

**DEFINICIÓN DEL IMPACTO EN EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO
DE UN CULTIVO DE PINOS EN EL MUNICIPIO DE ZAPATOCA,
SANTANDER, A PARTIR DE MEDICIONES GEOFÍSICAS**

Geól. Beatriz Katherin Herrera Hernández

Trabajo de grado para optar al Título de Magíster en Geofísica

Directora

Dr. Rocío Bernal Olaya

Co-directores

Dr. Juan Diego Colegial Gutiérrez

Dr. Jheyston Serrano

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ciencias

Escuela De Física

Maestría En Geofísica

Bucaramanga

2025

RESUMEN

La investigación evalúa el impacto de las plantaciones de pino sobre el contenido de agua en el suelo en Zapatoca, Santander, utilizando métodos geofísicos como Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Radar de Penetración Terrestre (GPR). Este estudio busca comprender cómo los cultivos de especies forestales no nativas pueden modificar la dinámica hídrica del suelo, un factor clave para la sostenibilidad ambiental y la productividad agrícola de la región.

Se analizaron cuatro parcelas experimentales: tres con especies de pino (Maximinoi, Oocarpa y Pátula) y otra con bosque nativo. La metodología incluyó la caracterización físico-química del suelo, mediciones geofísicas repetidas en el tiempo, el cálculo del contenido de agua en el suelo a partir de las mediciones geofísicas, y análisis complementarios de contenido de agua en laboratorio. Se identificaron diferencias significativas en la textura, Carbono Orgánico Total (COT) y composición química del suelo entre parcelas, destacando un mayor contenido de arcilla en los bosques nativos frente a los suelos bajo pinos, lo que influye en la resistividad y su capacidad de retención de agua.

Los resultados geofísicos evidenciaron que las plantaciones de pino reducen la infiltración de agua debido a barreras físicas superficiales, como las acículas. Este efecto se tradujo en un menor contenido de agua en profundidad en el suelo bajo pinos, con dinámicas de humedad más limitadas espacial y temporalmente. El estudio resalta la eficacia de los métodos geofísicos para caracterizar la variabilidad hídrica en diferentes tipos de vegetación y sugiere enfoques multidisciplinarios para gestionar los impactos ambientales en ecosistemas intervenidos.

Palabras clave: Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), contenido de agua en el suelo, plantaciones de pino, bosque nativo, cambio de uso del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema dinámico y complejo, compuesto por materiales minerales y orgánicos, agua y gases, que interactúan entre sí para regular procesos vitales como el ciclo de nutrientes y el crecimiento de las plantas. Su evolución y características están fuertemente determinadas por factores como el clima, la litología y la vegetación (Osman, 2013). En términos climáticos, la temperatura y la precipitación influyen directamente en procesos de formación, meteorización y transporte de materiales en el perfil del suelo, afectando su textura, estructura y contenido de agua (Brady & Weil, 2016). La litología, por su parte, condiciona el tipo de material parental del que se origina el suelo, determinando su textura inicial, capacidad de retención de agua y contenido de nutrientes (Jenny, 1941). Finalmente, la vegetación actúa como un modulador del microclima del suelo, del aporte de materia orgánica y de la dinámica del agua. En este sentido, la introducción de especies exóticas, como los pinos puede alterar significativamente las propiedades del suelo. Diversos estudios han documentado que este tipo de plantaciones tiende a reducir el contenido de agua en el suelo, producto de una mayor demanda hídrica por evapotranspiración y una menor infiltración, afectando así su balance hídrico (Huber & Trecaman, 2000; Ansaloni & Chacón, 2003; Huber et al., 2008; Fioroni et al., 2020; Ordoñez, 2022). Sin embargo, la mayoría de estas conclusiones se basan en mediciones directas e invasivas, usualmente limitadas a puntos aislados cuya representatividad espacial es limitada.

En años recientes, los métodos geofísicos han emergido como una solución al desconocimiento de la representatividad de las mediciones directas, ya que han permitido hacer mediciones indirectas, de manera no invasiva, en transectos, que permiten definir la continuidad de las propiedades físicas del suelo, hacer las mediciones en varios puntos y por tanto definir la importancia del punto de medición directo elegido en los casos en

los que se ha correlacionado los resultados (Allred y Ehsani, 2008; Romero Ruiz et al., 2018; Vanella et al., 2023).

Entre las técnicas geofísicas más utilizadas para medir los cambios temporales del contenido de agua en el suelo se encuentran la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y el Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés) (Michot, 2003; Huisman et al., 2003; Schwartz et al., 2008; Besson et al., 2009; Dafonte et al., 2013; Brillante et al., 2015; Vanella et al., 2022). La TRE, es utilizada para determinar la resistividad del subsuelo mediante mediciones de potencial con corrientes constantes, aplicando la Ley de Ohm. La resistividad resultante está inversamente relacionada con el contenido de agua del suelo. Al medir la resistividad en varios puntos a lo largo de un transecto, se pueden obtener imágenes 2D de la distribución del agua en el suelo, permitiendo un análisis más preciso y representativo que las técnicas tradicionales (Michot, 2003, Schwartz et al., 2008; Vanella et al., 2022).

Por otro lado, el GPR utiliza pulsos electromagnéticos para medir la reflectividad de las ondas en las distintas capas del subsuelo. La reflectividad está relacionada con las diferencias en la permitividad dieléctrica del suelo, propiedad física en la que el agua tiene el mayor valor, en comparación con otros constituyentes del suelo. Esta técnica es particularmente útil para identificar las fronteras entre capas de suelo con diferentes niveles de saturación de agua, lo que facilita un análisis más detallado de la dinámica hídrica en el subsuelo (Van Overmeeren et al., 1997; Turesson, 2006).

En la región de Zapatoca, Santander (Colombia), los cultivos de pinos han reemplazado en gran medida los bosques nativos, lo que ha generado preocupaciones sobre su impacto en la disponibilidad de agua del suelo. Aunque algunos estudios han señalado que las plantaciones de pinos podrían no modificar significativamente el contenido de agua en el suelo (Giraldo López, 1993), otros sugieren que el impacto podría ser más complejo,

variando según las características del ecosistema local (León Gamboa et al., 2010; Fioroni et al., 2020). En este sentido, el uso de métodos geofísicos para evaluar de manera indirecta el contenido de agua del suelo ofrece una nueva perspectiva sobre el impacto de las plantaciones de pino en el equilibrio hídrico del suelo.

Este estudio representa el primer análisis de este tipo en Colombia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar el impacto en el contenido de agua del suelo que generan un cultivo de pinos en Zapatoca a partir de métodos geofísicos.

2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un plan de mediciones e inversión geofísica, basado en las características del suelo de la zona de estudio, que permita hacer seguimiento a propiedades físicas que se relacionen con el contenido de agua en el suelo.
- Calibrar las mediciones geofísicas con las mediciones directas significativas al respecto de la distribución, textura, profundidad de ocurrencia de los horizontes del suelo y contenido de agua en muestras de suelo.
- Evaluar el impacto en el contenido de agua del suelo generado por el cultivo de pinos en comparación con el bosque nativo.

3. SITIO DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el nororiente de Colombia, sobre la cordillera Oriental (Figura 1A), específicamente en la vereda Las Flores, cerca del casco urbano del municipio de Zapatoca, Santander. La región se encuentra a una altitud promedio de 1900

metros sobre el nivel del mar, con una topografía que varía de inclinada a moderadamente inclinada, presentando pendientes entre 7 al 25 %.

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 1973), en esta zona afloran dos formaciones geológicas principales: la Formación Paja, compuesta predominantemente por lutitas negras calcáreas con intercalaciones de calizas, y la Formación Rosablanca, compuesta de calizas y margas, con intercalaciones de areniscas calcáreas (Figura 1B).

Los suelos de la zona de estudio presentan por lo tanto una marcada heterogeneidad, con texturas que varían entre francas, limosas y arcillosas, según los análisis realizados en este estudio.

El sitio de estudio corresponde a una finca dedicada principalmente al cultivo de Pinos, con una extensión de más de 10 hectáreas destinadas a este fin. Además de las plantaciones de pino, la finca cuenta con extensas áreas de bosque nativo, algunas zonas con eucaliptos, y pequeñas plantaciones de café y uva. Las plantaciones de pino incluyen tres especies principales: Pino Maximinoi, Pino Oocarpa y Pino Pátula, cuyas edades oscilan entre los 12 y 25 años, siendo el Maximinoi la especie más joven y el Pátula la más antigua. Por otro lado, los bosques nativos albergan una variada vegetación que incluye especies como el Arrayán, Cucharó, Pomarroso, Berraco, entre otras, cuyas edades superan los 30 años.

La investigación se desarrolla en cuatro parcelas experimentales, cada una representativa de un tipo de vegetación diferente. Tres de estas parcelas están ocupadas por las especies de pino mencionadas, mientras que la cuarta corresponde a un área de bosque nativo (Figura 1C).

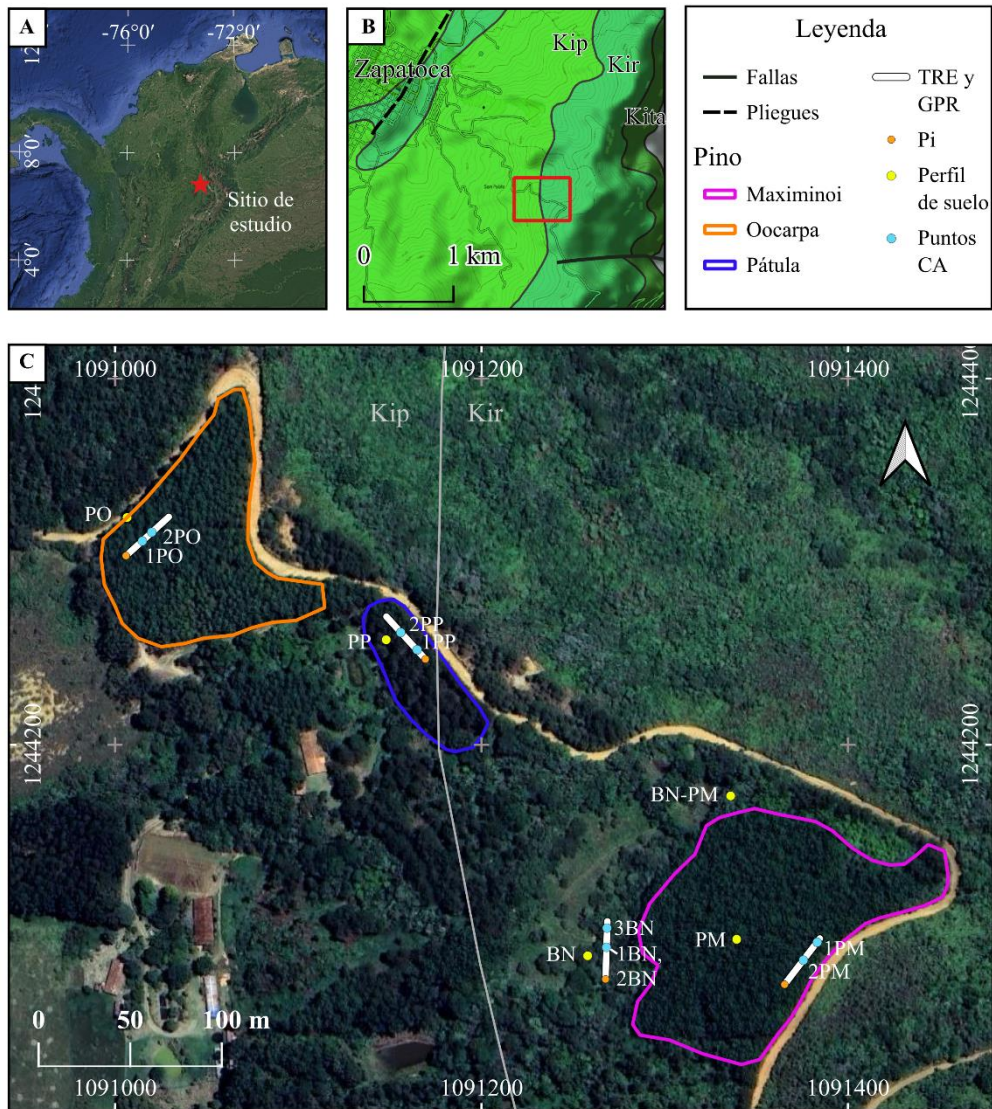


Figura 1. Localización del sitio de estudio. **A)** Ubicación del área de estudio en el mapa de Colombia. **B)** Geología regional, mostrando las formaciones Paja (Kip), Rosablanca (Kir) y Tambor (Kita). Mapa tomado del Servicio Geológico Colombiano – SGC (1973). **C)** Ubicación de las parcelas con especies de pino y bosque nativo, transectas de GPR y TRE, sitios de descripción del perfil del suelo (Perfil del suelo: BN, BN-PM, PM, PP y PO) y puntos de muestreo para contenido de agua (Puntos CA: 1BN, 2BN, 3BN, 1PM, 2PM, 1PP, 2PP, 1PO y 2PO). BN: Bosque Nativo; PM: Pino Maximinoi; PO: Pino Oocarpa; y PP: Pino Pátula.

3.1 Clima

El municipio de Zapatocha se caracteriza por un clima tropical de sabana, conocido popularmente como "clima de seda", con una temperatura promedio anual de 21 °C.

Según datos históricos del IDEAM, Zapatocha registra un promedio anual de precipitación de aproximadamente 1.200 mm. Octubre es el mes más lluvioso, con 173 mm, seguido de mayo con cerca de 150 mm. En contraste, diciembre y enero son los meses más secos,

con precipitaciones inferiores a 30 mm. Sin embargo, este patrón climático ha presentado variaciones significativas en el último año debido a fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña. El Fenómeno de El Niño en el país comenzó a mediados de 2023 y alcanzó su máxima intensidad entre diciembre de 2023 y febrero de 2024, causando un déficit de lluvias en varias regiones, incluida la región Andina (Comisión Colombiana del Océano, 2024). Posteriormente, El Niño comenzó a debilitarse hacia el segundo trimestre, dando paso a condiciones neutrales entre abril y junio. Para el segundo semestre del año, se desarrollaron las condiciones de La Niña, que se manifestó plenamente entre agosto y noviembre, generando un aumento significativo en las precipitaciones en gran parte del territorio nacional, incluyendo Zapatoca, como se muestra en la Figura 2.

Las campañas de adquisición de datos en este estudio se llevaron a cabo del 30 de abril al 1 de mayo de 2024, y del 21 al 22 de agosto de 2024.

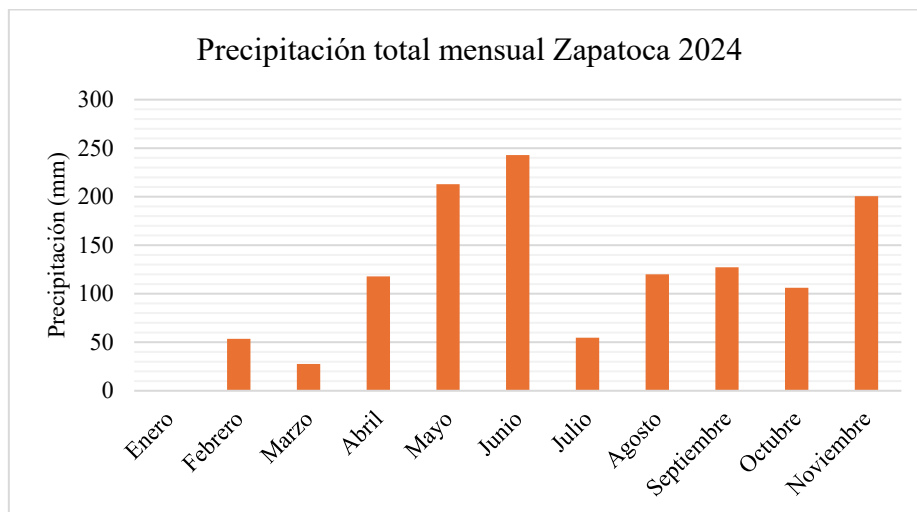


Figura 2. Precipitación total mensual en Zapatoca 2024. Estación Hidrometeorológica Zapatoca [24055030]. Fuente: IDEAM.

4. METODOS

Para cumplir con los objetivos propuestos, se empleó la siguiente metodología: (1) se realizó la caracterización física y química del suelo en cada parcela de estudio; (2) se adquirieron datos geofísicos 2D de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y

Georradar (GPR), repetidos en el tiempo en cada parcela; (3) se recolectaron muestras de suelo directamente en las transectas donde se llevaron a cabo las mediciones geofísicas para realizar análisis de contenido de agua en laboratorio. (4) Se cuantificó el contenido de agua en el suelo a partir de los resultados de las mediciones geofísicas, aplicando la ley de Archie (Archie, 1942) y la ley generalizada de Archie (Shah & Singh, 2005) para las tomografías, y la metodología de Topp et al. (1980) para las mediciones de GPR.

