

Prácticas empresariales en HYDROINGENIERIA S.A.S. como apoyo técnico en proyectos  
geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y energías renovables

Madeleine Castellanos Rincón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geóloga

Director

Angélica Álvarez Naranjo

PhD. Geología Estructural y Tectónica

Codirectores

Iván Camilo Galvis Tarazona

Msc. Hidrólogo

Ingrid Julietd Cubides Grimaldos

Geóloga

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Geología

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*En primer lugar, a Dios, mi mayor fuente de energía y vitalidad. Sin él no habría sobrevivido a este proceso caótico pero hermoso de la vida.*

*Mi mamá, Liliana Patricia Rincón. La mujer más fuerte y valiente sobre esta tierra, merecedora de todos nuestros logros. Tú y yo contra el mundo Firu.*

*A mi abuelito, Humberto Rincón Barajas. El ser más especial, me acompañó hasta el final de mi carrera desde el cielo, dándome la fuerza necesaria para terminar esta etapa.*

### **Agradecimientos**

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme culminar esta hermosa etapa de la vida.

A mi amada mamá, la persona más incondicional merecedora de un reconocimiento por luchar por mi durante toda mi carrera universitaria.

A la geología, la carrera que yo no elegí, ella me eligió. Por ser mi motor diario y mi mayor inspiración de aprender cada día más sobre esta hermosa ciencia.

A la Universidad Industrial de Santander, por ayudarme a crecer y madurar en todo el proceso de aprendizaje. A mi querida profesora Angélica Álvarez, la persona de quien más recibí apoyo, impulsándome y haciéndome creer en mí misma.

A la empresa HYDROINGENIERIA S.A.S. que me abrió las puertas para darme la oportunidad de conocer el mundo laboral y de poder aprender de ellos. A mi codirectora de tesis Ingrid Cubides, de quien pude adquirir conocimientos tanto profesionales como personales.

A las personas que más que compañeros de universidad se volvieron amigos de la vida, donde lloramos juntos por las materias que se creían perdidas, que me apoyaron durante momentos difíciles, pero sobre todo que hicieron de esta etapa, la mejor de todas. A Leonel, el amigo que todo el mundo desearía tener, porque su incondicionalidad y amor son la razón de todos los frutos académicos y personales.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Antecedentes.....	13
3. Conceptos básicos.....	14
3.1 Resistividad eléctrica.....	14
3.1.1 Sondeos eléctricos verticales (sev).....	16
3.1.2 Tomografía de resistividad eléctrica (tre).....	17
3.3 Hidrogeología.....	18
3.3.1 Recursos hídricos.....	18
3.3.2 Nivel freático.....	19
3.3.3 Análisis fisicoquímicos de suelo y agua orientados a la geotecnia.....	19
4. Metodología.....	21
4.1 Fase 1. Introducción.....	21
4.2 Fase 2. Aplicación de conocimientos y desarrollo de tareas técnicas.....	22
3.1.1 Adquisición de los sondeos eléctricos verticales azimutales(sea).....	22
3.1.1 Adquisición de las tomografías de resistividad eléctrica (tre).....	24
3.1.1 Análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo y agua.....	25
4.3 Fase 3. Informe final.....	26
5. Resultados.....	27

5.1 Energías renovables.....	27
5.1.1 Exploración geotécnica para la línea de transmisión del parque solar quifa .....	28
5.1.2 Exploración geotécnica para la línea de transmisión del parque solar bugambiles .....	37
6.1 Hidrogeología .....	45
6.1.1 Caracterización hidrogeológica para la prospección de aguas subterráneas en la planta industrial familia s.a. ....	45
6.2.1 Solicitud de licencia ambiental para la construcción de la red de media tensión en los sectores la lizama y la fortuna.....	50
6. Conclusiones.....	60
Referencias .....	62

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación de corrosividad del suelo.	25
Tabla 2. Potencial de agresividad de muestras de agua.	26

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Rangos de resistividades eléctricas de rocas, sedimentos y fluidos.	15
Figura 2. Configuración electródica.	17
Figura 3. Ejemplo de una pseudosección.	18
Figura 4. Esquema de la topografía y nivel freático en una situación ideal.	19
Figura 5. Curva de una línea procesada en IPI2Win.	23
Figura 6. Configuración electródica en el arreglo Wenner.	23
Figura 7. Arreglo de electrodos tipo Gradiente.	25
Figura 8. Diagrama de flujo de las fases metodológicas	27
Figura 9. Mapa de localización del área destinada al parque solar Quifa.	29
Figura 10. Mapa geológico regional del Parque Solar Quifa.	30
Figura 11. Mapa de localización de puntos de muestreo de agua.	33
Figura 12. Resultado SEV.	34
Figura 13. Gráfica ejemplo de la visualización del SEA_01.	36
Figura 14. Mapa de localización del área destinada al parque solar Bugambiles.	38
Figura 15. Mapa geológico regional del Parque Solar Bugambiles.	40
Figura 16. Mapa de localización de SPT + Cortes para perfiles estratigráficos.	40
Figura 17. Resultado SEV.	42
Figura 18. Gráfica ejemplo de la visualización del SEA_01.	44
Figura 19. Mapa de localización del área destinada al área industrial Familia S.A.	46
Figura 20. Mapa geológico local de la planta industrial Familia S.A.	47
Figura 21. Imágenes 2D sacadas del Res2Dinv de la TRE_01.	49

PRACTICA EMPRESARIAL EN HYDROINGENIERIA S.A.S.	8
Figura 22. Resultado de la TRE_01	49
Figura 23. Interpretación geológica de la TRE.	50
Figura 24. Mapa y corte geológico regional.	52
Figura 25. Localización de tramos, puntos de control geológicos y geofísica.	53
Figura 26. Fotografía de campo.	54
Figura 27. TRE interpretada con unidades litológicas.	54
Figura 28. Columna estratigráfica local	55
Figura 29. Mapa geológico local a escala 1:25.000.	56
Figura 30. Análisis multitemporal de los años 2005, 2015 y 2025.	58
Figura 31. Modelo hidrogeológico conceptual y tabla de unidades hidrogeológicas.	59

## Resumen

**Título:** Prácticas empresariales en HYDROINGENIERIA S.A.S. como apoyo técnico en proyectos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y energías renovables\*

**Autor:** Madeleine Castellanos Rincón\*\*

**Palabras Clave:** Sondeos Eléctricos Azimutales, Tomografías de Resistividad Eléctrica, Energías Renovables, Hidrogeología, Geofísica

**Descripción:** En este documento se presenta un resumen de las labores realizadas como practicante de geología dentro de la empresa de consultoría HYDROINGENIERIA S.A.S., la cual permitió aplicar e integrar metodologías geológicas, hidrogeológicas y geofísicas en cuatro proyectos orientados a los sectores de energías renovables e hidrogeología. Para la consultoría de los proyectos de energías renovables de los parques solares Quifa y Bugambiles, la empresa se centró en los estudios geotécnicos y geoeléctricos del subsuelo, así como en el análisis fisicoquímico de suelos y aguas y la adquisición de los Sondeos Eléctricos Azimutales (SEA); específicamente, en la práctica se colaboró en el análisis fisicoquímico de suelos y agua, mapas temáticos y procesamiento en la fase inicial y final de los SEA. En el estudio hidrogeológico para la planta industrial Familia S.A., la empresa se centró en estudios geoeléctricos, donde se desarrollaron Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) para la caracterización hidrogeológica del área de interés; la práctica se desarrolló específicamente en la búsqueda de información geológica secundaria y en la fase inicial y final del procesamiento de las TRE, lo que permitió identificar zonas con potencial de acumulación de aguas subterráneas y generar un modelo geofísico de utilidad para la gestión hídrica. Para el proyecto de la línea de red de media tensión en la Lizama, la empresa se centró en el estudio geológico, geomorfológico e hidrogeológico a partir de las TRE. En este proyecto la práctica desarrollo labores de campo de cartografía y caracterización de unidades geológicas, elaboración de mapas temáticos y colaboración en el procesamiento de las TRE.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Angélica Álvarez Naranjo. Doctora en Geología Estructural y Tectónica. Codirectores: Iván Camilo Galvis Tarazona. Magister en Hidrología. Ingrid Julietd Cubides Grimaldos. Geóloga.

### Abstract

**Title:** Professional internship at HYDROINGENIERIA S.A.S. as technical support in geological, hydrogeological, geophysical, and renewable energy projects \*

**Author:** Madeleine Castellanos Rincón \*\*

**Key Words:** Azimuthal Electrical Soundings, Electrical Resistivity Tomography, Renewable Energy, Hydrogeology, Geophysical

**Description:** This document summarizes the work carried out as a geology intern at the consulting firm HYDROINGENIERIA S.A.S., where geological, hydrogeological, and geophysical methodologies were applied and integrated across four projects in the fields of renewable energy and hydrogeology. For the consulting services of the Quifa and Bugambiles solar park projects, the company focused on geotechnical and geoelectrical subsurface studies, as well as physicochemical analyses of soils and water, and the acquisition of Azimuthal Electrical Soundings (AES). Specifically, the internship contributed to the physicochemical analysis of soils and water, thematic mapping, and data processing in the initial and final phases of the AES surveys. In the hydrogeological study for the Familia S.A. industrial plant, the company conducted Electrical Resistivity Tomography (ERT) to characterize the hydrogeological setting; the internship was involved in gathering secondary geological information and in processing tasks during the initial and final phases of the ERT surveys, enabling the identification of zones with groundwater accumulation potential and the development of a geophysical model to support water management. For the medium-voltage power line project in Lizama, the company carried out geological, geomorphological, and hydrogeological studies based on ERT. In this project, the internship included fieldwork for geological mapping and unit characterization, the preparation of thematic maps, and collaboration in the processing of ERT data.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical Chemistry. School of Geology. Director: Angélica Álvarez Naranjo. Doctor in Structural and Tectonic Geology. Co-directors: Iván Camilo Galvis Tarazona. Master in Hydrology. Ingrid Julietd Cubides Grimaldos. Geologist.

## **Introducción**

La exploración y caracterización del subsuelo son principios fundamentales para el desarrollo sostenible de proyectos en los sectores energético y ambiental. En Colombia, empresas como HYDROINGENIERIA S.A.S desempeñan un papel importante al brindar consultoría especializada en el desarrollo de estudios técnicos dirigidos a diversos sectores productivos y ambientales, contribuyendo a la gestión responsable de los recursos naturales del territorio nacional y al desarrollo de proyectos orientados a fortalecer la infraestructura, la sostenibilidad y el manejo estratégico del territorio nacional.

HYDROINGENIERIA S.A.S. es una empresa especializada en el estudio del agua, el suelo y el subsuelo, que desarrolla estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos para ofrecer información técnica precisa, que le permita a sus clientes tomar decisiones seguras, reducir riesgos y fomentar un desarrollo sostenible. En ese contexto, la ejecución de prácticas empresariales representa una oportunidad estratégica para aportar al fortalecimiento de los procesos técnicos en cada una de estas áreas.

La práctica empresarial que se desarrolló en esta empresa tuvo como propósito presentar el trabajo de grado en geología, con énfasis en la aplicación de metodologías geológicas, hidrogeológicas y geofísicas para la caracterización del subsuelo en diferentes proyectos. Estas actividades se llevaron a cabo en un entorno profesional que exige rigurosidad científica, capacidad analítica y dominio de herramientas especializadas para el procesamiento e interpretación de datos del subsuelo. En articulación con los objetivos académicos del programa de Geología, esta práctica buscó integrar el conocimiento teórico con experiencias aplicadas. Por lo tanto, el objetivo principal del trabajo fue colaborar con el equipo técnico de la empresa y contribuir en la recopilación, análisis e interpretación de datos, así como a la formulación de

productos cartográficos, técnicos, estructuración de informes, entre otros, que contribuyeron significativamente al desarrollo de los estudios del subsuelo y al fortalecimiento de los objetivos técnicos de la empresa.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Aplicar metodologías geológicas, hidrogeológicas y geofísicas para la caracterización del subsuelo en proyectos de consultoría, mediante el análisis e interpretación de datos técnicos en la empresa HYDROINGENIERIA S.A.S.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Analizar e interpretar datos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos, para apoyar el desarrollo de estudios técnicos ajustados a las necesidades de distintos tipos de clientes.

Generar salidas gráficas (ej. mapas temáticos, perfiles, secciones transversales) que respondan a los objetivos y particularidades de cada proyecto.

Elaborar y estructurar informes claros y detallados que incorporen los resultados e interpretación de los estudios realizados por la empresa.

## **2. Antecedentes**

HYDROINGENIERIA S.A.S es una empresa colombiana con más de 10 años de trayectoria en el sector de consultoría técnica de empresas privada y públicas, especializada en estudios del suelo, del subsuelo y recursos hídricos. A lo largo de su trayectoria, ha participado en proyectos para entidades públicas y privadas, entre los que se destacan estudios para parque solares, exploraciones geofísicas orientadas a la identificación de fuentes de agua subterránea, caracterización geológica y modelaciones hidrogeológicas para el manejo de recursos hídricos. Su capacidad técnica se respalda en el uso de equipos de alta tecnología y en la formación continua

de su equipo técnico-profesional, lo que permite responder de manera eficaz a las crecientes exigencias del sector productivo y ambiental en Colombia.

Su portafolio de servicios abarca geología, hidrogeología, geofísica, hidrología, geotecnia y tecnologías aplicadas a mapeamiento mediante el uso de drones. La empresa se orienta a ofrecer soluciones técnicas que permitan a sus clientes la toma de decisiones informadas, que mitiguen riesgos y promuevan el desarrollo sostenible en proyectos de infraestructura, energía y medio ambiente.

### 3. Conceptos básicos

A continuación, se presentan algunos de los conceptos y definiciones que permiten comprender las técnicas que fueron implementadas en la práctica profesional.

#### 3.1 Resistividad Eléctrica

El método de resistividad eléctrica se basa en la teoría fundamental de la prospección eléctrica, la cual se fundamenta en los principios del campo eléctrico normal en medios homogéneos y el efecto de los campos de fuentes puntuales en medios heterogéneos (Lakubovskii & Liajov, 1980).

La resistividad eléctrica de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por dicho medio. La unidad de resistividad eléctrica en el Sistema Internacional es el ohmio por metro (Ohm.m) y está descrito por la siguiente Ecuación 1:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

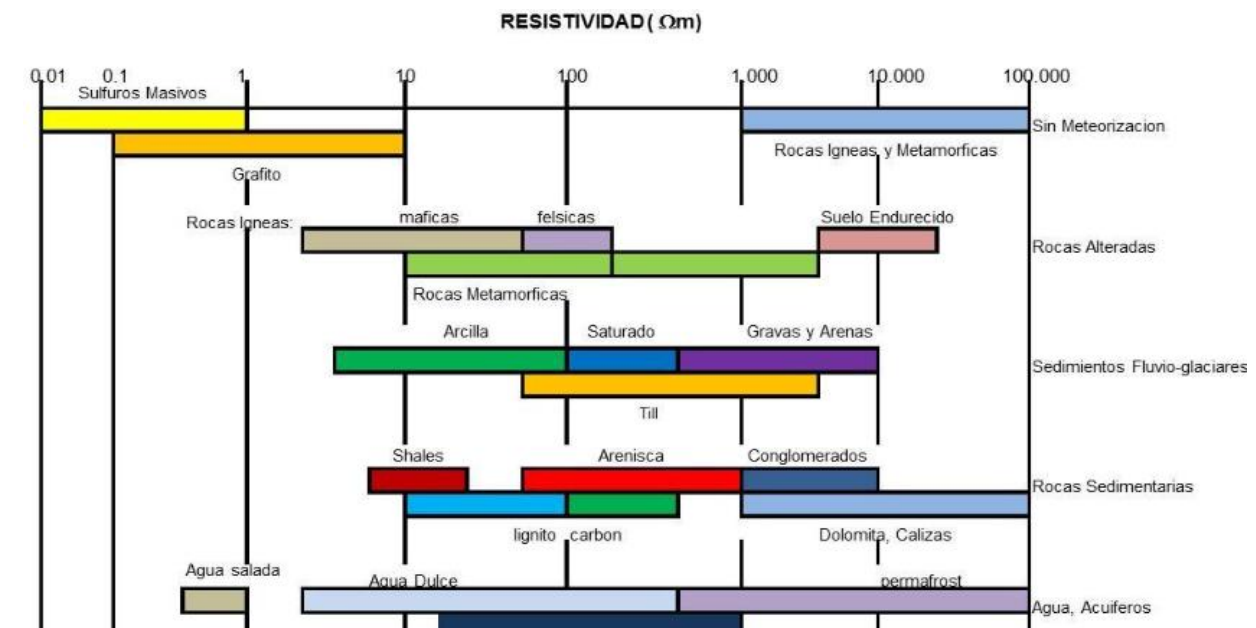
Dónde  $\rho$  es la resistividad eléctrica,  $K$  es el factor geométrico del dispositivo geoelectrico,  $\Delta V$  es el voltaje (diferencia de potencial) e  $I$  es la corriente.

La Ecuación 1 es la base fundamental del método de resistividad eléctrica, la cual permite obtener el valor de resistividad ( $\rho$ ) para un medio homogéneo. Análogamente, esta ecuación se puede aplicar para la interpretación de los resultados de la medición con un dispositivo geoelectrico situado en la superficie de un terreno heterogéneo. Sin embargo, en el resultado del cálculo tan sólo se obtiene una cierta magnitud arbitraria que tiene las dimensiones de una resistividad, la cual se denomina resistividad eléctrica aparente, por lo que es la variable experimental básica en todos los estudios geoelectricos y se designa como  $\rho_a$ . La magnitud de la resistividad aparente depende de la estructura del corte geoelectrico y de la distribución relativa de los electrodos(Palacky, 1987).

Los contrastes en los valores de resistividad de los diferentes materiales geológicos en cada sitio son los que permiten aplicar exitosamente el método de prospección geoelectrica. En la Figura 1 se aprecian los rangos teóricos de resistividad eléctrica que caracterizan a las rocas, sedimentos y fluidos.

**Figura 1**

*Rangos de resistividades eléctricas de rocas, sedimentos y fluidos.*



Nota: \* Tomada de (Palacky, 1987)

### 3.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

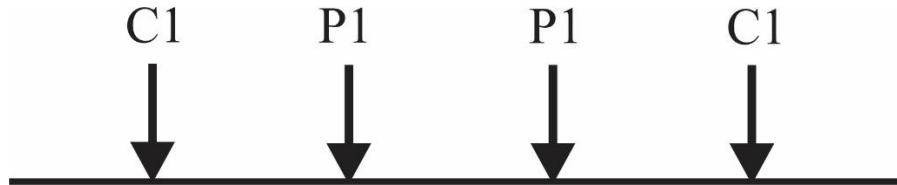
Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) tienen como finalidad determinar la distribución vertical de resistividades eléctricas bajo el punto central del dispositivo, a partir de los valores obtenidos de resistividades aparentes (Hernández Lucendo, 1984). Son principalmente utilizados en áreas donde la geología se conforma por estratos horizontales, con el objetivo de determinar la litología o las capas que componen el subsuelo hasta la profundidad alcanzada mediante la variación de resistividades en dirección vertical. Pese a que es una técnica económica, no obtiene mediciones en dirección horizontal, lo que hace que la geología más compleja no pueda ser definida.

