

Detección de salinidad con técnicas no invasivas en suelos cultivados con plátano *Musa acuminata* Escuintla, Guatemala.

Non-Invasive Salinity Detection Techniques in *Musa acuminata* (Banana) Crops in Escuintla, Guatemala

Monica Carolina Ordoñez Lemus¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9914-8121>

Felix Rocael Martínez Gómez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5778-1838>

Hugo Antonio Tobias Vásquez², ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1522-0973>

¹ Estudiante de Posgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

² Docente en Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

E-mail autor/a de correspondencia: monica.lemus8@gmail.com

Ordoñez Lemus, M.C; Martínez Gómez, F.R; Vásquez, H.A.T. (2026). Detección de salinidad con técnicas no invasivas en suelos cultivados con plátano *Musa acuminata* Escuintla, Guatemala. *Revista Estudios Ambientales*, 16 (1), 86-109.

Recibido: 03/04/2026 - **Aceptado:** 16/05/2026 – **Publicado:** 24/07/2026

RESUMEN

La salinidad del suelo representa un reto por la degradación que afecta la funcionalidad edáfica y la productividad de cultivos tropicales. Se evaluó la salinidad del suelo mediante la integración de métodos convencionales y no invasivos en un sistema de cultivo de plátano *Musa acuminata* en Masagua, Escuintla. Se aplicaron dos tomografías de resistividad eléctrica (TRE-01 y TRE-02), complementadas con mediciones de conductividad eléctrica *in situ* y análisis de laboratorio. Se realizaron análisis comparativos y correlacionales entre métodos para determinar el coeficiente de R², RMSE y análisis de concordancia. Los valores de conductividad eléctrica en laboratorio oscilaron entre 1.31 y 4.85 dS/m en TRE-01, mientras que en campo variaron entre 0.19 y 0.95 dS/m, se demuestra subestimación sistemática del método directo *in situ* respecto al laboratorio. La tomografía eléctrica presentó valores entre 0.79–1.71 dS/m. Se identificó una distribución vertical heterogénea, con mayores concentraciones de sales en los primeros 40 cm y disminución a partir de 1.0 m. En TRE-02, los valores de laboratorio (≈2.99–3.64 dS/m) confirmaron salinidad moderada. La relación inversa entre resistividad y conductividad fue consistente; sin embargo, el ajuste estadístico

presentó dispersión, indicando influencia de otras variables edáficas adicionales *in situ* que pudieron alterar los datos. La tomografía de resistividad eléctrica permite caracterizar la variabilidad espacial y vertical de la salinidad, pero subestima los datos lo que requiere calibración con datos de laboratorio para mejorar su precisión.

PALABRAS CLAVE: suelo, resistividad eléctrica, conductividad eléctrica, escuintla, tomografía eléctrica.

ABSTRACT

Soil salinity represents a challenge due to the degradation that affects edaphic functionality and the productivity of tropical crops. Soil salinity was evaluated through the integration of conventional and non-invasive methods in a Musa acuminata banana cropping system in Masagua, Escuintla. Two electrical resistivity tomography surveys (ERT-01 and ERT-02) were applied, complemented with in situ electrical conductivity measurements and laboratory analyses. Comparative and correlational analyses were performed between methods to determine the R^2 coefficient, RMSE, and concordance analysis. Laboratory electrical conductivity values ranged between 1.31 and 4.85 dS/m for ERT-01, while field values varied between 0.19 and 0.95 dS/m, demonstrating a systematic underestimation of the direct in situ method compared to laboratory analysis. Electrical tomography presented values between 0.79–1.71 dS/m. A heterogeneous vertical distribution was identified, with higher salt concentrations in the first 40 cm and a decrease from 1.0 m depth. In ERT-02, laboratory values (≈ 2.99 –3.64 dS/m) confirmed moderate salinity. The inverse relationship between resistivity and conductivity was consistent; however, the statistical fit showed dispersion, indicating the influence of additional in situ edaphic variables that may have altered the data. Electrical resistivity tomography allows characterization of the spatial and vertical variability of salinity, but it underestimates the data, requiring calibration with laboratory data to improve its accuracy.

KEYWORDS: soil, electrical resistivity, electrical conductivity, escuintla, electrical tomography.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende en gran medida de la calidad del suelo, que está determinada por la

interacción de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La variabilidad espacial de estas propiedades es un gran desafío para su caracterización y gestión, especialmente en sistemas intensivos

donde los procesos de degradación pueden ser heterogéneos (García, 2014). La salinización del suelo es una de las limitaciones más importantes a la productividad agrícola en las zonas tropicales en este caso Guatemala.

El problema es que la acumulación de sales solubles en el perfil del suelo altera el potencial osmótico del suelo, reduce la disponibilidad de agua para las plantas y crea desequilibrios nutricionales, afectando el crecimiento y rendimiento de cultivos sensibles como el plátano (*Musa acuminata*) (Zapata, 2022). Este fenómeno suele verse alterado por prácticas agrícolas inadecuadas como el uso excesivo de fertilizantes y deficiencias de drenaje, así como por condiciones ambientales que favorecen la evaporación y la acumulación de sales en la superficie (Vithanage, 2014; Londoño, 2016).

Este estudio se llevó a cabo en la finca Banamar S.A., en el municipio de Masagua, Escuintla, Guatemala, dentro de la llanura costera del Pacífico. El área corresponde a bosque seco tropical, caracterizado por periodos de déficit hídrico que favorecen procesos de evaporación y acumulación de sales en el suelo. Por lo general, los suelos predominantes son de origen aluvial volcánico, con alta variabilidad textural y condiciones de drenaje que pueden facilitar la redistribución vertical de sales (Figura, 1).

En esta zona se han reportado valores de conductividad superiores a 6 dS/m, lo que indica condiciones de salinidad que pueden amenazar la sostenibilidad del sistema productivo. Sin embargo, la información disponible sobre la distribución espacial y vertical de la salinidad es limitada, lo que dificulta la implementación de estrategias de gestión. Tradicionalmente, la evaluación de la salinidad del suelo se ha basado en métodos directos utilizando muestras aleatorias y análisis de laboratorio. Aunque, estos métodos ofrecen alta precisión, presentan limitaciones en

términos de costo, tiempo y representatividad espacial (García, 2014). Desde un punto de vista teórico, la evaluación indirecta de la salinidad se basa en la relación entre las propiedades eléctricas del suelo, especialmente la resistencia eléctrica (ρ) y su conductividad eléctrica inversa (σ), la cual depende del contenido de humedad, textura y concentración de sales disueltas (Hernández, 2019; López, 2019).

En este contexto, la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) ha surgido como una técnica no invasiva para obtener imágenes del subsuelo a partir de la distribución espacial de la resistividad (es decir, la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica). En el suelo, este parámetro varía según la textura, el contenido de agua y las sales solubles, permitiendo distinguir horizontes y condiciones edáficas sin necesidad de excavar (Loke, 2013; Samouëlian et al., 2005).

La TRE funciona inyectando corriente eléctrica en el terreno mediante electrodos y midiendo las diferencias de potencial generadas; a partir de múltiples combinaciones de inyección y medición, se construye una imagen bidimensional de la distribución de resistividades en el subsuelo. Esta técnica ha demostrado su utilidad para caracterizar perfiles de suelo y determinar variaciones espaciales de las propiedades del suelo, proporcionando información continua en profundidad y alta resolución espacial. Por ejemplo, el estudio de García (2014) reportó correlaciones significativas entre la conductividad eléctrica y las propiedades del suelo, mientras que Castillo (2017) identificó horizontes edáficos utilizando perfiles de resistividad.

Asimismo, Hernández-Ramos (2019) demostró que este método permite una caracterización de alta resolución en comparación con los métodos convencionales. Sin embargo, todavía existen limitaciones relacionadas con la calibración de los datos y la precisión de las estimaciones implícitas. Además

Guatemala no cuenta con ningún estudio piloto o a puesto aprueba de tomografías de resistividad eléctrica para ver qué tan útil puede ser esta tecnología.

En los sistemas de producción agrícola, la aplicación de métodos geofísicos aún es

limitada, especialmente en Guatemala, donde su uso se centra principalmente en estudios geológicos. Por lo tanto, existen vacíos en la integración de estos métodos para la evaluación de la salinidad del suelo en los sistemas de producción.