4.1 Caracterización del suelo

La caracterización suelo se llevó a cabo mediante la descripción en campo del perfil de suelo en cada parcela de estudio. En cada uno de estos perfiles se tomaron muestras a diferentes profundidades, el muestreo fue guiado por los cambios de color del suelo en profundidad, lo que indicaba un cambio en sus propiedades. Estas muestras fueron luego sometidas a análisis físicos y químicos en laboratorio.

4.2 Análisis de suelo

Los análisis de laboratorio incluyeron textura, densidad, Carbono Orgánico Total (COT), carbonatos, PH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), y concentraciones de Ca, Na, Mg, y K en todas las parcelas con plantaciones de pino. En la parcela de bosque nativo, debido a limitaciones logísticas y presupuestarias, sólo se analizaron textura, densidad y COT.

Para el análisis de la textura del suelo se utilizó el método de Bouyoucos adaptado, que consiste en determinar la proporción de arena, limo y arcilla a través de un análisis de sedimentación. La densidad se midió por el método gravimétrico, que determina la masa del suelo por unidad de volumen. El Carbono Orgánico Total (COT) se cuantificó mediante el método espectrofotométrico UV-Vis Walkley & Black, que se basa en la

oxidación del carbono orgánico en el suelo y la medición de la absorbancia de la solución resultante. Los carbonatos se analizaron por titrimetría, un procedimiento en el que se neutraliza el carbonato con un ácido y se mide la cantidad utilizada. El pH se determinó mediante el método potenciométrico, conforme a la norma NTC 5264:2023, que mide la tensión de una solución acuosa de suelo utilizando un electrodo. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se evaluó mediante un proceso de extracción con acetato de amonio, que permite medir la capacidad del suelo para intercambiar cationes. Finalmente, las concentraciones de calcio (Ca), sodio (Na), magnesio (Mg) y potasio (K) se analizaron por espectroscopia de absorción atómica (EPA 3050 B, EPA 7000B), una técnica que mide la absorción de luz por los átomos de estos elementos.

Todos estos análisis fueron realizados en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander.

4.3 Contenido de agua (medición directa)

La evaluación del contenido de agua en el suelo mediante métodos directos se realizó en la campaña de adquisición del 21 al 22 agosto. Para ello se recolectaron entre 1 y 2 libras de muestra de suelo en bolsas herméticas, a distintas profundidades, a lo largo de las transectas de medición geofísica en cada parcela. Estas muestras fueron analizadas para determinar el contenido de agua gravimétrico (θ_m), además de la textura y densidad del suelo.

El método gravimétrico consiste en secar una muestra de suelo en un horno a 105 °C durante 24 horas para determinar el contenido de humedad del suelo. El contenido de agua se calcula como el peso inicial del suelo en campo menos el peso seco después del horneado.

Los valores de θ_m fueron convertidos a contenido de agua volumétrico (θ) usando la relación expuesta en Osman (2013):

$$\theta = \theta_m \frac{d_b}{d_w}$$

Donde d_w es la densidad del agua (1000 kg m⁻³ a 20°C) y d_b es la densidad del suelo.

Los datos obtenidos fueron esenciales para calibrar la cuantificación del contenido de agua del suelo que se realizó mediante métodos geofísicos.

4.4 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Para la adquisición de datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) se utilizó el equipo FlashRES-UNIVERSAL64/96, desarrollado por ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd. Las mediciones se realizaron en perfiles bidimensionales (2D) en tres fechas distintas: el 30 de abril, el 1 de mayo y el 21 de agosto. En la parcela de Pino maximinoi, la última adquisición tuvo lugar el 22 de agosto de 2024, tras un evento de lluvia significativo la noche anterior. Todas las mediciones se realizaron en las mismas ubicaciones dentro de cada parcela para asegurar la comparabilidad de los resultados.

Se adoptó una estrategia de medición multitemporal debido a que las variaciones estacionales en la resistividad eléctrica se atribuyen principalmente a los cambios en el contenido de agua del suelo. Durante este intervalo, otras propiedades del suelo que afectan la resistividad, como el contenido de arcillas, se mantienen constantes, permitiendo así vincular directamente las fluctuaciones observadas a las variaciones en la humedad (Auerswald et al., 2001; Michot, 2003; Grandjean et al., 2009). Aunque la temperatura puede influir en la resistividad en un 2% por cada grado centígrado, en este estudio no se realizaron correcciones por este factor.

Se utilizó un arreglo Wenner-Schlumberger, para garantizar una adecuada sensibilidad tanto lateral como vertical en el suelo. Este arreglo empleó 64 electrodos alineados sobre la superficie del suelo, con una separación de 0,5 m entre ellos. La inversión de los datos se llevó a cabo en el software Res2Dinv [Loke, 2010] que permite controlar varios parámetros de inversión. En este caso, dentro de los parámetros más importantes que se modificaron se encuentra: un tamaño estándar de bloques de celda, el método de optimización Gauss-Newton, dos nodos entre electrodos adyacentes, y un factor de amortiguamiento inicial de 0.2, con un mínimo de 0.0200. Adicionalmente, se aplicó la norma L para calcular el factor de regularización. Se emplearon los mismos parámetros de inversión para todas las parcelas. Las inversiones se detuvieron tras siete iteraciones o cuando el error RMS fue menor o igual al 2%, aunque en la mayoría de los casos se alcanzó la convergencia en cinco iteraciones.

4.5 Contenido de agua con TRE

El contenido de agua en el suelo a partir de mediciones de resistividad eléctrica se estimó mediante dos enfoques: la ley de Archie y la ley generalizada de Archie (Shah & Singh, 2005).

Para suelos con baja cantidad de arcillas (arenosos, francos y limosos, como en las parcelas de Pino maximinoi y Pino oocarpa), se utilizó la ley de Archie (1942), que asume que la matriz sólida no influye en la conductividad eléctrica:

$$S_w = \left(\frac{\rho_w}{\rho \varphi^m} \right)^{\frac{1}{n}}$$

En esta ecuación, ρ es la resistividad global del suelo; ρ_w es la resistividad de la solución del suelo; φ es la porosidad; S_w es la saturación de agua; m es una constante que varía de 1.3 a 2.5 (en este estudio se asignó un valor de 2.49, siendo el trabajo de Rinaldi &

Cuestas, 2002); y n es una constante con un valor generalmente cercano a 2 (Lowrie, 2007).

El contenido volumétrico de agua (θ) se calculó como:

$$\theta = \varphi \cdot S_w$$

La resistividad de la solución del suelo, p_w , fue determinada en laboratorio a partir de una muestra de agua lluvia tomada en la zona de estudio. El valor obtenido fue de 111.36 Ohm.m. El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander, con el método Conductivimétrico, SM 2510 B.

La porosidad se estimó usando valores de densidad del suelo según Osman (2013) (Tabla 1).

Tabla 1. Relación de la densidad aparente con la porosidad del suelo. Tomado de Osman (2013)

Densidad aparente, Mg/m^3	Porosidad total estimada, %
1.20	55
1.30	51
1.40	47
1.50	43
1.60	39
1.70	35

Para suelos con alto contenido de arcilla, donde la resistividad de la matriz sólida no es despreciable (como en las parcelas de Pino pátula y el bosque nativo), se aplicó la Ley Generalizada de Archie (Shah y Singh, 2005):

$$\frac{1}{\rho} = c \cdot \frac{1}{\rho_w} \cdot \theta^m$$

Donde c y m dependen del porcentaje de arcilla:

$$c = i \cdot \text{Arcilla}^j$$
$$m = k \cdot \text{Arcilla}^l$$

con, $i = 0.6$, $j = 0.55$, $k = 0.92$ y $l = 0.2$. La arcilla se expresa como el porcentaje en volumen de una muestra, si es $>5\%$. Para contenidos de arcilla inferiores al 5%, $c = 1.45$ y $m = 1.25$.

4.6 Radar de Penetración terrestre (GPR)

En cada parcela de estudio se adquirieron dos perfiles GPR de aproximadamente 30 m de longitud en dos fechas distintas: el 30 de abril y el 21 de agosto (22 de agosto para la parcela de Pino maximinoi). Las adquisiciones se realizaron sobre las mismas transectas empleadas para los perfiles de TRE.

El equipo utilizado fue el GSSI TerraSIRch SIR® System-3000, equipado con una antena de 400 MHz que opera con una separación fija entre transmisor y receptor. Durante las dos campañas, se utilizó el modo Geology que viene pre-establecido en el equipo. Sin embargo algunos parámetros se modificaron entre las dos fechas.

- Parámetros 1: En la campaña del 30 de abril, los datos se recolectaron en función de la distancia, utilizando 1024 muestras por escaneo, una constante dieléctrica de 32 (recomendada por el fabricante para condiciones húmedas y suelos arcillosos), y una densidad de 10 escaneos por metro.
- Parámetros 2: En las mediciones del 21 y 22 de agosto, se emplearon tanto los Parámetros 1 como una configuración ajustada, denominada *Parámetros 2*. Esta última incluyó una constante dieléctrica de 16 (adecuada para suelos agrícolas, arenas limosas y húmedas) y una mayor densidad de adquisición, con 50 escaneos por metro. Los mejores resultados se obtuvieron con esta configuración optimizada.

El procesamiento de los datos de GPR se realizó en el software Reflexw, la rutina de procesamiento incluyó ajustes de tiempo-cero y la aplicación de un filtro *dewow* para eliminar efectos de inducción de baja frecuencia. Además, se aplicaron filtros de *background removal*, pasa banda (*lower cutoff* 100, *lower plateau* 300, *upper plateau* 500 y *upper cutoff* 800) y ganancia (*energy decay* de entre 0,1 y 0,3). La misma rutina de procesamiento fue aplicada a todos los perfiles.

4.7 Contenido de agua con GPR

El cálculo del contenido volumétrico de agua (θ) a partir de los datos de GPR se realizó utilizando la relación empírica de Topp et al. (1980), la cual establece un vínculo entre la constante dieléctrica (ϵ_r) y el contenido de agua mediante la ecuación:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3$$

ϵ_r está relacionada con la velocidad Electromagnética (v) a partir de la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{c}{v}$$

Donde c es la velocidad de la luz (0,3 m/ns).

Para calcular ϵ_r se determinó la velocidad en los perfiles GPR utilizando el software Reflexw. Este procedimiento se llevó a cabo mediante el ajuste manual de hipérbolas en los perfiles. Las velocidades obtenidas se agruparon en capas considerando también el carácter de los reflectores, permitiendo la conversión de los perfiles de tiempo a profundidad y la generación de un perfil de velocidades. A partir de las velocidades calculadas, se determinó la permitividad del suelo (ϵ_r), y posteriormente, el contenido de agua.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterización del suelo

La comparación de los perfiles del suelo en el sitio de estudio muestra una notable heterogeneidad entre parcelas, evidenciando que cada localidad presenta un perfil de suelo distinto (Figura 3). En la superficie de las parcelas con plantaciones de pino, se identificaron capas de acículas de diferentes espesores, las cuales fueron retiradas para realizar las mediciones geofísicas. Además, se observaron raíces gruesas sobresalientes, aunque estas no se reflejan en los perfiles estudiados.

Bosque Nativo

En el Bosque Nativo (Figura 3A) se describió un perfil de suelo de 70 cm de profundidad. La capa superficial, de aproximadamente 25 cm de espesor, presenta un color marrón oscuro y contiene raíces de hasta 1 cm de diámetro. Por debajo de esta se encuentra una capa arcillosa de tonos ocres.

En la zona de transición entre el Bosque Nativo y el Pino Maximinoi (Figura 3B), se describió un perfil de suelo de 110 cm de profundidad. La capa superior, de alrededor de 70 cm de espesor, es de color marrón y tiene una textura arenoso-limosa al tacto. Subyacente a esta capa se encuentra otra de color negro con una textura similar.

Pino Maximinoi

En la parcela de Pino Maximinoi (Figura 3C), también se describió un perfil del suelo de 110 cm. La capa superior, de 40 cm de espesor, presenta un color entre marrón oscuro y negro con raíces de hasta 3 cm de diámetro. Debajo de esta se encuentra una capa de transición de unos 30 cm de espesor que contiene material de la capa superior y zonas arcillosas con tonalidades ocres. Finalmente, por debajo de esta capa de transición se encuentra una capa de color ocre homogéneo. La capa de acículas en esta parcela tiene un espesor aproximado de 25 cm.

Pino Oocarpa

En la parcela de Pino Oocarpa (Figura 3D), se describió un perfil del suelo con un espesor total de 110 cm. La capa superior, de 55 cm de espesor, es de color marrón claro y contiene raíces de hasta 1.5 cm de diámetro. Subyacente a esta capa se encuentra una capa maciza y arcillosa, de un color ligeramente más claro que la capa superficial. En este caso, la capa de acículas alcanza un espesor de aproximadamente 15 cm.

Pino Pátula

Finalmente, en la parcela de Pino Pátula (Figura 3E), el perfil del suelo descrito también alcanza los 110 cm de profundidad. Este perfil está compuesto por una capa maciza y arcillosa de color marrón rojizo que se extiende uniformemente a lo largo de todo el perfil. En este bosque, la capa de acículas en la superficie tiene un espesor de hasta 10 cm.

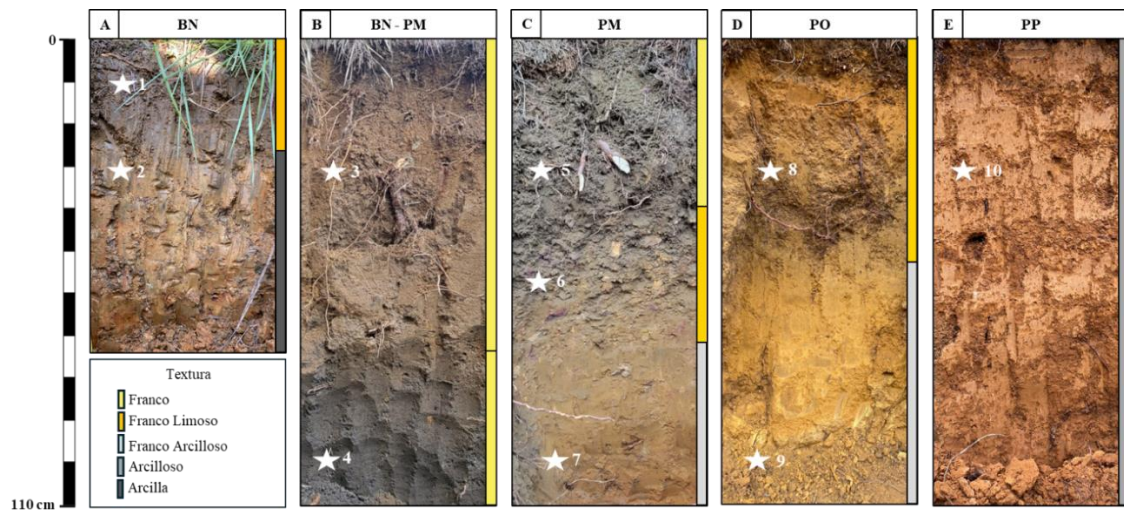


Figura 3. Perfiles del suelo en las parcelas de estudio. **A)** Bosque Nativo (BN). **B)** Bosque Nativo-Pino Maximinoi (BN-PM). **C)** Pino Maximinoi (PM). **D)** Pino Oocarpa (PO). **E)** Pino Pátula (PP). Las estrellas representan las ubicaciones donde se recolectaron muestras de suelo para análisis físicos y químicos, las muestras se encuentran numeradas de 1 a 10. Para referencia de la ubicación de los perfiles ver Figura 1.

5.2 Análisis de suelo

Bosque Nativo

En el perfil del suelo del Bosque Nativo (BN), se recolectaron dos muestras: una a 10 cm de profundidad (muestra 1) y otra a 30 cm (muestra 2) (Figura 3A). Los análisis indican una transición textural de franco limosa hasta los 25 cm a una textura arcillosa a mayor profundidad. La densidad aparente mostró un incremento, pasando de 1,11 g/cm³ en la muestra superior a 1,19 g/cm³ en la muestra más profunda. El contenido de carbono orgánico total (COT) disminuyó significativamente, desde 7,35 % a 2,38 % entre ambas profundidades, como se detalla en la Tabla 2.

En el perfil BN-PM se recolectaron dos muestras, una a 30 cm (muestra 3) y otra a 100 cm (muestra 4) de profundidad (Figura 3B). No se observó variación textural significativa, siendo franca en ambas profundidades. La densidad aparente fue similar, con valores de 0,96 g/cm³ en la muestra 3 y 0,99 g/cm³ en la muestra 4. El COT aumentó de 5,08 % en la muestra 3 a 6,77 % en la muestra 4, coincidiendo con una capa más oscura.