El principio de este método radica en un punto central de referencia invariable, desde el cual va variando el espaciamiento ente los electrodos para alcanzar mayor cobertura e información del terreno (López Hidalgo et al., 2004). En la Figura 2 se muestra la disposición electródica convencional simétrica empleada para medir la resistividad del subsuelo.

La representación de esta técnica se realiza en el *software* Grapher donde un diagrama circular indica que la resistividad es homogénea en todas las direcciones, lo que sugiere que el medio es isotrópico. Por el contrario, un diagrama elíptico o poligonal indica que existen diferencias significativas en la resistividad en función de la dirección, lo que apunta a la presencia de anisotropía, posiblemente causada por fracturas, variaciones en la litología, o cambios en el contenido de agua en los poros de las rocas. En casos donde se detecta anisotropía, el eje mayor de la elipse suele coincidir con la dirección preferencial de fracturación o con los planos de mayor conductividad en el subsuelo.

**Figura 2**

*Configuración electródica.*



*Nota: \*P: Electrodos de Potencial, C: Electrodos de Corriente. Tomada de (López Hidalgo et al., 2004).*

Durante la práctica, los SEV complementaron los estudios de parque solares. En la fase de interpretación se utilizaron principalmente para identificar posibles estructuras hidrogeológicas en las áreas de interés.

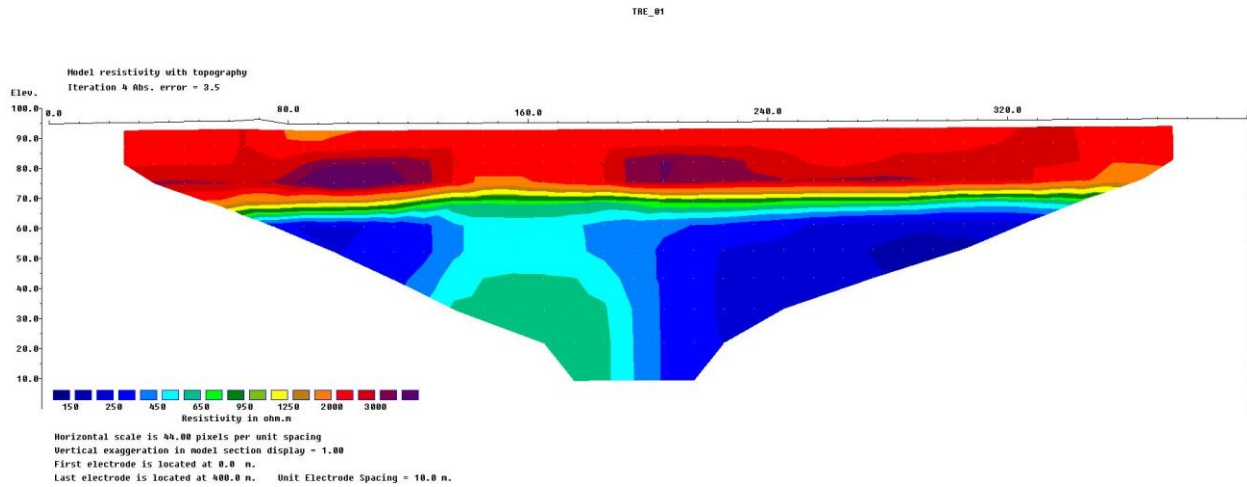
### **3.1.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)**

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) se usa principalmente en investigaciones donde se obtienen imágenes de distribución de las propiedades eléctricas del subsuelo, a partir del empleo de matrices de electrodos en la superficie. La técnica se basa en una separación constante de electrodos, teniendo en cuenta el aumento o disminución de la distancia entre estos, lo cual puede afectar la profundidad de investigación deseada; siendo que, a mayor distancia entre electrodos, incrementa la profundidad de alcance y viceversa (Griffiths & Barker, 1993). El arreglo de electrodos se adecua al objetivo del proyecto y sus datos son procesados mediante el *software* especializado Res2Dinv, el cual genera secciones interpretativas como las de la Figura 3.

Para efectos de la práctica empresarial, el análisis de esta técnica es fundamental en la identificación de variaciones litológicas y/o zonas con posibles acumulaciones de agua subterránea.

**Figura 3**

*Ejemplo de una pseudosección.*



*Nota: \* La TRE es de línea de 400 metros de longitud y con profundidad de alcance de 80 metros procesada en Res2Dinv.*

## 3.2 Hidrogeología

### 3.2.1 Recursos hídricos

Los recursos hídricos se definen como el agua que fluye o se concentra en las masas continentales, incluyendo las superficiales y subterráneas. Estos recursos se pueden dividir en dos: recursos hídricos renovables y no renovables. Los primeros son aquellos que se recuperan mediante la precipitación y se evidencian mediante caudales superficiales anuales y aguas subterráneas. Los segundos son aquellos que se encuentran de forma subterránea, como en acuíferos profundos y que presentan una tasa de recarga ínfima en relación con el tamaño del acuífero o almacenamiento y, por ende, al ser sobreexplotado no tiene la capacidad de recargarse de manera rápida (The United Nations, 2017).

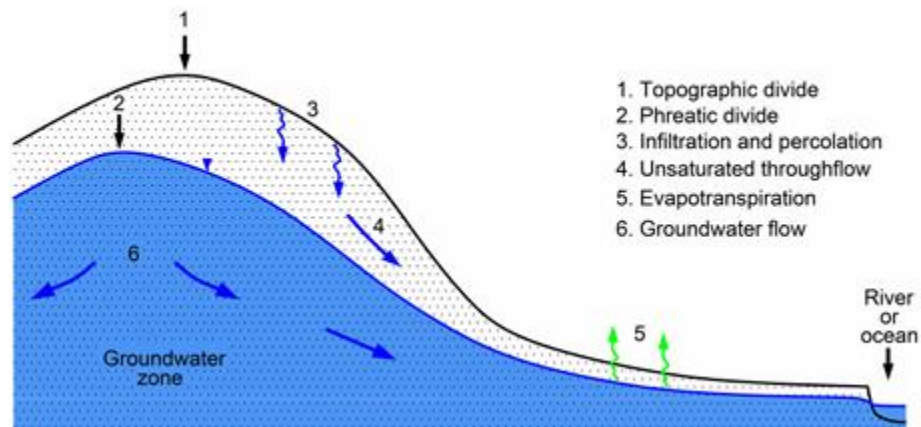
Durante la práctica se interpretaron los resultados obtenidos en las mediciones de resistividad eléctrica para identificar el comportamiento de los recursos hídricos subterráneos, asociando zonas de baja resistividad con posibles acuíferos o niveles de saturación, teniendo en cuenta la teoría de resistividades para cada fluido como se muestra la Figura 1.

### 3.2.2 Nivel freático.

El nivel freático o tabla de agua se define como a una superficie dentro del suelo o roca donde la presión del agua en los poros es igual a la presión atmosférica, marcando el límite superior de la zona saturada (Figura 4; Baird & Low, 2022). Determinar el nivel freático es esencial para la gestión de recursos hídricos, ya que la sobreexplotación de este puede traer consecuencias negativas a los seres vivos que se abastecen de este recurso (Holzer & Bennett, 2003).

**Figura 4**

*Esquema de la topografía y nivel freático en una situación ideal.*



*Nota: \*Tomado de Baird & Low (2022).*

La determinación del nivel freático o tabla de agua es clave para definir la profundidad del agua subterránea y establecer la relación entre los valores de resistividad obtenidos y las condiciones hidrogeológicas de la zona de interés.

### 3.2.3 Análisis fisicoquímicos de suelo y agua orientados a la geotecnia

Para los análisis fisicoquímicos de muestras de suelo se miden parámetros como el potencial de hidrógeno (pH), determinado de acuerdo con la norma NTC-ISO 11464 (ICONTEC, 2022b), donde se puede evaluar la acidez o alcalinidad, lo cual influye en la velocidad de corrosión en el suelo, que afecta estructuras como los parques solares. De forma similar, se analizan otros parámetros como la presencia de cloruros, determinados de acuerdo con la norma NTC 5596

(ICONTEC, 2022a), donde se define la cantidad tolerable de este compuesto, ya que estos aceleran la corrosión de metales, en especial las de estructuras enterradas, donde la superficie presenta materiales metálicos y la corrosión forma capas de óxido, que con el tiempo debilitan la estructura. Otro parámetro medido es el Carbono Orgánico Total (COT), determinado de acuerdo con la norma NTC 5403 método B (ICONTEC, 2021), donde se define la descomposición de residuos orgánicos para comprender las interacciones químicas entre el suelo y las estructuras. También se determinan las Sales Totales de acuerdo con la norma NTC 5596 (ICONTEC, 2022a), donde estos compuestos afectan la estabilidad y capacidad de retención de agua en la capa de suelo. Por último, se determinan los Carbonatos por medio del método de Bicarbonatos y Carbonatos en Extracto de Suelos (IGAC, 2024), donde se define la cantidad permisible de estos compuestos, ya que pueden aumentar el pH del suelo, lo que contribuye a la precipitación de sales, sistemas de drenaje y estructuras de concreto.

Para el análisis fisicoquímico de muestras de agua se miden parámetros como el potencial de hidrogeno (pH), determinado de acuerdo con el método SM 4500-H+B (Water Environment Federation, 2017), donde se puede evaluar la acidez o alcalinidad, lo cual se relaciona con la interacción química entre el agua y los materiales estructurales. De forma similar se determina el contenido de sulfatos de acuerdo con el método SM 4500 -SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-(Water Environment Federation, 2023c) , donde se define la cantidad admisible de estos compuestos, ya que influyen en la reactividad con los componentes del concreto, especialmente en condiciones de humedad y que pueden promover la corrosión de elementos metálicos. Como también se establece el porcentaje de cloruros de acuerdo con la norma SM 4500 -Cl- (Water Environment Federation, 2023b), debido a que estos compuestos aceleran la corrosión de metales, en especial las de estructuras enterradas. Al igual que se determina el Carbono Orgánico Total (COT) de acuerdo con la norma

SM 5310 C (Water Environment Federation, 2022), donde se define la descomposición de residuos orgánicos y la carga contaminante del medio acuático. Por último, se establece la Conductividad Eléctrica de acuerdo con el método SM 2510 (Water Environment Federation, 2023a), parámetro con el cual es posible evaluar la cantidad de sales totales, donde a mayor contenido de estos compuestos la conductividad del agua es más alta, lo cual determina la calidad de esta.

#### **4. Metodología**

La metodología propuesta para el desarrollo de la práctica empresarial se dividió en tres fases principales: 1. Introducción, 2. Etapa de oficina, 3. Informe final. En cada fase se observan acciones específicas orientadas a satisfacer con los objetivos del trabajo de grado y fortalecer el apoyo técnico en los proyectos elaborados por HYDROINGENIERIA S.A.S (Figura 8).

##### **4.1 Fase 1. Introducción**

Durante esta fase se llevó a cabo la inducción y el proceso de formación inicial, asimismo se inició la participación en las actividades principales desarrolladas por HYDROINGENIERIA S.A.S. Se estableció un cronograma de trabajo que incluyó las tareas principales de la empresa y las funciones asignadas al practicante dentro de los proyectos vigentes. En esta etapa se recibió capacitación en el uso de herramientas de procesamiento de datos y en programas especializados como Ipi2win, Grapher, Terrameter LS Toolbox, Erigraph, Res2DINV, y CorelDRAW. Asimismo, se desarrollaron salidas gráficas mediante sistemas de información geográfica que soportaron los resultados técnicos de los estudios.

Adicionalmente, se participó en la redacción y estructuración de informes técnicos, así como la actualización de la base de datos geológica de la empresa. Esta fase también contempló

la revisión bibliográfica de proyectos realizados y una presentación del geólogo responsable del acompañamiento académico.

#### **4.2 Fase 2. Aplicación de conocimientos y desarrollo de tareas técnicas**

En esta fase se pusieron en práctica los conocimientos adquiridos durante la etapa introductoria mediante tareas técnicas como la elaboración de mapas geológicos, localización de puntos de interés junto con análisis, procesamiento e interpretación. Las actividades se ejecutaron con base en los lineamientos disponibles en OneDrive y utilizando programas como Qgis, Ipi2win, Grapher, Terrameter LS Toolbox, Erigraph, Res2DINV, y CorelDRAW.

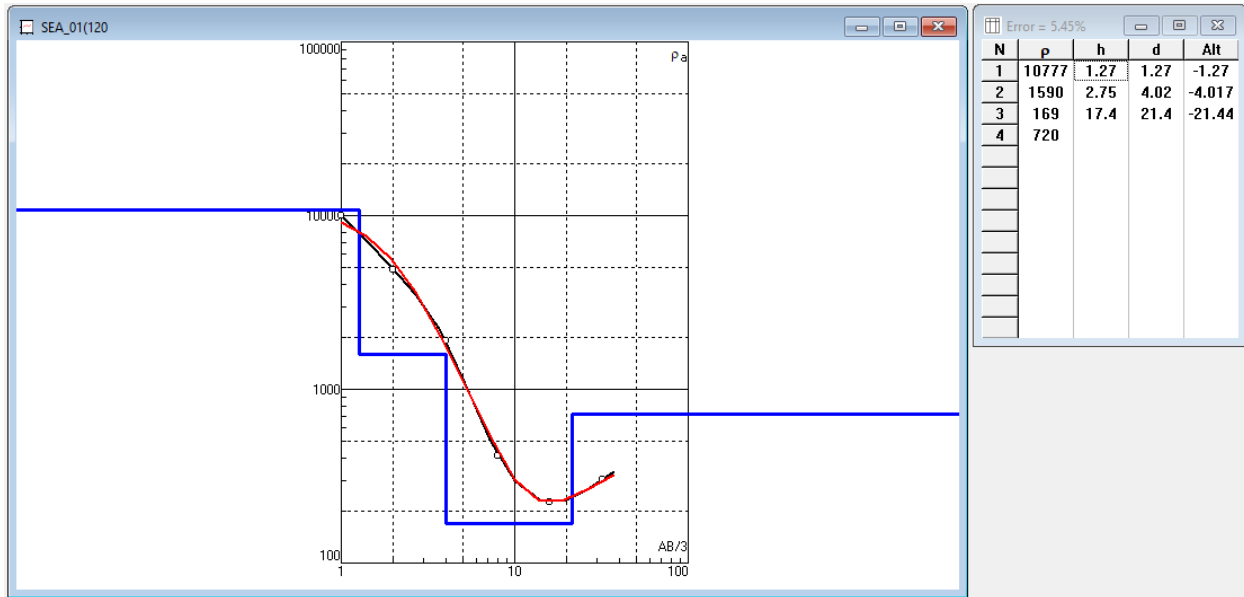
##### ***4.2.1 Adquisición de los Sondeos Eléctricos Verticales Azimutales (SEA)***

La adquisición de datos de los SEA se realizó en campo mediante el equipo TERRAMETER LS, acompañado de 4 cables y 4 electrodos (AB y MN). La selección de este equipo responde a la necesidad del cliente, de enfocarse en la anisotropía eléctrica del terreno, más que en una alta resolución o una gran profundidad de penetración.

La técnica de SEA utiliza el mismo principio de inyección de corriente en el subsuelo y medición de la diferencia de potencial, pero a diferencia del SEV, en los SEA se realiza una rotación del arreglo de electrodos en torno a un punto central fijo, capturando datos en varias direcciones radiales. Esto permitió identificar la existencia de diferencias significativas en las propiedades eléctricas del medio en función de la dirección, lo que indicó la presencia de anisotropía en las rocas o sedimentos investigados. Los datos adquiridos en campo fueron procesados en el *software* especializado IPI2Win, con el objetivo de generar curvas interpretativas Figura 5.

**Figura 5**

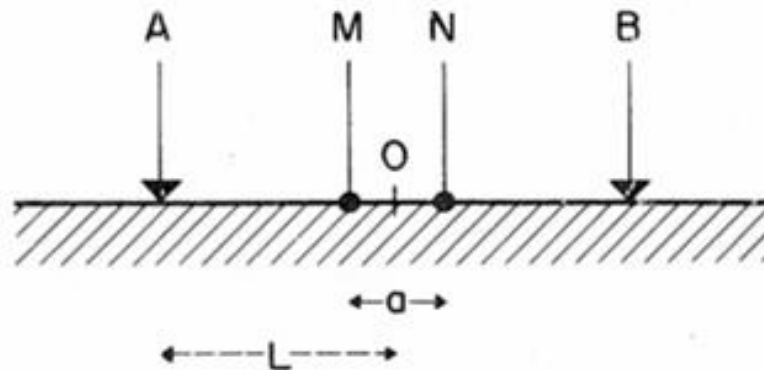
*Curva de una línea procesada en IPI2Win.*



Para la adquisición de datos, se empleó el arreglo de electrodos tipo Wenner, donde la distancia entre los electrodos de corriente y potencial es constante ( $AM = MN = NB$ ) como se muestra en la Figura 6. Esta configuración es ampliamente utilizada debido a su capacidad para proporcionar una buena resolución vertical y por su facilidad para identificar cambios en las propiedades eléctricas del subsuelo (Orellana, 1972).

**Figura 6**

*Configuración electrónica en el arreglo Wenner.*



*Nota: \* Tomada de (Orellana, 1972).*

El proceso de adquisición de datos comenzó con la inyección de una corriente controlada en el terreno a través de dos electrodos (A y B) y la medición de la diferencia de potencial generada en los otros dos electrodos (M y N). Con estos valores, junto con el coeficiente geométrico, el equipo calculó la resistividad aparente ( $\rho_a$ ), la cual se relaciona con la resistividad verdadera de las capas o materiales presentes en el subsuelo. Este procedimiento se repitió en varias direcciones, rotando el arreglo de electrodos a intervalos angulares específicos, normalmente para estudios de parques solares es  $60^\circ$ , hasta completar un círculo completo o un rango de azimuts de interés. Por último, los valores de resistividad real obtenidos para cada azimut fueron representados gráficamente en un diagrama polar realizado en Grapher.

Esta metodología tuvo como propósito caracterizar la variación de la resistividad del subsuelo en diferentes orientaciones, lo que permitió una interpretación más precisa de las propiedades eléctricas del medio.

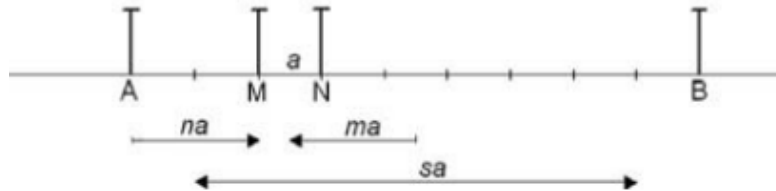
#### ***4.2.2 Adquisición de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE)***

La adquisición de datos de las TRE se realizó en campo mediante el equipo TERRAMETER LS, acompañado de 2 cables de 200 m c/u. En la TRE se empleó el arreglo de electrodos tipo Gradiente, el cual consistió en la inyección de corriente (similar al arreglo tipo Wenner que se explicó anteriormente) a través de dos electrodos (A y B) y la medición de la diferencia de potencial entre (M y N), donde la corriente fue inyectada con determinada separación (S+2), como lo muestra la Figura 7. En este procedimiento se midieron de forma simultánea o secuencial todas las diferencias de potencial entre los electrodos con una separación conocida (Dahlin & Zhou, 2006).