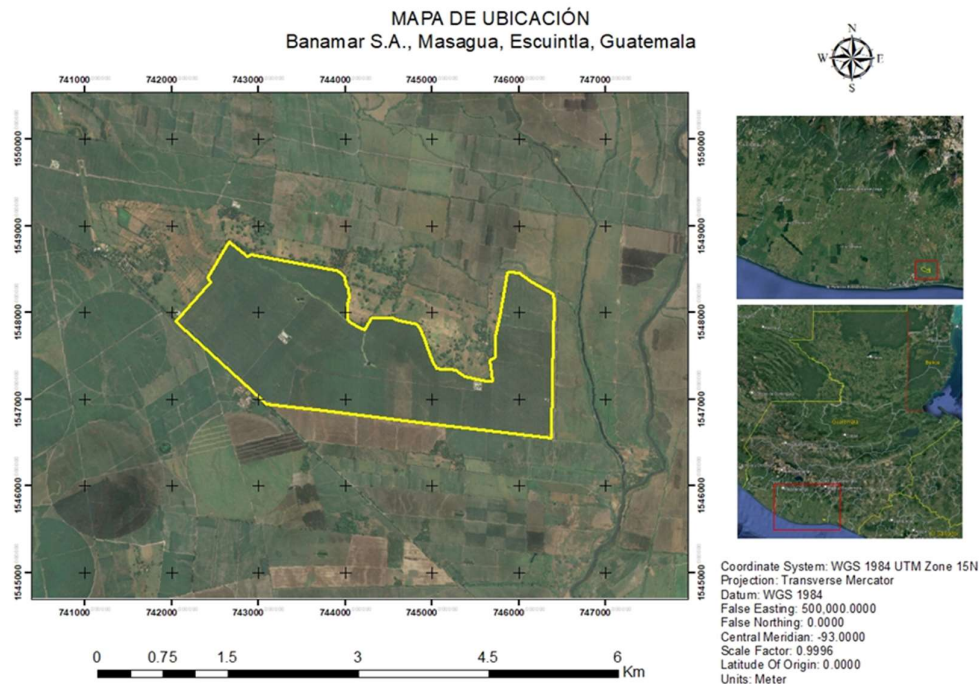


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio
 Fuente: elaboración propia con apoyo del software QGIS (V.3.40.6)

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la salinidad del suelo integrando métodos tradicionales (campo y laboratorio) y no invasivos (TRE) en un sistema de producción bananera en Masagua, Escuintla.

Se supone que la resistividad eléctrica tiene una relación inversa significativa con la conductividad eléctrica del suelo, lo que permite una estimación indirecta de la salinidad; sin embargo, su precisión depende de los procesos de calibración con datos de laboratorio.

De modo que se busca interpretar y explorar la viabilidad de la TRE para evaluar la salinidad en suelos cultivados con plátano, partiendo de que: (i) se puede

determinar la concentración de sales a diferentes profundidades (hasta 1.0 m) por medio de TRE, conductímetro de campo y análisis de laboratorio; (ii) establecer el ajuste estadístico entre la concentración de sales obtenida por métodos no invasivos, de campo y de laboratorio (iii) realizar la comparación espacial de la salinidad.

Partiendo de la hipótesis nula (H_0) de que no existe una relación estadísticamente significativa entre los valores de salinidad obtenidos mediante TRE, conductímetro y análisis de laboratorio, y que las técnicas no invasivas no identifican adecuadamente las zonas de alta salinidad.

METODOLOGÍA

El área de estudio se realizó dentro de las parcelas de cultivo de plátano *Musa acuminata* en la planta Banamar II, de la empresa Banamar S.A., ubicada en el kilómetro 93.5 de la carretera CA-09, ruta a Puerto Quetzal, Masagua, Escuintla, Guatemala. La finca posee una extensión total de 5.27 km²; sin embargo, el trabajo de campo se concentró en dos parcelas experimentales de 5 hectáreas cada una. En cada parcela se estableció una línea de tomografía eléctrica de 20 m de longitud, con muestreo directo en los 5 y 15 m, lo que permitió obtener un total de 40 muestras de suelo (20 por parcela) incluyendo los análisis de laboratorio.

Para la evaluación de la salinidad se emplearon tres métodos de medición: (i) TRE (tomografía de resistividad eléctrica), como técnica no invasiva indirecta; (ii) Campo, mediante conductímetro portátil para mediciones directas *in situ*; y (iii) Laboratorio (LAB).

Se seleccionó el arreglo polo-dipolo porque en teoría, esta configuración posibilita llegar a profundidades de exploración más grandes manteniendo la misma separación entre electrodos, en contraste con configuraciones como Wenner o dipolo-dipolo (Reynolds, 2011). Además, da una resolución vertical adaptada para distinguir y reconocer los horizontes superficiales del suelo, se piensa que su rendimiento se ve menos afectado por las fluctuaciones en la resistencia de contacto entre los electrodos y el suelo, lo cual es

común en zonas como las plantaciones de bananos. La idea es usar un nuevo método para buscarle posibilidad de aplicación mas en el contexto de Guatemala que es casi nula la información técnica generada.

Tomografía de resistividad eléctrica

Los datos de las tomografías de resistividad eléctrica fueron determinados por medio de un Resistivímetro (ABEM SAS 1000 Fabricación Sueca), además de toma de datos en campo de manera directa, por medio de un Conductivímetro (Hanna Soil Test HI98331) y, posteriormente, se recolectaron muestras de suelo y fueron llevadas al laboratorio para su análisis como la lo recomienda la metodología de Hernández (2019).

La tomografía de resistividad eléctrica funciona inyectando corriente eléctrica en el terreno a través de cuatro electrodos: dos emisores de corriente (A y B) y dos receptores de potencial (M y N), entre los cuales se midió simultáneamente la diferencia de voltaje (ΔV). Los cambios en la resistividad eléctrica del subsuelo se infieren a partir de las mediciones de voltaje y la configuración geométrica de los electrodos (Barrera, 2015).

Para la ejecución del levantamiento geofísico, se determinó la resistividad aparente (ρ_a), definida como la oposición que presenta un cuerpo al flujo de corriente eléctrica, expresada en ohmio-metro ($\Omega \cdot m$); (Reynolds, 2011), se obtiene mediante la relación de la ecuación 1:

$$\rho_a = 2\pi \cdot a \cdot n \cdot (n+1) \cdot \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad \text{Ecuación (1).}$$

Donde:

$2\pi \cdot a \cdot n \cdot (n+1)$ = constituye el factor geométrico (K) derivado del arreglo de electrodos;

a = representa la separación básica entre electrodos y

n = el factor de expansión de profundidad.

Los componentes eléctricos de la fórmula corresponden a la diferencia de potencial (ΔV), medida en voltios, y la intensidad de corriente (I) inyectada en amperios, siendo

la conductividad eléctrica ($\sigma = S/m = \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) el inverso matemático de dicha resistencia específica del terreno.

Para realizar la TRE se utilizó el arreglo Polo-Dipolo. Paralelamente al levantamiento geofísico, se realizó un muestreo directo *in situ* en cada línea de tomografía. En cada una de las dos líneas (TRE-01 y TRE-02), se establecieron dos puntos de muestreo ubicados a los 5 m y 15 m de longitud del perfil.

En cada punto, se extrajeron muestras de suelo cada 10 cm de profundidad hasta alcanzar 1.0 m, lo que resultó en 10 muestras por punto, 20 muestras por línea y un total de 40 muestras para ambas tomografías. En cada profundidad se midió la conductividad eléctrica directamente en el campo con el conductímetro portátil y se recolectó la muestra para su posterior análisis de laboratorio.

Etapa de laboratorio

Se realizó un muestreo puntual directo a cada 10 cm, hasta alcanzar la profundidad de 1.0 m, para cada tomografía eléctrica (homologando las 20 muestras por tendido eléctrico).

Para la preparación de las muestras de suelo destinadas a la medición de conductividad eléctrica en laboratorio, se siguieron dos protocolos. Para la prueba rápida inicial, se utilizó la relación suelo: agua 1:5, diluyendo una parte de suelo con cinco partes de agua destilada.

Para las muestras que presentaron valores de salinidad relevantes, se realizó el análisis de extracto de pasta saturada con el objetivo de obtener una evaluación más precisa de la salinidad del suelo y su relación con las condiciones de campo.

Este procedimiento consistió en: (i) colocar la muestra compuesta de suelo en un recipiente de aproximadamente un litro; (ii) agregar aproximadamente 5 gotas de

extractante por cada 10 g de suelo; (iii) incorporar agua desionizada hasta que esta apenas cubriera la superficie del suelo; (iv) mezclar durante un minuto y dejar reposar la mezcla durante al menos 5 minutos para garantizar el equilibrio entre la fase sólida y la solución; y (v) extraer el extracto mediante filtración con papel de filtro o lisímetro para su posterior análisis de conductividad eléctrica (Agro, 2003).

