bravo D, Quiroga-Mateus, R., López-Casallas, M., Torres, S., Contreras, R., Otero, A. C. M.... & González-Orozco, C. E. Assessing the cadmium content of cacao crops in Arauca, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*. (2024). ;196(4), 1-20.
24. Chaali N, Bravo, D., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Beltrán-Medina, J. I., Serralde-Ordoñez, D. P., & Benavides-Erazo, J. New insights into arsenic and cadmium distribution and origin in paddy soils using electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*. (2022). ;202, :104638.
25. Chavez E, He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*. (2015). ;533, :205-14.
26. Chavez E, He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*. (2016). ;150, :57-62.
27. Curtin D, Peterson, M. E., & Anderson, C. R. pH-dependence of organic matter solubility: Base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy. *Geoderma*,. (2016). ; 271:161-72.
28. Dahlin T, & Loke, M. H. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *Journal of applied geophysics*. (1998). ;38(4), :237-49.
29. Dahlin T, & Loke, M. H. Underwater ERT surveying in water with resistivity layering with example of application to site investigation for a rock tunnel in central Stockholm. *Near Surface Geophysics*. (2018). ;16(3),: 230-7.

30. Datsios ZG, Mikropoulos, P. N., & Karakousis, I. Laboratory characterization and modeling of DC electrical resistivity of sandy soil with variable water resistivity and content. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. (2017).24(5), :3063-72.
31. Eitzinger A, Binder, C. R., & Meyer, M. A. Risk perception and decision-making: do farmers consider risks from climate change?. *Climatic change*. (2018). ;151, :507-24.
32. Ekine A, & Emujakporue, G. Investigation of corrosion of buried oil pipeline by the electrical geophysical methods.. "Journal of Applied Sciences and Environmental Management". (2010).
33. Feola G, Agudelo Vanegas, L. A., & Contesse Bamón, B. P. Colombian agriculture under multiple exposures: a review and research agenda. *Climate and Development*. (2015). ;7(3),.
34. Gabarrón M, Martínez-Pagán, P., Martínez-Segura, M. A., Bueso, M. C., Martínez-Martínez, S., Faz, Á., & Acosta, J. A. Electrical resistivity tomography as a support tool for physicochemical properties assessment of near-surface waste materials in a mining tailing pond (El Gorguel, SE Spain). *Minerals*, 10(6), 559. (El Gorguel, SE Spain) *Minerals*, . (2020);10(6), 559.: 559.
35. Gil JP, López-Zuleta, S., Quiroga-Mateus, R. Y., Benavides-Erazo, J., Chaali, N., & Bravo, D. Cadmium distribution in soils, soil litter and cacao beans: a case study from Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*,. (2021). ; 1:22.
36. Godt J SF, Grosse-Siestrup C, Esche V, Brandenburg P, Reich A, Groneberg DA The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. (2006) 1.
37. Griffiths DH, & Barker, R. D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*. (1993). ;29(3-4), :211-26.
38. Hardie M, & Doyle, R. Measuring soil salinity. In *Plant salt tolerance* Humana Press, Totowa, NJ. (2012).(pp. 415-25).
39. Hartemink AE, & Barrow, N. J. Soil pH-nutrient relationships: the diagram. *Plant and Soil*,. (2023). ; 486(1-2), :209-15.
40. Hassan AA, & Toll, D. G. Water content characteristics of mechanically compacted clay soil determined using the electrical resistivity method. *ICE Virtual Library*. (2015).
41. Hossain K, Anees, M. T., Baker, A. F. B. A., Khan, M. M. A., Khalil, A. E., Ishola, K. S.... & AK, M. O. Application of geo-electrical methods for estimating water infiltration in soils. *Nature Environment and Pollution Technology*. (2022). ;21:1279-88.
42. Hou X, & Jones, B. T. Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry. *Encyclopedia of analytical chemistry*. (2000). ;2000, 9468-9485.:9468-85.
43. Ibañez JJ. Biodisponibilidad de los nutrientes por las plantas, pH del suelo y el complejo de cambio o absorbente. (2007).
44. Ichimaru S. Basic principles of plasma physics: a statistical approach. Press. C, editor: CRC Press.; (2018).
45. Kabata-Pendias A. Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*. (2004). ;122(2-4),: 143-9.
46. Kalinski RJ, & Kelly, W. E. Electrical-resistivity measurements for evaluating compacted-soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*. (1994). ;120(2), :451-7.

47. Kemna A. Tomographic inversion of complex resistivity. Ruhr-: Universität Bochum,; (2000).
48. Kemna A, Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L.... & Zimmermann, E. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. *Near Surface Geophysics*. (2012). ;10:453-68.
49. Khan SR, Sharma, B., Chawla, P. A., & Bhatia, R. Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES): a powerful analytical technique for elemental analysis. *Food Analytical Methods*. (2022).1-23.
50. Kim JH, Yoon, H. K., Cho, S. H., Kim, Y. S., & Lee, J. S. Four electrode resistivity probe for porosity evaluation. ASTM International. (2011).
51. Kim JH, Yoon, H. K., Cho, S. H., Kim, Y. S., & Lee, J. S. Four electrode resistivity probe for porosity evaluation West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. (2011). ;(Vol. 34).
52. Koirtzmann SR, Jones, J. S., Jester, C. P., & Yates, D. A. Use of spatial emission profiles and a nomenclature system as aids in interpreting matrix effects in the low-power argon inductively coupled plasma. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. (1981). ;36(1), :49-59.
53. Kowalczyk S, Maślakowski, M., & Tucholka, P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. *Journal of Applied Geophysics*,. (2014). ; 110, :43-50.
54. KRAUS JD. Electromagnetismo. In: Hill. MDMG, editor.(1986).
55. Loke MH, & Barker, R. D. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*. (1995). ;60(6), :1682-90.
56. Loke MH. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.: Geotomo Software; (2004).
57. Lu Y, Abuel-Naga, H., Al Rashid, Q., & Hasan, M. F. Effect of pore-water salinity on the electrical resistivity of partially saturated compacted clay liners. *Advances in Materials Science and Engineering*. (2019). (7974152.).
58. Mansourian D, Cornelis, W., & Hermans, T. Exploring geophysical methods for mapping soil strength in relation to soil compaction. : Ghent University.; (2020).
59. Metwally M, Elawadi, E., Moustafa, S. S., Al Arifi, N., El Alfy, M., & Al Zaharani, E. Groundwater contamination assessment in Al-Quwy'yia area of central Saudi Arabia using transient electromagnetic and 2D electrical resistivity tomography. *Environmental earth sciences*. (2014).71, :827-35.
60. Mitra S, Pramanik, K., Sarkar, A., Ghosh, P. K., Soren, T., & Maiti, T. K. Bioaccumulation of cadmium by *Enterobacter* sp. and enhancement of rice seedling growth under cadmium stress. *Ecotoxicology and environmental safety*. (2018). ;156, :183-96.
61. Murad OF. Obtaining chemical properties through soil electrical resistivity. *Journal of Civil Engineering Research*. (2012). ;2(6), :120-8.
62. Novaes CG, Bezerra, M. A., da Silva, E. G. P., dos Santos, A. M. P., da Silva Romao, I. L., & Neto, J. H. S. A review of multivariate designs applied to the optimization of methods based on inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). *Microchemical journal*. (2016). ;128, :331-46.
63. Orellana E. Prospección geoeléctrica por campos variables O73 NT, editor(1974).

64. Plati C, Loizos, A., & Gkyrtis, K. Assessment of modern roadways using non-destructive geophysical surveying techniques. *Surveys in Geophysics*. (2020). ;41(3), :395-430.
65. Pozdnyakov AI, Pozdnyakova, L. A., & Karpachevskii, L. O. Relationship between water tension and electrical resistivity in soils. *Eurasian Soil Science*. (2006).39(1), :S78-S83.
66. Reyes Y, Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*. (2016). ;16(2), :66-77.
67. Reynolds JM. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons. Sons. JW, editor(2011).
68. Rodríguez Albarracín HS. Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca: Universidad Nacional de Colombia; 2017.
69. Roger-Estrade J, Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Defosse, P., & Manichon, H. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil and Tillage Research*. (2004). ;79(1), :33-49.
70. Roshan S, Wu, J., & DeVries, T. Controls on the cadmium-phosphate relationship in the tropical South Pacific. *Global Biogeochemical Cycles*. (2017). ;31(10), :1516-27.
71. Russell EJ, & Barker, R. D. Electrical properties of clay in relation to moisture loss. *Near Surface Geophysics*. (2010).8:173-80.
72. Samouëlian A, Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage research*. (2005).83(2), :173-93.
73. Seigel HO. Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*. (1959). ;24:547-65.
74. Seladji S, Cosenza, P., Tabbagh, A., Ranger, J., & Richard, G. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. *European journal of soil science*. (2010). ;61(6), :1043-55.
75. Sharpley AN. Effect of soil pH on cation and anion solubility. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. (1991). ;22(9-10), :827-41.
76. Shevnev V, Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., & Ryjov, A. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. *Geofísica internacional*. (2006). ;45(3), :195-207.
77. Soares Gerscovich DM, & Vipulanandan, C. Data analyses to correlate the soil properties to the electrical resistivity. *Geotechnical and Geological Engineering*. (2023). ;41(8), :4507-28.
78. Telford WM, Geldart, L. P., Sheriff, R. E., & Keys, D. A. *Applied Geophysics* (2nd ed.). : Cambridge University Press.; (1990).
79. Testing AS. Standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method. *American Society for Testing and Materials*. (1995). ;ASTM G 57-95,(1995) 3.
80. Testing AS. Standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method. *American Society for Testing and Materials*. (1995). ;ASTM G 57-95,(1995)

81. Wayal V, Sitharam, T. G., & Anjali, M. Geo-electrical characterization of physical and mechanical properties of zinc tailing. *Journal of Applied Geophysics*. (2021). ;188, :104-315.
82. Wenner F. A method of measuring earth resistivity (No. 258).(1916).
83. Werban U, Kuka, K., & Merbach, I. Correlation of electrical resistivity, electrical conductivity and soil parameters at a long-term fertilization experiment. *Near Surface Geophysics*. (2009).7(1),: 5-14.
84. Willemsen JA. Molecular Dynamics Simulation of the Adsorption of Emerging Organic Contaminants by Smectite Mineral Surfaces. Princeton University.: Princeton University.; (2021).
85. Zha F, Zhu, F., Xu, L., Kang, B., Yang, C., Zhang, W. & Liu, Z. Laboratory study of strength, leaching, and electrical resistivity characteristics of heavy-metal contaminated soil. *Environmental earth sciences*. (2021). ;80, :1-11.
86. Zhang H, Ke, S., Zhang, S., Shao, J., & Chen, H. Reactive transport modeling of pollutants in heterogeneous layered paddy soils: a) Cadmium migration and vertical distributions. *Journal of Contaminant Hydrology*. (2020). ;235.
87. Zhao K, Liu, X., Xu, J., & Selim, H. M. Heavy metal contaminations in a soil–rice system: identification of spatial dependence in relation to soil properties of paddy fields. *Journal of Hazardous Materials*. (2010). ;181(1-3), :778-87.
88. Zhdanov MS. Foundations of geophysical electromagnetic theory and methods. *Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*: Elsevier. ; (2017).
89. Zieher T, Markart, G., Ottowitz, D., Römer, A., Rutzinger, M., Meißl, G., & Geitner, C. Water content dynamics at plot scale—comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling. *Journal of Hydrology, Elsevier*. (2017). ;544, :195-209.
90. Mendecki, M. J., Warchulski, R., Szczuka, M., Środek, D., & Pierwoła, J. (2020). Geophysical and petrological studies of the former lead smelting waste dump in Sławków, Poland. *Journal of Applied Geophysics*, 179, 104080.
91. Shah, P. H., & Singh, D. N. (2005). Generalized Archie's law for estimation of soil electrical conductivity. *Journal of ASTM International*, 2(5), JAI13087
92. Rosli, N., Ismail, N. A., Saad, R., & Rahman, N. (2020). A new approach in calculating porosity of shallow unconsolidated soil based on Archie's Law. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 3.