Este tipo de arreglo se consideró el más adecuado para el registro multicanal, ya que permitió registrar diversos puntos simultáneamente para cada inyección de corriente, disminuyendo el tiempo de adquisición sin comprometer la densidad y calidad de los datos

**Figura 7**

*Arreglo de electrodos tipo Gradiente.*



*Nota: \*La separación entre electrodos de corriente es de  $(S+2)a$ , el factor separación  $s = 7$ , el factor  $n = 2$  y el factor de punto medio  $m = -2$ . Para definir  $n$  se refiere a la distancia relativa más pequeña entre un electrodo (Dahlin & Zhou, 2006).*

**4.2.3 Análisis de los parámetros fisicoquímicos del suelo y agua**

La metodología propuesta por (Ávila Mendoza & Genescá Llongueras, 2003), estableció los umbrales para clasificar la corrosividad del suelo, discriminándola en las categorías de bajo, moderado y alto riesgo (Tabla 1), y su potencial de agresividad discriminándolas en: potencialmente agresivas, moderadamente agresivas y no agresivas (Tabla 2).

**Tabla 1**

*Clasificación de corrosividad del suelo.*

Parámetros	Bajo	Moderado	Alto
<b>pH</b>	> 6,0	$5,5 \leq \text{pH} \leq 6,0$	<5,5
<b>Cloruros (mgCl/Kg)</b>	< 20 mgCl/Kg	$20 \text{ mgCl/Kg} \leq 100 \text{ mgCl/Kg}$	$\geq 100 \text{ mgCl/Kg}$
<b>Sulfatos (mgSO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/Kg)</b>	< 200 mgSO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /Kg	$200 \text{ mgSO}_4^{-2}/\text{Kg} \leq 1000 \text{ mgSO}_4^{-2}/\text{Kg}$	$\geq 1000 \text{ mgSO}_4^{-2}/\text{Kg}$
<b>Salinidad (ppm)</b>	< 500 ppm	$500 \text{ ppm} \leq 2000 \text{ ppm}$	$\geq 2000 \text{ ppm}$
<b>Materia Orgánica-COT (%)</b>	< 0,5%	$0,5\% \leq 1,0\%$	$\geq 1,0\%$

*Nota: \*Tabla de parámetros de corrosividad de muestras de suelo. Tomado de (Ávila Mendoza & Genescá Llongueras, 2003).*

**Tabla 2***Potencial de agresividad de muestras de agua.*

Parámetros	Rango de valor	Potencial de agresividad
<b>pH</b>	>7,5	No agresivo
	6,5 – 7,5	Moderadamente Agresivo
	< 6,5	Altamente Agresivo
<b>Cloruros (mg/L)</b>	< 50	No Agresivo
	50 – 200	Moderadamente Agresivo
	> 200	Altamente Agresivo
<b>Sulfatos (mg/L)</b>	< 200	No agresivo
	200 – 1000	Moderadamente Agresivo
	> 1000	Altamente Agresivo
<b>Carbono Orgánico Total (COT) (mg/L)</b>	< 5	No agresivo
	5 – 15	Moderadamente Agresivo
	>15	Altamente Agresivo
<b>Conductividad Eléctrica (µS/cm)</b>	< 250	No agresivo
	250 – 800	Moderadamente Agresivo
	> 800	Altamente Agresivo

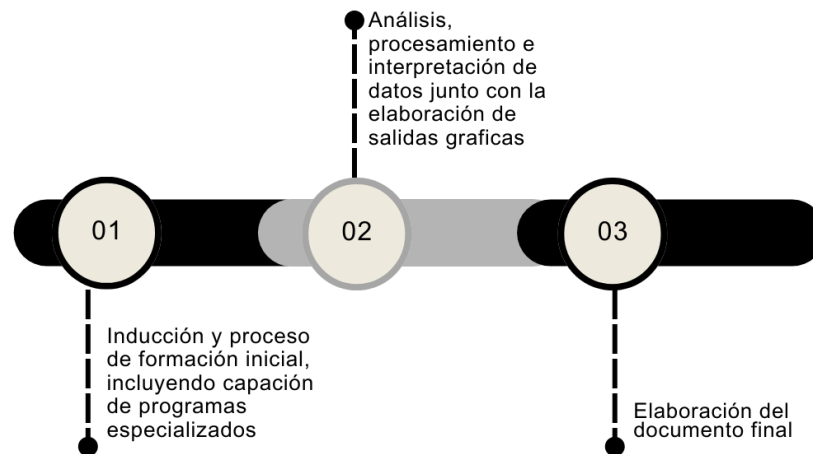
*Nota: \*Tabla de parámetros de corrosividad de muestras de agua. Tomado de (Ávila Mendoza & Genescá Llongueras, 2003).*

### 4.3 Fase 3. Informe final

En esta fase se consolidó la información generada a lo largo de la práctica empresarial. Se documentó las actividades desarrolladas, los objetivos alcanzados, la programación ejecutada y los principales logros y aprendizajes adquiridos durante el proceso. Como parte del cierre del proceso, se elaboró un informe técnico que sintetizó los resultados del trabajo realizado, las actividades realizadas por el practicante, con base en los lineamientos establecidos por la empresa.

**Figura 8**

*Diagrama de flujo de las fases metodológicas*



## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los proyectos de la empresa en los que se desarrolló la práctica empresarial, especialmente en la recopilación y análisis de información bibliográfica, elaboración de salidas gráficas, procesamiento y análisis de datos y elaboración de informes técnicos. En algunos casos, se participó en las campañas de campo, apoyando las actividades de adquisición de datos. A continuación, se describirán de forma resumida estos proyectos, los cuales aparecen están divididos por temática. Para cada caso, se incluye una breve descripción de los conceptos básicos y más relevantes tratados en cada uno, los objetivos y labores desarrolladas por la empresa y la participación específica como practicante, señalando las actividades, los objetivos cumplidos y los aportes realizados a dichos proyectos.

### 5.1 Energías renovables

Durante la práctica empresarial se desarrollaron dos proyectos de energías renovables, el primero trata la exploración geotécnica para la línea de transmisión del Parque Solar Quifa y el segundo para la línea de transmisión del Parque Solar Bugambiles. Ambos estudios tuvieron como propósito principal la caracterización geotécnica y geofísica del subsuelo, con el fin de

proporcionar información técnica que respalde el diseño y la construcción de la infraestructura asociada a estos parques solares.

### ***5.1.1 Exploración geotécnica para la línea de transmisión del parque solar Quifa***

El primero de los proyectos de consultoría realizados por HYDROINGENIERIA S.A.S., en los cuales se desarrolló la práctica empresarial, consistió en un estudio geotécnico orientado a la construcción de un parque solar en el centro poblado El Oasis, municipio de Puerto Gaitán departamento del Meta (Figura 9), cuyo propósito fue evaluar las condiciones del subsuelo y suministrar la información necesaria para el diseño y la construcción de la infraestructura solar. La participación de la empresa se centró en el análisis de información secundaria, adquisición y análisis físicoquímico de agua y suelo, y el desarrollo de estudios geoelectricos como complemento a las investigaciones geotécnicas realizadas por otras empresas.

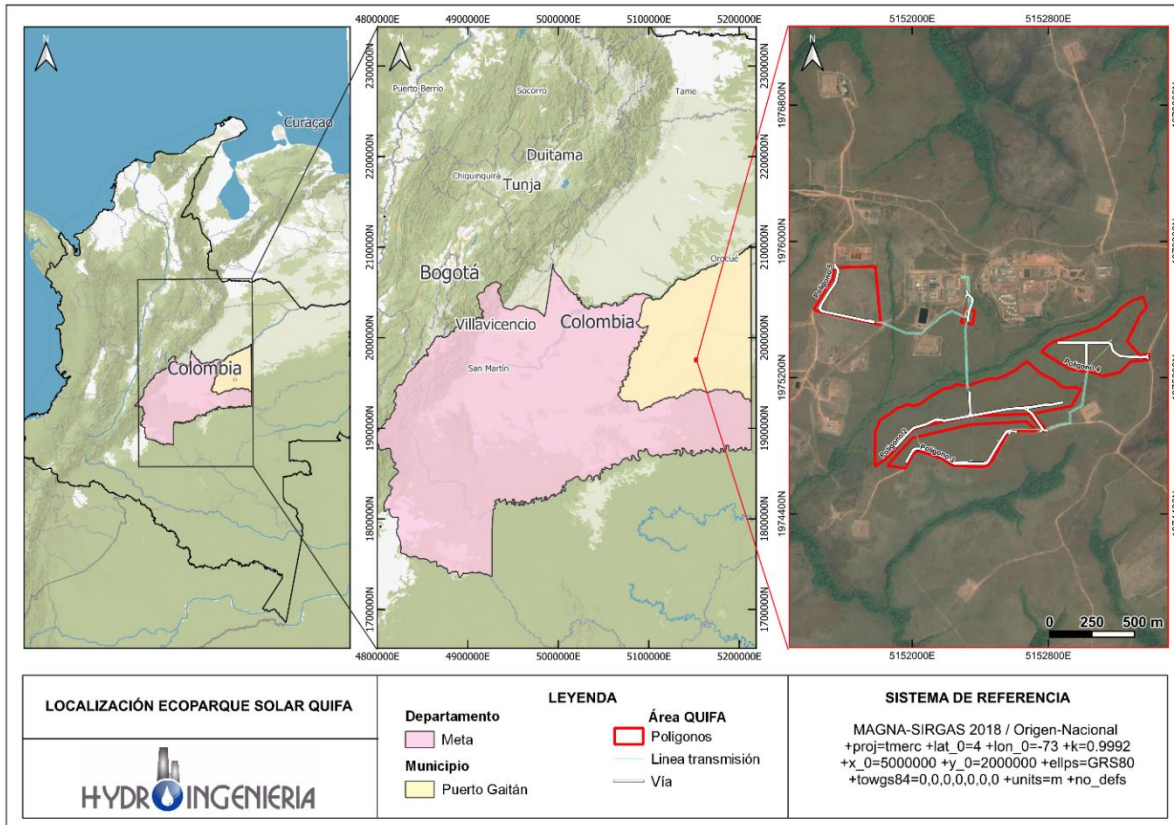
La primera parte de la práctica se centró en el análisis de información secundaria, con el objetivo de proporcionar datos de la geológica regional y local de la zona. Posteriormente, se participó en el análisis de parámetros físicoquímicos, tanto de muestras de suelo como de agua, con el fin de definir el grado de corrosividad que pueda afectar la durabilidad de las cimentaciones, estructuras o equipos del parque solar Quifa. Adicionalmente, la práctica involucró la colaboración en la fase del procesamiento de la resistividad eléctrica de Sondeos Eléctricos Verticales Azimutales (SEA), con el fin de analizar la anisotropía eléctrica del terreno para el diseño de sistemas de puesta a tierra.

En la fase de revisión bibliográfica se consultaron las planchas geológicas 289 Rio Tillavá (Alvarado et al., 2010b) y 290 Saravia (Alvarado et al., 2010c), junto con su memoria explicativa (Alvarado et al., 2010a) del Servicio Geológico Colombiano-SGC, de donde se extrajo la información sobre la estratigrafía, la geología estructural y la geomorfología de la zona de estudio.

Posteriormente, se hizo un análisis crítico de esta y se definió l información relevante para el estudio (Figura 10).

**Figura 9**

*Mapa de localización del área destinada al parque solar Quifa.*



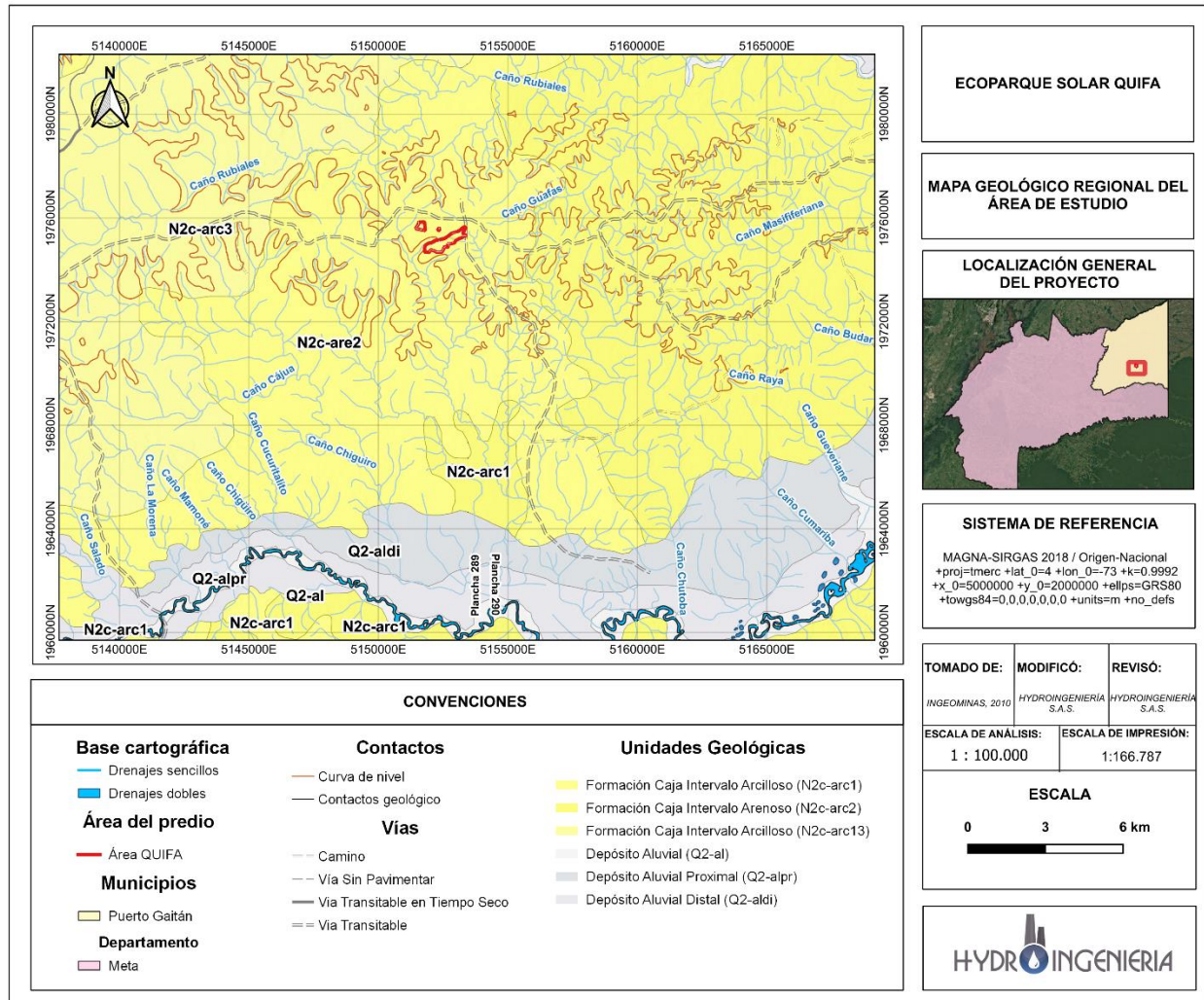
Dentro de las labores geotécnicas se realizaron salidas gráficas tales como la localización de puntos de recolección de muestras de agua y de suelo, también se presentan mapas de localización del ensayo Standard Penetration Test (SPT), que se realizan con el objetivo de determinar el nivel de compactación del suelo, junto con el mapa de localización de los cortes para la representación del perfil geotécnico.

También se realizaron análisis con el objetivo de evaluar las propiedades fisicoquímicas de 14 muestras de suelo y 14 de agua, las cuales fueron recolectadas previamente a la práctica

empresarial por el equipo de geólogos de la empresa y enviadas a laboratorios de geoquímica especializados (Figura 11).

**Figura 10**

*Mapa geológico regional del Parque Solar Quifa.*



*Nota: \*Esta salida gráfica es un ejemplo de los mapas geológicos regionales y locales. Modificado de (Alvarado et al., 2010b, 2010c).*

A partir de los datos obtenidos de estos análisis y los rangos propuestos por (Ávila Mendoza & Genescá Llongueras, 2003) para la corrosividad del suelo, la práctica desarrolló el análisis de riesgo por corrosión de las estructuras del Parque Solar, donde se determinó que hay un riesgo moderado a alto de corrosividad, principalmente por la presencia pH ácido y de cloruros en varias

muestras. Aunque los sulfatos y la salinidad son bajos, algunos valores elevados de Carbono Orgánico Total (COT) pueden favorecer la corrosión microbiológica. Estos hallazgos destacan la necesidad de implementar medidas de protección para estructuras metálicas, asegurando su durabilidad en el tiempo.

Para los rangos en los parámetros de corrosividad del agua se revela un alto potencial de agresividad debido al pH bajo en todas las muestras, lo que puede favorecer procesos corrosivos en estructuras expuestas. Los cloruros y sulfatos se encuentran mayormente en niveles no agresivos, salvo una muestra, que presenta una concentración elevada de cloruros y una conductividad eléctrica medianamente alta, clasificándola como moderadamente agresiva. En cuanto al carbono orgánico total (COT), la mayoría de las muestras presentan valores bajos, pero tres de las muestras fueron clasificadas como altamente agresivas.

Para la construcción del parque solar Quifa se hizo la recomendación de tener en cuenta estos parámetros con el fin de determinar el tipo de concreto a usar para el hincado de los paneles; siendo necesario posiblemente el uso de algún recubrimiento al concreto para que agentes corrosivos no puedan afectar al panel.

Otro de los parámetros a tener en cuenta para la determinar el tipo de concreto, es la presencia de sulfatos; sin embargo, para las muestras analizadas no se detectaron niveles elevados de sulfatos según la NSR-10 (MADS, 2010); por lo tanto, no se consideró necesario restringir la elección del concreto a utilizar según este parámetro. No obstante, se debe tener en cuenta el pH, ya que es un factor corrosivo importante al momento de elegir el tipo de recubrimiento de concreto, ya sea epóxico o galvanizado, para mitigar el riesgo de corrosión.

Para el área de geofísica, la práctica se centró en la fase inicial del procesamiento y en la representación gráfica de los datos obtenidos, específicamente en la evaluación de la resistividad

eléctrica del subsuelo donde se realizaron 13 SEA, ejecutados de acuerdo con la normativa IEEE Std 81-2012 (IEEE SA Standards Association, 2012), para la medición de la resistividad, la impedancia del suelo y los potenciales de la superficie terrestres de un sistema de puesta a tierra. Los sondeos se llevaron a cabo en tres direcciones principales ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$ ), con el objetivo de determinar variaciones de resistividad asociadas a anisotropías del terreno.