El equipo utilizado para cuantificar la conductividad eléctrica del suelo es un sensor no invasivo que integra un sistema para análisis geo eléctrico marca ABEM, de fabricación sueca (Figura, 2). Fuente de poder de 45V, 90V, 180V y 270V. Cables para la conducción de la energía eléctrica proveniente de la fuente de poder con una extensión máxima de 750 m por ala. Electrodo de corriente (AB). Electrodo de potencial (MN).

Análisis de la información

Con los datos de resistividad y conductividad eléctrica, se realizó una inversión de resistividad aparente de campo con el software Res2dinvx64. Para el análisis post proceso se realizó con Surfer V16, y con ello, se evaluó la distribución lateral y vertical de cada dato de conductividad eléctrica. Los mapas se realizaron con el software ArcMap 10.5.

El levantamiento geofísico de la diferencia de potencial (ΔV) generada por la inyección de corriente controlada de la resistividad aparente fueron procesados en RES2DINV mediante inversión numérica, obteniendo modelos bidimensionales de resistividad real (ρ) y espesores de capa (h). Permitiendo generar tomografías eléctricas



Figura 2. Resistivímetro ABEM SAS 1000, para el levantamiento de la tomografía de resistividad eléctrica.
Fuente: Equipo propio utilizado.

Transmisor

Automático o intensidades seleccionables por el usuario	0,2 0,5 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 mA
Tensión de excitación (máx.)	400 V (800 V pico a pico)
Efecto salida, max	100 W
Exactitud de intensidad transmitida	Mejor que 0,5%, medido a 100 mA
Longitud del impulso de corriente	0,1 seg a 4 seg
Tipo de ciclo en modo resistividad	más –menos –menos –más (C. C. conmutada)
Tipo de ciclo en modo IP	más –cero –menos –cero (corriente continua conmutada)

Receptor

Potencial espontáneo (SP)

Número de canales de entrada	4, aislados galvánicamente (SAS 1000 sólo un canal)
Impedancia de entrada	10 M Ω , min
Rango automático	± 250 mV, ± 10 V, ± 400 V
Resolución (teórica)	± 30 nV (a 8 seg de tiempo de integración)
Exactitud (a 1 seg de integración)	Mejor que 0,5% medido a 100 mV, 1,5 V y 100 V
Precisión (a 1 seg de integración)	Mejor que 0,2% medido a 100 mV, 1,5 V y 100 V
Rango dinámico	hasta 140 dB más 64 dB de incremento automático

Resistividad

Número de canales de entrada	4, aislados galvánicamente (SAS 1000 sólo un canal)
Impedancia de entrada	10 M Ω , min
Rango automático	± 250 mV, ± 10 V, ± 400 V
Resolución (teórica)	± 30 nV
Exactitud $\Delta V/I$ (a 0,5 seg de integración)	Mejor que 1% medido a 1 Ω , desde 1 mA a 1000 mA
Precisión $\Delta V/I$ (a 0,5 seg de integración)	Típicamente mejor que el 0,5%
Rango dinámico	Hasta 140 dB más 64 dB de incremento automático

Polarización Inducida (IP)

Número de canales de entrada	4, aislados galvánicamente (SAS 1000 sólo un canal)
Impedancia de entrada	10 M Ω , min
Rango automático	± 250 mV, ± 10 V, ± 400 V
Resolución (teórica)	± 30 nV
Tipo de mediciones de IP	Capacidad carga dominio tiempo (M) medida en mseg
Retardo temporal inicial	10 ms hasta 10 seg en pasos de 10 ms
Número de intervalos de tiempo IP	1 – 10 ventanas temporales definidas por usuario en todos los canales
Intervalo básico de integración	20 mseg o 16,67 mseg dependiendo de la frecuencia de la línea eléctrica.
Rango dinámico	Hasta 140 dB más 64 dB de incremento automático

Figura 3. Especificaciones técnicas del equipo utilizado Terrametro SAS 4000/1000 y SAS log 200.

Fuente: Equipo propio utilizado.

Cordancia por Bland-Altman

La intención es verificar la cuantificación del sesgo sistemático (Bias) y los límites de acuerdo (Limits of Agreement, LoA) al 95 %. Se determinó el sesgo sistemático (Bias). Para ajustar y cuantificar la exactitud de los sensores de campo y la

TRE respecto al estándar de laboratorio, el sesgo se calculó como el promedio de las diferencias entre el método evaluado (M_i) y la referencia (R_i). La fórmula se basa en el principio modelación en reducción y ajuste de la varianza propuesto por Dunn y Shultis (2023), lo que nace la Ecuación 2:

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - R_i) \quad \text{Ecuacion (2)}$$

Donde:

M_i (método evaluado)= representa el valor de conductividad eléctrica medido por el sensor de campo o la tre para la observación i .

R_i (referencia)= es el valor de conductividad eléctrica obtenido mediante el estándar de laboratorio (extracto de saturación) para la misma observación i .

n = es el número total de muestras analizadas ($n=40$ para el análisis global).

Se establecieron los Límites de Acuerdo (LoA) al 95 % de confianza, definidos por el sesgo ± 1.96 veces la desviación estándar de las diferencias (SDdif). Los límites (Tabla, 1) permiten identificar el rango de dispersión del error y la presencia de valores atípicos en las mediciones.

las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$ (Cabrera, 2012). Los valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 2. Este estadístico normaliza el error cuadrático medio respecto a la varianza de los datos de referencia presentados en la ecuación 3

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

Se realizó la eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), que mide cuánto de la variabilidad de :

$$E = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \right]$$

Donde:

R_i = valor observado en el laboratorio para el punto i .

M_i = valor simulado o medido por el sensor de campo o tre para el punto i .

$\bar{R}$ = es el promedio aritmético de todos los valores de conductividad eléctrica registrados por el laboratorio en el perfil analizado.

Numerador $\sum (r_i - m_i)^2$ = representa la varianza residual o el error acumulado del sensor respecto a la referencia.

Denominador $\sum (r_i - \bar{r})^2$ = representa la variabilidad natural de los datos de laboratorio

Tabla 1. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Criterios de referencias tomados del trabajo de Molnar (2011).

Se evaluó el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio raíz (RMSE) y la relación de desviación de rendimiento (RPD). Se divide en tres niveles denominados clase A ($RPD > 2.0$), clase B ($1.40 \leq RPD \leq 2.0$) y clase C ($RPD < 1.40$), (Zhao et al., 2022).

El análisis se realizó en R para el estadístico comparativo y correlacional, utilizando las librerías “Stats”, “ggplo2”, “dplyr”, “tidyr”, “cowplot” para poder evaluar la fuerza de la relación lineal entre las variables (R-Core Team, 2025).

RESULTADOS

Tomografías

Se obtuvieron perfiles de resistividad mediante dos líneas de tomografía eléctrica de 20 m de longitud, con un

alcance de exploración efectivo de 1.5 m de profundidad (Figura, 4). A partir de esta prospección, se consolidó una base de datos vertical mediante el muestreo sistemático en los 5 y 15 m de cada trayectoria, recuperando núcleos de suelo cada 10 cm hasta alcanzar una profundidad de 1.0 m.

Este procedimiento facilitó la captura pareada de la conductividad eléctrica medida *in situ* y la preservación de estratos para su posterior validación analítica en condiciones de laboratorio para las muestras correspondientes a TRE-01 y M2 para las muestras correspondientes a TRE-02 (Figura, 5), como marco de referencia para el análisis de correlación entre los métodos de campo y los estándares químicos.