13. ANEXOS

ANEXO 1

A. Marco Teórico de la Resistividad Eléctrica

El principio de la conservación de la carga eléctrica es el fundamento que explica la existencia del flujo eléctrico presente en un material, que se escribe:

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{dq}{dt} \quad (1)$$

En la cual $\vec{J}$ es la densidad de corriente eléctrica (A/m²) y q es la densidad de carga eléctrica (C/m³), esta relación es conocida como la “ecuación de continuidad”; la cual, para corrientes estacionarias, se reduce a:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (2)$$

Si ρ es la resistividad eléctrica del medio ($\Omega \cdot m$), entonces la densidad de corriente $\vec{J}$ está relacionada con la intensidad del campo eléctrico $\vec{E}$ (V/m), por medio de la ley de Ohm, que la podemos escribir así:

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \text{ y como: } \vec{E} = -\nabla V; \text{ entonces; } \vec{J} = -\frac{1}{\rho} \nabla V \quad (3)$$

De donde se obtiene:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

Donde V es el potencial eléctrico (Voltio). Para un medio isotrópico ρ es una función escalar referida al punto de observación, y $\vec{J}$ está en la misma dirección que $\vec{E}$. En un medio anisótropo $\vec{J}$ tiene una propiedad de dirección y en general no está en la dirección de $\vec{E}$.

A.1.- Resistividad Eléctrica en un Medio Isótropo.

Para un medio isotrópico obtenemos, de las relaciones (2) y (3):

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = \frac{1}{\rho} \nabla^2 V + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \right) \nabla V = 0;$$

de donde:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

Esta es la ecuación fundamental de la prospección eléctrica con corriente continua. Si el medio es homogéneo, ρ es independiente de los ejes de coordenadas. Por lo tanto, la distribución de potencial eléctrico para el flujo de corriente continua, en un medio isotrópico homogéneo; satisface la ecuación de Laplace ec. (6). Si suponemos, que se introduce una corriente I en un medio infinito, y en un punto P , entonces; el potencial a una distancia r desde P , será una función solo de r . Por lo tanto, la ecuación de Laplace puede ser escrita como:

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (7)$$

Su solución es de la forma:

$$V = C_1 + \frac{C_2}{r} \quad (8)$$

Como el potencial se toma como cero a una gran distancia de la fuente, la constante de integración $C_1 = 0$. Está claro que las superficies equipotenciales son esféricas, y las líneas de campo eléctrico, así como las líneas de corriente, son radiales. La densidad de corriente a una distancia r se puede escribir como:

$$J = \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{C_2}{r^2} \quad (9)$$

Así el flujo total de corriente eléctrica que sale de una superficie esférica de radio r es:

$$4\pi r^2 J = \frac{4\pi}{\rho} C_2 \quad (10)$$

Como esto es igual a I , que es la corriente total introducida en el punto P , la constante C_2 se halla como:

$$C_2 = \frac{I\rho}{4\pi} \quad (10.1)$$

Para un medio semi-infinito, cuando la corriente es inyectada en un suelo homogéneo, el potencial en cualquier punto estará dado por:

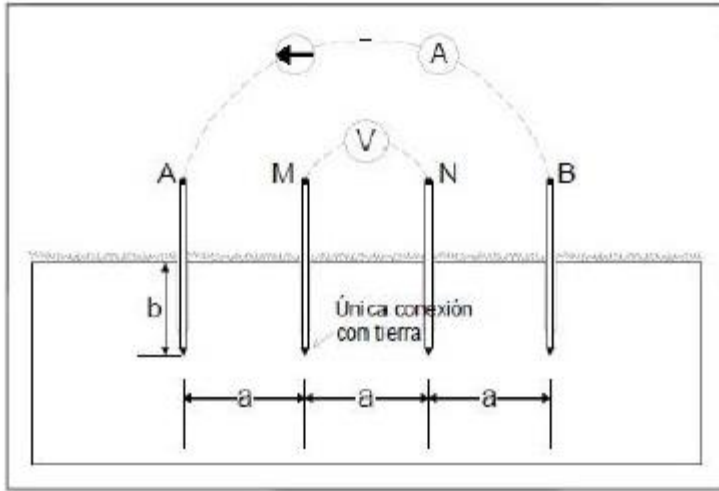
$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (11)$$

En la practica la corriente es introducida al suelo por dos electrodos, una fuente y un sumidero, y el potencial debido a este arreglo bipolar estará dado por:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (12)$$

En la que r_1 y r_2 son las distancias desde el punto P a la fuente y al sumidero, respectivamente.

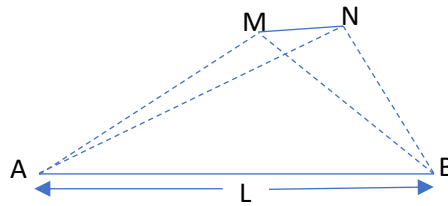
Consideremos que una corriente continua de intensidad I se introduce en un suelo homogéneo e isotrópico mediante electrodos de dos puntos A y B (Figura. A.1). La diferencia de potencial entre los dos puntos M y N en la superficie están dados por la ecuación (12):



Anexo. Figura. 1. Arreglo Wenner y configuración de electrodos.

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (13)$$

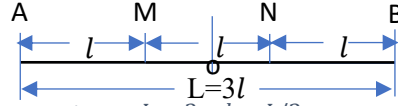
Donde ρ es la resistividad eléctrica del suelo, así la resistividad eléctrica de un suelo homogéneo, puede ser determinada a partir de mediciones desde la superficie, esto no solamente se aplica para mediciones en campo; si no también en mediciones realizadas sobre muestras de suelo en laboratorio (Orellana, E. 1997., Samouëlian, A.et al.2006 y Bhattacharya, P. 2012.)



Anexo. Figura. 2. Eletrodos Electrodo de punta sobre un suelo homogéneo e isotrópico. A, B = fuente puntual y sumidero; M, N = puntos de observación sobre la superficie del suelo. (Tomado de Orellana, E. 1997)

Varios arreglos de electrodos para A,B,M,N; han sido planteados y estudiados para lograr esta finalidad, el que se trabajará en la presente investigación será el arreglo Wenner, el cual se

caracteriza por distribuir de manera equidistante los diferentes electrodos como se observa en la anexo. Figura 4. Los arreglos más comunes han sido: el arreglo simétrico y el arreglo de dipolo. (Orellana, E. 1997. y Bhattacharya, P. 2012.)



Anexo. Figura. 3. Arreglo Wenner si $l = a$, entonces $L = 3a$; $l = L/3$.

En el arreglo simétrico, los puntos A, M,N,B se toman en una línea recta tal que los puntos M y N son simétricamente colocado alrededor del centro O de la longitud total AB.

Por lo tanto, la ecuación (13) se convierte en:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{4}{L-l} - \frac{4}{L+l} \right) \right] \quad (14)$$

De donde concluimos que:

$$\rho = \frac{\pi}{4} \left(\frac{L^2 - l^2}{l} \right) \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

Para el arreglo Wenner $l = a$; $l = L/3$, haciendo los reemplazos en la ecuación (15) se tiene la expresión para determinar la resistividad eléctrica del suelo isótropo homogéneo:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (16)B.-$$

A.2 Resistividad Eléctrica en un Medio Anisótropo.

Anteriormente se determinó que, para un medio anisótropo homogéneo, el tensor de conductividad era un tensor caracterizado por seis componentes y en ese caso es posible orientar los ejes de coordenadas de tal manera que $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$; estos ejes son llamados los ejes principales de anisotropía; y los principales valores de J y E están dados por

$$J_x = \frac{1}{\rho_x} E_x; J_y = \frac{1}{\rho_y} E_y; J_z = \frac{1}{\rho_z} E_z; \quad (17)$$

Donde X, Y, Z son ahora los ejes principales. Así la ecuación de continuidad (2) puede ser escrita en términos de los ejes principales como:

$$\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (18)$$

Elegimos un nuevo sistema de coordenadas, tal que:

$$\xi = x\sqrt{\rho_x}; \eta = y\sqrt{\rho_y}; \zeta = z\sqrt{\rho_z} \quad (19)$$

Y entonces la ecuación (17) se reduce a:

$$\frac{\sigma^2 V}{\sigma \xi^2} + \frac{\sigma^2 V}{\sigma \eta^2} + \frac{\sigma^2 V}{\sigma \zeta^2} = 0 \quad (20)$$

La solución de esta ecuación diferencial es de la forma:

$$V = \frac{C}{(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)^{1/2}} \quad (21)$$

En la cual C es una constante de integración y reemplazando por los ejes principales se tiene:

$$V = \frac{C}{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^{1/2}} \quad (22)$$

De esta ecuación se deduce, que las superficies equipotenciales dadas por:

$$\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2 = K^2 \quad (23)$$

Son elipsoides y los ejes coinciden con los ejes principales de anisotropía. Las densidades de corriente están dadas por:

$$J_x = -\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{C_x}{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^{3/2}}$$

$$J_y = -\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{C_y}{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^{3/2}} \quad (24)$$

$$J_z = -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{C_z}{(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2)^{3/2}}$$

Estas ecuaciones, satisfacen la relación:

$$\frac{J_x}{x} = \frac{J_y}{y} = \frac{J_z}{z} \quad (25)$$

Lo que permite observar las siguientes características:

- La manera en que las líneas de corriente, que son líneas rectas, se extienden radialmente desde la fuente, como en el caso de un medio isotrópico.
- Las líneas de fuerza eléctrica, en un medio anisotrópico forman una familia de trayectorias curvilíneas ortogonales a las superficies equipotenciales.
- No coinciden con las direcciones de las líneas de corriente excepto a lo largo de los ejes principales.