No se evidenció presencia de carbonatos, y el pH se mantuvo estable alrededor de 4,2.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) incrementó con la profundidad, de 14,49 a 20,09 meq/100g. La concentración de calcio (Ca) también mostró un ligero aumento, de 850,15 a 858,37 mgCa/kg. El sodio (Na) se mantuvo constante, alrededor de 84 mgNa/kg, mientras que el magnesio (Mg) aumentó con la profundidad, de 85,26 a 96,26 mgMg/kg. En contraste, el potasio (K) presentó una disminución notable, pasando de 34,75 mgK/kg en la muestra 3 a 17,89 mgK/kg en la muestra 4, como se detalla en la Tabla 2.

Pino Maximinoi

En el perfil del Pino Maximinoi (PM), se recolectaron tres muestras a diferentes profundidades: 30 cm (muestra 5), 70 cm (muestra 6) y 100 cm (muestra 7) (Figura 3C). La textura varió de franca en la capa más superficial, a franco limosa en la capa intermedia

y franco arcillosa en profundidad. La densidad aparente se mantuvo constante en todas las muestras, con un valor aproximado de 1,1 g/cm³.

El COT disminuyó con la profundidad, pasando de 7,36 % en la muestra 5 a 1,64 % en la muestra 7. No se detectaron carbonatos, mientras que el pH presentó ligeras variaciones entre las muestras, con valores de 4,29 en la muestra 5, 4,76 en la muestra 6 y 4,33 en la muestra 7.

La CIC disminuyó en profundidad, con valores de 15,55 meq/100g en la muestra 5, 7,49 meq/100g en la muestra 6, y 7,47 meq/100g en la muestra 7. La concentración de calcio fue la más alta a 30 cm de profundidad (1157,31 mgCa/kg), disminuyendo a 744,94 mgCa/kg en la capa intermedia y aumentando ligeramente a 876,81 mgCa/kg en la profundidad.

En cuanto a la concentración de sodio, la muestra superficial presentó el valor más alto entre todas las parcelas, con 101,94 mgNa/kg. La concentración de magnesio varió de 88,95 mgMg/kg en la muestra 5 a 82,99 mgMg/kg en la muestra 6, aumentando a 100,86 mgMg/kg en la muestra 7. Por último, el potasio fue más abundante en la superficie (32,34 mgK/kg en la muestra 5), disminuyendo significativamente en las capas más profundas (11,67 mgK/kg en la muestra 6 y 13,10 mgK/kg en la muestra 7), como se observa en la tabla 2.

Pino Oocarpa

En el perfil del Pino Oocarpa (PO), se tomaron dos muestras: una a 30 cm (muestra 8) y otra a 100 cm (muestra 9) de profundidad (Figura 3D). La textura cambió de franco limosa en la capa superficial a franco arcillosa en profundidad. La densidad aparente aumentó de 1,07 g/cm³ en la muestra 8 a 1,17 g/cm³ en la muestra 9. El COT disminuyó de 4,34 % a 1,41 % en las dos profundidades. No se identificaron carbonatos en ninguna de las muestras, mientras que el pH mostró una variación entre 4,20 y 4,81.

Los valores de CIC fueron de 14,26 meq/100g en la muestra 8 a 8,42 meq/100g en la muestra 9. El Ca aumentó de 821,84 a 865,92 meq/100g en profundidad. La concentración de Na también incrementó levemente, de 78,75 mgNa/kg en la superficie a 80,31 mgNa/kg en profundidad. En contraste, el magnesio disminuyó de 107,65 mgMg/kg a 95,27 mgMg/kg, y el potasio mostró una disminución, de 33,69 mgK/kg a 16,92 mgK/kg (tabla 2).

Pino Pátula

En el perfil del Pino Pátula (PP), se recolectó una única muestra a 30 cm de profundidad (muestra 10). La textura fue arcillosa, con una densidad aparente de 1,18 g/cm³. El COT fue el más bajo registrado a esa profundidad en todos los perfiles, con un valor de 1,23%. No se detectaron carbonatos, y el pH fue de 4,54. La CIC alcanzó un valor aproximado de 7 meq/100 g siendo también el valor más bajo registrado en las parcelas, mientras que las concentraciones de Ca, Na, Mg y K fueron 1116,29 (mg Ca/kg), 88,41 (mg Na/kg), 93,89 (mg Mg/kg) y 120,17 (mg K/kg), respectivamente, como se detalla en la Tabla 2.

En general, los resultados reflejan diferencias significativas entre las propiedades del suelo de las distintas parcelas. A 30 cm de profundidad, el Bosque Nativo presentó la mayor proporción de arcilla, con un 68 %, seguido del Pino Pátula con un 40 %, y del Pino Maximinoi con un 14 %. La densidad aparente osciló entre 1,0 y 1,2 g/cm³ en todas las parcelas, mientras que el contenido de COT fue más alto en el Pino Maximinoi (7,36 %) y más bajo en el Pino Pátula (1,23 %) también a 30 cm de profundidad. Ninguna de las parcelas presentó carbonatos, y el pH varió ligeramente entre 4,2 y 4,8.

En términos de CIC, a 30 cm de profundidad, el Pino Maximinoi tuvo el valor más alto (15,55 meq/100 g) y el Pino Pátula el más bajo (6,99 meq/100 g). Las concentraciones de calcio a 30 cm fueron mayores en el Pino Maximinoi (1157,31 mgCa/kg), seguido por el

Pino Pátula (1116,29 mgCa/kg) y el Pino Oocarpa (821,84 mgCa/kg). El sodio también fue más abundante en el Pino Maximinoi (101,94 mgNa/kg) y menor en el Pino Oocarpa (78,75 mgNa/kg). En cuanto al magnesio, el valor más alto se registró en el Pino Oocarpa (107,65 mgMg/kg). Finalmente, el potasio fue más abundante en el Pino Pátula (120,17 mgK/kg) y menos en el Pino Maximinoi (32,34 mgK/kg).

Tabla 2. Análisis textural y fisicoquímico de las muestras recolectadas en los perfiles de suelo descritos en cada parcela (BN, BN-PM, PM, PO y PP). S: Arena; C: Arcilla; L: Limo. COT: Contenido orgánico Total. CIC: Capacidad de Intercambio catiónico.

Perfil	BN						BN-PM						PM						PO						PP											
Muestra	1			2			3			4			5			6			7			8			9			10								
Prof. (cm)	10			30			30			100			30			70			100			30			100			30								
Análisis	Franco Limoso			Arcilla			Franco			Franco			Franco			Franco Limoso			Franco Arcilloso			Franco Limoso			Franco Arcilloso			Arcilloso								
Textural (%)	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L
	36	14	50	0	68	32	30	24	46	40	14	46	50	14	36	30	18	52	16	48	36	26	20	54	10	52	38	24	40	36						
Densidad (g/cm ³)	1,11			1,19			0,96			0,99			1,12			1,14			1,06			1,07			1,17			1,18								
COT (% C)	7,35			2,38			5,08			6,77			7,36			4,52			1,64			4,34			1,41			1,23								
Carbonatos	-			-			0			0			0			0			0			0			0			0								
PH	-			-			4,24			4,23			4,29			4,76			4,33			4,20			4,81			4,54								
CIC (meq/100g)	-			-			14,49			20,09			15,55			7,49			7,47			14,26			8,42			6,99								
Ca (mg Ca/kg)	-			-			840,15			858,37			1157,31			744,94			876,81			821,84			865,92			1116,29								
Na (mg Na/kg)	-			-			83,77			84,29			101,94			74,49			82,39			78,75			80,31			88,41								
Mg (mg Mg/kg)	-			-			85,26			96,26			88,95			82,99			100,86			107,65			95,27			93,89								
K (mg K/kg)	-			-			34,75			17,89			32,34			11,67			13,10			33,69			16,92			120,17								

5.3 Contenido de agua (medición directa)

La medición directa del contenido de agua se realizó a partir de muestras tomadas directamente sobre las transectas de medición geofísica. Los resultados obtenidos evidencian variaciones importantes entre las parcelas como se observa en la Tabla 3.

Bosque Nativo

En el Bosque Nativo se recolectaron tres muestras. La primera, denominada 1BN, fue tomada a 17,5 metros del punto inicial de la transecta y a 10 centímetros de profundidad. Esta muestra presentó un contenido volumétrico de agua del 24,13 % y una textura franco limosa. En la misma ubicación, pero a 30 centímetros de profundidad se recolectó la muestra 2BN, la cual mostró un contenido de agua del 26,24 % con textura arcillosa. La tercera muestra, identificada como 3BN, se tomó a 27 sobre la transecta y a 10 centímetros de profundidad, obteniendo un contenido de agua de 19,15 % y textura franco limosa. En estas tres muestras, la densidad del suelo fue de aproximadamente 1,1 g/cm³ (Tabla 3).

Pino Maximinoi

En la parcela de Pino Maximinoi se recolectaron dos muestras. La primera, denominada 1PM, fue tomada a 16,5 metros del punto inicial de la transecta y a 30 centímetros de profundidad. Esta muestra presentó un contenido de agua volumétrico del 27,25 %, con textura arenosa franca y una densidad de 1,36 g/cm³. La segunda muestra, 2PM, fue recolectada a 29 metros sobre la transecta y a la misma profundidad, mostrando un contenido de agua del 19,75 % y textura franca, con una densidad de 1,05 g/cm³ (Ver tabla 3).

Pino Oocarpa

En la parcela de Pino Oocarpa también se recolectaron dos muestras. La primera, denominada 1PO, fue tomada a 10 metros sobre la transecta y a 30 centímetros de profundidad. Esta muestra mostró un contenido de agua volumétrico del 16,84 %, con

textura franco arcillosa limosa y una densidad de 1,19 g/cm³. La segunda muestra, 2PO, se ubicó a 21 metros sobre la transecta y a la misma profundidad, presentando un contenido de agua del 15,40 % con textura franco limosa y una densidad de 1,16 g/cm³ (Tabla 3).

Pino Pátula

Finalmente, en la parcela de Pino Pátula se recolectaron dos muestras. La primera, identificada como 1PP, fue tomada a 7 metros sobre la transecta y a 30 centímetros de profundidad, mostrando un contenido de agua volumétrico del 13,65 %, con textura arcillo limosa y una densidad de 1,23 g/cm³. La segunda muestra, 2PP, fue recolectada a 20 metros sobre la transecta y a la misma profundidad, obteniendo un contenido de agua del 12,94 %, con textura arcillosa y una densidad de 1,16 g/cm³ (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de la medición del contenido de agua, textura y densidad de las muestras de suelo tomadas directamente sobre las transectas donde se realizaron las mediciones geofísicas.

Muestra	1BN			2BN			3BN			1PM			2PM			1PO			2PO			1PP			2PP				
Long. (m)	17,5			17,5			27			16,5			29			10			21			7			20				
Prof. (cm)	10			30			10			30			30			30			30			30			30				
Análisis textural (%)	Franco Limoso			Arcilla			Franco Limoso			Arenoso Franco			Franco			Franco Arcilloso Limoso			Franco Limoso			Arcillo Limoso			Arcilla				
	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C	L	S	C
	22	22	56	4	60	36	34	14	52	80	4	16	38	16	46	4	36	60	22	26	52	8	48	44	18	44	38		
Θ_m (%)	21,74			22,43			18,07			20,04			18,81			14,15			13,28			11,10			10,19				
Densidad (g/cm³)	1,12			1,17			1,06			1,36			1,05			1,19			1,16			1,23			1,16				
Θ (%)	24,35			26,24			19,15			27,25			19,75			16,84			15,40			13,65			11,82				

5.4 Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

En esta sección se presentan los perfiles de resistividad junto con los perfiles correspondientes de contenido de agua, calculados a partir de la resistividad, para cada parcela de estudio. Sobre los perfiles se ubicaron los árboles situados a menos de dos metros a cada lado de la transecta.

Bosque Nativo

En el Bosque Nativo, las tomografías adquiridas en diferentes fechas muestran variaciones significativas de resistividad. En las mediciones del 30 de abril y 1 de mayo, los valores mínimo y máximo oscilan entre 20 y 2000 Ohm·m, respectivamente, mientras que en la tomografía del 21 de agosto varían entre 100 y 1000 Ohm·m, con los valores más bajos extendiéndose a mayor profundidad (Figura 4).

En general, las tomografías permiten identificar tres zonas principales. La primera se encuentra en el costado superior izquierdo del perfil y abarca los primeros 10 metros. En las tomografías del 30 de abril y 1 de mayo, los valores de resistividad en esta área alcanzan hasta 500 Ohm·m en los primeros 0,5 metros de profundidad y aumentan a más de 1000 Ohm·m en niveles más profundos. En la medición del 21 de agosto, los valores de hasta 500 Ohm·m se extienden hasta 1,5 metros de profundidad, incrementándose a 900 Ohm·m en las capas inferiores.

La segunda zona, ubicada en el centro de los perfiles (entre 10 y 17 m de longitud), concentra los valores más altos de resistividad. En las mediciones del 30 de abril y 1 de mayo, estos valores se sitúan entre 1000 y 2500 Ohm·m (Figura 4A y Figura 4B), mientras que en la tomografía del 21 de agosto están por debajo de los 2000 Ohm·m (Figura 4C).

Finalmente, en el costado derecho de los perfiles, la resistividad disminuye en comparación con la zona central. En las tomografías del 30 de abril y el 1 de mayo, se observan dos anomalías superficiales con resistividades que varían de 20 a 500 ohm·m en los primeros 0,5 metros de profundidad. Por debajo de esta capa, los valores de resistividad aumentan, situándose entre 1000 y 2000 ohm·m (Figura 4A y Figura 4B). En la tomografía del 21 de agosto, en cambio,

las anomalías someras muestran valores entre 300 y 500 ohm·m. La anomalía de 500 ohm·m se extiende a profundidad. En el costado derecho, se ubica una anomalía de alrededor de 1000 ohm·m (Figura 4C).

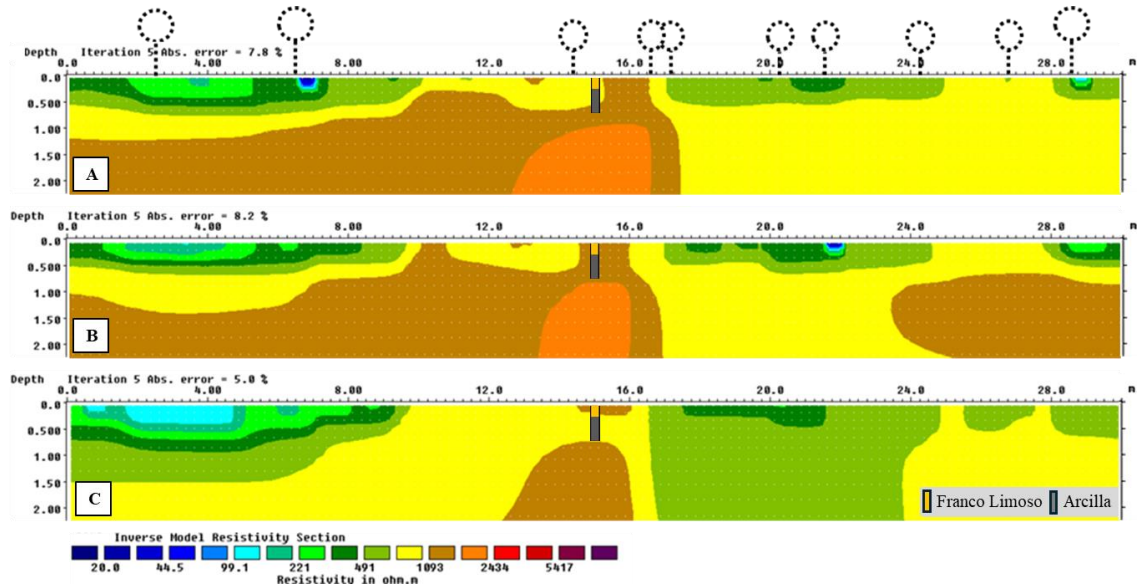


Figura 4. Tomografías de Resistividad Eléctrica en el Bosque nativo. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 21 de agosto de 2024. Los círculos representan los árboles mapeados a lo largo de la transecta. La barra que se presenta en la figura representa una proyección de la variación textural en profundidad, de acuerdo con el perfil del suelo descrito en esta parcela.

En los perfiles de contenido volumétrico de agua del Bosque Nativo (Figura 5), Se observa una distribución lateral irregular del contenido de agua, donde también se pueden identificar tres zonas. En el costado izquierdo, se identifica una zona con porcentajes altos de contenido de agua, que alcanzan profundidades de entre 0,5 a 0,7 m en los perfiles el 30 de abril y 1 de mayo, y llegan casi a 1,5 m en el perfil del 21 de agosto. Los valores en esta área varían entre el 16 y más del 50%, siendo notablemente más altos en el perfil de agosto.