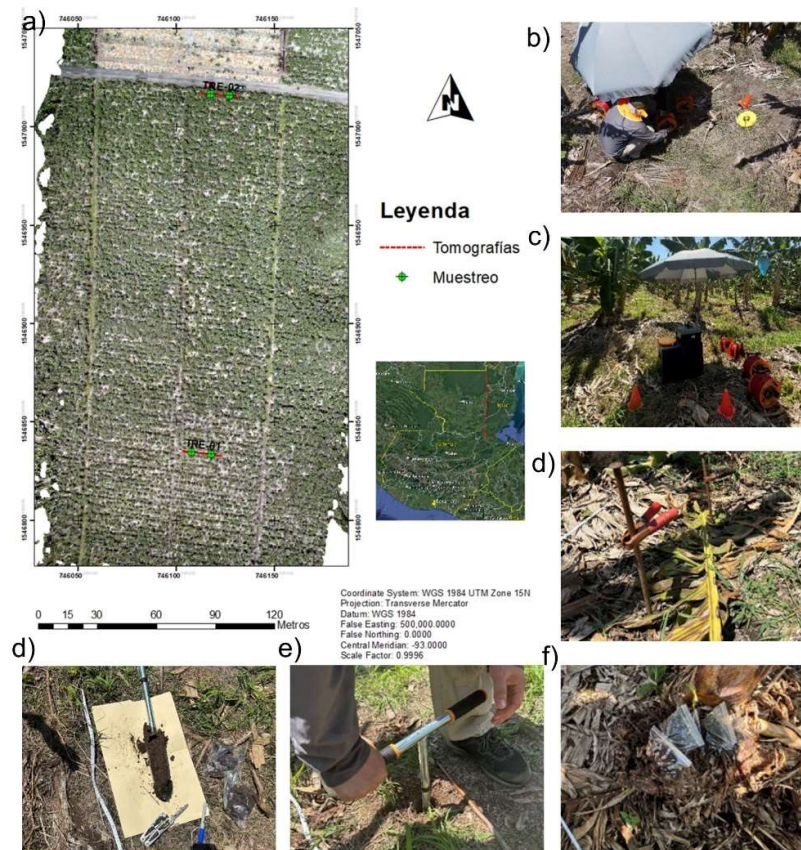


Figura 4. Representación espacial y operativa de la fase de campo; a) se detalla la ubicación geográfica de las líneas de tomografía eléctrica (TRE) y los puntos de muestreo sobre la ortofoto tomada con drone en el área de estudio; b) instalación del equipo y configuración

inicial; c) ejecución del levantamiento de la línea TRE-02; d) detalle de la conexión de electrodos; e) obtención de núcleos de suelo mediante barreno holandés; f) toma de datos de conductividad eléctrica in situ; y g) almacenamiento y sellado de muestras de suelo para el análisis comparativo en laboratorio

Fuente: Elaboración propia de datos copilados en campo.

Análisis de Suelo por TRE 01 y TRE 02

Se observa que en el perfil de TRE 01, que el pH es básico con rangos que van de 6.87, variando con forme la profundidad aumenta, hasta llegar a rangos de pH de 8.24 (Tabla, 2), lo que podría deberse a la concentración de iones solubles (Ca: 13.12–69.04 mg/kg; Mg: 15.95–119.53 mg/kg; Na: 0.07–0.37 meq/100g). El arreglo polo-dipolo, con su función de sensibilidad asimétrica, discrimina eficientemente variaciones laterales, pero subestima la resolución vertical; en perfiles con estratificación química variable, como el observado, los límites de

horizontes alterados geoquímicamente se difuminan en las secciones pseudotransversales.

Los picos de azufre (61.6 mg/kg aumentando a partir de los 15 m 92.86 mg/kg) a distintas profundidades del muestreo (5 m vs. 15 m) introducen variaciones en la resistividad aparente que la inversión convencional atribuye a interfaces inexistentes. La coexistencia de óxidos férricos (Fe: 17.23–61.6 mg/kg) y condiciones redox pueden afectar la actividad y puede influir en la respuesta de la conductividad eléctrica, debido a que estas fases modulan la conductividad del medio poroso de manera no lineal.

Tabla 2. Resultados de laboratorio de propiedades químicas de suelos para TRE-01 en los perfiles 5 a 15 m

ID	Profundidad (cm)	pH	mg/Kg												(dS/m)
			P	K	Ca	Mg	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S		
TRE 01 5 m	0 - 10	7.67	2.66	31.89	63.7	64.92	119.53	0.28	0.036	0.017	0.01	0.038	41.95	4.47	
	10 - 20	7.3	2.69	15.5	43.11	48.66	86.35	0.29	0.032	0.02	0.01	0.044	46.66	2.51	
	20 - 30	7.45	3.29	70.94	38.55	33.99	58.44	0.27	0.052	0.015	0.01	0.044	48.77	3.65	
	30 - 40	7.44	1.92	18.25	69.04	67.15	102.84	0.23	0.008	0.013	0.06	0.041	61.6	4.03	
	40 - 50	7.02	2.03	13.54	43.49	41.19	84.52	0.28	0.035	0.014	0.01	0.041	57.63	2.61	
	50 - 60	7.25	1.59	8.35	40.74	41.75	79.5	0.26	0.018	0.01	0.01	0.044	38.1	2.82	
	60 - 70	6.87	1.62	6.21	15.95	18.69	54.77	0.23	0.02	0.009	0.01	0.037	34.73	1.85	
	70 - 80	7.74	2.66	7.71	18.65	23.9	104.19	0.3	0.019	0.014	0.01	0.035	31.93	2.76	
	80 - 90	7.36	3.33	6.79	13.49	19.66	51.66	0.34	0.009	0.01	0.01	0.03	24.83	1.68	
	90 - 100	7.56	2.2	4.81	13.12	13.47	39.15	0.19	0.006	0.032	0.01	0.026	22.25	1.31	
TRE 01 15 m	0 - 10	7.94	3.15	92.91	55.55	48.44	91.91	0.18	0.028	0.014	0.01	0.03	39.57	4.85	
	10 - 20	8.08	2	15.98	38.37	37.19	81.08	0.2	0.022	0.013	0.001	0.02	34.81	3.08	
	20 - 30	7.57	18.49	62.39	82.59	74.5	74	0.37	0.043	0.016	0.059	0.04	92.86	4.8	
	30 - 40	7.54	2.56	21.63	33.12	32.94	44.84	0.19	0.012	0.01	0.01	0.03	27.85	2.65	
	40 - 50	7.88	2.2	20.68	30.68	28.55	42.18	0.17	0.013	0.02	0.01	0.03	25.57	2.34	
	50 - 60	7.47	2.55	13.85	34.67	36.05	56.96	0.13	0.01	0.012	0.01	0.05	28.17	2.68	
	60 - 70	7.48	3.06	7.6	20.78	22.84	56.73	0.11	0.011	0.011	0.01	0.03	24.9	1.88	
	70 - 80	7.88	1.29	9	18.05	17.82	41.71	0.09	0.005	0.015	0.012	0.03	22.23	1.86	
	80 - 90	8.24	3.36	7.58	24.5	29.07	63.5	0.16	0.009	0.017	0.01	0.03	26.83	1.9	
	90 - 100	8.11	2.54	7.04	17.14	17.43	55.89	0.07	0.013	0.013	0.01	0.03	17.23	1.75	

Se observo que en TRE 02 la estratificación química es distinta a la observada en TRE 01. El pH oscila entre 6.33 y 7.97 siendo menos básico que la tomografía 1. La conductividad eléctrica varía de 0.97 a 4.54 dS/m, con valores máximos en el horizonte superficial (4.54 dS/m), lo que podría estar asociado a sales en superficie por procesos de evaporación capilar. El sodio alcanza 113.22 mg/kg, valor comparable al máximo de TRE 01 pero con distribución más concentrada en el perfil superior (Tabla, 3). El calcio muestra una tendencia decreciente con la profundidad en ambos puntos de muestreo, de 62.13–78.94 mg/kg en superficie, y de 9.02–11.85 mg/kg a los 90–100 cm, podrían estar

asociados a lixiviación diferencial o acumulación de carbonatos en capas intermedias.

El azufre presenta un comportamiento diferente a TRE 01, los valores aumentan de 24.05 mg/kg (0–10 cm) a 38.17 mg/kg (30–40 cm) en los primeros 50 cm de horizonte y empieza a caer en rangos de 7.94 mg/kg a partir de 1 m, contrastante con el subsuelo enriquecido de TRE 01, por lo general es más asociados a enmiendas agrícolas. El hierro es mayor a partir de 1.0 m de profundidad con 0.356 mg/kg siendo, diez veces superior al resto del perfil, indicando acumulación de óxidos férricos o posible influencia del nivel freático.