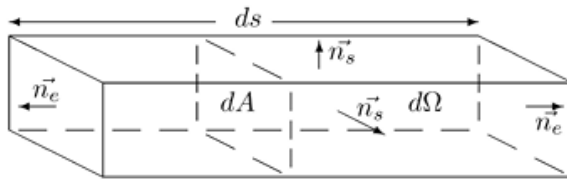
De acuerdo a Bhattacharya, P. 2012., ...La anisotropía en un cuerpo geológico puede deberse a varias razones, es un hecho bien conocido que, en rocas estratificadas, el rumbo ofrece un camino particularmente favorable para el flujo de corrientes eléctricas, la razón puede ser, que un gran número de cristales minerales poseen forma plana o alargada (mica, caolín, etc.). (Orellana, E. 1997. y Bhattacharya, P. 2012.) En exploración eléctrica, la práctica usual es caracterizar la propiedad eléctrica de una roca estratificada por dos parámetros, a saber, la resistividad longitudinal ρ_s (paralela al plano de estratificación) y la resistividad transversal ρ_T (normal al plano de estratificación). Así cualquier anisotropía en el plano de estratificación suele despreciarse, siendo muy pequeño en la mayoría de los casos prácticos.

B. La Ley de Archie

Si tenemos en cuenta el trabajo de Berg, C., et. al. (2021) en el cual se hace un excelente tratado de las ecuaciones de Maxwell para llegar a interpretar de una manera muy acertada, de acuerdo al modelo por ellos planteado, de la ley de Archie, que se debe considerar en este trabajo, por cuanto el suelo en estudio es un suelo que esta constantemente sometido a inundaciones, por precipitaciones de lluvias o por desbordamiento del río Arauca.

Berg et. al., (2021) Consideran un suelo saturado, que comprende una fase conductora (solución salina) y posiblemente varias fases no conductoras. La fase no conductora podría ser la matriz del suelo; por ejemplo, granos de cuarzo o de arenas, también fluidos no conductores que llenan parcialmente el espacio poroso de la roca o suelo. La fase conductora es principalmente un electrolito (soluciones salinas). Los suelos pueden contener otras fases conductoras, como superficies

minerales, arcillas y sulfuros metálicos, comúnmente pirita. Asumiremos una sola fase conductora, es decir, la de la solución salina, que llena (o llena parcialmente) el espacio poroso, con conductividad constante σ_w . Se excluye del análisis la conductancia superficial y las arcillas. Consideran una muestra de roca de volumen V que consta de una matriz aislante y posiblemente un fluido aislante que llena parcialmente el volumen de poros, junto con un electrolito (salmuera) que llena el volumen de poros Ω , restante en el modelo. La muestra tiene una longitud L en la dirección de una diferencia de potencial $\Delta\Phi$, aplicada sobre los planos laterales, y la muestra tiene un área de sección transversal constante A , ver la figura 5. La caída de voltaje $\Delta\Phi$ constante, conduce a una corriente continua. Crean un modelo bidimensional que se asemeja a una muestra de roca. Una sección transversal de una muestra de roca real tiene poca o ninguna conectividad y, por lo tanto, no puede usarse para el modelado numérico bidimensional del flujo de corriente. Berg et. al., (2022), Afirman que: si se desea un modelo con granos de aspecto realista, los granos de una imagen de roca deben separarse para proporcionar un camino para las corrientes que se van a modelar.



Anexo. Figura. 4. Volumen infinitesimal.

En el interior de la solución electrolítica, la densidad de corriente J viene dada por la ley de Ohm como $J = \sigma_w E$, donde E es el campo electrostático. El campo electrostático $E = -\nabla\Phi$, viene dado por el gradiente del potencial eléctrico Φ . El cambio de carga eléctrica en cualquier volumen, es igual a la cantidad de carga que fluye hacia el volumen menos la cantidad de carga que sale. Para un punto dado, el cambio de carga eléctrica viene dado por la divergencia de la densidad de corriente $\nabla \cdot J$. En estado estacionario, entonces tenemos $\nabla \cdot J = 0$. La combinación de las ecuaciones anteriores implica que el potencial eléctrico debe satisfacer la ecuación de Laplace:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot \sigma_w E = -\nabla \cdot \sigma_w \nabla \Phi = -\sigma_w \nabla^2 \Phi = 0, \quad (26)$$

Con las condiciones de frontera $\Phi = \Phi_{in}$, sobre la parte izquierda y $\Phi = \Phi_{out}$, sobre la parte derecha y donde la conductividad del electrolito σ_w , es constante. La corriente eléctrica no puede fluir hacia o desde ninguna fase no conductora, por lo tanto, la corriente debe fluir paralela a la interfaz entre la fase conductora (solución salina) y la fase no conductora (matriz de suelo); es decir, paralelo a las superficies de los granos, ya que ninguna corriente puede entrar o salir de los granos

no conductores. Por otro lado, la potencia P eléctrica desarrollado en la fase de conducción, en todo el volumen Ω , es:

$$P = V.I \text{ (Watts) con } V = \Delta\Phi \text{ (Voltios)} P = V.I \text{ (Watts)}$$

$$P = \int_{\Omega} \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV = \int_{\Omega} \sigma_w \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi dV = \int_{\Omega} \sigma_w \|\nabla\Phi\|^2 dV. \text{ (Watts);}$$

con dV : elementos de Volumen

La corriente total por el conductor electrolítico se puede escribir de la forma:

$$I = \frac{1}{\Delta\Phi} \int_{\Omega} \sigma_w \|\nabla\Phi\|^2 dV. \text{ (Amperios)}$$

(29)

Por definición de la conductividad efectiva σ_t , de la muestra considerada es:

$$\sigma_t = \frac{\mathbf{j}}{\mathbf{E}} = \frac{\frac{I}{A}}{\frac{\Delta\Phi}{L}} = \frac{IL}{A\Delta\Phi}$$

(30)

Dividiendo esta expresión por la conductividad del electrolito que llena los poros de la muestra se tiene:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_w} = \frac{IL}{\sigma_w A \Delta\Phi} = \frac{L}{A(\Delta\Phi)^2} \int_{\Omega} \|\nabla\Phi\|^2 dV.$$

(31)

Expresa la conductividad del medio como una integral sobre el volumen del electrolito.

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_w} = \phi S_w \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \frac{\|\nabla\Phi\|^2}{\frac{\Delta\Phi}{L^2}} dV = \phi S_w E_t.$$

(32)

Berg, C., et al., (2021), definen la conductividad mediante la cantidad fraccionaria de electrolito dada por ϕS_w y una integral sobre el volumen de electrolito vinculada al gradiente local en el campo eléctrico. Y aquí expresan la ley de Archie como: $\rho_t = \rho_w \Omega^{-1} S_w^{-1} E_t^{-1}$; Si se asume que la muestra está completamente saturada de agua, entonces $S_w = 1$, y se tiene que $\sigma_t = \sigma_s$, y se llega a la expresión para el factor de conductividad de la formación f :

$$f = F^{-1} = \frac{\rho_w}{\rho_s} = \frac{\sigma_s}{\sigma_w} = \phi E_0.$$

(33)

con F : Factor de Formación.

ANEXO 2

La espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente ICP OES.

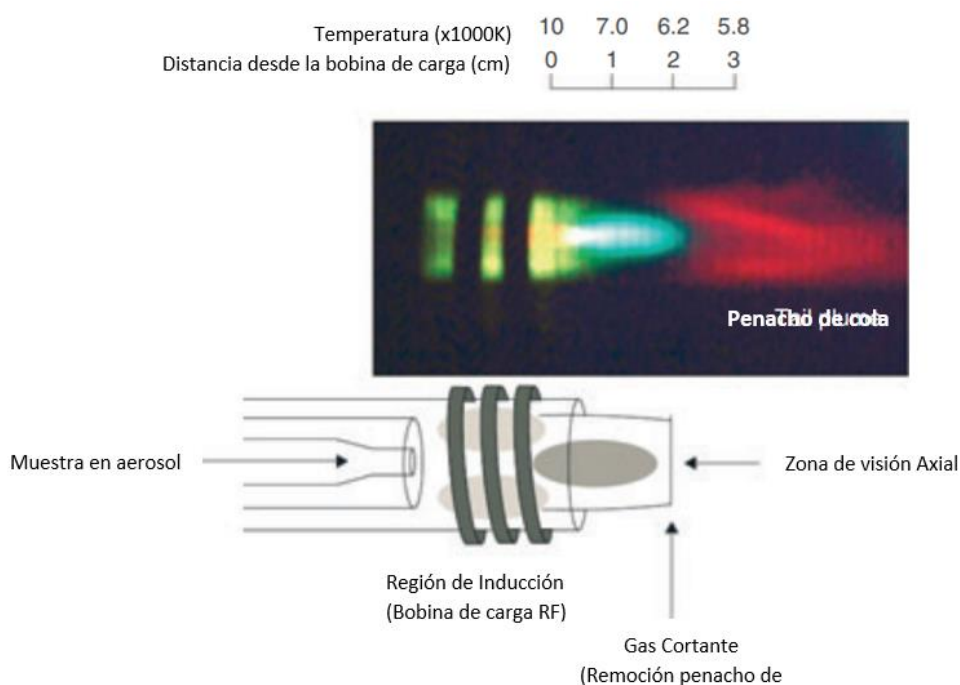
En instrumentos de medición el plasma proviene de un gas altamente energizado, y eléctricamente neutro compuesto de iones, electrones y partículas neutras. Suele ser producido por una corriente de argón, que es energizada por un campo electromagnético de alta frecuencia (o por energía de microondas) o por una corriente continua. Cuando esta fuente se combina con espectrómetros de alta calidad, da como resultado una poderosa técnica de detección de elementos presentes en una muestra. Los plasmas producidos en estos espectrómetros suelen tener una temperatura elevada (pueden alcanzar los 8.000 K) y un entorno químico menos reactivo que la llama del atomizador. Entre las técnicas espectrométricas disponibles comercialmente, la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP OES) se destaca hoy en día por su versatilidad y capacidad de detección. Novaes, C. G., et al. (2016).