En la zona central, el contenido de agua en los perfiles del 30 de abril y 1 de mayo, no supera el 16% y predominan los valores inferiores al 13%. Sin embargo, en el perfil del 21 de agosto, los porcentajes aumentan ligeramente, alcanzando hasta el 19%.

En el costado derecho, los perfiles del 30 de abril y 1 de mayo muestran una distribución irregular del contenido de agua en las capas superficiales (hasta 0,5 m), con valores que oscilan

entre el 13% y el 50%. A mayor profundidad, los porcentajes disminuyen y se ubican por debajo del 16%. En el perfil del 21 de agosto, se identifican dos áreas: una con valores entre el 16% y el 28%, y otra, hacia el extremo derecho, donde los porcentajes están entre el 16% y el 22%.

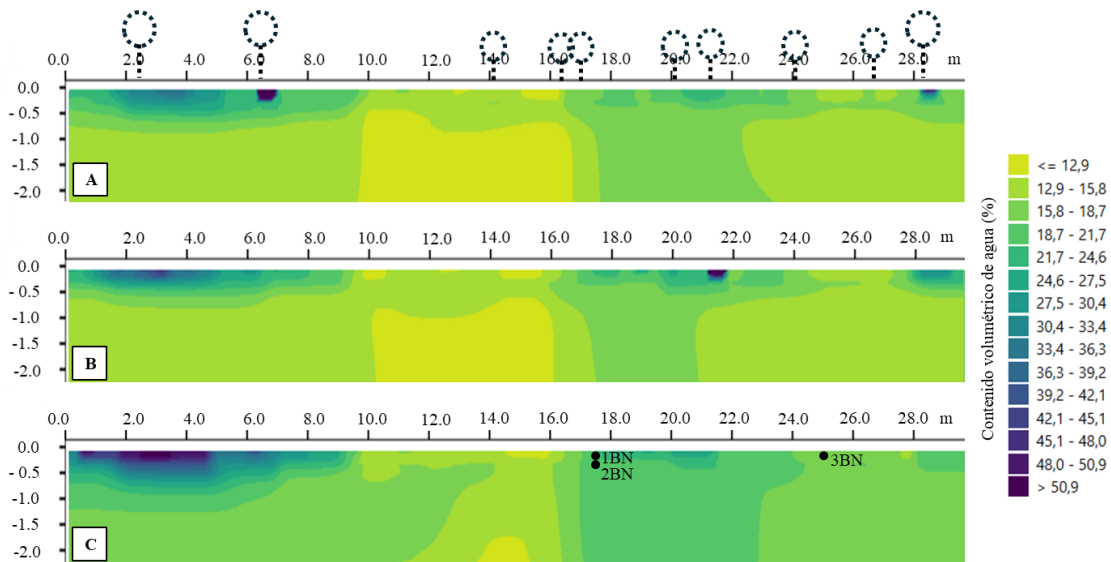


Figura 5. Perfiles de contenido de agua en el Bosque Nativo calculados a partir de la resistividad. Se muestran también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio (IBN, 2BN y 3BN). **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 21 de agosto de 2024. Los círculos representan los árboles mapeados a lo largo de la transecta.

Pino Maximinoi

En la parcela de pino Maximinoi, las tomografías realizadas en las distintas fechas muestran valores elevados de resistividad, con un rango de entre 400 y más de 5400 ohm.m en la tomografía del 30 de abril, y entre 400 y 5000 ohm.m en las del 1 de mayo y 22 de agosto.

En la tomografía del 30 de abril, la distribución de la resistividad es irregular lateralmente, en los primeros 0,7 metros de profundidad. Los valores más bajos e intermedios se localizan principalmente por debajo de las zonas donde se encuentran los pinos, con resistividades entre 500 y 2500 Ohm.m. A una profundidad mayor de 0,7 metros, la resistividad aumenta considerablemente, alcanzando valores superiores a 5400 Ohm·m, especialmente en la zona central del perfil, entre 15 y 20 m de longitud (Figura 6A).

En el perfil del 1 de mayo (Figura 6B), la distribución de la resistividad es similar a la del 30 de abril, aunque con diferencias entre los 4 y 12 m de longitud, donde la distribución de resistividades de 2000 Ohm.m es más continua. Al igual que en la tomografía del 30 de abril, por debajo de los 0,7 metros de profundidad, se registran los valores de resistividad más altos, que están sobre los 5000 Ohm.m, especialmente entre 14 y 17 m de longitud.

En la tomografía del 22 de agosto (Figura 6C), las zonas de altas resistividades se reducen en profundidad en comparación con los perfiles anteriores, por ejemplo entre 0 y 4 m, y entre 20 y 30 m.

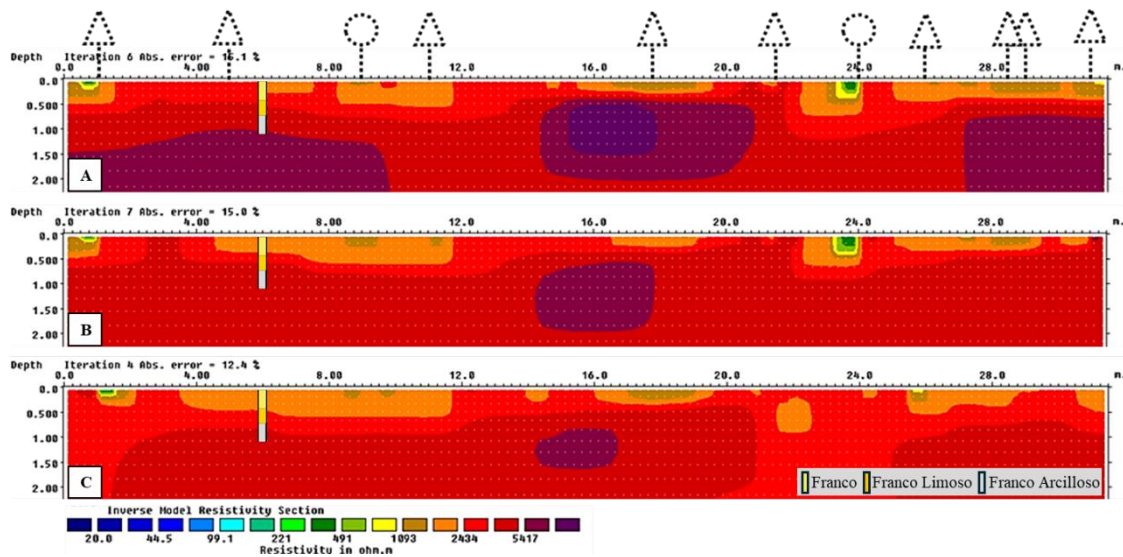


Figura 6. Tomografías de Resistividad Eléctrica en la parcela de Pino Maximinoi. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 22 de agosto de 2024. Los triángulos representan pinos y los círculos árboles nativos mapeados a lo largo de la transecta.

Los perfiles de contenido de agua de la parcela de pino Maximinoi (Figura 7), evidencian variaciones irregulares en el contenido de agua, con los valores más altos concentrándose especialmente en las zonas más superficiales del perfil, a una profundidad aproximada de 1 metro.

En el perfil correspondiente al 30 de abril, los valores de contenido de agua varían entre 16 y más de 51% en esta capa superficial. Siendo especialmente más altos en áreas ubicadas directamente debajo de los pinos (Figura 7A). A profundidades superiores a 1 metro, los

valores disminuyen, siendo inferiores al 19%, con una concentración de valores por debajo del 13% en la zona central del perfil, entre 15 y 20 m de longitud.

En el perfil del 1 de mayo, el contenido de agua en el primer metro de profundidad también está entre 16 y más del 51%, con una distribución similar a la del 30 de abril. A partir de 1 metro de profundidad, los valores disminuyen, oscilando entre el 13% y el 19% (Figura 7B).

En el perfil del 22 de agosto, el contenido de agua es significativamente mayor en comparación con los dos anteriores (Figura 7C). En la zona superficial (hasta 1 m de profundidad en este perfil), los valores oscilan entre el 19 y más del 51%. A partir de esta profundidad, los porcentajes oscilan entre el 13 y el 22%, con una concentración de valores bajos entre los 12 y 20 m de longitud.

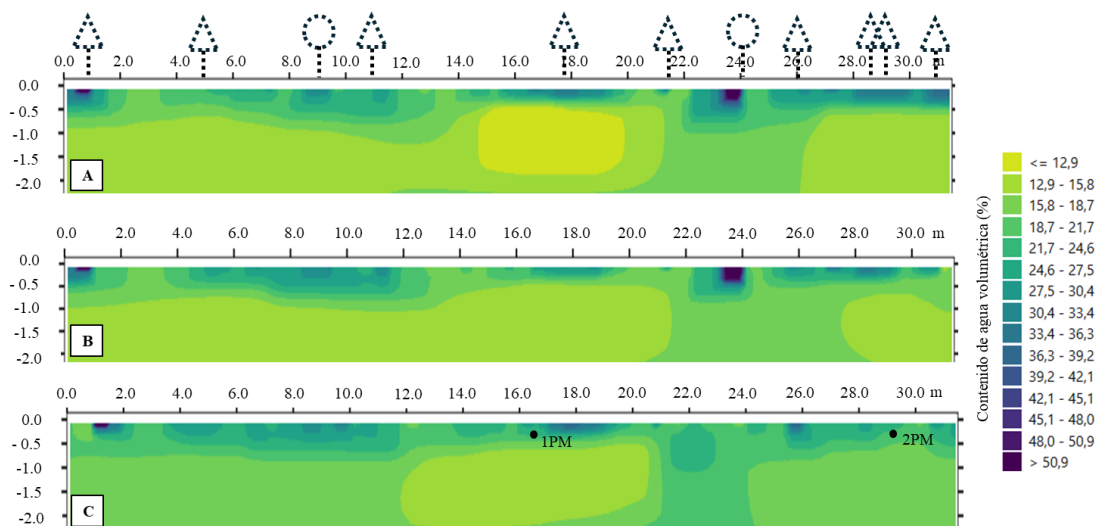


Figura 7. Perfiles de contenido de agua a partir de la resistividad en la parcela de Pino Maximinoi. Se muestran también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 22 de agosto de 2024. Los triángulos representan pinos y los círculos árboles nativos mapeados a lo largo de la transecta.

Pino Oocarpa

Las tomografías realizadas en esta parcela en las diferentes fechas revelan valores de resistividad elevados, especialmente en las zonas más profundas, donde se registran máximos de hasta 5400 Ohm.m. En las áreas más superficiales (hasta 0,7 m) la resistividad se distribuye de manera heterogénea, alcanzando un mínimo de 200 Ohm.m.

En la tomografía del 30 de abril, los valores de resistividad en la zona superficial (hasta 0,7 m) oscilan entre 200 y 5000 Ohm.m aproximadamente. Los valores más bajos e intermedios se encuentran directamente debajo de las áreas con pinos. A mayor profundidad, los valores de resistividad aumentan, alcanzando más de 5400 Ohm.m, especialmente entre los 16 y 28 m de longitud (Figura 8A).

El perfil del 1 de mayo evidencia un comportamiento similar en los primeros 0,7 m de profundidad, con resistividades entre 200 y 5000 ohm.m, pero con diferencias en la distribución en comparación con el perfil del 30 de abril (Figura 8B). A mayor profundidad, la resistividad incrementa nuevamente, alcanzando más de 5400 ohm.m entre los 18 y 24 m a lo largo de la transecta (Figura 8B).

En la tomografía del 21 de agosto, los valores de resistividad superficiales (hasta 0,7 m) también varían entre 200 y 5000 ohm.m, aunque predominan valores más altos en comparación con los perfiles anteriores, especialmente entre 1 y 8 m y de 20 a 30 m de longitud. Por debajo de esta capa superficial, la resistividad supera los 5400 ohm.m, especialmente entre los 19 y 23 m a lo largo de la transecta (Figura 8C).

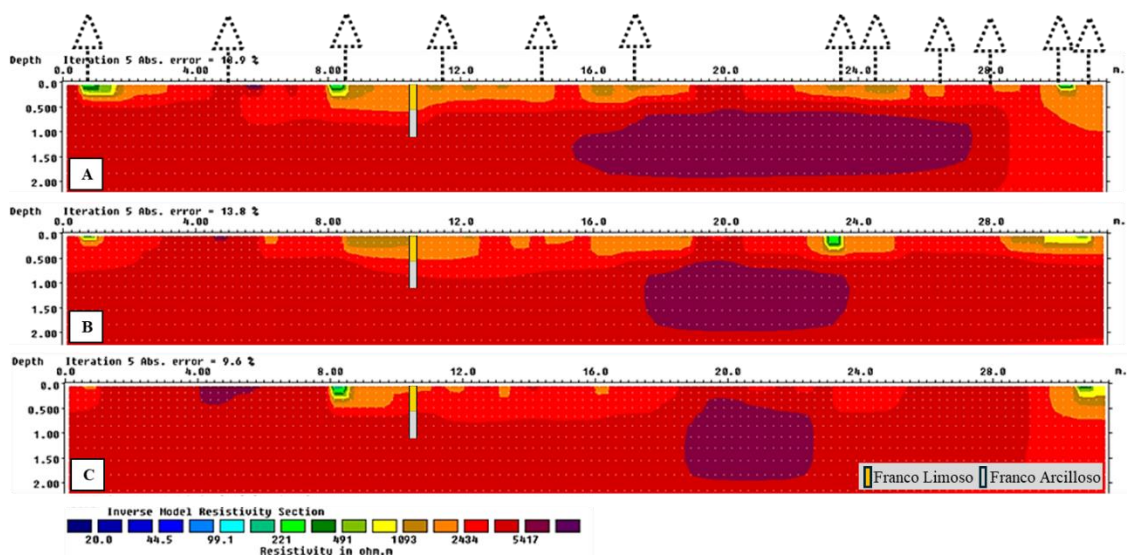


Figura 8. Tomografías de Resistividad Eléctrica en la parcela de Pino Oocarpa. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 21 de agosto de 2024. Los triángulos representan los pinos ubicados a lo largo de la transecta.

Los perfiles de contenido de agua en la parcela de pino Oocarpa muestran una distribución irregular, con los valores más altos concentrados en la zona superficial del suelo, hasta los 0,7 m de profundidad, y disminuyendo en profundidad.

En el perfil del 30 de abril, el contenido de agua en esta capa superficial varía entre el 13% y más del 40%. En las capas más profundas, el contenido de agua disminuye, siendo inferior al 19%, especialmente hacia el margen derecho del perfil, donde los valores son inferiores al 13% (Figura 9A).

En el perfil del 1 de mayo los valores de contenido de agua en la zona superficial también oscilan entre el 13% y más del 40%, pero presentan una distribución diferente a la observada en el perfil del 30 de abril (Figura 9B). En profundidad el contenido de agua disminuye, alcanzando valores inferiores al 13%

Para el 21 de agosto (Figura 9C), los valores de contenido de agua en los primeros 0,7 m de profundidad oscilan nuevamente entre el 13% y más del 40%. Sin embargo, predominan valores más bajos en comparación con los perfiles de abril y mayo. En las capas más profundas, los valores son menores al 19%, destacando una mayor concentración de los registros más bajos en el margen derecho del perfil.

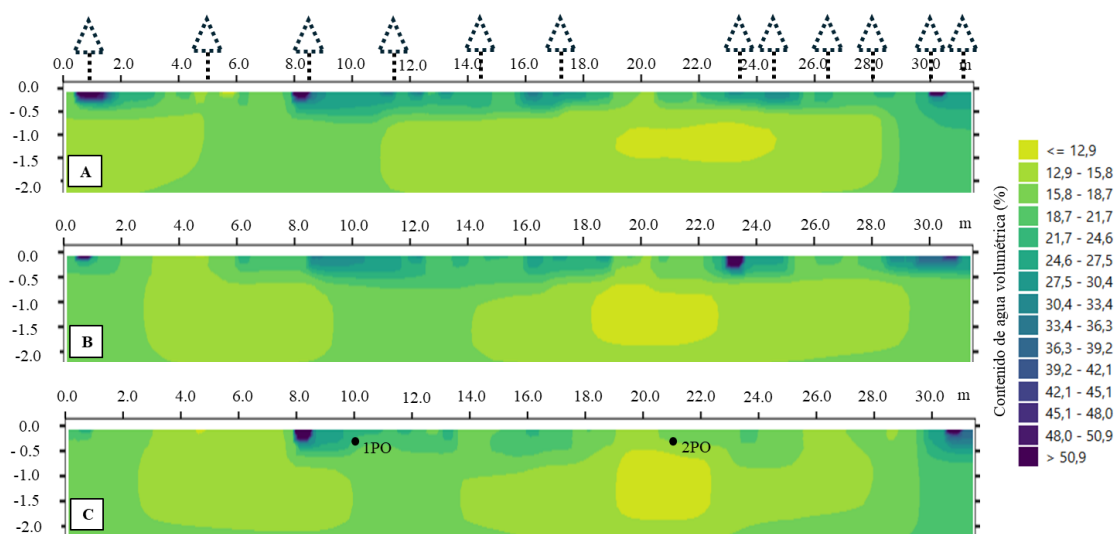


Figura 9. Perfiles de contenido de agua a partir de la resistividad en la parcela de Pino Oocarpa. Se muestran también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. A) 30

de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 21 de agosto de 2024. Los triángulos representan los pinos a lo largo de la transecta.