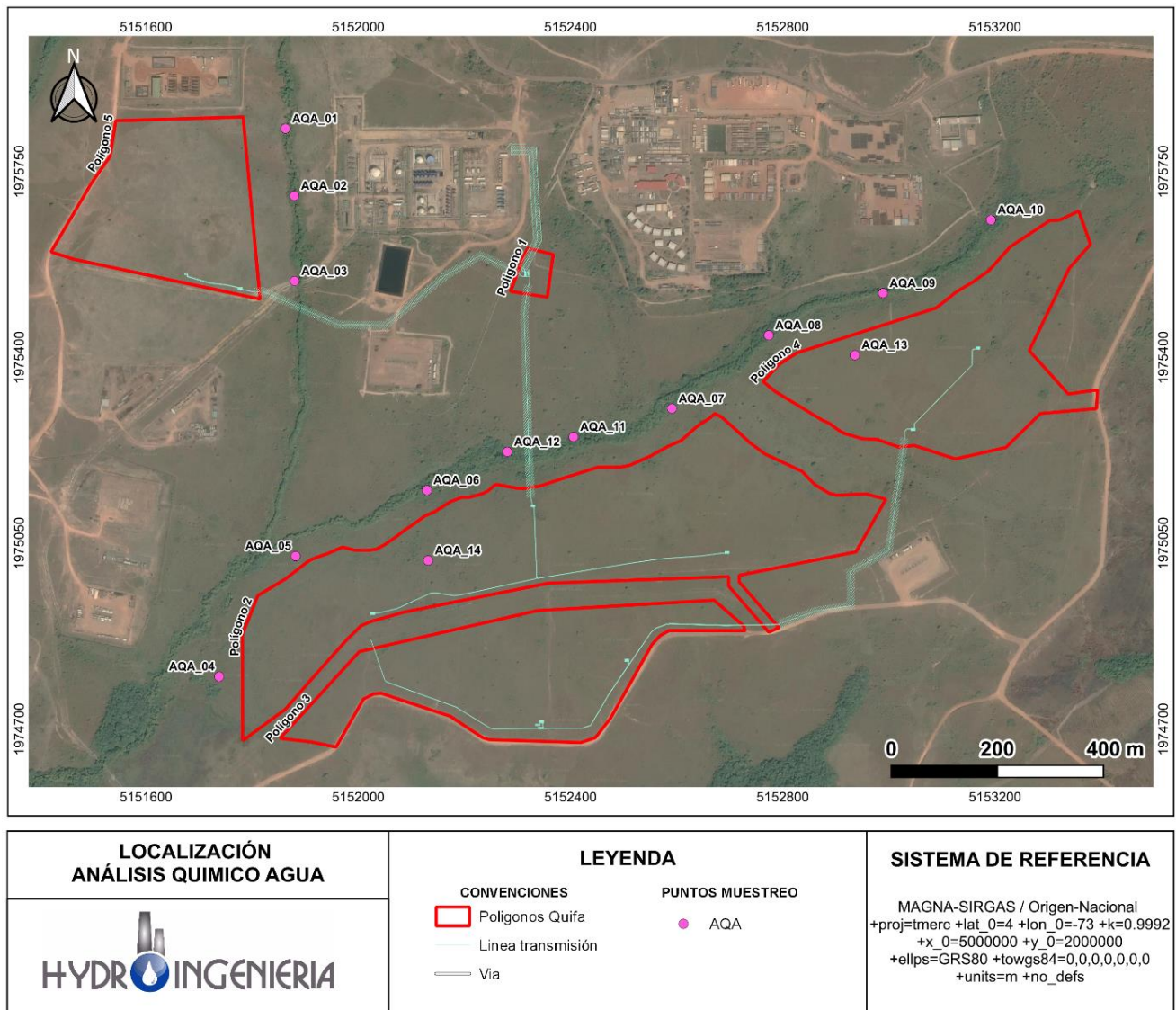
Los datos adquiridos en cada dirección tuvieron un control de calidad en campo, mediante la identificación y eliminación de registros anómalos (ejemplo: los datos que exceden por uno o más órdenes de magnitud del total de los registros o los registros de valores negativos). En los casos en donde se detectaron inconsistencias, se repitió la adquisición en el mismo punto. Posteriormente, los valores corregidos se organizaron en tablas y se exportaron en formato \*.dat; para su posterior entrada al *software* IPI2Win. En este programa se generaron las curvas de resistividad real para cada medición realizada (Figura 12), lo que permitió obtener un conjunto de resultados por cada Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), los cuales se agruparon en una sola gráfica para una representación más clara de los datos.

En la Figura 12 se muestra en el eje X la apertura máxima para esta adquisición versus la resistividad aparente en el eje Y. La curva de color negro muestra la resistividad aparente que representa los datos tomados en campo y la resistividad real sobrepuesta en color rojo, las cuales se guían de las capas que hay en el subsuelo representadas con la línea azul. El objetivo en el procesamiento fue hacer que la curva roja se ajustara lo mejor posible a la curva negra, teniendo en cuenta no exceder el 10% del error.

Posterior al procesamiento se presentó la visualización gráfica de cada SEA en el *software* Grapher. Los datos se visualizaron en conjunto (uniendo los SEV realizados en las 3 direcciones) para poder tener una mejor interpretación de las resistividades a profundidad (Figura 13).

**Figura 11**

*Mapa de localización de puntos de muestreo de agua.*



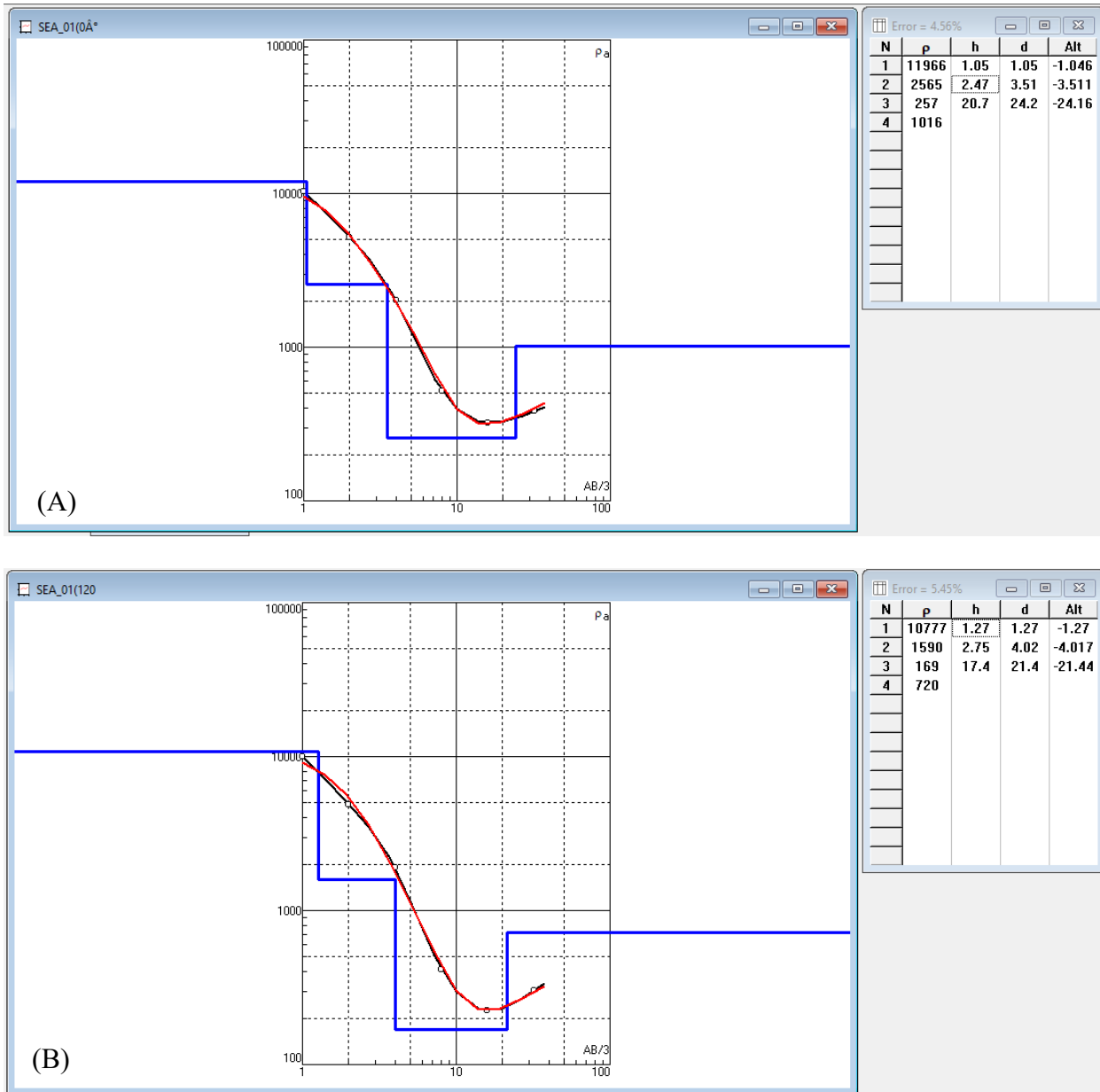
*Nota: \*Esta salida gráfica es un ejemplo de los mapas de localización tanto del área geotécnica como del área geofísica.*

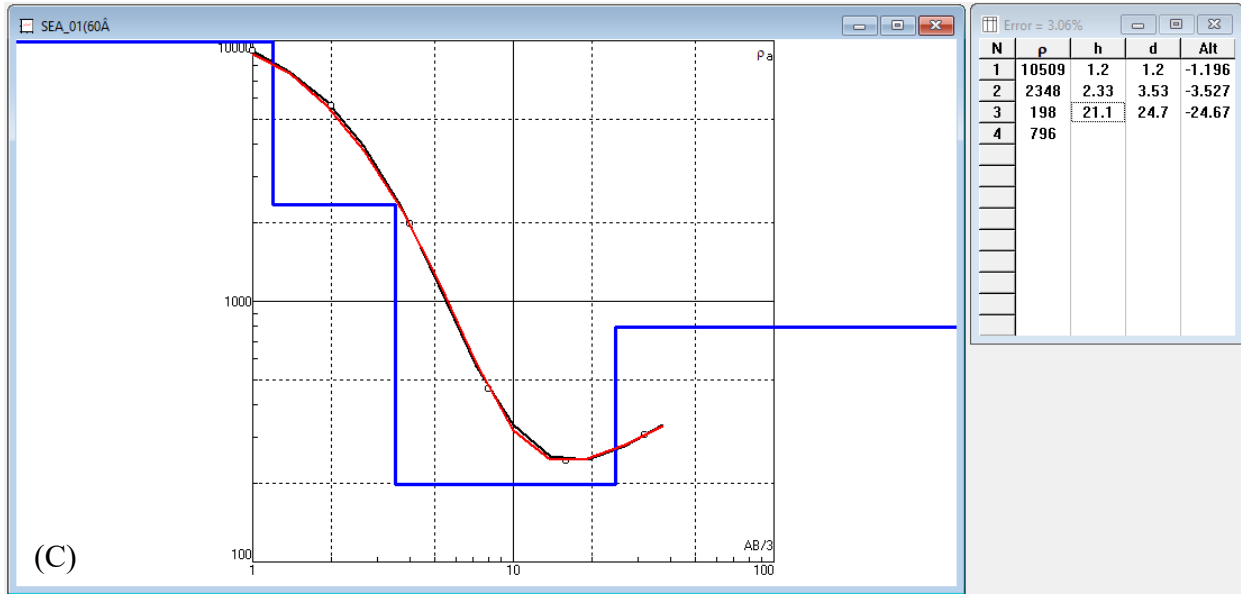
A partir del procesamiento de los datos obtenidos se logró evidenciar diferencias significativas en los valores de resistividad, las cuales pueden estar influenciadas por la composición litológica, la compactación del suelo y/o la presencia de humedad. Para el caso específico del proyecto del parque solar de Quifa, se identificaron tres capas (profundidades 1,0, 3,69 y 23,43 m) con variaciones importantes de resistividad, las cuales se asociaron a cambios en

la granulometría y el grado de consolidación del material. Finalmente, estos datos de resistividad con la interpretación se entregaron al cliente.

**Figura 12**

*Resultado SEV.*

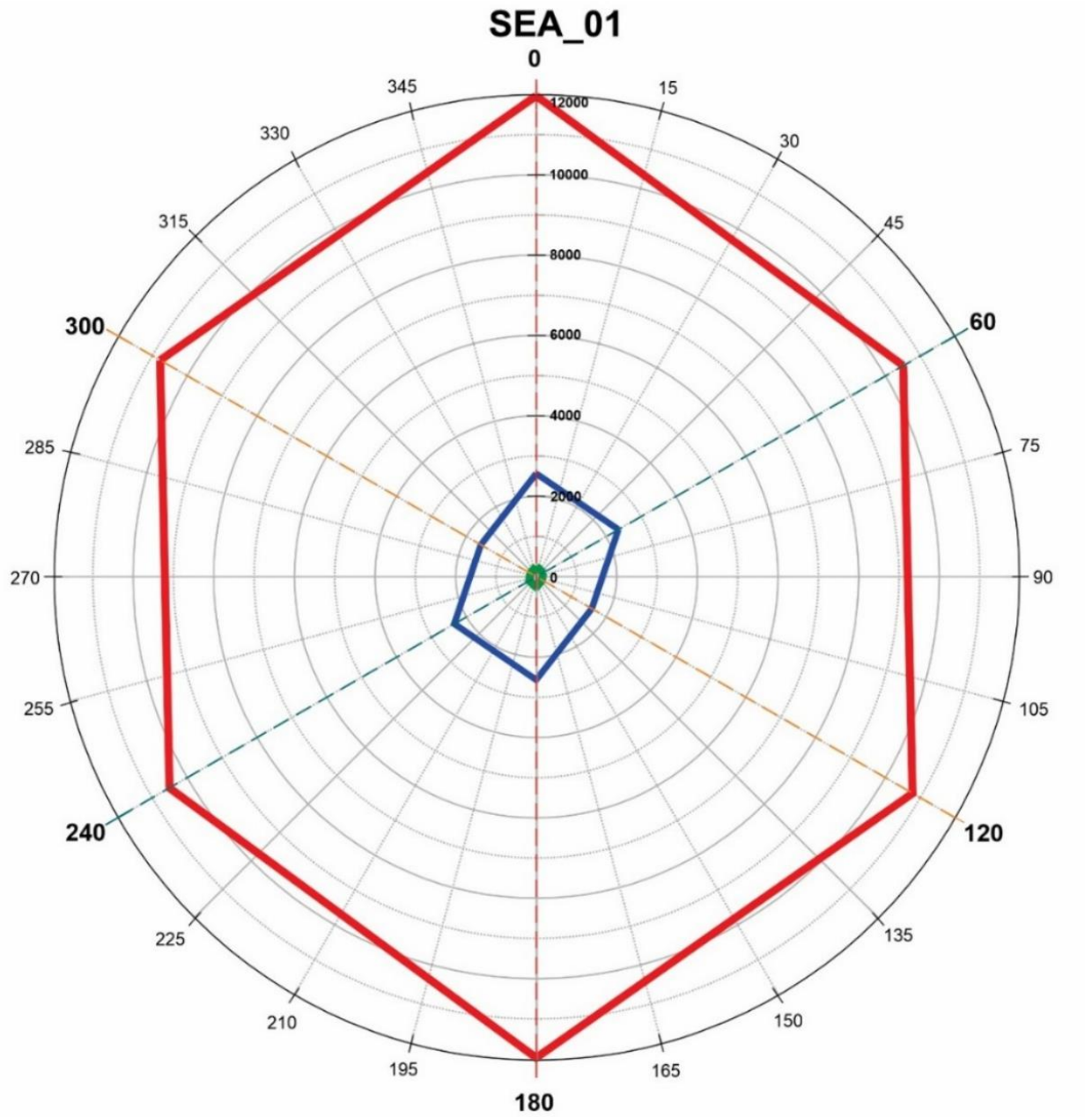




Nota: \* Curva de resistividad vs  $AB/3$ =apertura de electrodos. La figura (A) representa el SEV en dirección  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , la (B) representa el SEV en dirección  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$  y la (C) representa el SEV en dirección  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$ .

**Figura 13**

*Gráfica ejemplo de la visualización del SEA\_01.*



Ángulo de medición	Capas	Profundidad (m)
Resistividad en la dirección 0° - 180°.	Capa 1	1,00
Resistividad en la dirección 60° - 240°.	Capa 2	3,69
Resistividad en la dirección 120° - 300°.	Capa 3	23,43

*Nota: \* En este diagrama polar se evidencian 3 SEV a distintas profundidades.*

### ***5.1.2 Exploración geotécnica para la línea de transmisión del parque solar Bugambiles***

El proyecto Bugambiles fue el segundo proyecto en el cual se desarrolló la práctica empresarial, al igual que en el proyecto Quifa, la empresa desarrolló la consultoría para la viabilidad de la construcción de un parque solar. El proyecto se ubica en la vereda Campeche, municipio de Baranoa, departamento del Atlántico (Figura 14). De forma similar que, en la primera consultoría, la práctica desarrolló la fase de la revisión y análisis de información geológica secundaria, análisis de los datos fisicoquímicos de agua y suelo y el desarrollo de estudios geoelectrónicos enfocados a obtener la resistividad eléctrica del terreno.

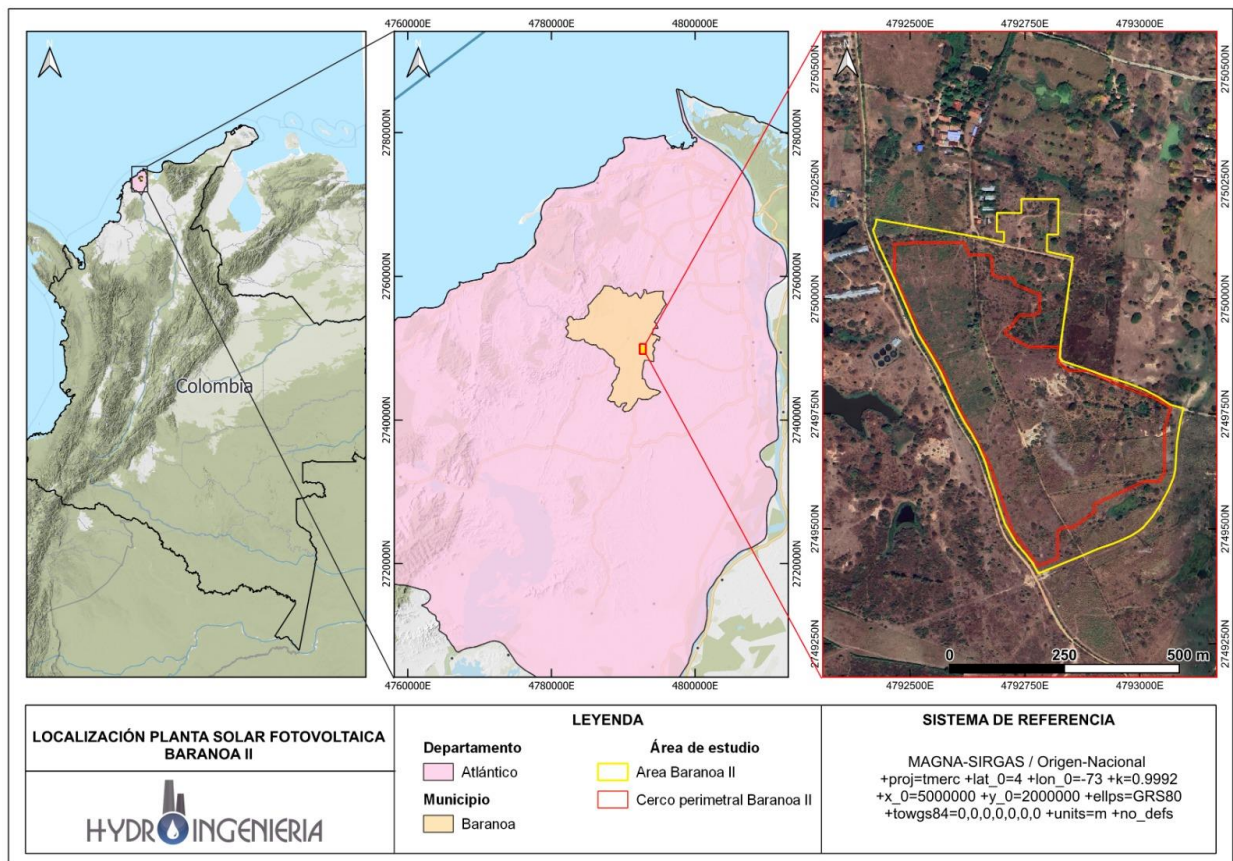
En la fase de revisión bibliográfica se consultaron, tanto las planchas geológicas como la memoria 16-17 Galerazamba y Barranquilla (Barrera Olmos, 2001; Barrera, 1998) y 24 Sabanalarga (Reyes & Zapata, 1998; Zapata García & Reyes Torres, 2001) elaboradas por el Servicio Geológico Colombiano-SGC. Se recopiló información sobre la estratigrafía, la geología estructural y la geomorfología de la zona. Posteriormente, se realizó un análisis crítico de dicho material, seleccionando los aspectos relevantes para la consultoría de la empresa (Figura 15).