Tabla 3. Resultados de laboratorio de propiedades químicas de suelos para TRE-01 en los perfiles 5 a 15 m

ID	Profundidad (cm)	pH	mg/Kg											(dS/m)
			P	K	Ca	Mg	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S	
TRE 02 5 m	0 - 10	7.91	1.15	6.6	62.13	36.21	101.92	0.14	0.012	0.019	0.01	0.036	24.05	3.64
	10 - 20	7.87	1.75	4.45	55.35	32.31	76.99	0.13	0.005	0.015	0.01	0.024	28.37	2.99
	20 - 30	7.74	1.41	4.1	73.77	40.82	61.57	0.12	0.007	0.018	0.002	0.033	37.71	3.12
	30 - 40	7.84	1.22	3.27	65.16	37.67	46.38	0.12	0.002	0.013	0.01	0.036	38.17	2.79
	40 - 50	7.73	1.82	2.96	60.9	37.89	52.94	0.13	0.007	0.014	0.01	0.032	34.63	2.81
	50 - 60	7.29	0.99	2.97	38.86	26.07	51.36	0.09	0.003	0.013	0.003	0.031	26.46	2.43
	60 - 70	7.6	1.72	6.67	45.83	32.3	69.25	0.1	0.007	0.012	0.01	0.03	24.2	2.37
	70 - 80	7.51	0.79	7.03	25.43	19.11	70.53	0.09	0.003	0.016	0.007	0.05	16.27	1.69
	80 - 90	6.33	1.48	3.28	12.02	9.71	49.67	0.1	0.011	0.016	0.01	0.037	12.22	1.26
	90 - 100	7.32	2.66	3.22	9.02	8.09	43.13	0.18	0.009	0.356	0.01	0.033	7.94	0.97
TRE 02 15 m	0 - 10	7.4	2.21	9.49	78.94	44.02	113.22	0.14	0.017	0.014	0.002	0.04	41.82	4.54
	10 - 20	7.53	1.73	6.1	81.59	45.84	78.42	0.11	0.007	0.011	0.01	0.03	31.8	4.13
	20 - 30	7.97	1.3	7.04	71.83	41.43	71.02	0.11	0.016	0.015	0.01	0.03	35.91	3.63
	30 - 40	7.33	3.01	8.05	59.07	38.16	61.57	0.13	0.011	0.011	0.005	0.03	34.41	3.27
	40 - 50	7.57	1.15	7.26	32.32	21.81	51.68	0.1	0.006	0.011	0.01	0.03	18.65	2.14
	50 - 60	7.94	102	3.25	18.36	12.91	38.45	0.09	0.008	0.018	0.005	0.04	18.61	1.4
	60 - 70	7.97	1.5	3.54	33.51	25.1	53.55	0.14	0.006	0.013	0.01	0.03	19.72	2.2
	70 - 80	7.93	2.36	3.32	12.76	20.06	48.88	0.16	0.003	0.01	0.01	0.02	18.67	1.85
	80 - 90	7.85	3.39	3.97	16.65	15.18	45.17	0.16	0.014	0.014	0.01	0.03	17.95	1.84
	90 - 100	7.15	2.8	3.97	11.85	16.58	38.8	0.3	0.013	0.018	0.01	0.05	15.78	1.04

Resistividad y conductividad eléctrica

Se muestran los perfiles de resistividad y conductividad, levantados mediante la

tomografía de resistividad eléctrica para TRE-01 se realizó la Figura, 5 y TRE-02 Figura, 6. Se muestra un bloque diagrama 3D comparativo entre ambas líneas, para visualizar las variaciones de salinidad en el suelo y subsuelo.

valores derivados de la tomografía eléctrica, conductímetro de campo y laboratorio.

De ambas modelaciones se realizó un pseudo modelo 3D (Figura, 7), combinando las 2 tomografías de resistividad y de conductividad.

Además, se muestran los valores de conductividad obtenidos mediante los

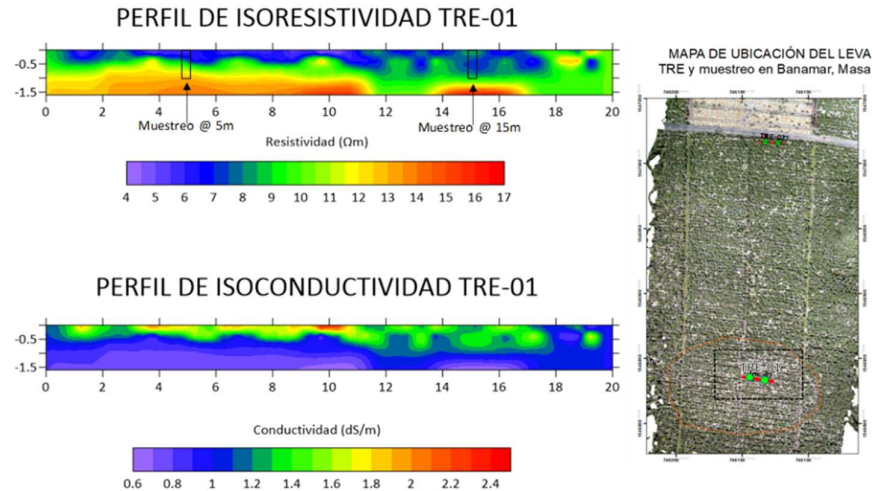


Figura 5. Perfiles de resistividad y conductividad, correspondientes a TRE-01

Fuente: Elaboración propia con datos de campo y drone.

Nota. Esta línea se encuentra localizada al sur del área de estudio

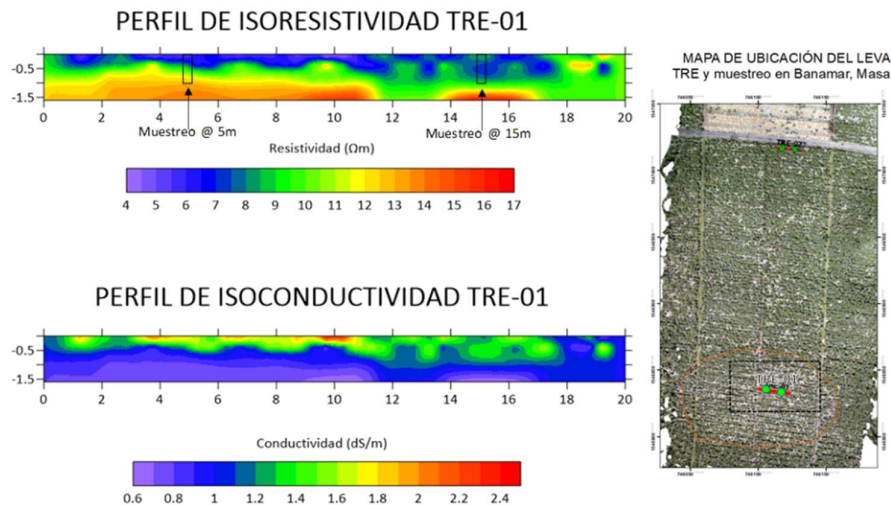


Figura 6. Perfiles de resistividad y conductividad, correspondientes a TRE-02

Fuente: Elaboración propia con datos de campo y drone.

Nota. Esta línea se encuentra localizada al Norte del área de estudio

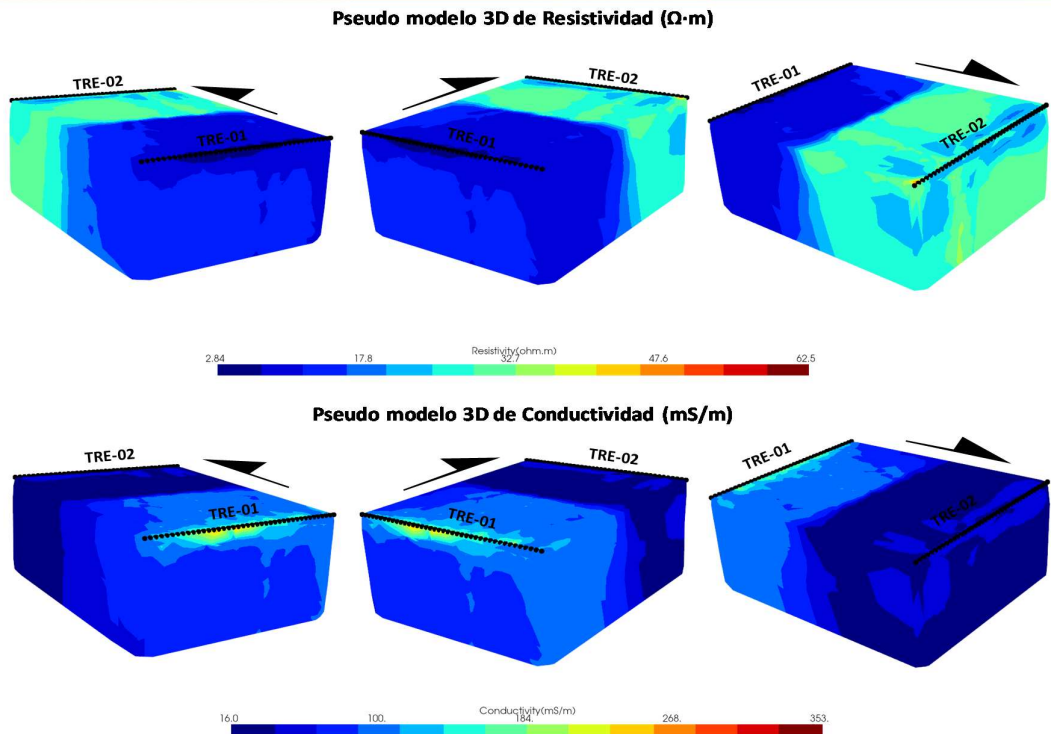


Figura 7. Pseudo modelo 3D (2.5d) para ambas tomografías (resistividad y conductividad).
 Fuente: Elaboración propia del modelo de Resistividad ($\Omega\cdot m$) y Conductividad (mS/m).
 Nota: Elaboración propia a partir de datos en TRE-01 y TRE-02.