Con este método, las muestras líquidas se inyectan en un plasma de argón inducido por radiofrecuencia (RF) usando uno de una variedad de nebulizadores o técnicas de introducción de muestras. La niebla de la muestra que llega al plasma se seca, vaporiza y energiza rápidamente a través de la excitación por colisión a alta temperatura. La emisión atómica que emana del plasma se ve en una configuración radial o axial, se recolecta con una lente o un espejo y se refleja en la rendija de entrada de un dispositivo de selección de longitud de onda. Las mediciones de un solo elemento se pueden realizar de manera rentable con una combinación simple de monocromador y tubo fotomultiplicador (PMT), y se realizan determinaciones simultáneas de elementos múltiples para hasta 70 elementos con la combinación de un policromador y un detector de matriz. El rendimiento analítico de dichos sistemas es competitivo con la mayoría de las demás técnicas de análisis inorgánico, especialmente en lo que respecta al rendimiento y la sensibilidad de la muestra. Hou, X., & Jones, B. T. (2000).

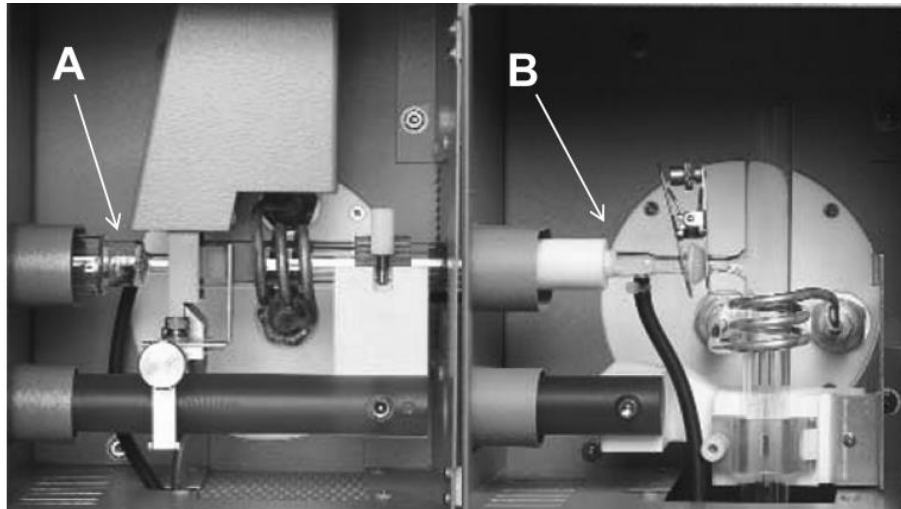
B. El plasma acoplado inductivamente (ICP).

El plasma acoplado inductivamente (ICP) se genera de la siguiente manera: se aplica potencia de radio frecuencia (RF), normalmente de 700 a 1500 W, a la bobina de carga y una corriente alterna oscila dentro de la bobina a una velocidad correspondiente a la frecuencia del generador de RF. Para la mayoría de los instrumentos ICP OES, el generador de RF tiene una frecuencia de 27 o 40 MHz. La oscilación de corriente a esta alta frecuencia hace que se establezca la misma oscilación de alta frecuencia de campos eléctricos y magnéticos dentro de la parte superior de la antorcha. Con el gas argón fluyendo a través de la antorcha, se usa una chispa de una bobina de Tesla, para producir electrones e iones de "semilla"; en el gas argón dentro de la región de la bobina de carga. (Wu, P., et al. (2009)). Estos iones y electrones luego son acelerados por el campo magnético, y chocan con otros átomos de argón, provocando una mayor ionización en forma de reacción en

cadena. Este proceso continúa; hasta que se forma un plasma de alta temperatura, de color blanco brillante, muy intenso, en forma de lágrima. Agregar energía al plasma a través de colisiones inducidas por RF se conoce como acoplamiento inductivo y, por lo tanto, el plasma se denomina ICP. El ICP se mantiene dentro de la antorcha siempre que se aplique suficiente energía de RF. En un sentido más crudo, el acoplamiento de la energía de RF al plasma se puede visualizar como iones de Ar cargados positivamente en el gas de plasma, que intentan seguir los iones cargados negativamente, electrones que fluyen en la bobina de carga (y los campos eléctricos y magnéticos correspondientes), ya que el flujo cambia de dirección 27 (o 40) millones de veces por segundo. La multitud de colisiones que se producen en este entorno da lugar a la transferencia de energía a la muestra. Wu, P., et al. (2009). Ver anexo figura 6.



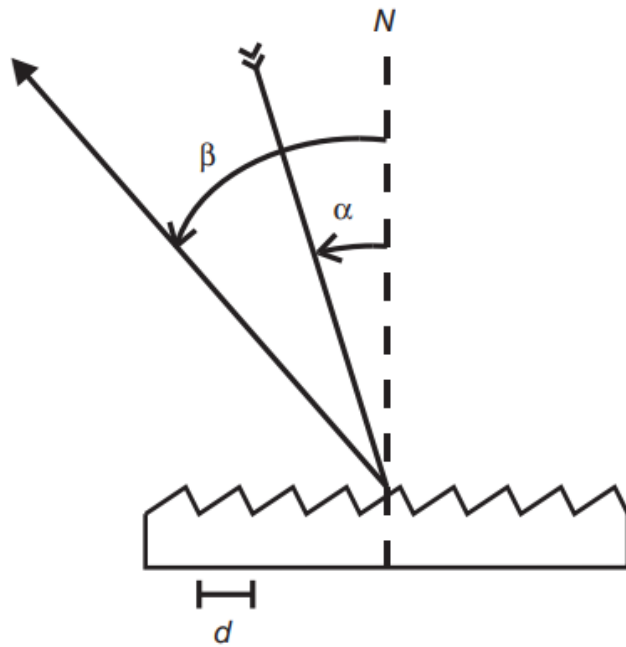
Anexo. Figura. 5. Se muestra el gradiente de temperatura dentro del ICP con respecto a la distancia desde la bobina de carga. También da la nomenclatura para algunas de las diferentes zonas del plasma como lo sugiere Koirtiyohann et al.(15) La región de inducción (IR) rodeada por la bobina de carga tiene "forma de rosquilla" como se describe arriba, y es la región donde se produce la transferencia de energía inductiva. Esta es también la región de mayor temperatura y se caracteriza por una emisión continua brillante. Desde el IR hacia el penacho de cola, la temperatura disminuye. La radiación de fondo continuo en la región IR es el resultado de tres procesos principales: relajación de especies moleculares excitadas en el plasma; reacciones de recombinación de ion electrón-argón; y el efecto Bremsstrahlung (radiación electromagnética emitida cuando los electrones son desacelerados por el campo magnético cambiante). Modificado de Hou, X., & Jones, B. T. (2000).



Anexo. Figura. 6. Fotografías de una ruta de purga axial (A) y una ruta de purga radial (B). (Fotografías cortesía de Teledyne Leeman Labs.). Tomado de Peng Wu, et al. (2009)

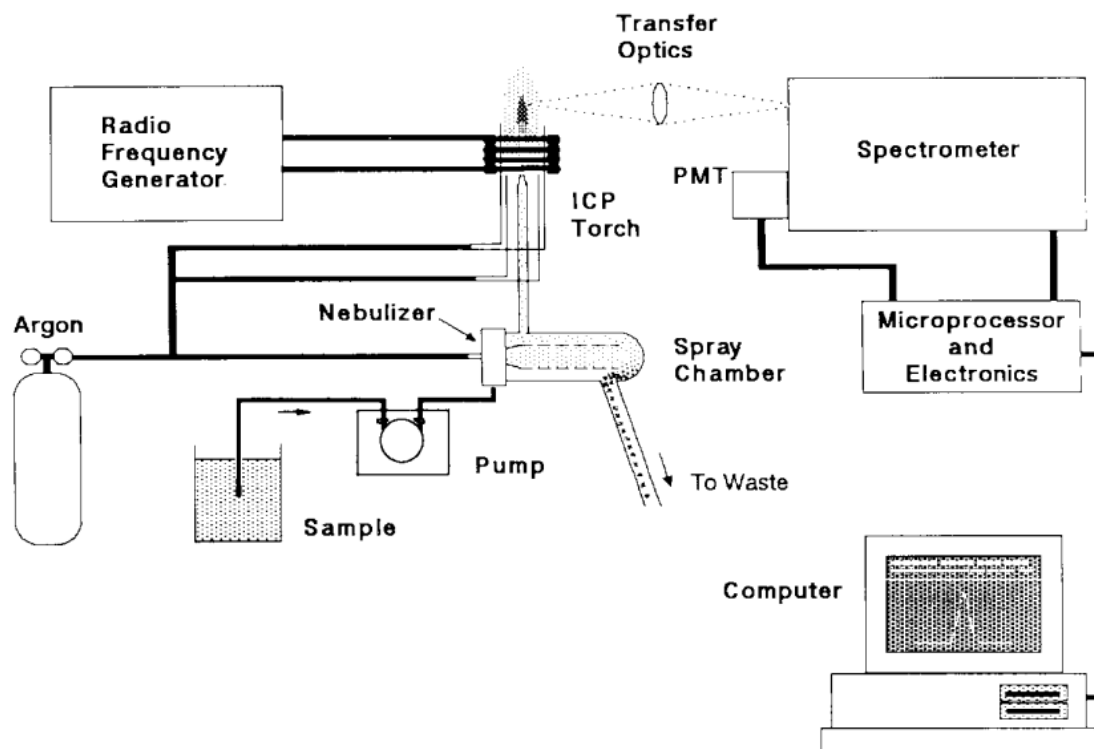
C. Espectrómetro del ICP-OES

ICP OES se caracteriza por riqueza espectral, de los 70 elementos más comúnmente determinados por este método, dan lugar a por lo menos 70 000 líneas de emisión totales en el rango de longitud de onda de 200 a 600 nm. Una consecuencia de esta alta densidad de información espectral, es la necesidad de un alto poder de resolución. Las interferencias espectrales, ocurren en este caso incluso si solo un pequeño número de elementos concomitantes, están presentes en concentraciones moderadas en la muestra. Es deseable una resolución mucho más alta en ICP OES, con paso de banda espectral ($\Delta\lambda$) de 0,01 nm o menos, este grado de resolución se ha logrado utilizando monocromadores de rejilla plana con distancias focales grandes ($f = 0,5$ m. o más). La figura 3, representa una rejilla de surcos planos. La normal a la superficie de rejilla (N) se muestra como una línea discontinua. Un rayo de luz que incide en la rejilla se aproxima con un ángulo α , medido con respecto a N . El rayo difractado sale de la superficie de la rejilla con un ángulo β . Los rayos paralelos que inciden en la rejilla, en diferentes facetas de ranura adyacentes; recorren una distancia diferente antes de alcanzar una posición común más allá de la rejilla. Si la diferencia en la distancia recorrida es un múltiplo de la longitud de onda de la luz (λ) que incide sobre la superficie de la rejilla, entonces los rayos experimentan una interferencia constructiva. De lo contrario, se produce una interferencia destructiva. Consideraciones geométricas relativamente simples dan como resultado la fórmula de rejilla que se muestra en la ecuación (34):