En el frente geotécnico, durante la práctica se realizaron las mismas actividades del proyecto Quifa, tales como: la elaboración de mapas de ubicación de los puntos de recolección de muestras de agua y suelo, al igual que mapas de localización para realización del ensayo *Standard Penetration Test* (SPT), junto con la ubicación de cortes utilizados para la representación del perfil geotécnico (Figura 16).

En el análisis fisicoquímico se evaluaron las propiedades de 5 muestras de agua y 14 muestras de suelo. A partir de las propiedades obtenidas, se determinó el nivel de corrosividad en cada punto de recolección de la muestra por medio de los rangos propuestos para suelo y agua (Ávila Mendoza & Genescá Llongueras, 2003).

**Figura 14**

*Mapa de localización del área destinada al parque solar Bugambiles.*



En el análisis físico-químico del suelo se muestra un riesgo moderado a alto de corrosividad, principalmente por su pH ácido y un alto contenido de cloruros en la mayoría de las muestras. Respecto a los sulfatos, la mayoría de las muestras se clasifican como baja a moderadamente agresivas, a excepción de una muestra, ubicada al sureste del predio, la cual se clasifica como altamente agresiva. En cuanto al Carbono Orgánico Total (COT), la mayoría de las muestras presentan baja agresividad, aunque tres de ellas se clasifican entre moderadamente a altamente agresivas, lo que podría favorecer la corrosión microbiológica en estos puntos. Finalmente, la salinidad se clasifica en la mayoría de las muestras como moderadamente agresivas, a excepción de 2 muestras que se clasifican como altamente agresivas.

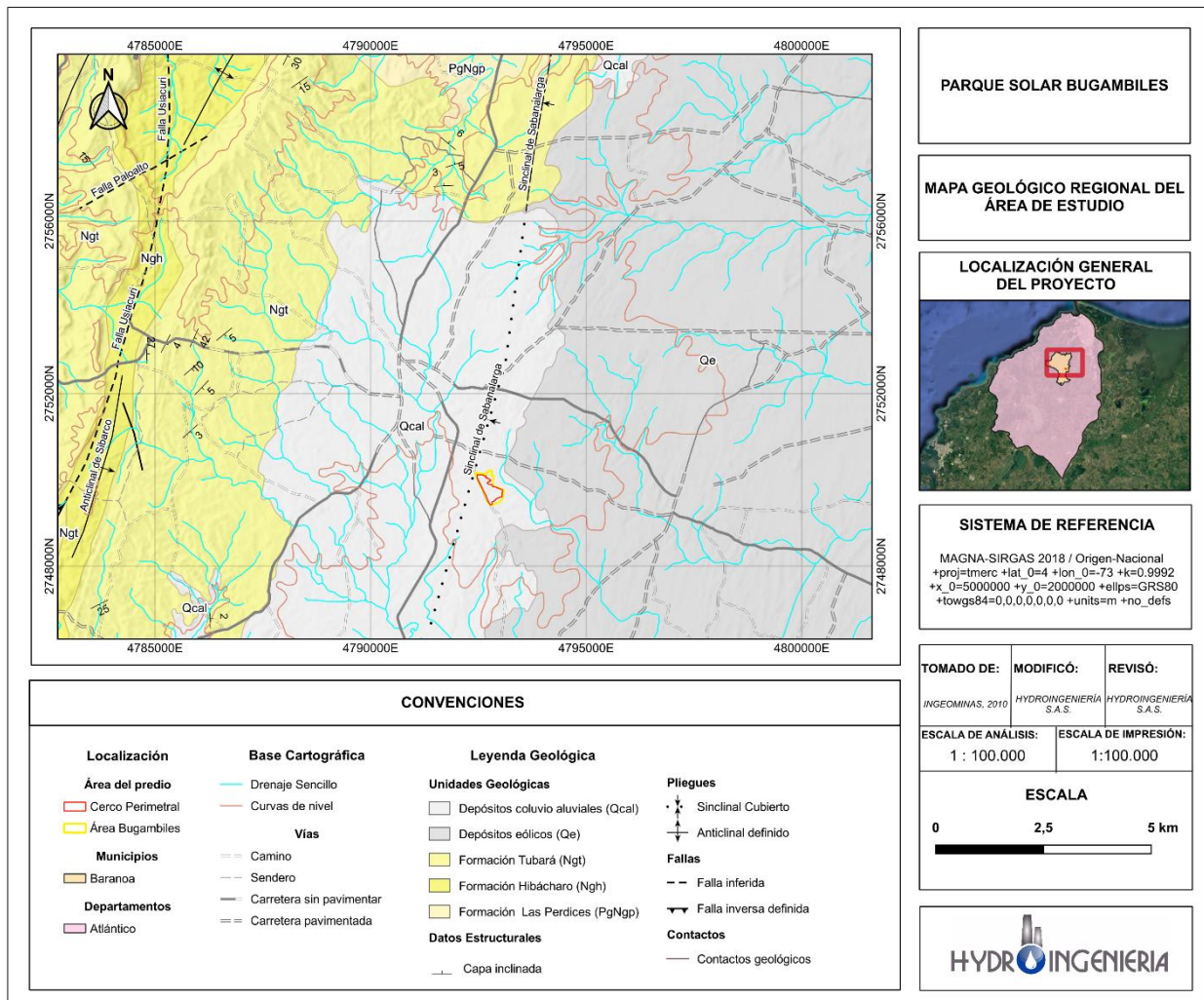
Para el análisis químico del agua, se tomaron muestras de cuerpos de agua superficiales debido a la ausencia del nivel freático. Aunque estas aguas no constituyen un punto de referencia directo para determinar con precisión su corrosividad, pueden proporcionar indicios sobre las condiciones del agua en el subsuelo. En el análisis de las muestras se evidencia un potencial medio-alto de agresividad debido al pH medio-bajo en todas las mediciones, lo que puede favorecer procesos corrosivos en estructuras expuestas. Por otro lado, la totalidad del contenido de sulfatos en las muestras se encuentran en niveles no agresivos. En cuanto a los cloruros y la conductividad eléctrica, tres muestras presentan valores no agresivos; sin embargo, algunas de las muestras presentan valores altamente agresivos. Dado que en las muestras analizadas son de aguas superficiales y no se detectaron niveles elevados de sulfatos según la NSR-10 (ICONTEC, 2022b), no es necesario restringir la elección del concreto a utilizar.

En el frente geofísico, se tuvieron en cuenta las mismas actividades del proyecto Quifa, tales como la fase inicial del procesamiento y en la representación gráfica de los datos obtenidos, que en este caso fueron 8 SEA. Al igual que en el anterior, los sondeos se llevaron a cabo en las tres direcciones principales ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$ ), para la posterior determinación de variaciones de resistividades en el subsuelo.

En la Figura 17 se presenta en el eje X la apertura máxima para esta adquisición versus la resistividad aparente en el eje Y. La curva de color negro se muestra la resistividad aparente que representa los datos tomados en campo y la resistividad real sobrepuesta en rojo, las cuales se guían de las capas que hay en el subsuelo representadas con la línea azul. El objetivo en el procesamiento fue hacer que la curva roja se ajuste lo mejor posible a la curva negra y que este ajuste no supere el 10% de error.

Figura 15

Mapa geológico regional del Parque Solar Bugambiles.

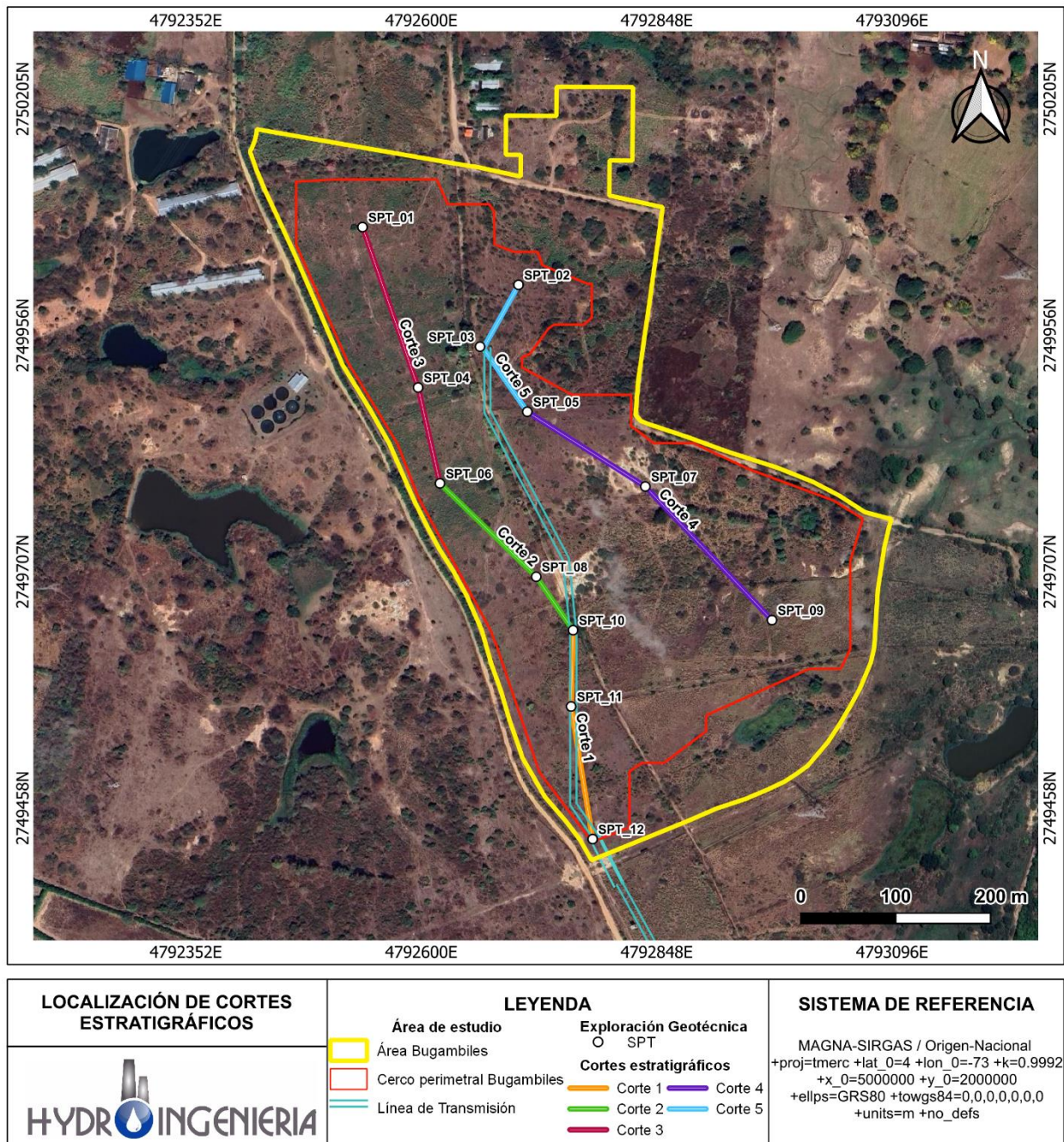


Nota: \* Modificado de las planchas 16-17 Galerazamba y Barranquilla y 24 Sabanalarga (Barrera, 1998; Reyes & Zapata, 1998).

En la gráfica de la Figura 18 se muestra el resultado del procesamiento de cada SEA, en el cual se observa en conjunto los datos de los SEV realizados en las distintas direcciones, con el objetivo de poder tener una mejor interpretación a profundidad de las resistividades.

Figura 16

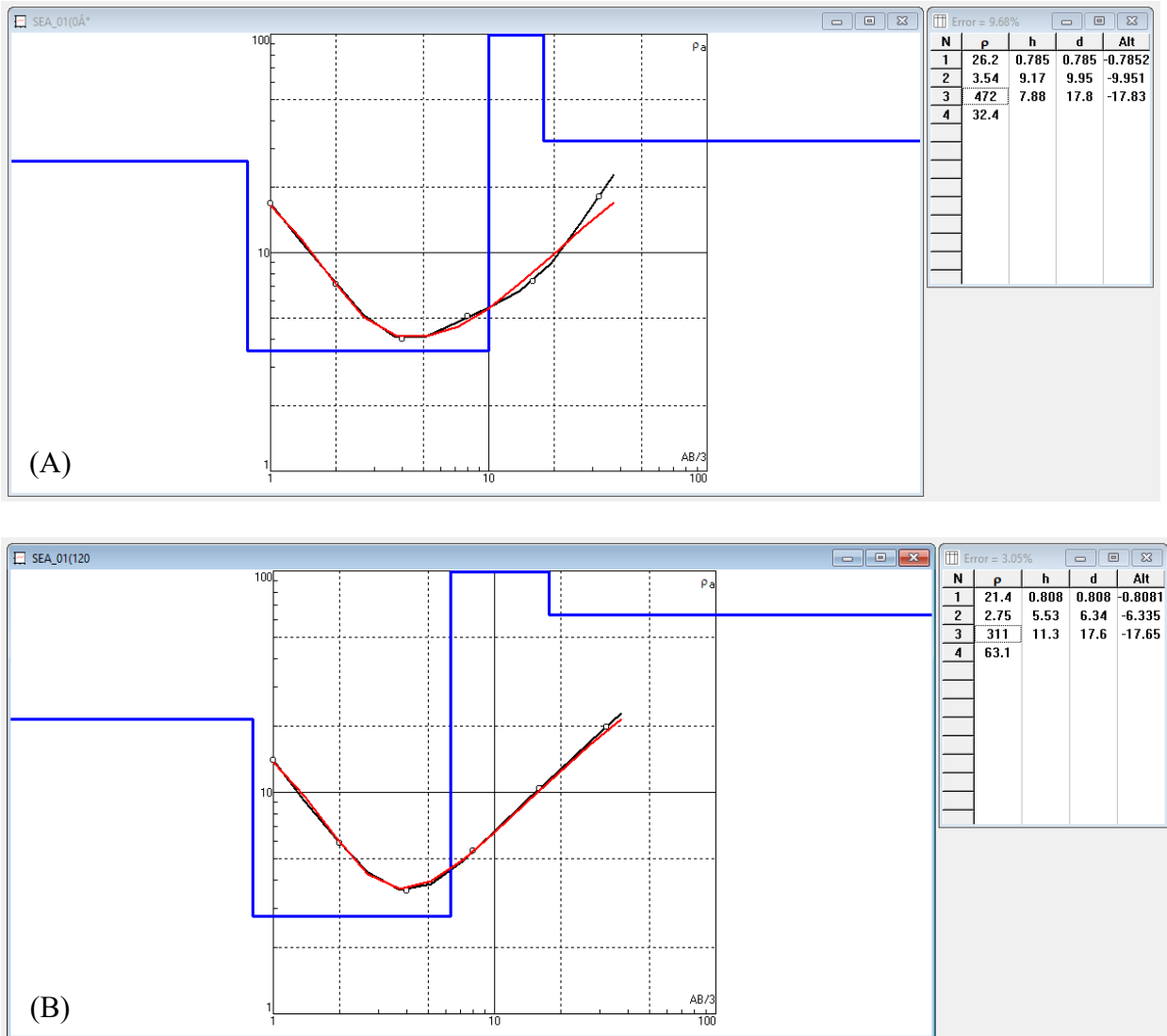
Mapa de localización de SPT + Cortes para perfiles estratigráficos.

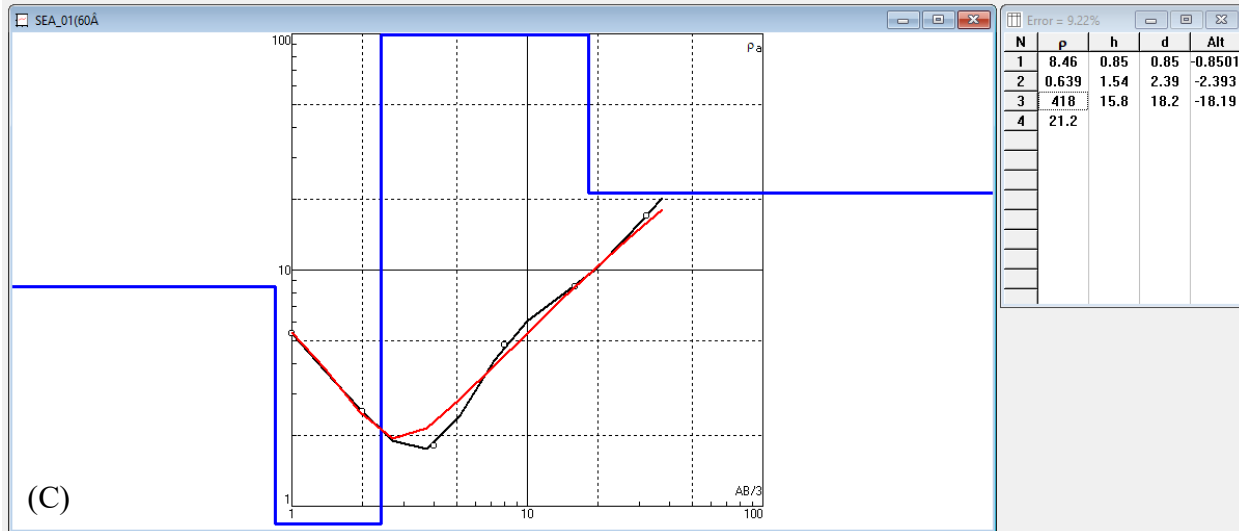


Nota: \* Esta salida grafica fue utilizada en el área geotécnica.

**Figura 17**

Resultado SEV.