En la Tomografía 1, los perfiles por profundidad mostraron que LAB tenía más variación vertical, mientras que TRE mantiene una respuesta relativamente estable, y Campo registro los valores más bajos en casi todo el perfil (Figura, 8 inciso a y b). Los métodos *in situ* sí captaron el gradiente vertical de conductividad, pero con una señal atenuada respecto al laboratorio (Figura, 8 inciso c y d). LAB domino en las medidas que se capturaron a mayores profundidades, TRE ocupa una posición y Campo permanece por debajo, a los 5 y 15 m se observó que existen diferencias espaciales en LAB, lo cual sugiere heterogeneidad del perfil que no es captada con la misma amplitud por los sensores.

En la Tomografía 2, el patrón fue más claro (Figura, 8 inciso b y d). LAB mostro los valores más altos en todas las profundidades, mientras que TRE y

Campo tenían rangos más bajos y con poca variación vertical. Esto indica que, aunque el laboratorio detecto cambios con la profundidad, los métodos *in situ* responden con una señal mucho más uniforme. En consecuencia, la capacidad de TRE y Campo para reproducir la magnitud y la amplitud del patrón vertical observado en laboratorio es menor en Tomografía 2 que en Tomografía 1.

En la variación en cada rango de medias, se observó la diferencia de la magnitud para la conductividad eléctrica entre métodos (Figura 8 inciso e y f). En la Tomografía 01, la media de Campo fue 0.62 dS/m, la de TRE 1.25 dS/m y la de LAB 2.77 dS/m, lo que se reflejó en un gradiente ascendente desde las mediciones *in situ* hacia la referencia de laboratorio. En la Tomografía 02, tiene el mismo patrón se mantuvo, con medias de 0.31 dS/m para Campo, 0.40

dS/m para TRE y 2.51 dS/m para LAB. Indicando que ambos métodos *in situ* registraron valores menores que el

laboratorio, existiendo subestimación de la conductividad eléctrica respecto al método de referencia.

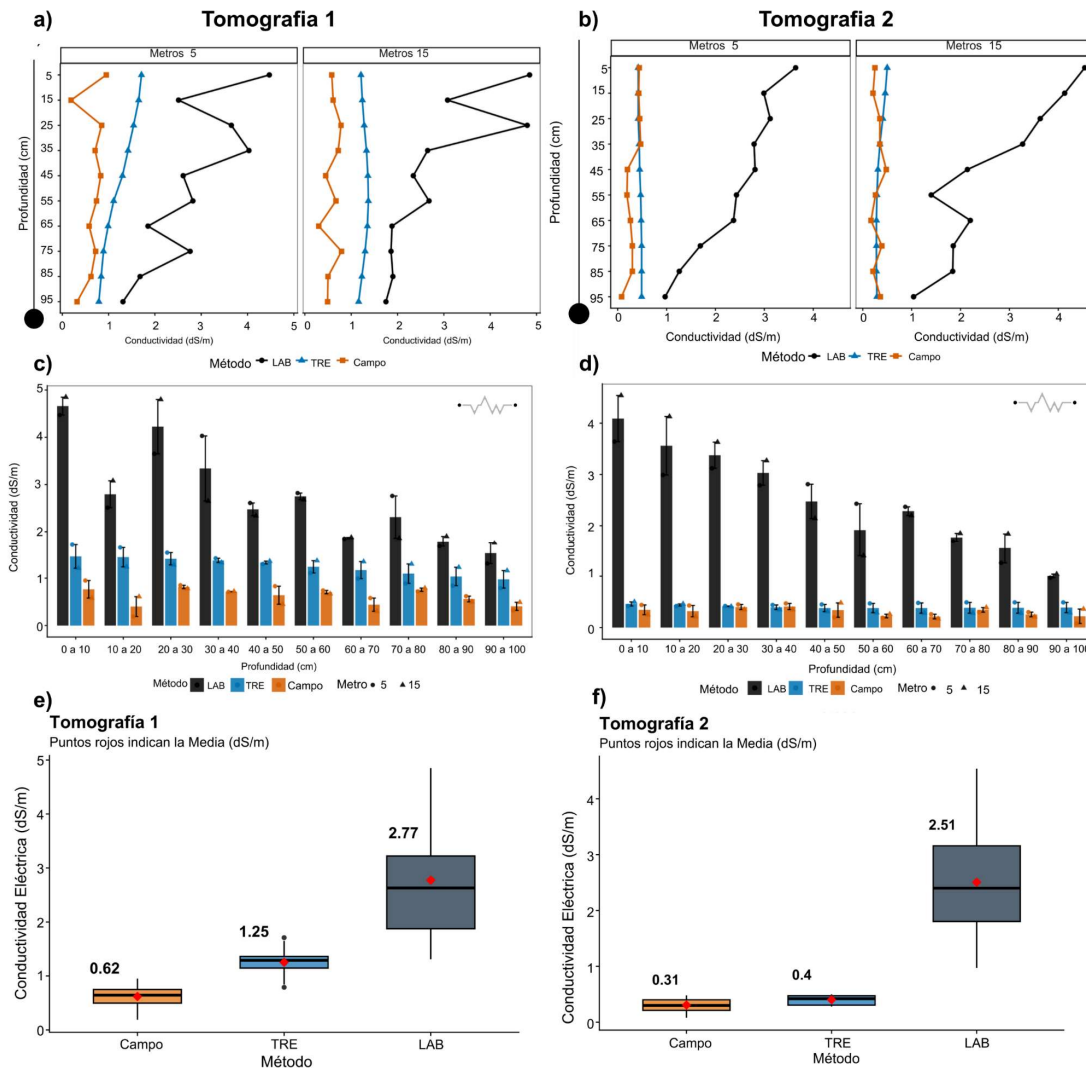


Figura 8. Análisis comparativo de conductividad eléctrica del suelo, medida mediante métodos de laboratorio (LAB), tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y sensor de campo directo. Se presentan los perfiles verticales de conductividad (a, b), la distribución de Conductividad eléctrica por rangos de profundidad de 10 cm (c, d) y el resumen estadístico en boxplots con las medias globales (e, f) para Tomografía 1 y Tomografía 2, evaluados a los 5 y 15 m de cada transecto.

Predicción de Salinidad

En la relación para las mediciones de conductividad eléctrica obtenidas por laboratorio se observó que la comparación entre LAB y Campo, es de tendencia positiva donde campo explica el 13.9% de

la variación observada en LAB ($R^2 = 0.139$). El panel b) de la Figura 9, presenta la relación entre LAB y TRE, con una tendencia positiva más débil, donde TRE explica el 7.5 % de la variación de LAB ($R^2 = 0.075$). La relación entre TRE y Campo

poseen similitudes, donde Campo explica el 46.3 % de la variación observada en TRE ($R^2 = 0.463$).

Existe una subestimación de los métodos Campo y TRE para determinar conductividad eléctrica (dS/m), en comparación con el estándar de laboratorio. En la Tomografía 1 (Figura, 10), se observó un sesgo negativo de -2.15 dS/m para el sensor de campo y de -1.52 dS/m para la TRE. Lo que indica que, a medida que aumenta la carga iónica del suelo, los sensores electromagnéticos pierden capacidad de respuesta. Se observó que el error, se incrementa proporcionalmente con la magnitud de la salinidad medida.

En contraste, la Tomografía 2 (Figura, 10) presentó que ambos métodos de campo tenían un sesgo mínimo de apenas -0.09 dS/m. Sin embargo, al comparar ambos

con el laboratorio (Campo vs Lab y TRE vs Lab), persiste un sesgo negativo de -2.2 dS/m y -2.1 dS/m. Es posible que la capacidad del suelo como su alta porosidad y retención de humedad, afectan la señal de los sensores, provocando que la conductividad eléctrica medida en campo sea consistentemente inferior a la obtenida en el extracto de saturación.

Se detallan los datos encontrados al realizar los análisis de regresiones por medio de corrección de Nash-Sutcliffe en la Tabla 4, y al transformar los datos predichos, para verificar los valores contrastantes entre cada método utilizado que determino dS/m. Se observan que todos los métodos de campo y TRE no tienen una correlación con respecto al laboratorio al contrario los métodos Campo y TRE muestran rangos similares.