Anexo. Figura. 7. Diagrama de la rejilla de ranuras planas. N es la normal a la superficie de la rejilla, α el ángulo de incidencia medido con respecto a N , β el ángulo de difracción medido con respecto a N , y d el ancho de una sola ranura. (Tomado de Spectroscopy Review 1980)

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda \quad (34)$$



Anexo. Figura. 8. Diagrama esquemático del proceso de medición (Tomado de Novaes, C. G., et al. (2016))

D. El plasma en instrumentos Ópticos

En instrumentos de medición el plasma proviene de un gas altamente energizado, y eléctricamente neutro compuesto de iones, electrones y partículas neutras. Suele ser producido por una corriente de argón, que es energizada por un campo electromagnético de alta frecuencia (o por energía de microondas) o por una corriente continua. Cuando esta fuente se combina con espectrómetros de alta calidad, da como resultado una poderosa técnica de detección de elementos presentes en una muestra. Los plasmas producidos en estos espectrómetros suelen tener una temperatura elevada (pueden alcanzar los 8.000 K) y un entorno químico menos reactivo que la llama del atomizador. Entre las técnicas espectrométricas disponibles comercialmente, la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP OES) se destaca hoy en día por su versatilidad y capacidad de detección. Novaes, C. G., et al. (2016).

Con este método, las muestras líquidas se inyectan en un plasma de argón inducido por radiofrecuencia (RF) usando uno de una variedad de nebulizadores o técnicas de introducción de muestras. La niebla de la muestra que llega al plasma se seca, vaporiza y energiza rápidamente a través de la excitación por colisión a alta temperatura. La emisión atómica que emana del plasma se ve en una configuración radial o axial, se recolecta con una lente o un espejo y se refleja en la rendija de entrada de un dispositivo de selección de longitud de onda. Las mediciones de un solo elemento se pueden realizar de manera rentable con una combinación simple de monocromador y tubo

fotomultiplicador (PMT), y se realizan determinaciones simultáneas de elementos múltiples para hasta 70 elementos con la combinación de un policromador y un detector de matriz. El rendimiento analítico de dichos sistemas es competitivo con la mayoría de las demás técnicas de análisis inorgánico, especialmente en lo que respecta al rendimiento y la sensibilidad de la muestra. Hou, X., & Jones, B. T. (2000).

Anexo 3 Programa Python para determinar coeficientes

Los coeficientes de la función que mejor se ajusta a los datos experimentales se determinaron en el programa en Python y con ello se puede determinar los coeficientes de ajuste de la función ponderada.