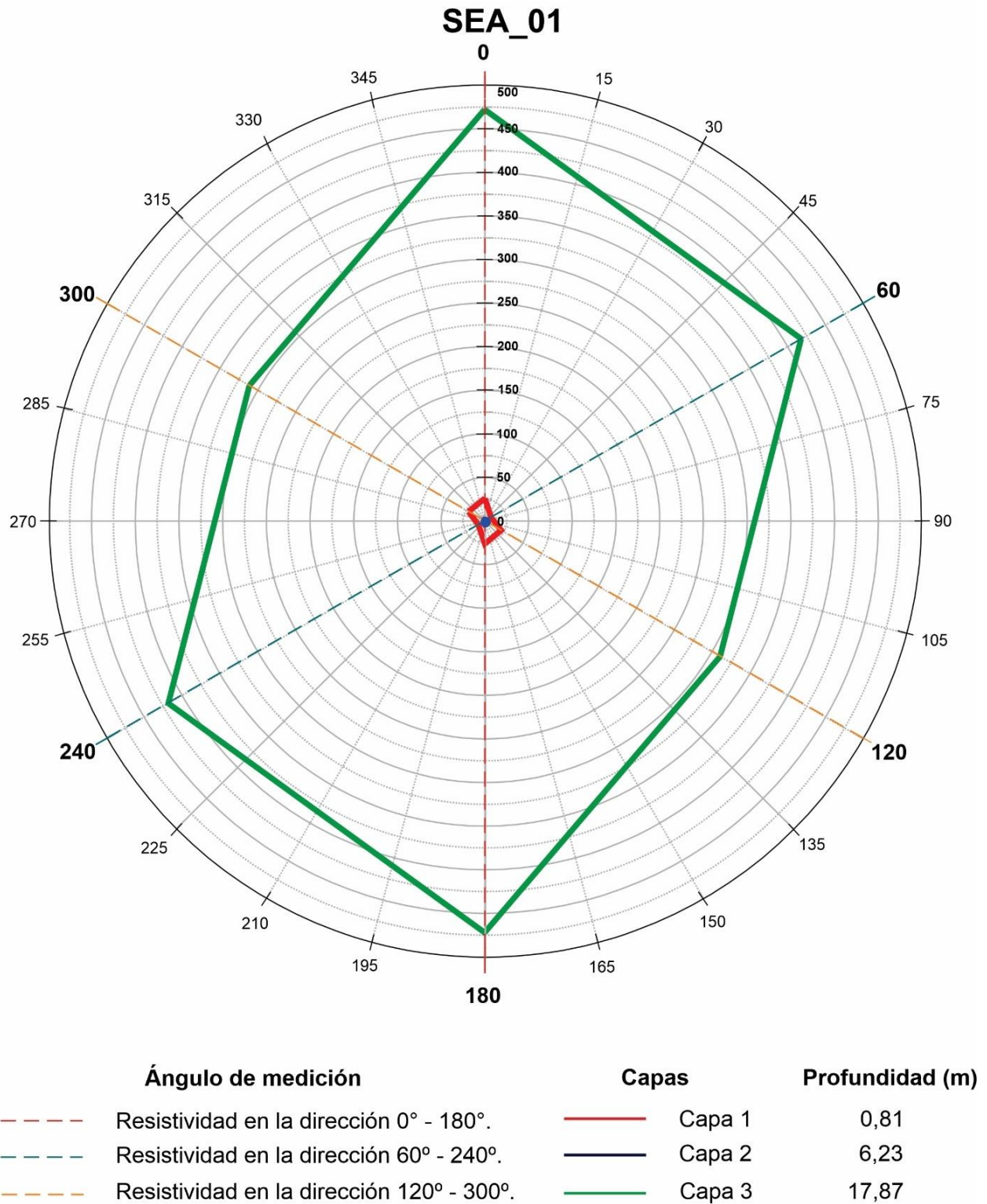


Nota: \*Curva de resistividad vs  $AB/3$ =apertura de electrodos. La figura (A) representa el SEV en dirección  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , la (B) representa el SEV en dirección  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$  y la (C) representa el SEV en dirección  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$ .

A partir de la gráfica resultante se puede evidenciar tres capas, algunas capas con diferencias significativas en los valores de resistividad (profundidades 0,81; 6,23 y 17,87 m), influenciadas posiblemente por la composición litológica, la compactación del suelo y/o la presencia de humedad. Los resultados proporcionan valores bajos asociados a arcillas, lo cual es información clave para la evaluación del comportamiento eléctrico del terreno, lo que contribuirá en el diseño de sistemas de puesta a tierra y eficiencia energética de la infraestructura del parque solar Bugambiles.

**Figura 18**

Gráfica ejemplo de la visualización del SEA\_01.



Nota: \* En este diagrama polar se evidencian 3 SEV a distintas profundidades.

## **5.2 Hidrogeología**

Durante la práctica empresarial se desarrollaron dos proyectos enfocados a la hidrogeología, la prospección de aguas subterráneas en la planta industrial Familia S.A. y la construcción de red de media tensión en el sector de La Lizama. El primer estudio se basa en la caracterización hidrogeológica a partir de un modelo de distribución de la resistividad real del subsuelo y el segundo estudio la complementación de los requerimientos geológicos e hidrogeológicos para la licencia ambiental del área de interés del cliente.

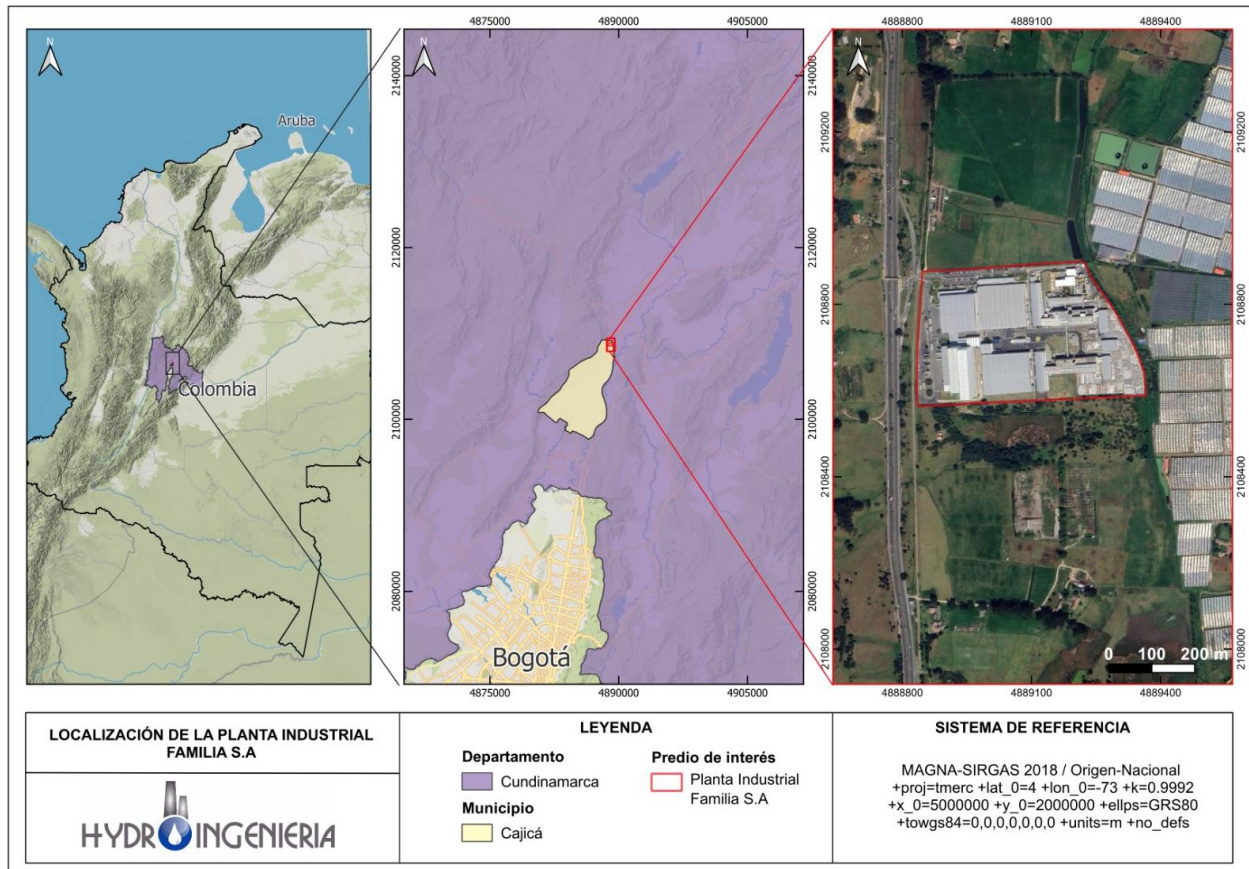
### ***5.2.1 Caracterización hidrogeológica para la prospección de aguas subterráneas en la planta industrial Familia S.A.***

El primero de los proyectos de hidrogeología en los cuales se desarrolló la práctica empresarial, consistió en un estudio hidrogeológico para la prospección de aguas subterráneas por medio de exploración geofísica para la planta industrial Familia S.A., la cual está localizada en el área rural de la vereda Río Grande, del municipio de Cajicá, departamento de Cundinamarca (Figura 19). La participación de la empresa se centró en el desarrollo de estudios geoeléctricos para la caracterización hidrogeológica del área de interés.

En la parte inicial de la consultoría se realizó el análisis de información geológica e hidrogeológica existente. Como parte específica de la práctica empresarial, se compilaron y analizaron los datos SIG de la geología local proporcionada por el cliente, la cual fue organizada y ajustada para los trabajos de geofísica. Posteriormente, se participó en la fase del procesamiento de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE), la cual tuvo como objetivo principal la determinación de resistividades del terreno para la identificación y delimitación de zonas con potencial de acumulación de agua subterránea.

**Figura 19**

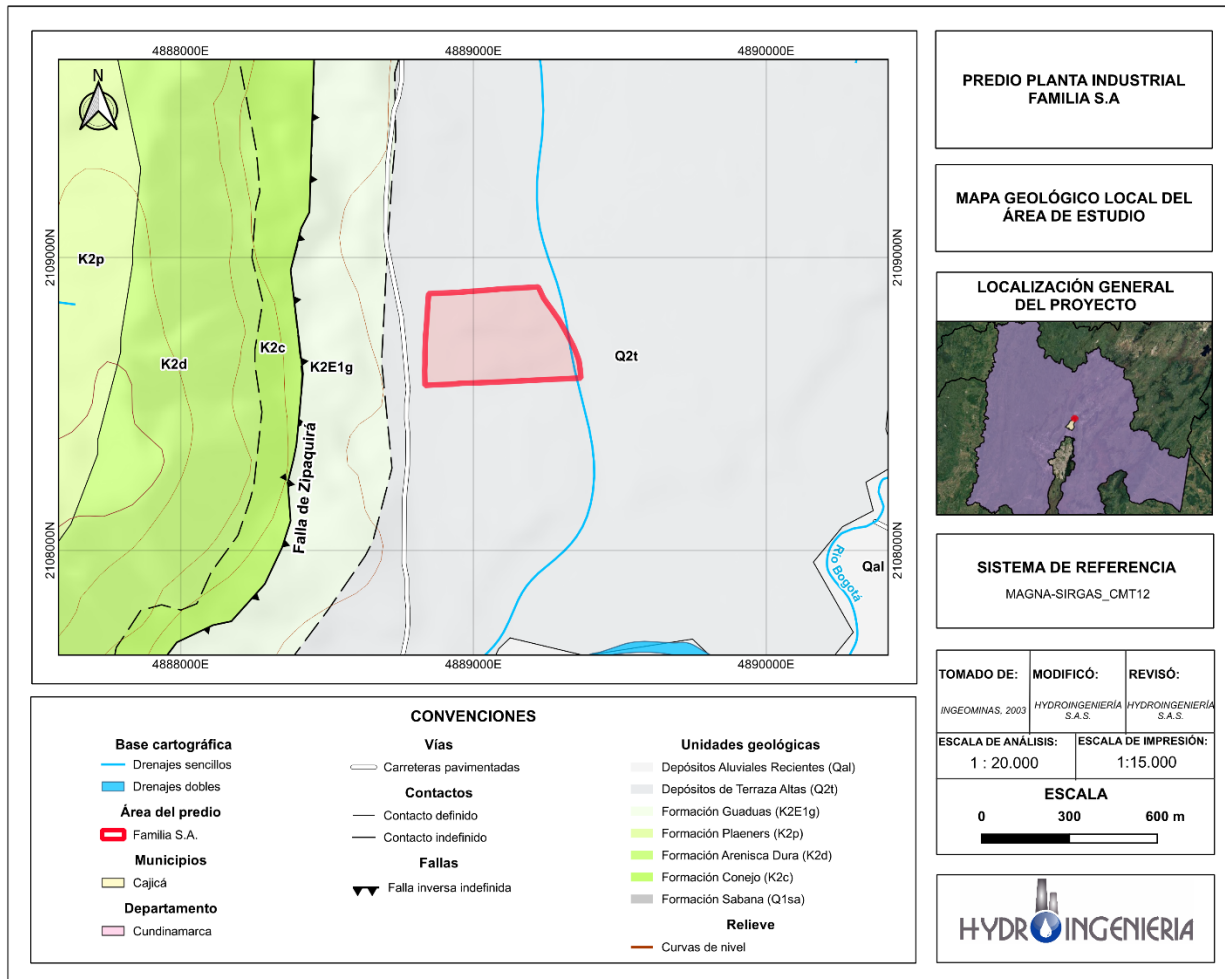
*Mapa de localización del área destinada al área industrial Familia S.A.*



En la fase de revisión de información geológica se consultaron las planchas y memorias geológicas 209 Zipaquirá (Montoya & Reyes, 2003b, 2003a) 228 Bogotá Noreste (Buitrago et al., 2008; Corredor et al., 2015) del Servicio Geológico Colombiano-SGC, de donde se extrajo la información sobre la estratigrafía, tal como la litología y espesores de las unidades, como también la información estructural (Figura 20), para su posterior comparación con los datos adquiridos en la TRE. Adicionalmente, se consultó la información relacionada a la hidrogeología, tanto de entidades públicas como privadas (ej. CAR, 2008; González, 2022; IDEAM, 2010), de donde se extrajo información como la provincia hidrogeológica a la que pertenece la zona de estudio, sus límites estructurales y los niveles freáticos y potenciales hidrogeológicos reportados.

Figura 20

Mapa geológico local de la planta industrial Familia S.A.



Nota: \* Mapa realizado como parte de los productos cartográficos. Modificado de (Buitrago et al., 2008; Montoya & Reyes, 2003b).

La práctica empresarial tuvo participación en la etapa inicial del procesamiento y la posterior interpretación de la TRE, específicamente en la correlación de la caracterización litológica extraída de la información secundaria y las resistividades extractadas de la tomografía. En este proyecto se realizó una TRE, de acuerdo con la normativa ASTM D6431-99 (ASTM International, 1999), para el análisis de materiales del subsuelo, en función de su comportamiento eléctrico; es decir, un diferenciador de estos en función de su valor de resistividad.

La tomografía se realizó con una longitud de 400 m para alcanzar una profundidad máxima de 78,8 m, aproximadamente. Los datos adquiridos se incorporaron al *software* Toolbox, el cual genera un archivo \*.dat, que posteriormente se incorporó al *software* Erigraph, del que se extrajo una pseudosección preliminar de resistividad aparente. Luego, el archivo original (\*.dat) se procesó con el *software* Res2Dinv, para invertir los datos de resistividad aparente a partir de las pseudosección medida en campo y calculada (Figura 21. A-B), transformándolos en un modelo de resistividad en función de la profundidad. El programa ajusta el modelo a través de un proceso iterativo para minimizar la discrepancia entre datos de campo y los modelados, lo que permite generar una representación precisa de la variabilidad de la resistividad eléctrica del subsuelo en dos dimensiones (Figura 21; punto C). Este proceso es esencial para obtener una interpretación detallada de las características geológicas e hidrogeológicas del área estudiada.

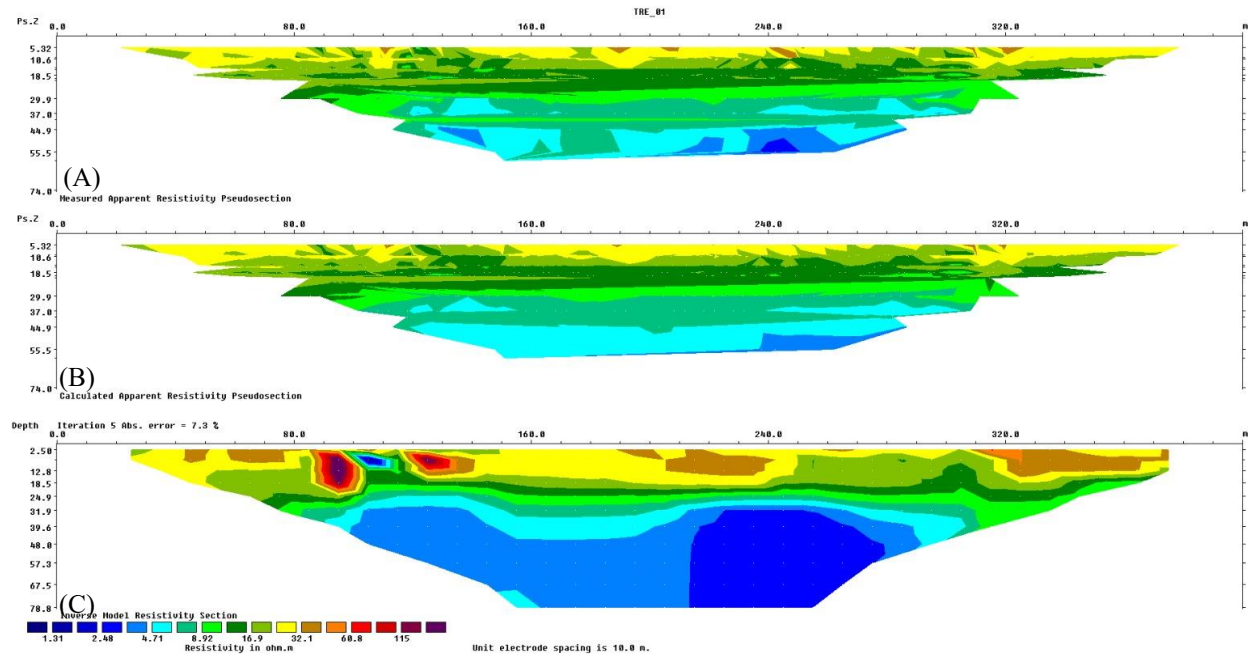
El resultado generado a partir del procesamiento de la pseudosección es una imagen bidimensional (2D) de la distribución de la resistividad en el suelo (Figura 22), el cual es un modelo de distribución de la resistividad real del subsuelo, que puede ser considerada como una solución válida de los datos experimentales, donde el modelo teórico es similar a las observaciones de campo.

Posteriormente, los resultados del estudio de prospección geofísica y el análisis de información geológica-hidrogeológica secundaria determinan los rangos de valores de resistividad característicos para las unidades geológicas presentes en el área de estudio (Figura 23). Las unidades geológicas son asignadas a partir de los rangos de resistividades eléctricas, por lo cual la unidad con resistividad más baja se puede asociar a una anomalía conductiva dada por el ascenso de materiales salinos y porosidad secundaria, clasificándola con una característica hidrogeológica

baja a moderada. La unidad con resistividades más altas se asocia a un contenido litológico de variable humedad o agua subterránea de característica hidrogeológica baja.