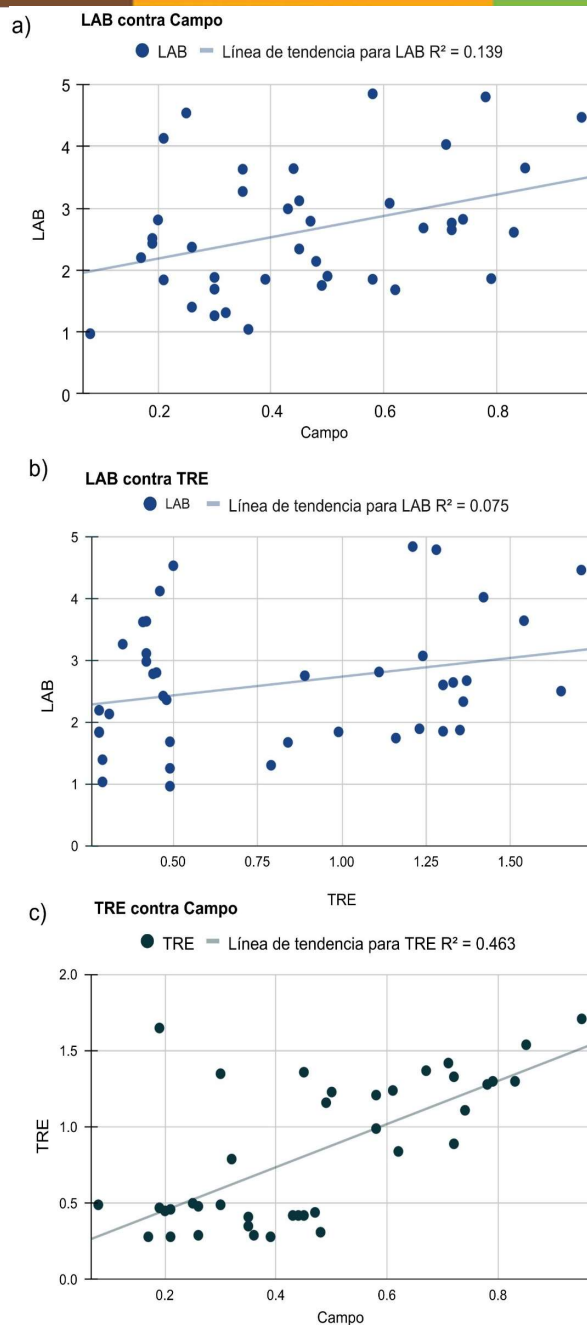


Figura 9. Relaciones entre conductividad eléctrica obtenidas. laboratorio (LAB), sensor de campo (Campo) y TRE. a) Campo explicó el 13.9 % de la variación en LAB b) TRE explicó el 7.5 %, c) Campo explicó el 46.3 % de la variación en TRE.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo y laboratorio.

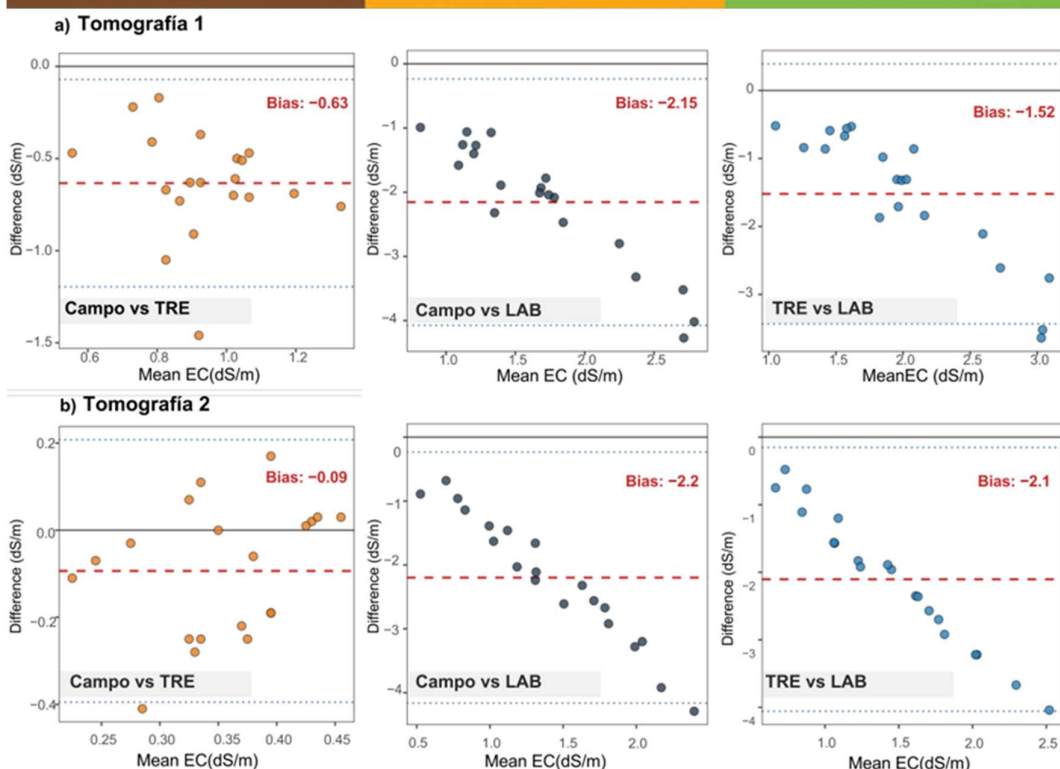


Figura 10. Correlaciones entre conductividad eléctrica (dS/m) entre métodos de medición (Campo, TRE y Laboratorio) para las Tomografías 1 y 2 para eliminar el sesgo con Bias.
 Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de Bias.

Tabla 4. Comparación general sin corrección de sesgos

Tomografía	Comparación	RMSE (dS/m)	E (NSE)	Ajuste (Molnar)	RPD	Clase (Zhao)
T1	Campo vs LAB	2.28	< 0.2	Insuficiente	0.85	Clase C
T1	TRE vs LAB	1.74	< 0.2	Insuficiente	1.1	Clase C
T1	Campo vs TRE	0.72	0.32	Satisfactorio	1.45	Clase B
T2	Campo vs LAB	2.35	< 0.2	Insuficiente	0.78	Clase C
T2	TRE vs LAB	2.1	< 0.2	Insuficiente	0.92	Clase C
T2	Campo vs TRE	0.15	0.48	Bueno	1.82	Clase B

Fuente: Elaboración propia

Nota: Se toman de referencia los valores del Criterio de Nash-Sutcliffe.

Al momento de realizar las correcciones aplicadas mejoraron parcialmente la escala de las lecturas, pero no lograron reconstruir con precisión el patrón vertical de la conductividad eléctrica de referencia (Figura, 10). En consecuencia, los métodos indirectos evaluados no deben considerarse sustitutos directos del análisis de laboratorio bajo las condiciones del estudio. Los métodos podrían ser útiles

como herramientas de tamizaje rápido o monitoreo relativo para identificar tendencias espaciales o de contraste dentro del perfil del suelo.

Si lo colocamos en base a la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), (utilizada para evaluar la aptitud predictiva de los modelos), se confirma que la viabilidad de las estimaciones en la primera Tomografía de medición con valores de 0.27 (Campo)

y 0.23 (TRE). Estos valores positivos indican que los modelos son mejores predictores que la media de las observaciones. Sin embargo, para la segunda sesión, Tomográfica (NSE de 0.04 y 0.10), señala una baja concordancia entre los valores observados y simulados.

Esta discrepancia podría atribuirse a condiciones del sitio de muestreo, ruido como la heterogeneidad en las propiedades físicas del suelo durante la segunda toma.

El mejor desempeño predictivo en el perfil es al separar el análisis por profundidades

(Tabla, 5 y Figura, 11), para 5 m, se encontró que Campo es el mejor método para calibrar (RMSE = 0.7; MAE = 0.6; Bias = 0.10; NSE = 0.3; $R^2 = 0.41$).

En el perfil de 15 m, el mejor método fue TRE es decir las tomografías sirven para explotar salinidad a mayores profundidades (RMSE = 1.03; MAE = 0.84; Bias = -0.13; NSE = 0.15; $R^2 = 0.18$). Además, es más fácil calibrarlo el perfil de 5 m al ser más predecible que el de 15 m, y que las calibraciones por tomografía ofrecieron el mejor desempeño relativo en ambos casos.