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
# Definir las funciones no lineales f1, f2 y f3
def f1(x):
    return -111.81 * x ** 5 + 935.67 * x ** 4 - 2940.8 * x ** 3 + 4297.5 * x ** 2 - 2943.8 * x + 979.13
def f2(x):
    return -110 * np.log(x) + 235.08
def f3(x):
    return 219.03 * x ** -0.442
# Definir los datos observados
x_data = np.array([0.28, 0.56, 0.84, 1.12, 1.4, 1.68, 1.96, 2.24, 2.52, 2.8])
y_data = np.array([436.1844828, 234.637931, 229.3827586, 216.5948276, 201.8017241,
163.7706897, 158.4206897, 155.762069, 149.2965517, 143.8431034])
# Coeficientes R^2 de las funciones
r2_f1 = 0.9877
r2_f2 = 0.8595
r2_f3 = 0.9264
# Función de error
def error_func(params, x, y_observed):
    a, b, c = params
    y_predicted = a * f1(x) + b * f2(x) + c * f3(x)
    return np.sum((y_observed - y_predicted) ** 2)
# Estimar los coeficientes iniciales
initial_guess = [1, 1, 1]
# Ponderación inversa al error cuadrático para cada función
weights = [1/r2_f1, 1/r2_f2, 1/r2_f3]
# Normalizar los pesos
weights /= np.sum(weights)
# Optimizar los coeficientes utilizando la función minimize de scipy
result = minimize(error_func, initial_guess, args=(x_data, y_data), method='Nelder-Mead')
# Obtener los coeficientes óptimos
a_opt, b_opt, c_opt = result.x
# La nueva función F será una combinación ponderada de las funciones originales
def F(x):
    return a_opt * f1(x) + b_opt * f2(x) + c_opt * f3(x)
print("Coeficientes óptimos:")
print("a =", a_opt)
print("b =", b_opt)
print("c =", c_opt)
Coeficientes óptimos:
```

$$\alpha = 0.962277226644050$$

$$\beta = -0.06510484690400557$$

$$\gamma = 0.10418724708787563$$

Y la nueva función F será:

$$F(x) = 0.96227722664405 * (-111.81 * x^5 + 935.67 * x^4 - 2940.8 * x^3 + 4297.5 * x^2 - 2943.8 * x + 979.13) - 0.0651048469040055 * (-110 * (LN(x)) + 235.08) + 0.104187247087875 * (219.03 * x^4 - 0.442)$$

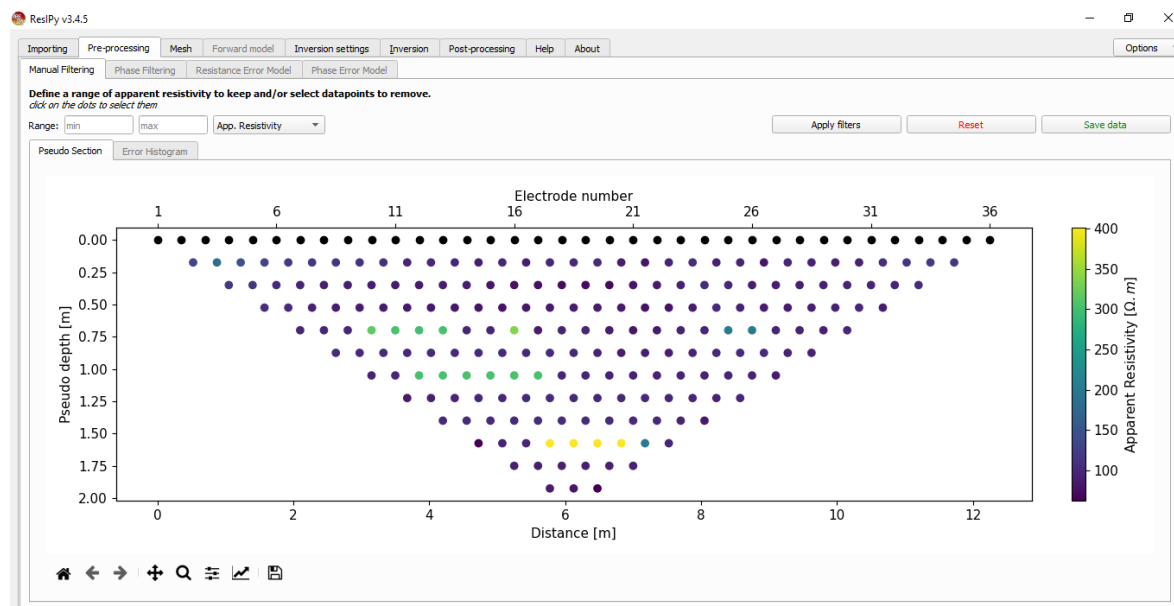
Realizando la simplificación se obtiene:

$$F(x) = -107.59140x^5 + 900.367170x^4 - 282.9843616x^3 + 413.5355325x^2 - 273.18724x + \frac{227.7912}{x^{0.442}} + 7.16Ln(x) + 926.8837171 \quad (35)$$

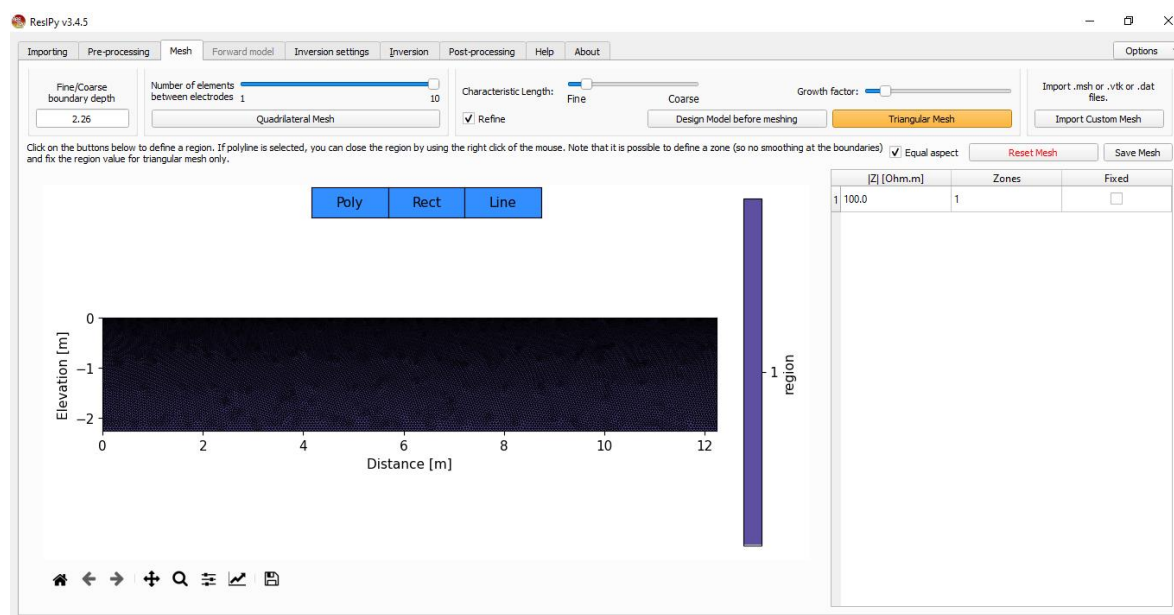
Anexo 4. Procesamiento de ERT 2D

Procesamiento para obtener las Tomografías 2D en El programa de Inversión ResIPy

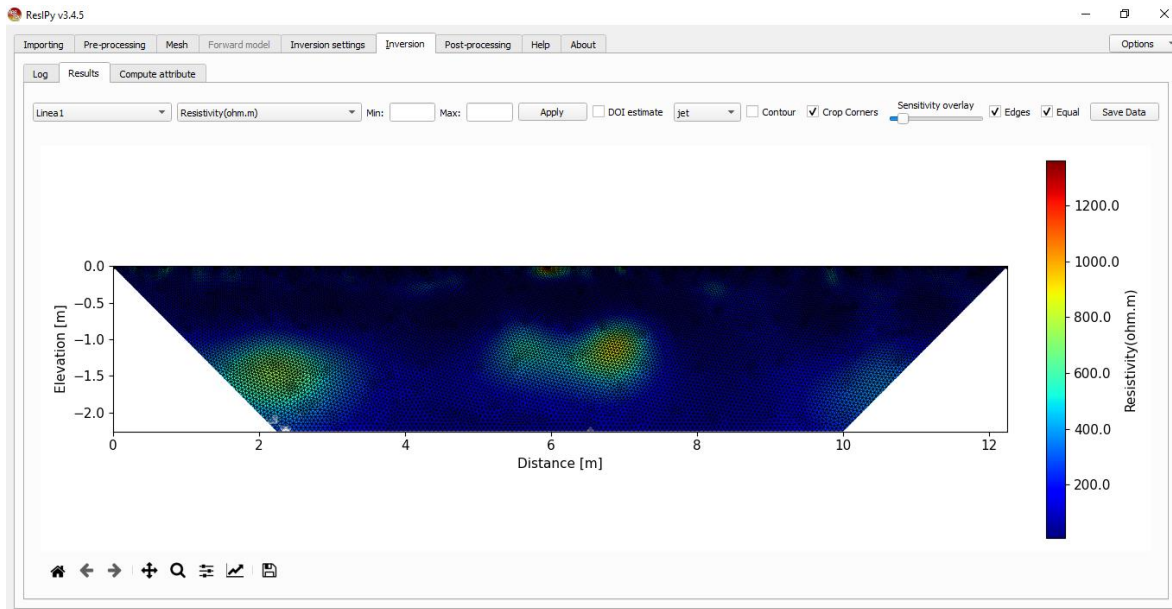
Linea 1



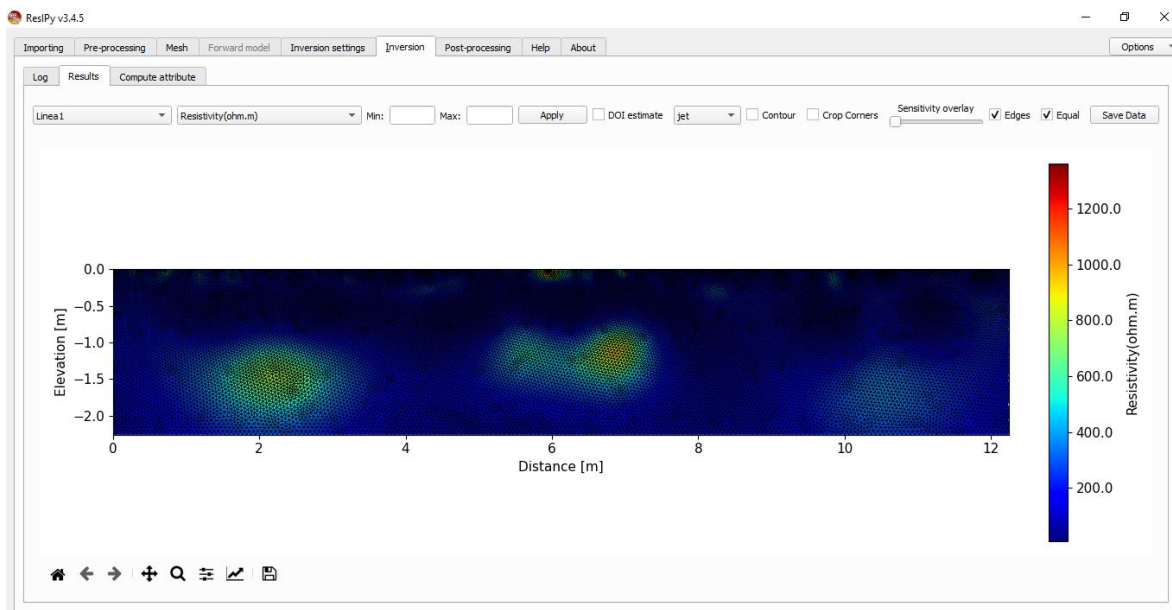
Anexo 3. Figura. 1. Preprocesamiento de los datos para Inversión. (ResIPy ver. 3.4.5)



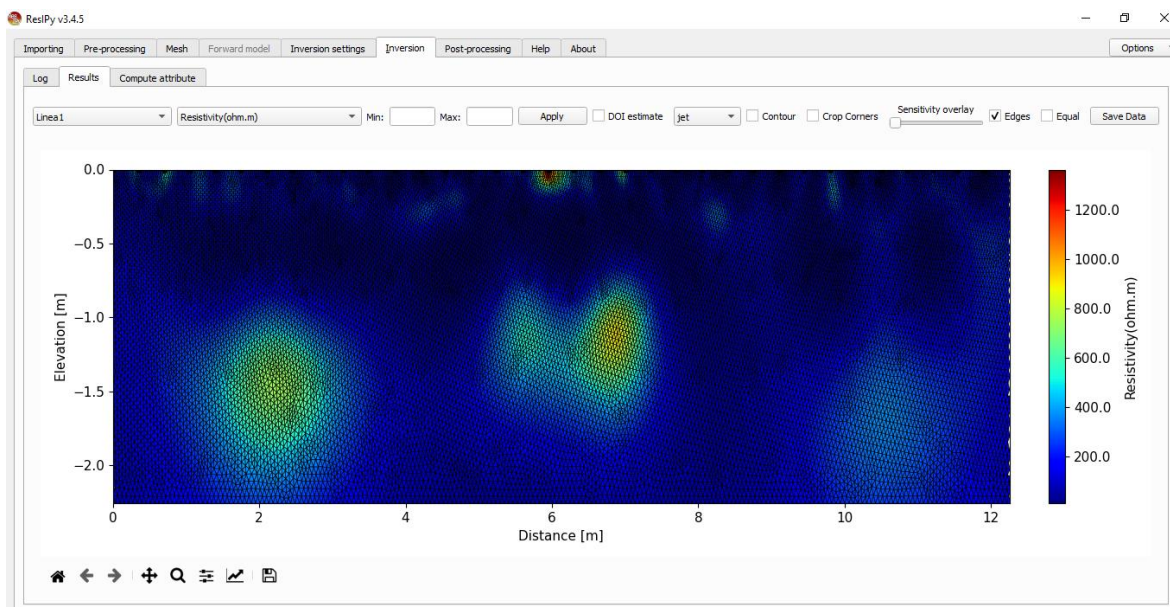
Anexo 3. Figura. 2. Definición de malla de inversión triangular. (ResIPy ver 3.4.5)



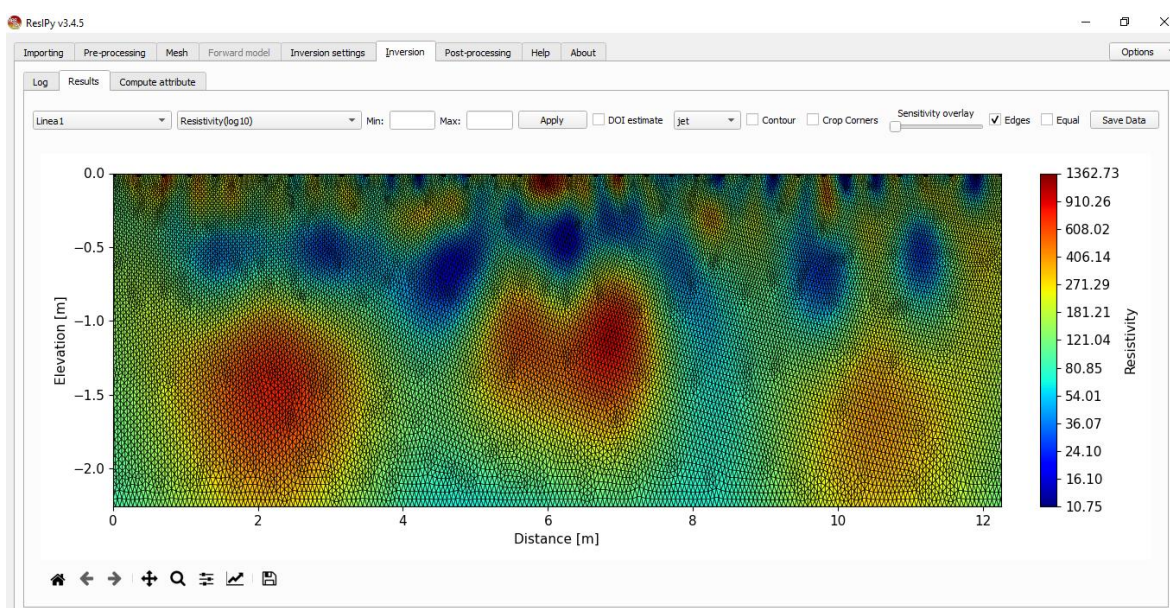
Anexo 3. Figura. 3. Tomografía con mallado triangular y con corte de esquinas. (ResIPY ver 3.4.5.)



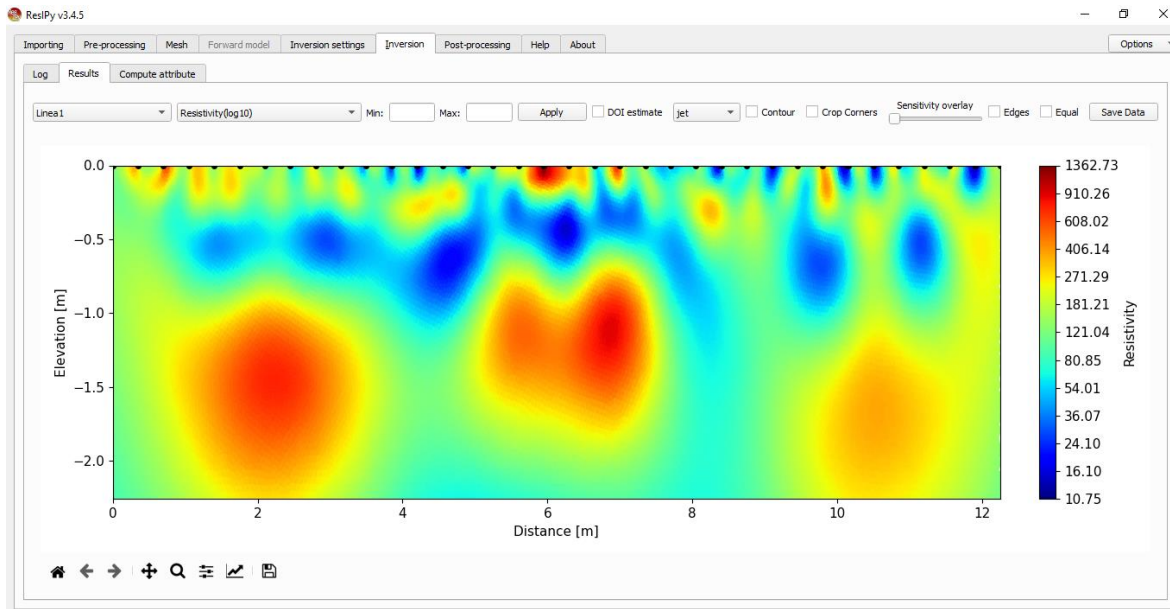
Anexo 3. Figura. 4. Tomografía con máxima resolución y mallado triangular. (ResIPY ver 3.4.5.)



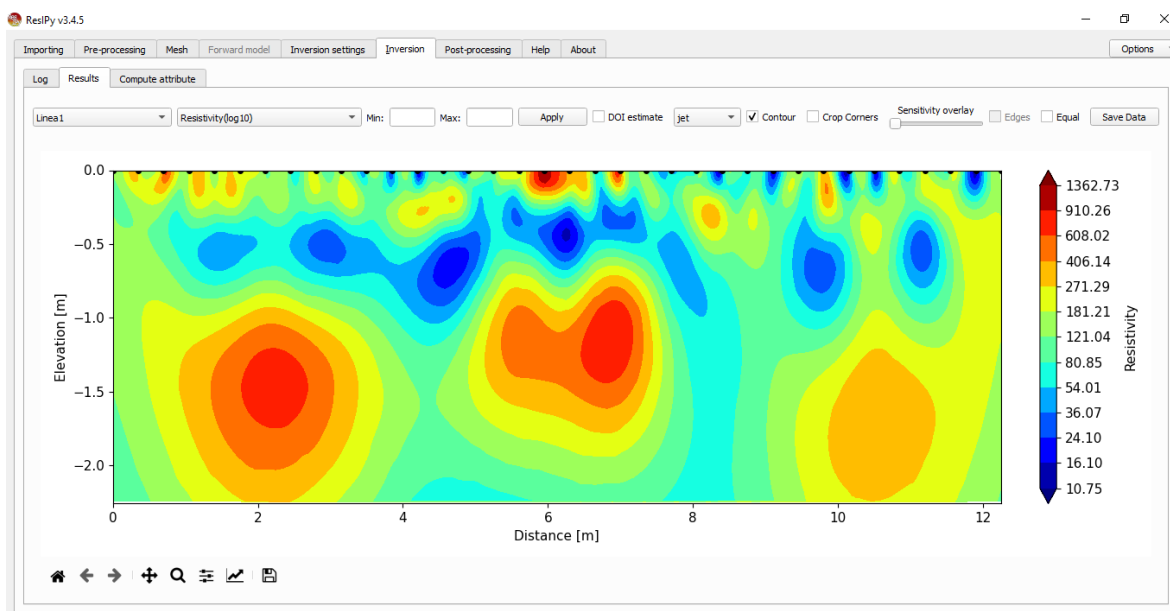
Anexo 3. Figura. 5. Tomografía con máxima resolución y máxima apertura (sin editar). (ResIPy ver 3.4.5.)



Anexo 3. Figura. 6. Tomografía maximizada con malla de inversión triangular (sin editar) (ResIPy ver 3.4.5.)



Anexo 3. Figura. 7. Tomografía final maximizada. (Sin editar) (ResIPy ver 3.4.5.)



Anexo 3. Figura. 8. Tomografía con contornos, maximizada. (ResIPy ver 3.4.5)

Salida de información durante procesamiento de inversión.