**Figura 21**

*Imágenes 2D sacadas del Res2Dinv de la TRE\_01.*



*Nota: \*Ejemplo de pseudosecciones donde (A) Pseudosección medida, (B) Pseudosección calculada, (C) Modelo inverso.*

**Figura 22**

*Resultado de la TRE\_01*

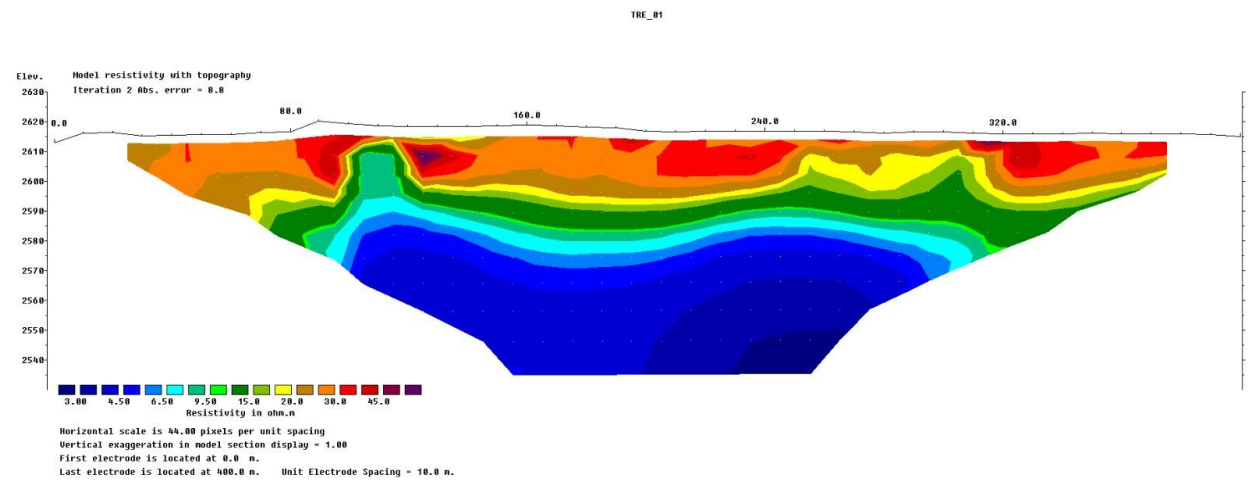
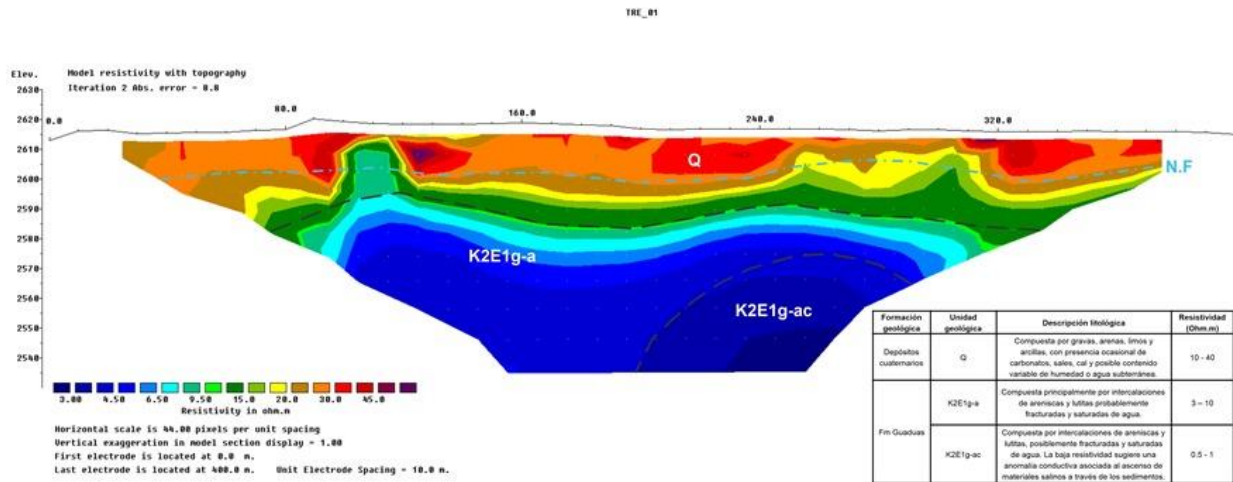


Figura 23

Interpretación geológica de la TRE.



**5.2.2 Solicitud de licencia ambiental para la construcción de la red de media tensión en los sectores La Lizama y La Fortuna.**

El segundo proyecto relacionado con hidrogeología en el cual se desarrolló la práctica empresarial consistió en un estudio geológico, geomorfológico e hidrogeológico, para completar los requerimientos de la solicitud de la licencia ambiental para la construcción de la línea de media tensión (34,5 y 13,2 KV) en el sector La Lizama, entre los municipios de San Vicente de Chucurí y Barrancabermeja, departamento de Santander. La participación de la empresa se centró en la adquisición de información geológica y geofísica para el análisis hidrogeológico y geológico de la zona de construcción de la línea. Al ser una zona extensa (aproximadamente 9 km), el equipo técnico decidió dividir el área en cuatro tramos como se muestra en la Figura 25.

El proyecto se dividió en dos áreas: geología y geofísica. La primera área incluyó dos fases, la primera fase consistió en el estudio de la línea de red de tensión completa y la segunda fase, donde se hizo detalle en las áreas de sustracción dentro esta línea de tensión. Específicamente, en la práctica se participó en ambas fases (incluyendo la comisión de campo), donde se realizó el análisis de información geológica secundaria previo a los trabajos de campo para la realización de

la cartografía y caracterización de formaciones geológicas dentro de la línea de red de tensión completa, el cual tuvo como objetivo realizar un mapa geológico local a escala 1:25.000, junto con una columna estratigráfica. En la segunda fase, al igual que en la primera, se realizó el levantamiento cartográfico geológico y caracterización de unidades geológica, pero a una escala más detallada 1:10.000. A partir de la información secundaria se presentó un análisis multitemporal (para los años 2005, 2015 y 2025) de los cambios geomorfológicos del área de estudio, donde se analizaron cambios en la intervención antrópica, reforestación, deforestación y procesos erosivos. Adicionalmente, se realizó un estudio hidrogeológico donde se identificaron y asociaron las zonas de recarga, tránsito y descarga de acuíferos con las formaciones geológicas, como también las direcciones de flujo subterráneo.

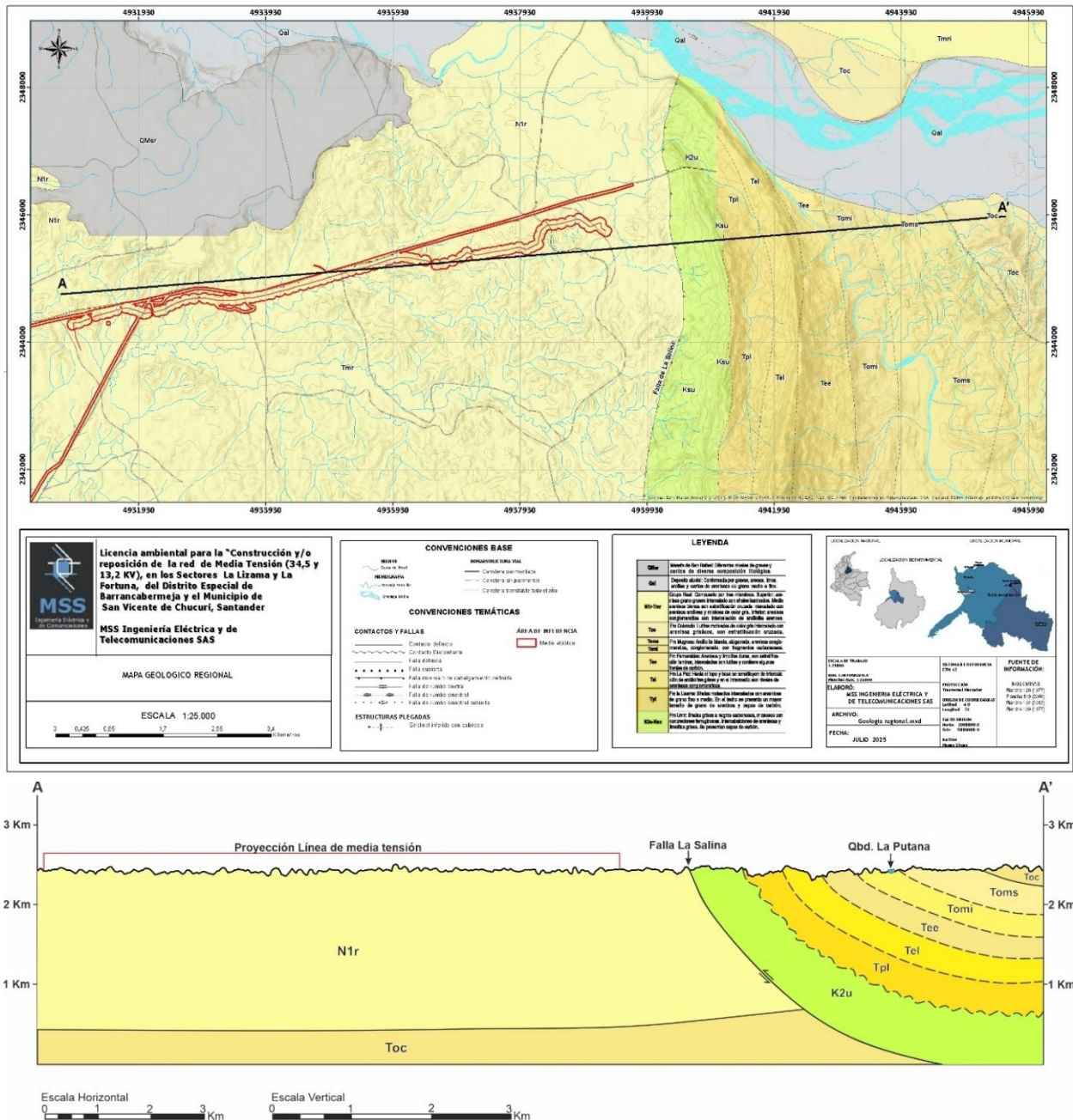
En la revisión bibliográfica se realizó la consulta de las memorias y planchas geológicas 108 Puerto Wilches (Fonseca et al., 2012a, 2012b), 109 Rionegro (Ward et al., 1973; Ward, Goldsmith, Jimeno, Cruz, et al., 1977), 119 Barrancabermeja (Gómez et al., 2008; GRP Ltda e INGEOMINAS, 2008), 120 Bucaramanga (Ward et al., 1973; Ward, Goldsmith, Jimeno, Restrepo, et al., 1977) del Servicio Geológico Colombiano-SGC. Donde se analizó la estratigrafía, geomorfología, estructural e hidrogeología relacionada con el estudio (Figura 24). Adicionalmente, se realizaron los mapas de localización para los trabajos de campo, donde se ubicaron las líneas TRE, puntos de agua registrados, entre otros.

Para este estudio se realizaron dos salidas de campo (la práctica empresarial involucró solo la primera de estas), de la cual la primera tuvo un carácter geológico, donde se obtuvo como resultado la digitalización de la libreta de campo, análisis litológicos y caracterización de puntos de agua como pozos, aljibes, etc. Para la segunda salida se adquirieron cinco tomografías de resistividad eléctrica (TRE), de la cual se obtuvo un perfil del subsuelo, permitiendo identificar la

distribución espacial y los contrastes de resistividades para su posterior asociación a las unidades geológicas reportadas en la información secundaria (Figura 25).

Figura 24

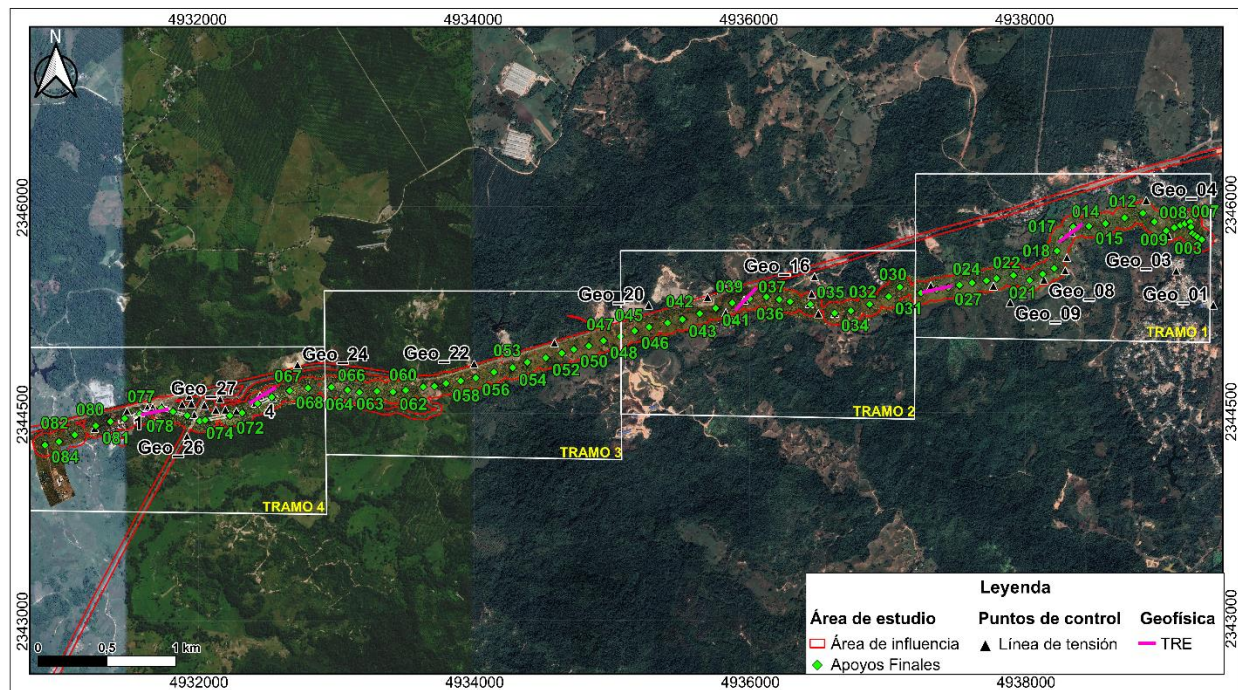
Mapa y corte geológico regional.



Nota: \*El mapa y corte fue realizado durante la fase de revisión bibliográfica. Modificado de (Fonseca et al., 2012b; GRP Ltda e INGEOMINAS, 2008; Ward, Goldsmith, Jimeno, Cruz, et al., 1977; Ward, Goldsmith, Jimeno, Restrepo, et al., 1977)

**Figura 25**

Localización de tramos, puntos de control geológicos y geofísica.



Nota: \*Tramos en los que se dividió el proyecto.

En la fase de procesamiento de los datos de campo, se realizó la interpretación del registro fotográfico, donde se identificaron las unidades litológicas presentes como se muestra en la **Figura 26**, también se hizo la interpretación e identificación de estas unidades en las TRE (Figura 27). Al igual que con la geología, se realizó la caracterización de las estructuras geomorfológicas a escala 1:10.000, que fue un requerimiento para las áreas de sustracción, el cual tuvo como objetivo rectificar y/o modificar las capas digitales de la geomorfología (\*.shp) entregadas por el cliente.

A partir de la caracterización litológica descrita previamente y con base en los datos recolectados en campo durante la campaña de control geológico, se elaboró la columna estratigráfica local como se muestra en la Figura 28. Esta columna sintetiza las unidades geológicas identificadas, su disposición vertical, sus relaciones estratigráficas y los espesores relativos observados en las estaciones de control; también se realizó el mapa geológico local a escala

1:25.000 (Figura 29), junto con un corte estructural para la línea de red de media tensión. Para el área de sustracción se realizó el mapa geológico local detallado a escala 1:10.000.

**Figura 26**

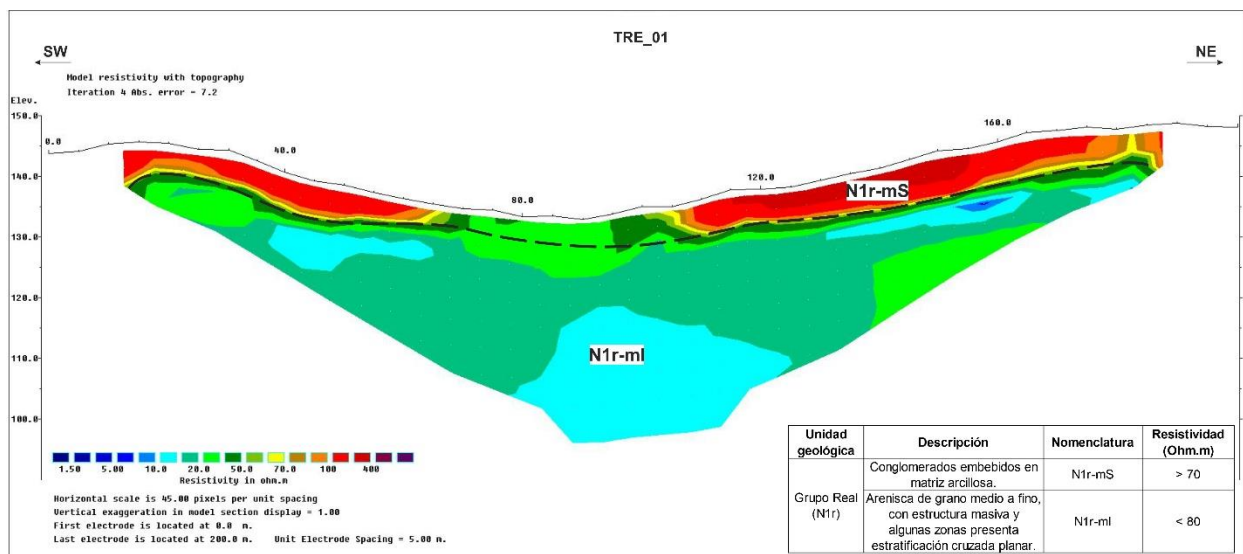
*Fotografía de campo.*



*Nota: \*Estación de campo.*

**Figura 27**

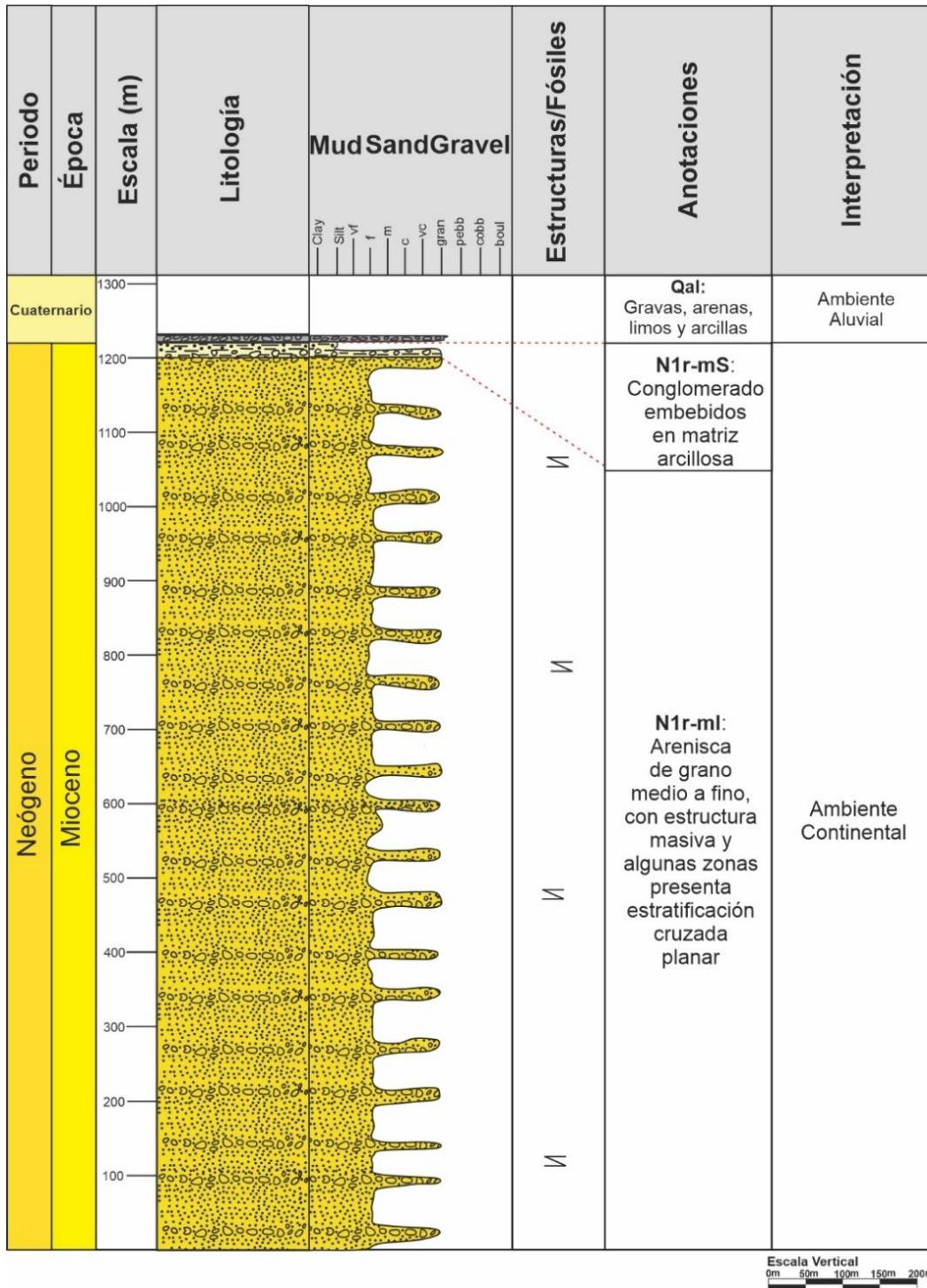
*TRE interpretada con unidades litológicas.*



*Nota: \*TRE interpretada durante la práctica.*

Figura 28

Columna estratigráfica local





factores como intervención antrópica, reforestación, deforestación y procesos erosivos; también, se realizó una figura representativa del área de sedimentación activa de la zona (Figura 30).