Pino Pátula

La parcela de pino Pátula presenta una particularidad: además de los pinos, el terreno se utiliza para sembrar café. Esto implica que el suelo se somete a arado y riego para la siembra y mantenimiento del café, respectivamente. Los pinos también son intervenidos, ya que se les cortan las ramas laterales para permitir que la luz solar y la lluvia alcancen fácilmente la superficie del suelo. Las plantas de café se distribuyen en los primeros 12 m a lo largo de las transectas de medición geofísica.

En las tomografías adquiridas en esta parcela (Figura 10), los valores de resistividad oscilan entre un mínimo de aproximadamente 44 ohm.m y un máximo de cerca de 5400 ohm.m en las mediciones del 30 de abril y el 1 de mayo. En la tomografía del 21 de agosto, los valores mínimo y máximo se encuentran entre 100 ohm.m y alrededor de 4000 ohm.m, respectivamente.

En el margen izquierdo de los perfiles, los valores más bajos de resistividad se concentran en las capas más superficiales (hasta 0,5 m) y se extienden hasta los 14 m de longitud, abarcando la zona con café. En profundidad, los valores de resistividad tienden a aumentar alcanzando hasta los 5400 Ohm.m en los perfiles del 30 de abril y el 1 de mayo (Figura 10A y Figura 10 B).

En el margen derecho de los perfiles la resistividad disminuye en la zona más superficial, alcanzando valores entre 44 y 900 Ohm.m en la tomografía del 30 de abril y alrededor de 100 y 900 Ohm.m en las del 1 de mayo y 21 de agosto. A mayor profundidad, se observa un incremento en los valores de resistividad.

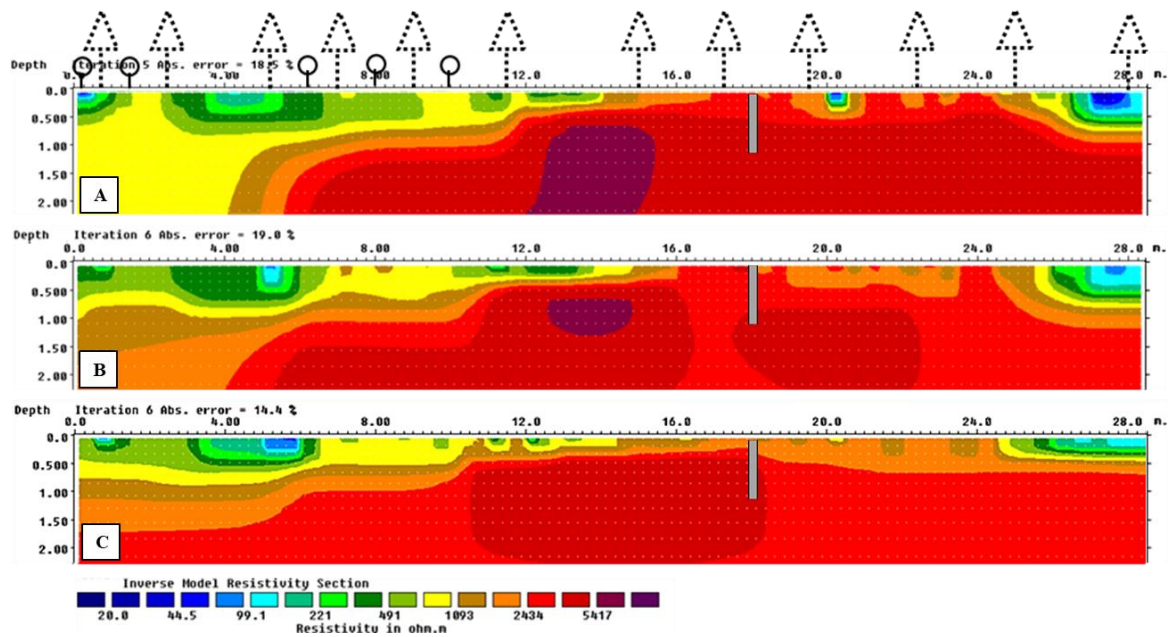


Figura 10. Tomografías de Resistividad Eléctrica en la parcela de Pino Pátula. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 21 de agosto de 2024. Los triángulos representan los pinos y los círculos de línea continua, plantas de café.

Los perfiles de contenido de agua calculados a partir de la resistividad en la parcela de Pino Pátula revelan una distribución heterogénea del contenido de agua en las tres fechas analizadas (Figura 11). En la zona de la transecta donde se ubican las plantas de café (primeros 12 m de longitud), se observan altos contenidos de agua, con valores que varían entre el 15% y más del 50%, extendiéndose hasta 2 m de profundidad en el perfil del 30 de abril, 1,5 m en el del 1 de mayo y 1 m en el del 21 de agosto. Por debajo de esta zona de altos contenidos de agua, los porcentajes disminuyen a menos del 13% y se extienden de manera homogénea más allá de los 12 m de longitud, abarcando la zona derecha de los perfiles.

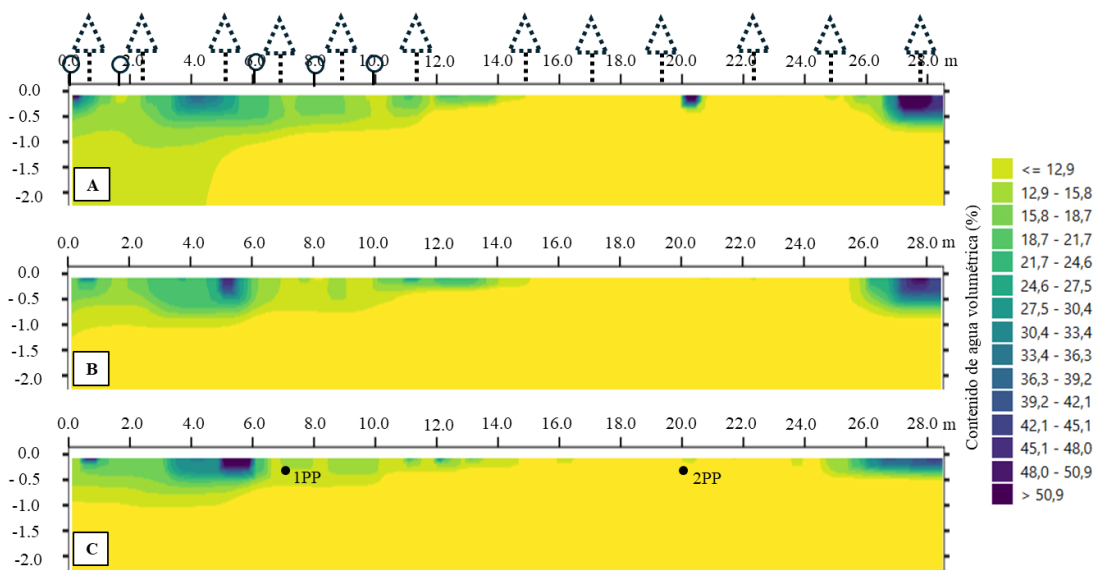


Figura 11. Perfiles de contenido de agua a partir de la resistividad en la parcela de Pino Pátula. Se muestran también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. **A)** 30 de abril de 2024. **B)** 1 de mayo de 2024. **C)** 22 de agosto de 2024. Los triángulos representan los pinos y los círculos de línea continua, plantas de café.

5.5 Radar de Penetración Terrestre (GPR)

Los datos de GPR presentan una limitación de resolución con los parámetros 1, lo que dificulta realizar una comparación detallada de las transectas multitemporales. Sin embargo, es importante resaltar que sí se observan cambios en la señal en las diferentes fechas, estas variaciones pueden ser objeto de estudio en trabajos subsiguientes.

Bosque Nativo

Las imágenes de GPR obtenidas en el Bosque Nativo muestran que, a partir de los 35 ns, las reflexiones presentan un patrón plano-paralelo, con altas amplitudes y una distribución lateral regular. Por encima de los 35 ns, en los perfiles adquiridos el 30 de abril y el 21 de agosto con los parámetros 1, los reflectores se presentan plano-paralelos, pero con amplitudes variables y una distribución lateral irregular que varía entre las dos fechas (Figura 12A y Figura 12B). En contraste, en el perfil del 21 de agosto obtenido con los parámetros 2, se observa una mayor claridad en las amplitudes por encima de los 35 ns, así como un incremento en el número de hipérbolas, que no se detectan en las adquisiciones previas (Figura 12C). En este último perfil,

se identificaron cuatro capas, basadas en el análisis del carácter de la señal y en las velocidades obtenidas mediante el ajuste de hipérbolas.

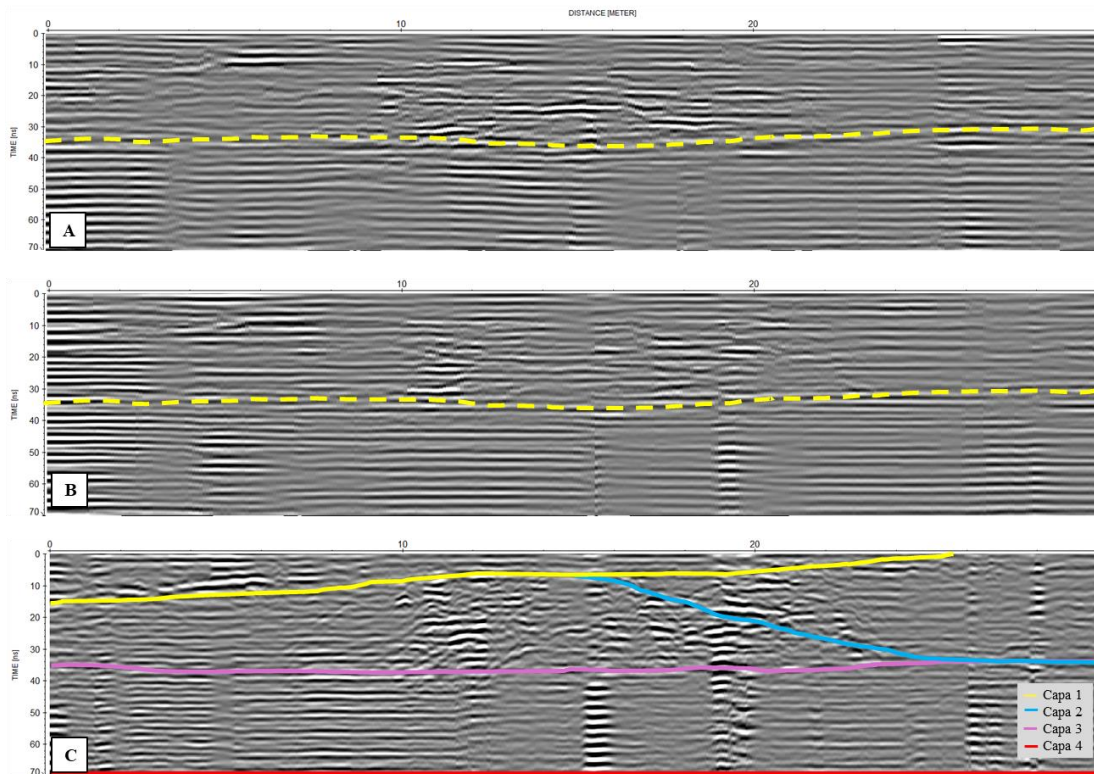


Figura 12. Perfiles GPR en el Bosque Nativo. **A)** 30 de abril de 2024 con los parámetros 1. **B)** 21 de agosto con los parámetros 1. **C)** 21 de agosto de 2024 con los parámetros 2. Las líneas continuas representan el modelo de capas que se ingresó al software Reflexw.

El perfil del contenido de agua obtenido para el Bosque Nativo a partir del análisis de las velocidades, se presenta en la figura 13. Se identificó una zona superficial entre 0,6 m de profundidad y hasta 26 m de longitud, que se pincha lateralmente, con un contenido de agua de 26%, por debajo de esta capa se reconocen dos zonas, una en el margen derecho con un contenido de agua de 21% y otra en el margen izquierdo con un contenido de agua del 17% que se extiende en profundidad.

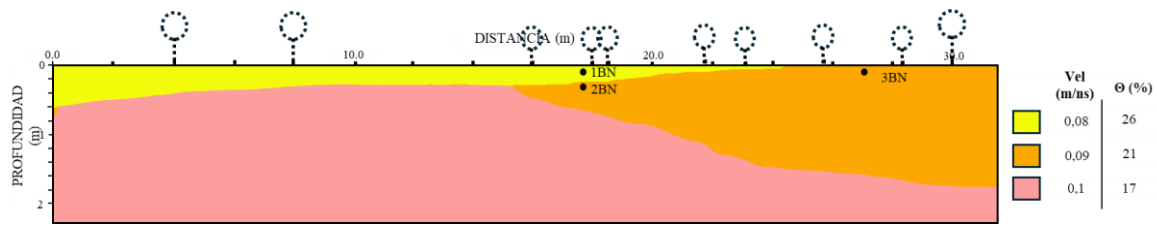


Figura 13. Perfil de contenido de agua a partir de GPR en el Bosque Nativo. Se muestran también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. Los círculos representan los árboles mapeados a lo largo de la transecta.

Pino Maximinoi

En la parcela de Pino Maximinoi, los perfiles de GPR adquiridos el 30 de abril y el 22 de agosto usando los parámetros 1 exhiben reflectores plano-paralelos e irregulares, con amplitudes variables a lo largo del perfil (Figura 14A y Figura 14B). Estos reflectores presentan truncamientos y adelgazamientos laterales en algunas zonas. Se observa también una atenuación de la señal en el margen derecho estos perfiles. En la zona central, la señal presenta una mayor amplitud y se pueden identificar algunas hipérbolas, aunque su presencia es poco evidente.

En contraste, el perfil obtenido el 22 de agosto con los parámetros 2, el carácter de los reflectores es mucho más claro y las hipérbolas son más abundantes y variables en tamaño, lo que permitió identificar 6 capas para el análisis de velocidades (Figura 14C).

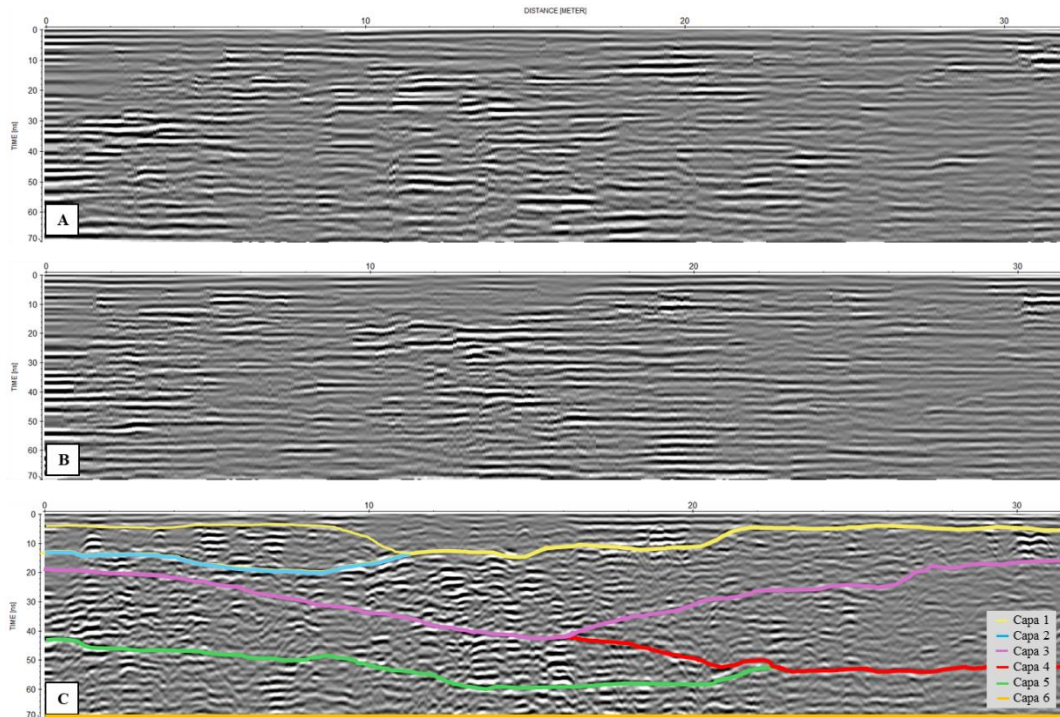


Figura 14. Perfiles GPR en la parcela de pino Maximinoi. **A)** 30 de abril de 2024 con los parámetros 1. **B)** 21 de agosto con los parámetros 1. **C)** 22 de agosto de 2024 con los parámetros 2. Se incluye el modelo de capas que se ingresó al software Reflexw.