```
>> R2 ResistivityInversion v4.02 <<
```

```
>> Date: 09 - 03 - 2024
```

```
>> My beautiful survey
```

```
>> InverseSolutionSelected<<
```

```
>> Reading start resistivity from res0.dat
```

```
>> RegularisedType<<
```

```
>> LinearFilter <<
>> True-DataInversion <<
>> NormalRegularisation <<
>> Data weights will be modified <<
```

Processing dataset 1

Measurements read: 198 Measurements rejected: 0
Geometric mean of apparent resistivities: 0.10585E+03

>> Total Memory required is: -7.521 Gb

Iteration 1

Initial RMS Misfit: 12.06 Number of data ignored: 0
Alpha: 9.613 RMS Misfit: 10.47 Roughness: 63.842
Alpha: 4.462 RMS Misfit: 10.84 Roughness: 113.196
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 10.47
Updated data weights

Iteration 2

Initial RMS Misfit: 6.20 Number of data ignored: 0
Alpha: 7.091 RMS Misfit: 5.67 Roughness: 42.068
Alpha: 3.291 RMS Misfit: 5.58 Roughness: 68.904
Alpha: 1.528 RMS Misfit: 5.60 Roughness: 117.333
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 5.58
Updated data weights

Iteration 3

Initial RMS Misfit: 3.31 Number of data ignored: 0
Alpha: 2.123 RMS Misfit: 3.24 Roughness: 68.565
Alpha: 0.986 RMS Misfit: 3.23 Roughness: 113.340
Alpha: 0.457 RMS Misfit: 3.52 Roughness: 197.430
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 3.23
Updated data weights

Iteration 4

Initial RMS Misfit: 2.16 Number of data ignored: 0
Alpha: 0.581 RMS Misfit: 2.09 Roughness: 127.420
Alpha: 0.270 RMS Misfit: 2.33 Roughness: 238.156
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 2.09
Updated data weights

Iteration 5

Initial RMS Misfit: 1.56 Number of data ignored: 0
Alpha: 0.319 RMS Misfit: 1.53 Roughness: 171.383
Alpha: 0.148 RMS Misfit: 1.86 Roughness: 320.177
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 1.53
Updated data weights

Iteration 6

Initial RMS Misfit: 1.21 Number of data ignored: 0
Alpha: 0.166 RMS Misfit: 1.18 Roughness: 213.037
Alpha: 0.077 RMS Misfit: 1.52 Roughness: 393.319
Step length set to 1.00000
Final RMS Misfit: 1.18
Attempted to update data weights and caused overshoot
treating as converged

Solution converged - Outputting results to file

Calculating sensitivity map

Processing dataset 2

End of data: Terminating

Timing Summary

=====

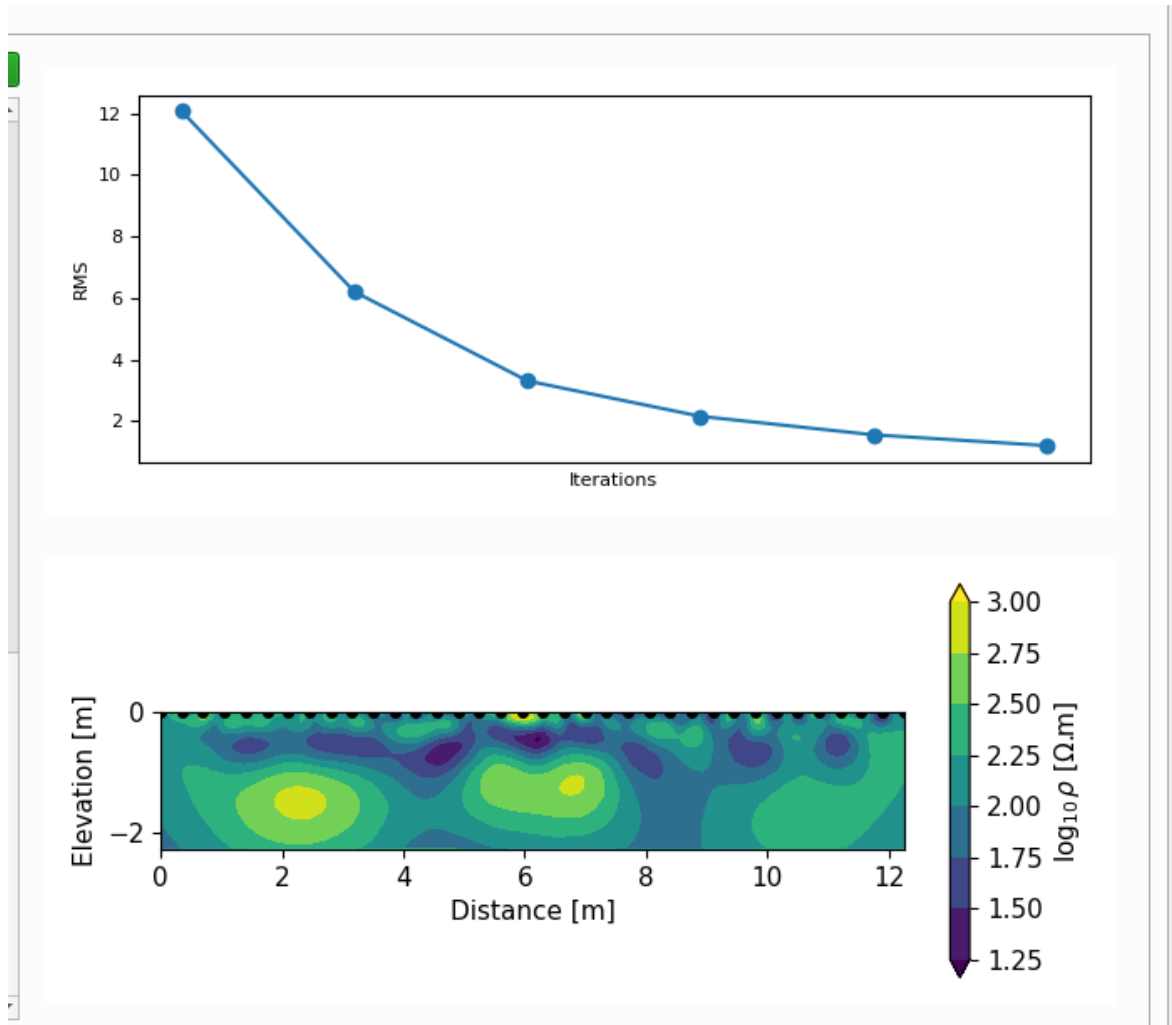
Total time taken: 667. s
Percent time taken forming element equations: 0.3 %
Percent time taken solving forward equations: 34.4 %
Percent time taken forming Jacobian: 0.3 %
Percent time taken solving inverse equations: 52.4 %
Percent time taken calculating res. matrix: 0.0 %

Timing Details

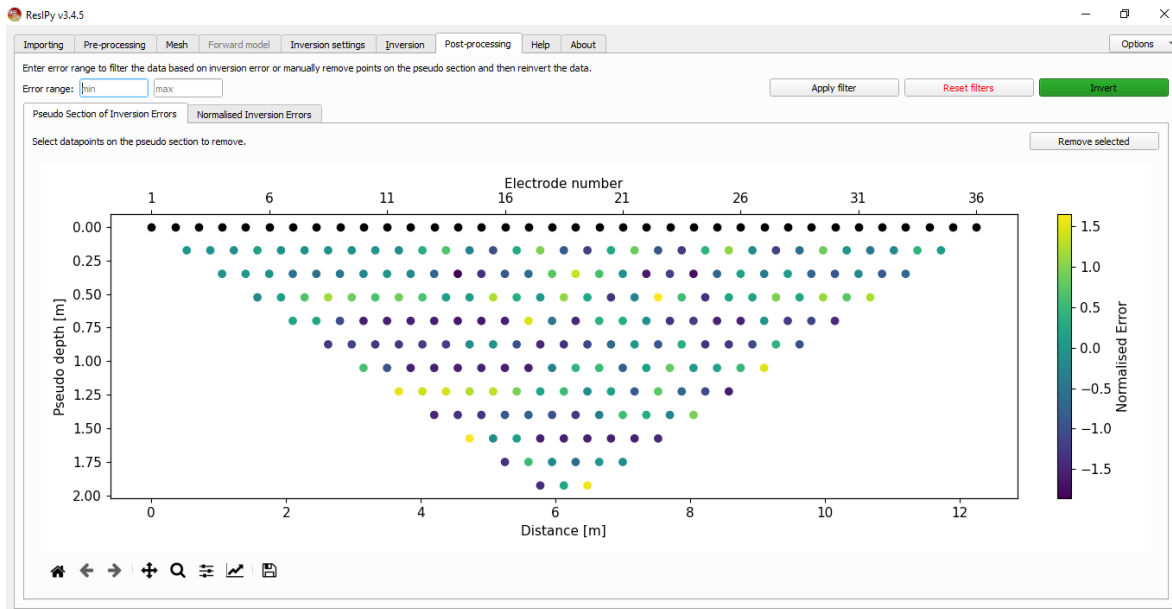
=====

Number of calls to form element equations: 240
Average time taken in call: 0.0 s
Number of calls to solve forward equations: 8640
Average time taken in call: 0.0 s
Number of calls to form Jacobian: 6
Average time taken in call: 0.4 s
Number of calls to solve inverse equations: 14

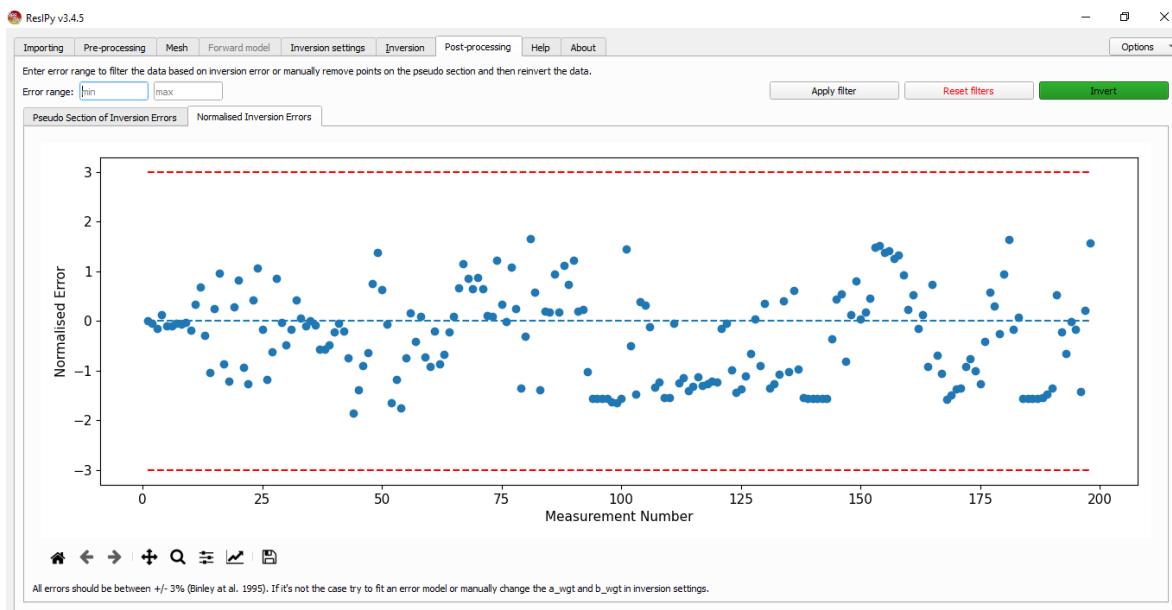
Average time taken in call: 25.0 s
Number of calls to calculate res. matrix: 1
Average time taken in call: 0.0 s



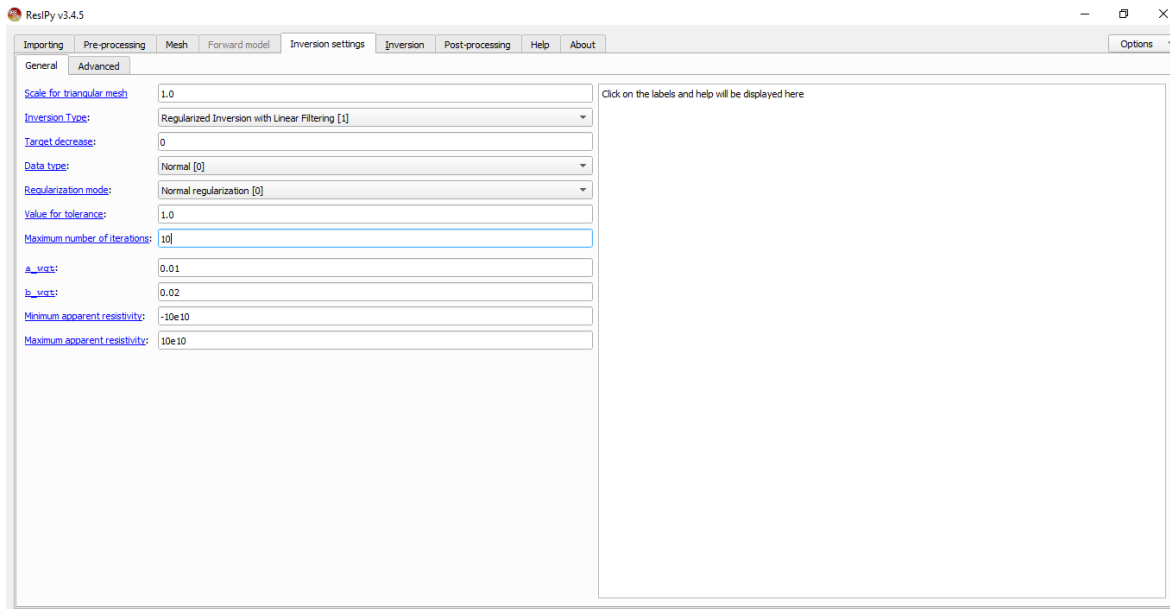
Anexo 3. Figura. 9. Diagrama de procesamiento de inversión y depuración de RMS



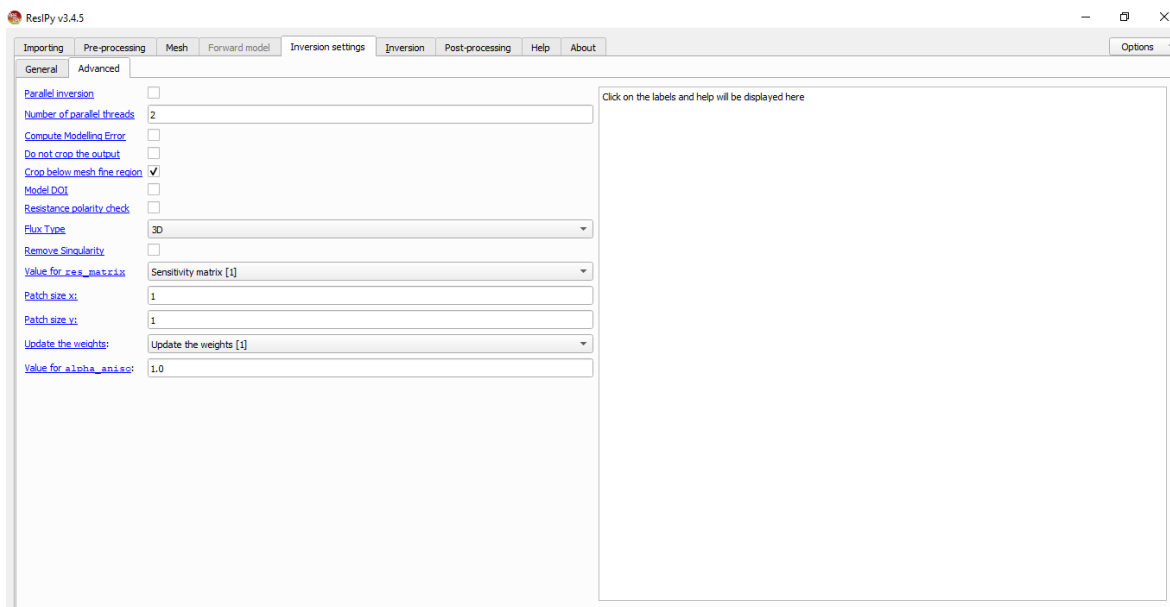
Anexo 3. Figura. 10. Post- Procesamiento para filtrado manual. (ResIPy ver 3.4.5.)



Anexo 3. Figura. 11. Error Normalizado en la Inversión. (ResIPy ver 3.4.5)



Anexo 3. Figura. 12. Parámetros de ajuste general para la inversión. (ResIPy ver 3.4.5)



Anexo 3. Figura. 13. Parámetros de ajuste avanzados para inversión. (ResIPy ver 3.4.5)

Anexo 5. Procesamiento de ERT 2D Diagrama de bloques del equipo electrónico para la medición de resistividad del suelo.

Equipo Emisor y Medidor de Resistividad