Figura 30

Análisis multitemporal de los años 2005, 2015 y 2025.

Análisis Multitemporal	
Imágenes Satelitales	Años analizados
	<p><b>2005</b></p> <p>La imagen correspondiente al año 2005 presenta baja resolución, está en escala de grises y muestra una calidad limitada, lo cual restringe la interpretación detallada de coberturas y elementos superficiales. No obstante, fue posible identificar la traza general de dos quebradas innominadas en las Áreas de Sustracción 1 y 2, las cuales siguen una dirección general suroeste (SW). En las Áreas 3 y 4 no se evidencian estructuras similares, posiblemente debido a la resolución de la imagen.</p> <p>En la Área de Sustracción 3 se identificó un proceso erosivo puntual, representado por un píxel más claro en la escala de grises. Esta tonalidad más brillante, en contraste con los tonos oscuros predominantes en el resto de la imagen, puede estar asociada a una zona sin cobertura vegetal o con exposición de suelo desnudo, lo que sugiere condiciones de erosión superficial activa o áreas recientemente intervenidas que impiden el establecimiento de vegetación.</p> <p>En contraste, la mayoría de los polígonos de sustracción muestran píxeles predominantemente oscuros (cercanos al negro), lo que podría interpretarse como presencia de vegetación densa o cobertura boscosa cerrada al momento de la captura satelital. En particular, en la Área de Sustracción 4 no se observan elementos geomorfológicos destacados ni huellas de alteración, más allá de su apariencia uniforme y oscura, compatible con un entorno naturalmente conservado.</p>
	<p><b>2015</b></p> <p>En la imagen correspondiente al año 2015, se evidencia una mejora en la resolución y contraste respecto a la imagen de 2005, lo que permite una interpretación más clara de las coberturas superficiales y la dinámica del paisaje. Se mantiene visible la traza de las quebradas innominadas en las Áreas de Sustracción 1 y 2, que conservan su dirección general de flujo hacia el suroeste (SW). En las Áreas 3 y 4 no se identifican cursos hídricos visibles.</p> <p>En las Áreas de Sustracción 1 y 2, se observan los primeros indicios de intervención antrópica, especialmente en el extremo occidental de ambas áreas. Estos cambios se expresan como claros en la cobertura vegetal, posiblemente asociados a aperturas de caminos, limpieza de terreno o uso del suelo con fines operativos o de infraestructura.</p> <p>En la Área de Sustracción 3, se mantiene el proceso erosivo puntual previamente identificado en 2005. Además, en este periodo aparece una zona de reforestación perceptible por el patrón regular y más claro de cobertura, indicativo de plantaciones jóvenes o procesos de restauración ecológica.</p> <p>Por su parte, en la Área de Sustracción 4, se identifica un proceso de deforestación incipiente en el extremo nororiental del polígono, evidenciado por la pérdida parcial de cobertura vegetal y la exposición de superficies claras. No se observan en esta área procesos erosivos ni trazas hídricas visibles.</p>
	<p><b>2025</b></p> <p>La imagen satelital 2025, se evidencia una mejora en la resolución y contraste respecto a la imagen de 2005, lo que permite una interpretación más clara de las coberturas superficiales y la dinámica del paisaje. Se mantiene visible la traza de las quebradas innominadas en las Áreas de Sustracción 1 y 2, que conservan su dirección general de flujo hacia el suroeste (SW). En las Áreas 3 y 4 no se identifican cursos hídricos visibles.</p> <p>En las Áreas de Sustracción 1 y 2, se observan los primeros indicios de intervención antrópica, especialmente en el extremo occidental de ambos polígonos. Estos cambios se expresan como claros en la cobertura vegetal, posiblemente asociados a aperturas de caminos, limpieza de terreno o uso del suelo con fines operativos o de infraestructura. En la Área de Sustracción 3, se mantiene el proceso erosivo puntual previamente identificado en 2005. Además, en este periodo aparece una zona de reforestación perceptible por el patrón regular y más claro de cobertura, indicativo de procesos de restauración ecológica.</p> <p>Por su parte, en la Área de Sustracción 4, se identifica un proceso de deforestación incipiente en el extremo NE del polígono, evidenciado por la pérdida parcial de cobertura vegetal y la exposición de superficies claras. No se identifican en esta área procesos erosivos ni trazas hídricas visibles.</p>

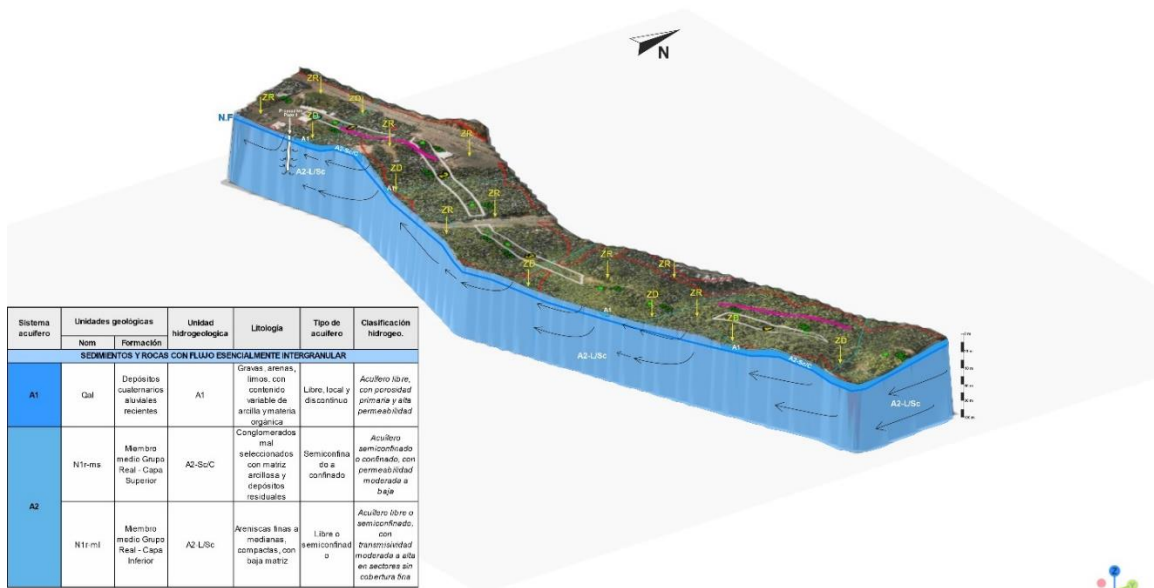
Nota: \*Se realizó el análisis de acuerdo con la inversión antrópica, reforestación, deforestación y procesos erosivos.

Las áreas de sustracción de este proyecto tenían como requerimiento realizar un modelo hidrogeológico conceptual. Específicamente, la práctica involucró la realización de las salidas graficas relacionadas al modelo, como lo fueron mapas de sistemas de acuíferos, interpretación de las capas de estos sistemas acuíferos con respecto a las resistividades del terreno, a partir de los datos adquiridos en las dos TRE realizadas en estas áreas. Como producto final del proyecto, se presentó el modelo hidrogeológico conceptual realizado en 3D (Figura 31).

Este esquema representa de manera esquemática la disposición estratigráfica de las unidades geológicas y acuíferas presentes en el área de estudio, así como su comportamiento hidrogeológico y se evidencian las direcciones generales del flujo subterráneo, con un movimiento regional controlado principalmente por la topografía, así como los mecanismos de recarga que ocurren en las zonas más altas y media del sistema y las zonas de descarga que se concentran en los sectores más bajos del valle. Este modelo constituye la base conceptual para comprender la dinámica de los acuíferos y su potencial de aprovechamiento.

**Figura 31**

*Modelo hidrogeológico conceptual y tabla de unidades hidrogeológicas.*



*Nota: \*Este modelo hidrogeológico conceptual contiene el diagrama de flujos, la interpretación de unidades geológicas y zonas hidrogeológicas como ZR: Zona de Recarga, ZD: Zona de Descarga.*

## 6. Conclusiones

En la práctica empresarial la participación en los proyectos de los parques solares Quifa y Bugambiles permitió consolidar la aplicación de metodologías geológicas, fisicoquímicas y geofísicas en la etapa geotécnica y geofísica. El análisis fisicoquímico de suelos y aguas aportó información esencial para identificar condiciones de corrosividad. Por otra parte, la adquisición de los Sondeos Eléctricos Azimutales (SEA) presentaron las anisotropías del subsuelo. Ambos resultados fortalecieron la toma de decisiones sobre las cimentaciones, sistemas de puesta a tierra y la selección de concreto a usar, contribuyendo a la viabilidad técnica y sostenibles para las infraestructuras de paneles solares.

En el estudio hidrogeológico realizado para la Planta Industrial Familia S.A se delimitaron zonas con potencial de acumulación de aguas subterráneas y se correlacionaron con las formaciones geológicas. La integración de la información secundaria geológica-hidrogeológica y la interpretación de resistividades generaron un modelo geofísico útil para orientar a futuras perforaciones y planes de abastecimiento hídrico en la planta industrial.

De igual manera, en el proyecto de la línea de red media tensión en La Lizama se colaboró en el análisis geológico, geomorfológico e hidrogeofísico posibilitando la identificación de unidades litológicas, zonas de recarga, tránsito y descarga de acuíferos, así como la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual en tres dimensiones. Este proceso no solo respondió a los requerimientos de la licencia ambiental, sino que también demostró la utilidad de unir herramientas SIG, interpretación multitemporal y métodos geofísicos para evaluar impacto y riesgos asociados a proyectos de infraestructura eléctrica.

Finalmente, la práctica empresarial en HYDROINGENIERIA S.A.S cumplió con el propósito de integrar los conocimientos teóricos en contextos distintos, mediante la elaboración de

salidas gráficas, informes técnicos y la interpretación de datos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos. La experiencia adquirida evidenció la importancia de la unión de diferentes disciplinas para el éxito de proyectos energéticos e hidrogeológicos, a la vez que fortaleció competencias técnicas, analíticas y de comunicación profesional, aportando de manera significativa al desarrollo y perfil profesional.

### Referencias

- Alvarado, S., Téllez, M., Pacheco, S., & Rojas, N. (2010a). *Cartografía geológica de la zona centro y sur del departamento del Meta planchas 286, 287, 288, 289, 290, 307, 308. Escala 1:100.000. Bogotá D.C. INGEOMINAS. 286.*
- Alvarado, S., Téllez, M., Pacheco, S., & Rojas, N. (2010b). *Geología de la Plancha 289 Río Tillavá. INGEOMINAS.*
- Alvarado, S., Téllez, M., Pacheco, S., & Rojas, N. (2010c). *Geología de la Plancha 290 Saravia. INGEOMINAS.*
- ASTM International. (1999). *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation.*
- Ávila Mendoza, J., & Genescá Llongueras, J. (2003). *Más allá de la herrumbre, II : la lucha contra la corrosión* (S. A. D. C. V. FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, Ed.).
- Baird, A. J., & Low, R. G. (2022). The water table: Its conceptual basis, its measurement and its usefulness as a hydrological variable. *Hydrological Processes*, 36(6).  
<https://doi.org/10.1002/hyp.14622>
- Barrera Olmos, R. (2001). *Plancha 16 y 17 Galerazamba y Barranquilla - Memoria explicativa. INGEOMINAS.*
- Barrera, R. (1998). *Plancha 016-017 Galerazamba-Barranquilla. INGEOMINAS.*
- Buitrago, J., Terraza, R., & Etayo, F. (2008). *Geología de la plancha 228 Santafé de Bogotá Noreste. INGEOMINAS.*
- CAR. (2008). *Plan De Manejo Ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y Zona Crítica* (Oficina de Comunicaciones CAR & R. Martínez, Eds.). CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Bogotá D.C.

- Corredor, V., Terraza, R., & Etayo, F. (2015). *Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste - Memoria explicativa. Servicio Geológico Colombiano.*
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113–123.
- Fonseca, H., Fuquen, J., Mesa, L., Talero, C., Pérez, O., Porras, J., Gavidia, O., Pacheco, S., Amaya, E., García, Y., & Farfán, E. (2012a). *Cartografía geológica de la plancha 108, Puerto Wilches - Memoria explicativa. Servicio Geológico Colombiano.*
- Fonseca, H., Fuquen, J., Mesa, L., Talero, C., Pérez, O., Porras, J., Gavidia, O., Pacheco, S., Amaya, E., García, Y., & Farfán, E. (2012b). *Geología de la plancha 108, Puerto Wilches. Servicio Geológico Colombiano.*
- Gómez, A., Patiño, A., Renzoni, G., Beltrán, A., Quintero, C., & Manrique, M. (2008). *Plancha 119-Barrancabermeja - Memoria explicativa. Cartografía y muestreo geoquímico, escala 1:100.000. INGEOMINAS.*
- González, G. (2022). *Caracterización Geoeléctrica Orientada a la Prospección de Acuíferos en la Hacienda Salgado, Municipio de Sopó, Cundinamarca. Tesis de Grado.* Universidad de Los Andes. Bogotá D.C.
- Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211–226.
- GRP Ltda e INGEOMINAS. (2008). *Geología de la Plancha 119 Barrancabermeja. INGEOMINAS.*
- Hernández Lucendo, M. del C. (1984). *Interpretación automática de sondeos eléctricos verticales. Tesis Doctoral.* Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

- Holzer, T. L., & Bennett, M. J. (2003). Unsaturation beneath a water table. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(4), 379–385.
- ICONTEC. (2021). *Calidad del suelo. Determinación del carbono orgánico. NTC 5403*.  
<https://ebooks.icontec.org/pdfreader/calidad-del-suelo-determinacin-carbono-orgnico>
- ICONTEC. (2022a). *Calidad del suelo. NTC 5596*. <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-calidad-de-suelo-determinacion-de-la-conductividad-electrica-ntc5596-2022.html>
- ICONTEC. (2022b). *Calidad del suelo. Pretratamiento de muestras para análisis físicoquímicos. NTC-ISO 11464*. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/49158ac9-925b-4c0a-93c7-bf24e056b96a/content>
- IEEE SA Standards Association. (2012). IEEE 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. En *IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)* (pp. 1–86).  
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- IGAC. (2024). *Determinación de Bicarbonatos y Carbonatos en Suelos*.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional Del Agua 2010*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Lakubovskii, Iu. V., & Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica* (3a ed.). Reverté. Barcelona, España.
- López Hidalgo, A. A., Heng Loke, M., Fanton, G. O., & Cara Rubí, E. (2004). *Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D y 3D)*. *Tesis de Grado: Vol. 600(5400)*. Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina.
- MADS. (2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10*.

Montoya, D., & Reyes, G. (2003a). *Geología de la plancha 209 Zipaquirá - Memoria explicativa. INGEOMINAS.*

Montoya, D., & Reyes, G. (2003b). *Geología de la plancha 209 Zipaquirá. INGEOMINAS.*

Orellana, E. (1972). *Prospección geoeléctrica en corriente continua.* PARANINFO. Madrid, España.

Palacky, G. (1987). Resistivity Characteristics of Geological Targets. En M. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory* (pp. 53–129). Society of Exploration Geophysicists Tulsa. Tulsa, EUA.

Reyes, G., & Zapata, G. (1998). *Plancha 24 Sabanalarga. INGEOMINAS.*

The United Nations. (2017). *Manual on the Basic Set of Environment Statistics of the FDES 2013. Water Resources Statistics. Sub-component 2.6 Water Resources of the Basic Set of Environment Statistics of the FDES 2013. Methodology sheet of the Basic Set of Environment Statistics of the FDES.*

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1973). *Cuadrángulo H-12 Bucaramanga. Planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga. Cuadrángulo H-13 Pamplona. Planchas 110 Pamplona - 121 Cerrito - Memoria explicativa. INGEOMINAS.*

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1977). *Geología de la Plancha 109, Rionegro. INGEOMINAS.*

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Restrepo, H., & Gómez, E. (1977). *Geología de la Plancha 120 Bucaramanga. INGEOMINAS.*

Water Environment Federation. (2017). *4500-H+ pH. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.* <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.082>

Water Environment Federation. (2022). *5310 Total Organic Carbon. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.*

<https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/smww.2882.104>

Water Environment Federation. (2023a). *PHYSICAL AND AGGREGATE PROPERTIES OF WATER AND WASTEWATER 2510 Conductivity. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.* <https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.027>

Water Environment Federation. (2023b). *4500 -Cl- Chloride. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.*

<https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.079>

Water Environment Federation. (2023c). *4500-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> Sulfate. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater.*

<https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.098>

Zapata García, G., & Reyes Torres, G. A. (2001). *Plancha 24 Sabanalarga - Memoria explicativa. INGEOMINAS.*