El perfil de contenido de agua obtenido mediante GPR para el Pino Maximinoi se muestra en la Figura 15. En este perfil se identifican cinco regiones con distintos contenidos de agua: una región superficial con un contenido de agua del 26%; una zona subyacente en el margen derecho, con un contenido de agua del 21%; una capa intermedia que se extiende a lo largo del perfil, con un contenido de agua del 17%; y, finalmente, dos zonas en la parte más profunda, una en el margen izquierdo con un 13% y otra en el margen derecho con un 21%.

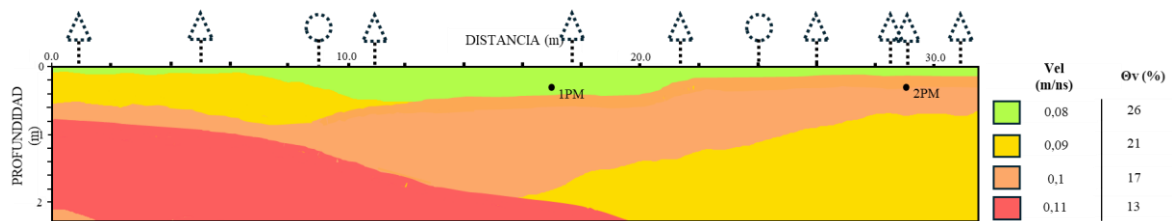


Figura 15. Perfil de contenido de agua a partir de GPR en el Pino Maximinoi. Se presentan también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. Los triángulos representan pinos y los círculos árboles nativos mapeados a lo largo de la transecta.

Pino Oocarpa

Las imágenes de GPR obtenidas en la parcela de Pino Ocarpa muestran una atenuación de la señal hacia el margen izquierdo del perfil. Por debajo de los 40 ns, se observan reflectores plano-parallelos con altas amplitudes y una distribución regular. Por encima de este nivel, en las imágenes del 30 de abril y el 21 de agosto, obtenidas con los parámetros 1, se observan reflectores plano-parallelos con amplitudes altas, pero con una distribución irregular y discontinua, con variaciones entre las dos fechas (Figura 16A y Figura 16B). En el perfil del 21 de agosto, utilizando los parámetros 2, se obtiene más información sobre la zona por encima de los 40 ns, donde los reflectores presentan amplitudes altas y discontinuidades, acompañados de hipérbolas de diferentes tamaños. En este perfil, se identificaron siete capas, basadas en el análisis del carácter de la señal y en las velocidades obtenidas mediante el ajuste de hipérbolas (Figura 16C).

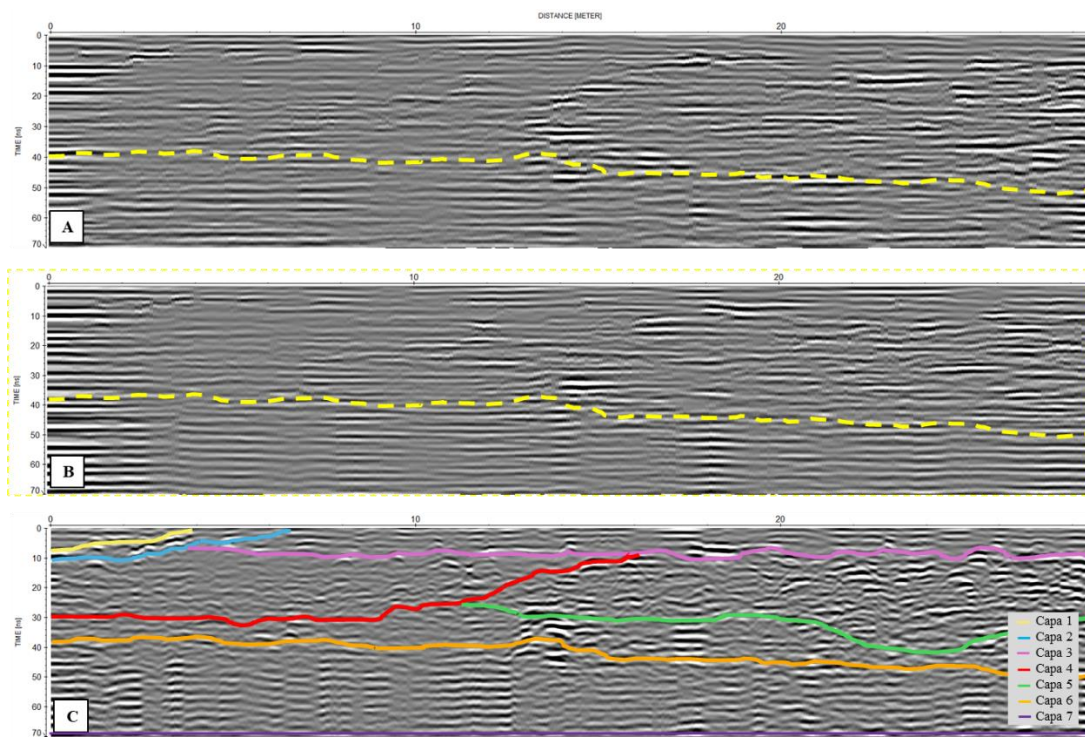


Figura 16. Perfiles GPR en la parcela de pino Ocarpa. **A)** 30 de abril de 2024 con los parámetros 1. **B)** 21 de agosto con los parámetros 1. **C)** 21 de agosto de 2024 con los parámetros 2. Se incluye el modelo de capas que se ingresó al software Reflexw.

El perfil de contenido de agua obtenido para el pino Ocarpa, derivado del análisis de las velocidades en las capas identificadas, se muestra en la Figura 17. Se reconocen cinco zonas

con diferentes contenidos de agua: en la zona más superficial (hasta los 0,4 m), los contenidos varían entre 21% en la parte más izquierda y 17% hacia la derecha del perfil. A profundidades de entre 0,4 y 1,8 m, los contenidos de agua son del 13 y 11%, y en la zona más profunda, los contenidos de agua son del 9%.

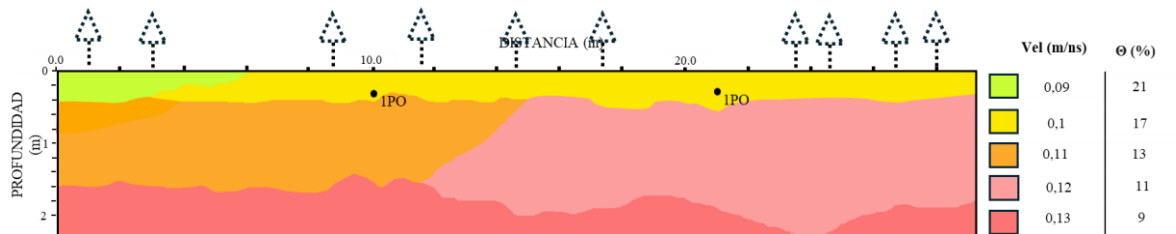


Figura 17. Perfil de contenido de agua a partir de GPR en el Pino Oocarpa. Se incluyen también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. Los triángulos representan pinos mapeados a lo largo de la transecta.

Pino Pátula

Las imágenes de GPR obtenidas en la parcela de Pino Pátula muestran una atenuación de la señal por debajo de aproximadamente 20 ns, con reflectores plano-paralelos discontinuos lateralmente. Por encima de este nivel, los perfiles obtenidos el 30 de abril y el 21 de agosto con los parámetros 1 muestran reflectores plano-paralelos de altas amplitudes, discontinuos y con una distribución irregular, que varía entre las dos fechas de adquisición (Figura 18A y Figura 18B). En la zona central de estos perfiles, se concentra una mayor cantidad de reflectores discontinuos de alta amplitud, junto con algunas hipérbolas. Sin embargo, en la imagen obtenida el 21 de agosto con los parámetros 2, la señal se presenta con mejor definición y se observa un mayor número de hipérbolas. El análisis del carácter de la señal en este último perfil, junto con el ajuste de hipérbolas permitió identificar cuatro capas con diferentes velocidades, como se muestra en la Figura 18C.

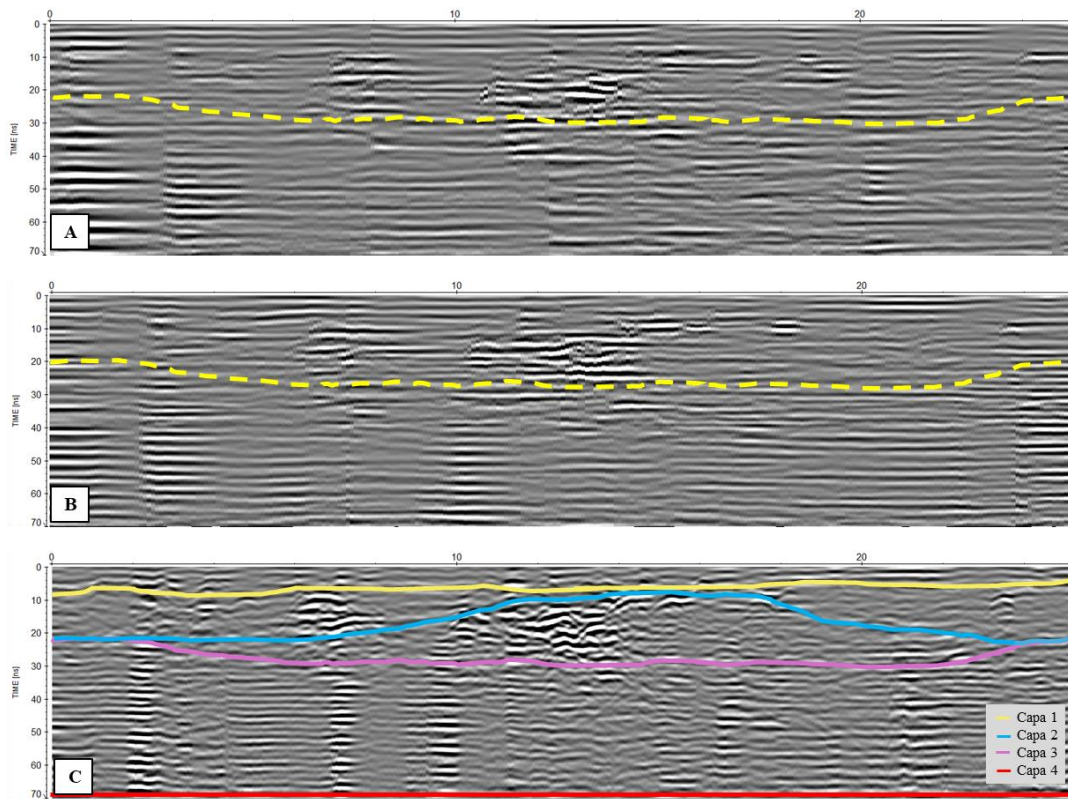


Figura 18. Perfiles GPR en la parcela de pino Pátula. **A)** 30 de abril de 2024 con parámetros 1. **B)** 21 de agosto con parámetros 1. **C)** 21 de agosto de 2024 con parámetros 2. Se incluye el modelo de capas que se ingresó al software Reflexw.

El perfil de contenido de agua obtenido en la parcela de Pino Pátula a partir del GPR, se presenta en la Figura 19. Se observa una zona superficial (hasta aproximadamente 0,4 m de profundidad) con un contenido de agua del 17%. Por debajo de esta profundidad, los contenidos de agua disminuyen, alcanzando 13% a 1,2 m de profundidad y concentrándose en 11% en la zona central del perfil. En la zona más profunda, el contenido de agua es del 9%.

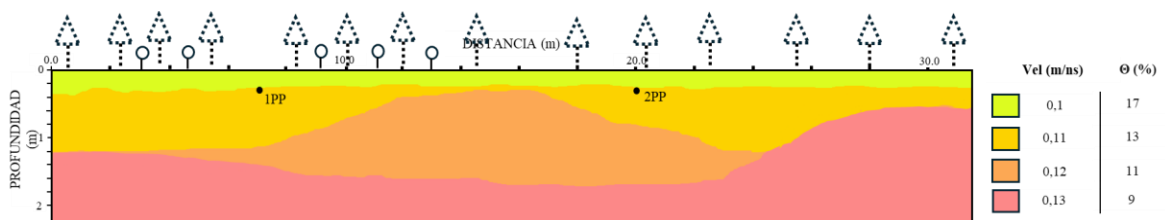


Figura 19. Perfil de contenido de agua a partir de GPR en el Pino Pátula. Se incluyen también los puntos donde se recolectó muestra de suelo para análisis de contenido de agua en laboratorio. Los triángulos representan los pinos y los círculos de línea continua, plantas de café mapeadas a lo largo de la transecta.

6. DISCUSIÓN

6.1 Resistividad en las diferentes parcelas

Los valores de resistividad muestran rangos contrastantes entre las parcelas estudiadas. En el bosque nativo, las resistividades están en el orden de cientos de $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ principalmente, mientras que en las parcelas de pino los valores están en el orden de los mil $\text{Ohm}\cdot\text{m}$. Sin embargo, el contenido de agua en las cuatro parcelas no presenta variaciones significativas que expliquen estas diferencias en resistividad. Esto sugiere que los valores de resistividad no son directamente proporcionales al contenido de agua cuando comparamos entre parcelas.

Al analizar los resultados texturales y químicos de las muestras de suelo, enfrentamos una limitación: no contamos con datos geoquímicos específicos del bosque nativo. A pesar de ello, en los datos disponibles (Tabla 2), la única característica que parece diferenciarse notablemente es el contenido de arcilla, que es significativamente más alto en el bosque nativo que en el resto de las parcelas. Lo que nos lleva a postular que las diferencias de resistividad entre el bosque nativo y las parcelas de pino podrían estar relacionadas con un mayor contenido de arcilla en el suelo del bosque nativo. Este hallazgo es consistente con estudios previos como el de Auerswald et al. (2001), que destacan la arcilla como el factor más influyente en la resistividad eléctrica del suelo. Sin embargo, es fundamental realizar investigaciones adicionales que permitan evaluar con mayor detalle cómo el contenido de arcilla u otras propiedades químicas del suelo impactan las características eléctricas en los distintos escenarios analizados.

Resistividad multitemporal en el mismo sitio

Las variaciones multitemporales de resistividad en el mismo sitio evidencian cambios que se relacionan con fluctuaciones en el contenido de agua del suelo, como han sugerido otros autores (Auerswald et al., 2001; Michot, 2003; Grandjean et al., 2009; Vanella et al., 2022).

En el bosque nativo, la resistividad presentó variaciones significativas entre fechas, con una notable disminución en los valores de resistividad que pasaron de más de $1000 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ a

aproximadamente 500 Ohm·m en zonas específicas en la tomografía del 21 de agosto. Además, las anomalías de baja resistividad se distribuyeron de manera más amplia y alcanzaron mayor profundidad (hasta 1,5 m) en comparación con las parcelas de pino.

En la parcela de Pino Maximinoi, las mediciones multitemporales evidenciaron una disminución significativa en los valores de resistividad, que pasaron de 5000 Ohm·m a aproximadamente 3000 Ohm·m en la tomografía del 21 de agosto. Este comportamiento se relaciona directamente con el evento de lluvia ocurrido el día previo a la última medición en agosto en esta parcela. Las anomalías de resistividad baja en esta parcela no superan los 0,7 m de profundidad en las tres fechas.

En la parcela de Pino Oocarpa, en cambio, se evidenciaron aumentos en los valores de resistividad en la tomografía del 21 de agosto, pasando de 3000 Ohm·m a más de 5000 Ohm·m, y los valores de resistividad más bajos concentrándose en los primeros 0,5 m en las tres fechas.

En la parcela de Pino Pátula, los resultados fueron más heterogéneos: aunque en algunas zonas se registraron disminuciones de resistividad (de 4000 a 3000 Ohm·m en las zonas más profundas y de 3000 a 2000 Ohm·m en las superficiales), otras áreas, especialmente en el margen izquierdo, presentaron incrementos de hasta 3000 Ohm·m con el tiempo. En esta parcela, las anomalías de resistividad bajas se limitan a también a las capas más superficiales y se ubican por debajo de las áreas intervenidas con cultivo de café.

Estos resultados sugieren que el bosque nativo presenta una mayor capacidad de infiltración y percolación de agua, reflejada en resistividades más bajas en profundidad y lateralmente tras el aumento de las lluvias. En cambio, en las parcelas de pino, las anomalías de resistividad se concentraron en las capas superficiales y no mostraron una disminución significativa con el tiempo, lo que sugiere una menor capacidad para que el agua percole hacia capas más profundas.

Una limitación importante en las mediciones de resistividad multitemporal está asociada con la variación del error RMS (Root Mean Square). En las parcelas de pino, los valores de RMS alcanzaron hasta un 19%, lo que puede comprometer la resolución de los resultados y la representatividad de las variaciones observadas. Si bien la reducción del RMS podría generar un modelo de resistividad más ajustado y con anomalías más localizadas, esto también produce una distribución de resistividad excesivamente compartimentalizada, con variaciones muy pequeñas y frecuentes (Figura 20A), lo que dificulta la comparación con mediciones directas y la identificación de tendencias claras.

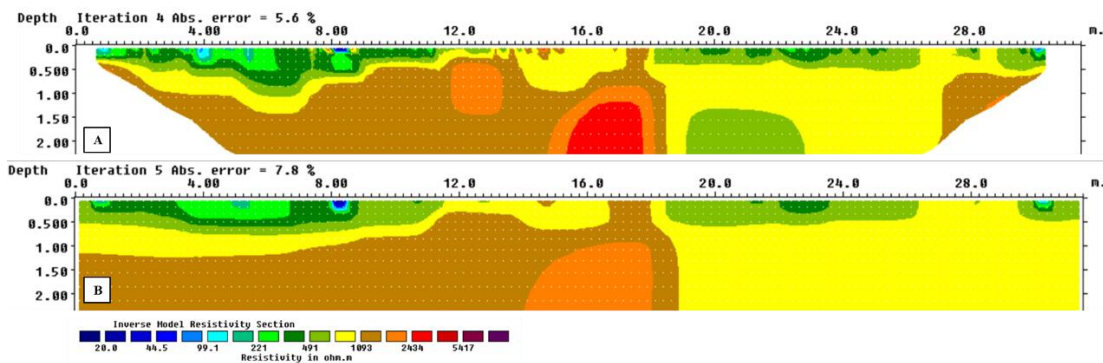


Figura 20. Resultados de la inversión de la tomografía del 30 de abril en el Bosque Nativo, con diferentes RMS. **A)** Tomografía con un RMS de 5.6%. **B)** Tomografía con RMS de 7,8%.

Al comparar inversiones con diferentes RMS (Figura 20A y Figura 20B), se observó que las soluciones con valores más bajos de error generaban modelos más heterogéneos, con anomalías distribuidas a escalas centimétricas. Aunque estadísticamente estas soluciones son más precisas, resultan difíciles de interpretar y comparar con los datos de campo. En cambio, las soluciones con RMS más alto, aunque menos detalladas, permiten observar tendencias más generales de la distribución de la resistividad (Figura 20B), facilitando una interpretación global del contenido de agua. Este último enfoque fue el que se escogió en esta investigación. Sin embargo, se recomienda realizar pruebas del efecto del RMS en la distribución de las anomalías, y su contenido de agua con un muestreo más denso de cuantificación de este para su comparación.

Contenido de agua en las diferentes parcelas

Para calcular el contenido de agua en el suelo a partir de la resistividad, se utilizaron las ecuaciones de Archie y la ley generalizada de Archie, cuyos resultados fueron comparados con las mediciones directas realizadas durante la fecha de mayor pluviosidad (21 y 22 de agosto). Esta comparación se presenta en la figura 21.

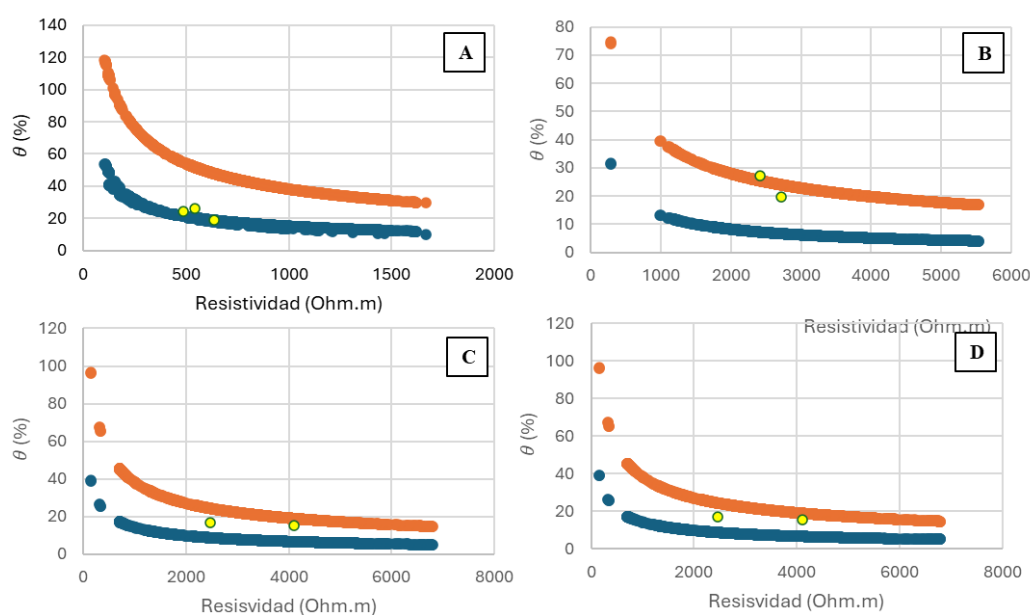


Figura 21. Comparación del contenido de agua estimado a partir de TRE y medición directa. Línea naranja: estimación mediante la ecuación de Archie. Línea azul: estimación según Shah y Singh. Puntos amarillos: medición directa. A: Bosque Nativo. B: Pino Maximinoi. C: Pino Oocarpa. D: Pino Pátula.

El contenido de agua calculado a partir de la resistividad demuestra un alto grado de correlación con los valores medidos en muestras directas. En el bosque de árboles nativos y en la plantación de pino Pátula, la estimación óptima del agua se determinó utilizando la metodología de Shah y Singh (2005) (Figuras 21A y 21D). Este resultado coincide con el contenido de arcilla observado en ambas plantaciones. En contraste, las plantaciones de pino Maximinoi y Oocarpa, donde los suelos son menos arcillosos, presentaron mejores resultados al emplear la ley de Archie para el cálculo (Figuras 21B y 21C). La comparación revela una discrepancia

significativa en el cálculo del contenido de agua en la plantación de pino Oocarpa (Figura 21C). Se plantea la hipótesis de que la ley de Archie es imprecisa debido al alto contenido de limo en el suelo de esta plantación. Esta variación en la textura no es considerada en ninguna de las leyes disponibles.

Los resultados muestran que el contenido de agua es más elevado en la parcela del bosque nativo, lo cual coincide con su mayor proporción de arcilla. A pesar de que los suelos arcillosos se caracterizan por tener una mayor porosidad y menor permeabilidad, los resultados sugieren que, incluso en profundidad, estos suelos retienen cantidades significativas de agua. Esto contrasta con las parcelas de Pino Maximinoi y Ocarpa, donde los mayores contenidos de agua se concentran en la capa más superficial, disminuyendo de manera en profundidad. Aunque, en teoría, la textura menos arcillosa de este suelo debería favorecer una mayor infiltración y saturación en profundidad debido a su mayor permeabilidad, los resultados indican lo contrario. Esto sugiere que los pinos podrían estar afectando negativamente la infiltración y retención de agua en el suelo.

Un escenario similar se presenta en la parcela de Pino Pátula, donde también se identificaron texturas arcillosas, pero con contenidos de agua considerablemente más bajos que en el bosque nativo. La única excepción ocurre en las áreas donde se encuentran plantas de café, donde los valores de humedad son más elevados, probablemente debido a las prácticas de manejo del cultivo, como el riego, el corte del dosel arbóreo de los pinos y el arado del suelo.

Estos resultados sugieren que, además de la textura del suelo, existen otras variables que influyen en el contenido de agua en las parcelas con pinos. Una de ellas es la acumulación de excesiva de acículas en las plantaciones de pinos, que alcanzan hasta 25 cm de espesor. Estudios previos ya han documentado que estas capas generan una barrera física que dificulta la infiltración del agua de lluvia al suelo, favoreciendo el escurrimiento superficial y limitando la recarga hídrica en profundidad (Ansaloni & Chacón, 2003, Fioroni et al., 2020)

Otro factor relevante en estas parcelas de pino es la cobertura del dosel arbóreo, que reduce significativamente la llegada de luz solar al suelo y limita la infiltración directa del agua de lluvia, produciendo aumentos en la evapotranspiración (Huber & Trecaman, 2000; Huber et al. 2008), lo que contribuye a los bajos contenidos de agua en profundidad en plantaciones de pino.

Contenido de agua multitemporal en el mismo sitio

Los resultados multitemporales evidencian patrones contrastantes en la distribución y evolución del contenido de agua en el suelo para las diferentes parcelas evaluadas.

En el bosque nativo, se observa un aumento progresivo del contenido de agua a mayor profundidad, lo que sugiere una infiltración más eficiente (posiblemente debido a la ausencia de barreras superficiales) y una capacidad superior del suelo para retener humedad en profundidad. A pesar de que lateralmente la distribución del contenido de agua es heterogénea, lo cual puede estar asociado a variaciones locales de textura y permeabilidad no evaluadas en este estudio, la tendencia general indica un incremento sostenido del agua en el subsuelo con el tiempo.

En la parcela de Pino Maximinoi se observa un comportamiento similar en las capas superficiales, donde el contenido de agua alcanza valores más altos y muestra una distribución más homogénea. Esto sugiere una infiltración inicial eficiente en los estratos menos profundos. No obstante, el agua no logra extenderse hacia las capas más profundas, lo que indica que un menor volumen queda disponible para infiltrarse tras quedar retenido en la capa de acículas o en las ramas de los pinos. Alternativamente, podrían presentarse variaciones texturales en profundidad que no fueron consideradas en las muestras, o bien el sistema radicular de este bosque podría favorecer una mayor infiltración de agua.

En la plantación de pino Oocarpa se ha observado, con el tiempo, una disminución del contenido de agua en profundidad, acompañada de una distribución lateral del agua en la capa superficial. Esta tendencia podría explicarse por variaciones texturales en profundidad y por la reducción del volumen de agua disponible para infiltrarse, que permanece únicamente en la capa más somera. De manera alternativa, un sistema radicular concentrado en las capas superficiales y que consume rápidamente el agua disponible también podría explicar esta tendencia.

En la parcela de Pino Pátula, el efecto de la intervención del suelo debido al cultivo de café en la transecta mejora la infiltración superficial, generando mayores contenidos de agua justo debajo de esta área intervenida. No obstante, este efecto es limitado a las capas más someras del perfil; a mayor profundidad, los valores de contenido de agua siguen siendo bajos.

Se concluye que el volumen de agua disponible para infiltrarse disminuye en las plantaciones de pino debido a las barreras físicas que limitan la capacidad del agua para alcanzar el suelo. Sin embargo, es necesaria una investigación más profunda para evaluar el impacto de otros factores, como el sistema radicular, la edad de los árboles y el papel de especies específicas en el proceso de meteorización del suelo.

GPR

Los resultados obtenidos con el GPR evidencian que la textura del suelo es un factor determinante en la profundidad alcanzada por la señal y, por ende, en la utilidad del registro geofísico. Se observó que la respuesta de los reflectores varía en el tiempo, lo que indica que esta técnica es sensible a los cambios en el contenido de agua del suelo. Sin embargo, el alcance de este estudio no permite realizar un análisis más detallado de dicha variabilidad.

Un aspecto relevante es que, en zonas donde las resistividades son altas, la señal del GPR penetra a mayores profundidades (Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25). Esto se

relaciona entonces con un menor contenido de arcilla que mejora la propagación de la energía del GPR, coincidiendo con estudios previos que demuestran cómo el contenido de arcilla limita la profundidad de exploración de este método (Algeo et al., 2016).

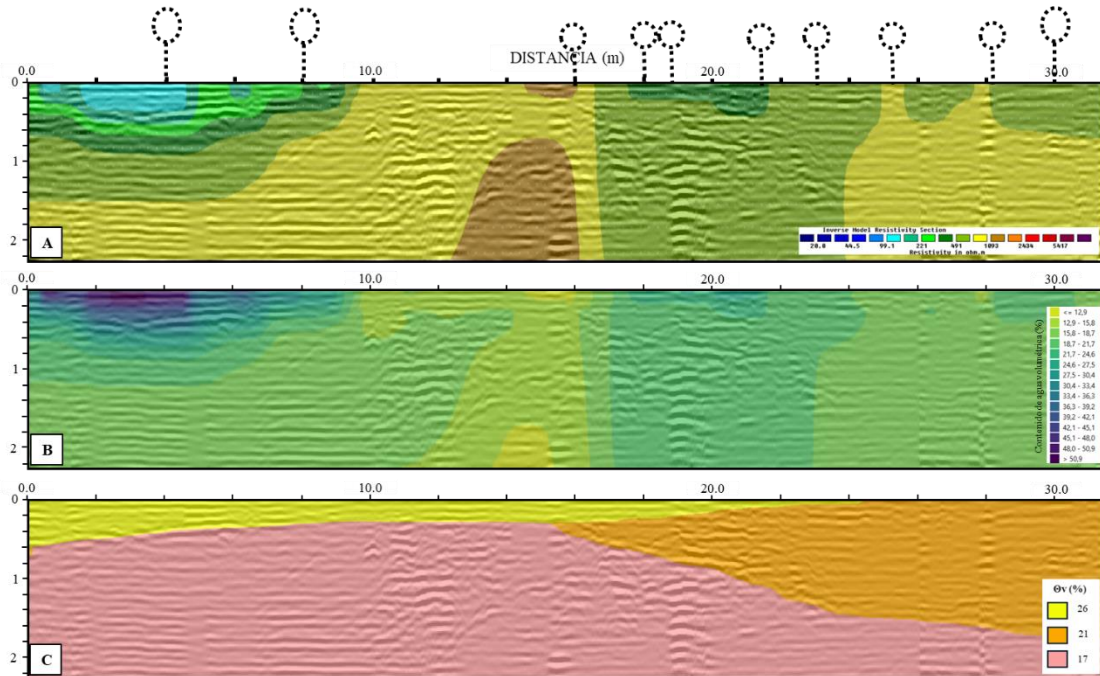


Figura 22. Gráfico combinado bosque nativo. **A)** Radargrama y TRE superpuestos. **B)** Perfil de contenido de agua con TREF y radargrama superpuestos. **C)** Perfil de contenido de agua con GPR y radargrama superpuestos.

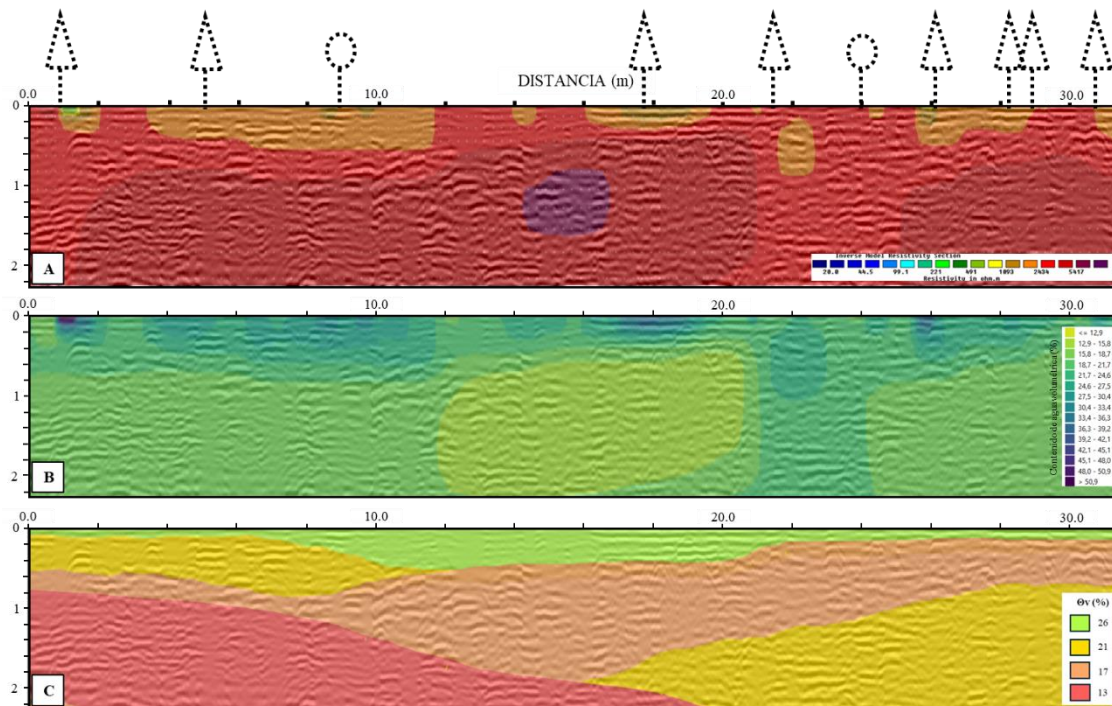


Figura 23. Gráfico combinado Pino Maximinoi. **A)** Radargrama y TRE superpuestos. **B)** Perfil de contenido de agua con TRE y radargrama superpuestos. **C)** Perfil de contenido de agua con GPR y radargrama superpuestos.

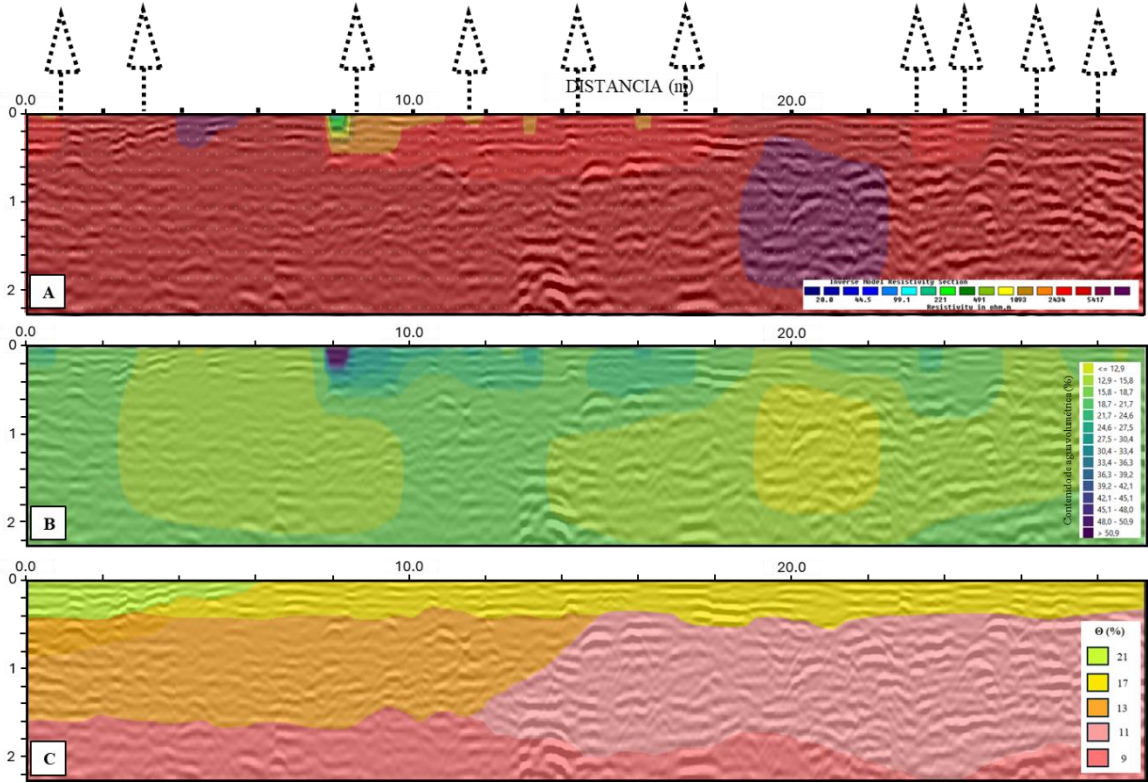


Figura 24. Gráfico combinado Oocarpa. **A)** Radargrama y TRE superpuestos. **B)** Perfil de contenido de agua con TRE y radargrama superpuestos. **C)** Perfil de contenido de agua con GPR y radargrama superpuestos.

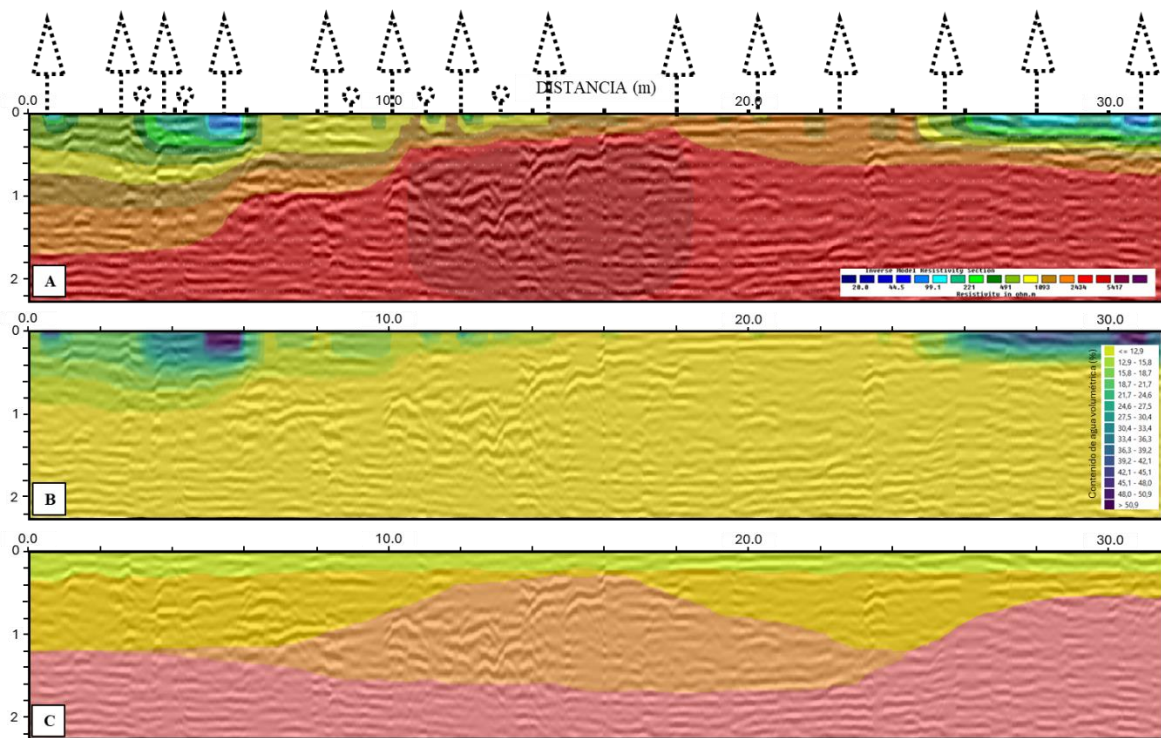


Figura 25. Gráfico combinado Pino Pátula. **A)** Radargrama y TRE superpuestos. **B)** Perfil de contenido de agua con TRE y radargrama superpuestos. **C)** Perfil de contenido de agua con GPR y radargrama superpuestos.

En cuanto a la estimación del contenido de agua, el cálculo realizado con GPR mostró una alta correlación con las mediciones directas. Proponemos que este hecho se debe a la alta resolución espacial del GPR en la zona superficial del suelo, donde los reflectores son más nítidos y consistentes, lo que reduce la incertidumbre en la interpretación y en el cálculo del contenido de agua. Por tanto, el GPR es una herramienta eficiente para cuantificar el contenido de agua en los primeros centímetros del suelo.

Sin embargo, la interpretación, requerida para cuantificar el contenido de agua, a profundidad es susceptible de mostrar más de un escenario de interpretación y además es una generalización mucho mayor a la que se puede hacer con resistividad (Figura 26). No tenemos datos para comprobarlo porque no tenemos muestras a profundidad, pero sugerimos que el método de determinación de la velocidad usado para el cálculo del contenido de agua con GPR en este estudio, a profundidades mayores a los primeros centímetros es susceptible de verificarse en un estudio posterior.

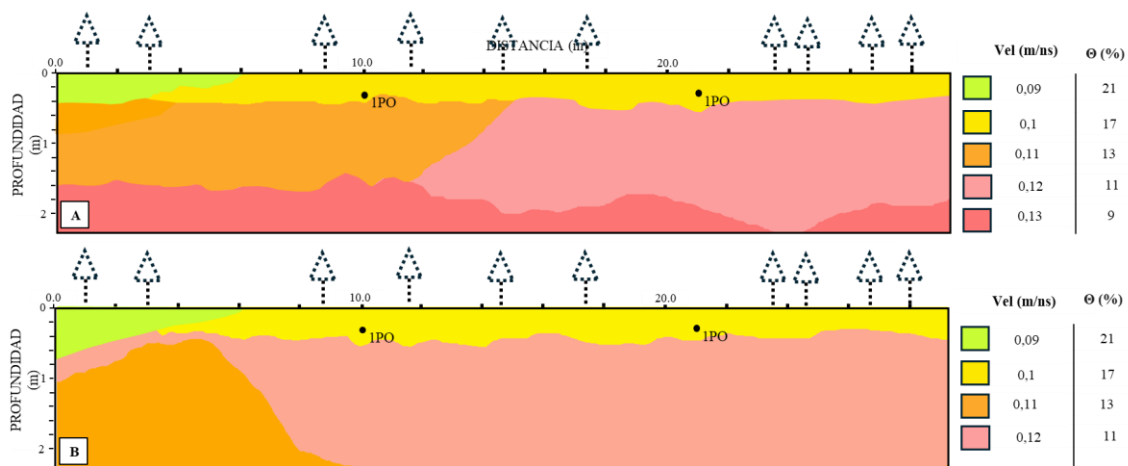


Figura 26. Dos diferentes modelos de contenido de agua en el pino Oocarpa obtenidos de diferentes interpretaciones de la señal del GPR. **A)** Interpretación 1. **B)** Interpretación 2. Los triángulos representan pinos mapeados a lo largo de la transecta.

CONCLUSIONES

- Se implementó un plan de mediciones e inversión geofísica multitemporal de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y GPR que permitió la caracterización del contenido de agua del suelo y sus variaciones espaciales y temporales en suelos bajo plantaciones de pino y bosque nativo.
- Los suelos del bosque nativo presentaron mayor capacidad de infiltración y retención de agua, atribuibles a la ausencia de barreras superficiales y a su textura más arcillosa.
- Los cultivos de pino mostraron un impacto significativo en la dinámica del agua en el suelo, con una capacidad de infiltración más limitada y una distribución de la humedad más restringida espacial y temporalmente. Este comportamiento podría estar influenciado por el dosel arbóreo y la acumulación de acículas en la superficie del suelo.

- En las parcelas con cultivos adicionales, como el Pino Pátula y el café, las intervenciones agrícolas como el riego y el arado incrementaron la infiltración y mejoraron la distribución del contenido de agua.
- La falta de datos geoquímicos detallados del bosque nativo, la baja resolución del GPR y las diferencias en el error RMS en las tomografías limitaron la comparación precisa entre fechas. Esto resalta la necesidad de futuros estudios con mayor control en los parámetros de medición y una caracterización química más completa.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), por brindarme los recursos académicos, científicos y técnicos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

A los profesores de la Escuela de Física, la Escuela de Geología y al programa de Maestría en Geofísica por su orientación y compromiso con la excelencia académica.

A la profesora Rocío Bernal, por su apoyo constante y guía durante el desarrollo de este proyecto.

A la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP) y a su programa del Fondo Corrigan por el apoyo brindado. Su respaldo ha sido fundamental para lograr los objetivos propuestos en este proyecto.

A mi familia (Andrés, Luna, Doris y Daniel) y amigos, quienes fueron un pilar de apoyo emocional y motivación constante durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- Algeo, J., Van Dam, R. L., & Slater, L. (2016). Early-Time GPR: A method to monitor spatial variations in soil water content during irrigation in clay soils. *Vadose Zone Journal*, 15(11), 1-9.
- Allred, B., Daniels, J.J., & Ehsani, M.R. (Eds.). (2008). *Handbook of Agricultural Geophysics* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420019353>
- Ansaloni, R., & Chacón, G. (2003). Interacción suelo, vegetación y agua: el efecto de las plantaciones de pino en ecosistemas altoandinos del Azuay y Cañar. *Revista de la Universidad del Azuay*, 31, 166-173.
- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers/Petroleum Division* 146, 54– 62.
- Auerswald, K., Simon, S., y Stanjek, H., "Influence of Soil Properties on Electrical Conductivity under Humid Water Regimes," *Soil Science*, vol. 166, 2001, pp. 382–390.
- Besson A., Cousin I., Bourennane H., Nicoullaud B., Pasquier C., Richard G., King D. (2009). The spatial and temporal organisation of the soil water content at field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science* (accepted).
- Brillante, L., Mathieu, O., Bois, B., Van Leeuwen, C., & Lévêque, J. (2015). The use of soil electrical resistivity to monitor plant and soil water relationships in vineyards. *Soil*, 1(1), 273-286.
- Comisión Colombiana del Océano (CCO). (2024). Fenómeno El Niño y La Niña: Impactos climáticos en Colombia. Recuperado de: <https://www.cco.gov.co>
- Dafonte, J., Raposo, J. R., Valcárcel, M., Fandiño, M., Martínez, E. M., Rey, B. J., & Cancela, J. J. (2013). Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*, 11, 55-67.
- Fioroni, F., Soto Mancilla, M., Fernández, N. V., & Carron, A. I. (2021). LOS PINOS Y SUS EFECTOS INVISIBLES. Desde La Patagonia. *Difundiendo Saberes*, 17(30), 40.
- GIRALDO, L., Luis G (1992). Balance hidrico en dos microcuencas de Piedras Blancas, Antioquia y efecto de tres coberturas vegetales sobre la humedad del suelo. Medellín. 131 p. Tesis (Magíster Scientiae en Silvicultura y Manejo de Bosques). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Grandjean, G; I. Cousin, I.; M. Seger; J. Thiesson; S. Lambot; B. van Wesemael; A. Stevens; K. Samyn; A. Bitri; S. Bernardi. (2009). From geophysical parameters to soil characteristics. FP7-DIGISOIL-D2.1.2009. hal-02824942. Report.
- Hillel, D. (2003). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Burlington. Elsevier Science & Technology. 9780123486554. 10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X. Book.

Huber, A., & Trecaman, R. (2000). Efecto de una plantación de *Pinus radiata* en la distribución espacial del contenido de agua del suelo. *Bosque*, 21(1), 37-44.

Huber, A., Iroumé, A., & Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(1), 142-148.

Huisman, J. A., Hubbard, S. S., Redman, J. D., & Annan, A. P. (2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. *Vadose zone journal*, 2(4), 476-491.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (n.d.). Datos Hidrometeorológicos - Atención al ciudadano. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

León-Gamboa, A. L., Ramos, C., & García, M. R. (2010). Efecto de plantaciones de pino en la artropofauna del suelo de un bosque Altoandino. *Revista de Biología Tropical*, 58(3), 1031-1048.

Loke, M. H. (2010). Res2dinv ver. 3.59 for windows xp/vista/7.

Lowrie, W. (2007). Earth's age, thermal and electrical properties. In *Fundamentals of Geophysics* (pp. 207–280). chapter, Cambridge: Cambridge University Press.

Michot, D., Y. Benderitter, A. Dorigny, B. Nicoullaud, D. King and A. Tabbagh (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using electrical resistivity tomography, *Water Resour. Res.* 39 (2003), p. 1138.

Osman, K. T. (2013). *Soils Principles, Properties and Management*. Dordrecht. Springer Netherlands.1. Aufl. 9400756623. 10.1007/978-94-007-5663-2.

Ordóñez, L. A. Y. (2022). Humedad y almacenamiento de agua en el suelo en cuatro tipos de cobertura vegetal. *Revista Ciencia y Tecnología*, 15(1), 19-24.

Rinaldi, V. A., & Cuestas, G. A. (2002). Ohmic conductivity of a compacted silty clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), 824-835.

Rodríguez-Robles, U., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Ramos-Leal, J. A., & Yépez, E. A. (2017). Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences*, 14(23), 5343-5357.

Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T, & Or, D. (2019). A review of geophysical methods for soil structure characterization. *Reviews of Geophysics*, 56, 672–697. <https://doi.org/10.1029/2018RG00061>. Journal Article.

Shah, P. H., & Singh, D. N. (2005). Generalized Archie's law for estimation of soil electrical conductivity. *Journal of ASTM International*, 2(5), JAI13087.

Schwartz, B. F., Schreiber, M. E., & Yan, T. (2008). Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 362(3-4), 234-246.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16 (3), 574–582.

Turesson, A. (2006). Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, 58(2), 99-111.

Van Overmeeren, R. A., Sariowan, S. V., & Gehrels, J. C. (1997). Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 316-338.

Vanella, D., J. M. Ramírez-Cuesta; G. Longo-Minnolo; D. Longo; A. D'Emilio; S. Consoli" (2023). Identifying soil-plant interactions in a mixed-age orange orchard using electrical resistivity imaging. *Plant and Soil*. 483. 1. 181-197. 2023/02/01. 1573-5036. 10.1007/s11104-022-05733-6.

Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., & Gómez, E. (1973). Mapa geológico de Colombia cuadrángulo H-12 Bucaramanga Planchas 109 Rionegro-120 Bucaramanga Cuadrángulo H-13 Pamplona Planchas 110 Pamplona-121cerrito. Ministerio de Minas y Energía Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas, Colombia.