Tabla 5. Comparación del mejor método de predicción de conductividad eléctrica para cada perfil de muestreo

Perfil	Mejor método	RMSE	MAE	Bias	NSE	R^2
5 m	Campo	0.713	0.608	0.1	0.393	0.413
15 m	TRE	1.032	0.843	-0.13	0.159	0.183

Nota: RMSE: raíz del error cuadrático medio; MAE: error absoluto medio; Bias: sesgo medio; NSE: eficiencia de Nash-Sutcliffe; R^2 : coeficiente de determinación.

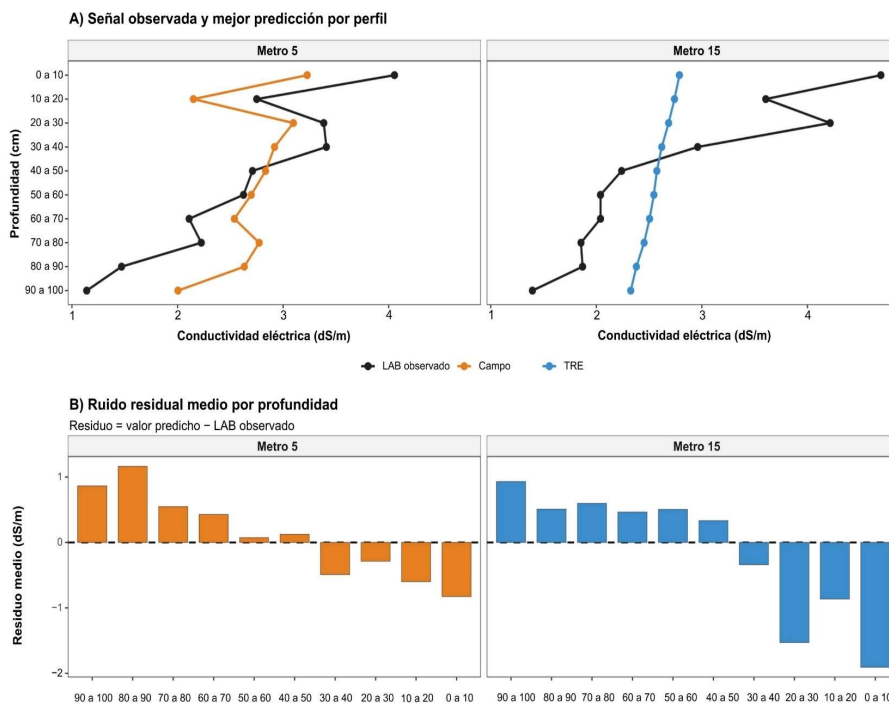


Figura 11. Señal observada en laboratorio y la mejor predicción por perfil (5 y 15 m), se puede calibrar mejor a los primeros 5 m para ambas tomografías.

DISCUSION

Resistividad y conductividad eléctrica

La aplicación de métodos no invasivos que se utilizó en esta investigación, se alinea con los estándares de próxima generación para la caracterización hidráulica del suelo. Peace (2024), destacó que la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es actualmente el método no invasivo más preciso para monitorear la variabilidad espacial de sales en la zona no saturada.

A pesar de ello, al capturar los datos pareados mediante muestreo sistemático a los 5 y 15 m en cada trayectoria (TRE 01 y 02) fue diferente, dejando la duda a la necesidad de calibración reportada por Innocenti et al (2024). Ellos, sostiene que el error en los modelos de inversión debe ser comparado con sensores y muestras de suelos, para encontrar un proxy confiable de la conductividad volumétrica y en este caso con los valores de laboratorio, validando así el procedimiento realizado para las muestras TRE-01 y TRE-02 pues son resultados similares a los encontrados en este estudio.

Por la diferencia entre la línea Norte (TRE-02) y la Sur (TRE-01) donde la primera presenta resistividades más altas de hasta 45 $\Omega \cdot m$ podría estar vinculada no solo a la química del suelo, sino a cambios en las propiedades físicas derivados del laboreo. Según Dafonte et al (2013, 2019), la Tomografía de Resistividad Eléctrica es muy sensible a los cambios físicos resultantes del laboreo con tracción animal o motorizada.

En este caso de estudio el suelo es un Molisol y la compactación o el cambio en la porosidad por el paso de maquinaria puede alterar la continuidad de los poros con agua, elevando la resistividad en zonas menos compactadas o con mayor drenaje, como se observa en la zona norte (TRE-02) donde la Conductividad eléctrica de laboratorio es significativamente menor (0.22 a 0.64 dS/m).

Por otro lado, las diferencias entre las resistividades de la zona Sur (4-17 $\Omega \cdot m$ y

la zona Norte (15-45 $\Omega \cdot m$ es consistente con los hallazgos de Innocenti et al. (2024). Ellos demostraron que, en suelos bajo riego intenso, la acumulación de sales iónicas (como el Sodio y Potasio analizados en este estudio) domina la señal eléctrica por encima de la textura del suelo, lo que justifica los altos valores de conductividad de hasta 2.4 dS/m observados en la línea TRE-01.

La representación mediante el pseudo-modelo 3D permite una interpretación volumétrica que supera el muestreo puntual tradicional a pesar de tener sesgos en los datos reportados. Según Loke (2013), este tipo de visualización espacial, con una separación entre líneas, podría determinar si la salinidad es un fenómeno continuo o derivado de un manejo localizado del suelo.

Contraste de Conductividad (Conductivímetro de campo)

Existe una discrepancia entre la Conductividad eléctrica de Laboratorio (LAB) y la derivada de la Tomografía (TRE). Mientras que la TRE-01 reportó un máximo de 2.4 dS/m, los análisis de laboratorio alcanzaron 4.54 dS/m. Esta diferencia no es un error, sino una característica física del método.

La observación es atribuida al arreglo polo-dipolo en TRE 01 y TRE 02, el cual radica en su ambigüedad petrofísica: un mismo valor de resistividad aparente puede corresponder a suelo arcilloso sódico (baja resistividad por conducción de superficie por baja resistividad por sales solubles), con implicaciones hidrológicas opuestas. Eissa et al. (2019), señalan que el polo-dipolo presenta mayor sensibilidad a estructuras 3D que los arreglos Wenner y Schlumberger, lo que en suelos con variabilidad química lateral (como la documentada entre 5 m y 15 m) genera distorsiones en los modelos 2D asumidos.

Según De-Jong et al (2020), en su estudio sobre el monitoreo de salinidad mediante TRE, la conductividad medida *in situ* es una conductividad aparente influenciada

por la fase gaseosa (poros con aire) del suelo.

A diferencia de que en el método de laboratorio se utiliza un extracto de saturación que disuelve los cristales de sal no detectados por la corriente eléctrica en campo. Este hallazgo es similar con lo descrito por Scudiero (2024), que argumenta que la TRE subestima la magnitud absoluta, pero es insuperable para identificar la geometría espacial de la pluma de sales.

La comparación entre los datos de la Tabla 3 (TRE-01) y la Tabla 4 (TRE-02) evidencia la heterogeneidad de la finca. Mientras que el Sur presenta una conductividad eléctrica de laboratorio media de 2.98 dS/m, el Norte desciende a valores de 0.64 dS/m. Esta variabilidad es la que justifica el uso del pseudo-modelo 3D.

De acuerdo con Mertzánides et al (2020) la integración de perfiles 2D paralelos permite identificar si la salinidad es un flujo continuo o un bolsón aislado. Lo que podría suceder primero para el sector Sur, es que indica un riesgo de salinización que requiere manejo de drenaje diferenciado. En la línea TRE-01, se observan valores de sodio soluble (Na^+ en extracto de pasta saturada) que promedian los 120–130 mg/kg. Según De-Jong et al (2020), en suelos con alta capacidad de intercambio catiónico, el sodio promueve la dispersión de micro agregados, lo que facilita la conducción eléctrica superficial.

Lo que pudo incidir en la baja resistividad de la zona Sur (4-17 $\Omega\cdot\text{m}$ no es aleatoria; es un horizonte sódico. La movilidad del Potasio (K), muestra picos de hasta 81.59 mg/kg (M2-15), lo que podría sugerir una lixiviación activa hacia los 30-40 cm, lo cual es captado por la TRE como una zona de alta conductividad persistente en profundidad.

Contraste de Métodos y Heterogeneidad del Perfil

La comparación entre las tablas de la Tomografía 1 y 2 mostraron que la heterogeneidad del perfil no es captada

con la misma amplitud por los sensores de campo. Picoli et al (2019) señalan que la alta variabilidad de cationes como el Sodio y Potasio (como en este estudio) crea micro-zonas de conductividad que la TRE tiende a suavizar (smoothing effect) durante el proceso de inversión matemática.

Este suavizado es lo que genera el ruido en el residuo observado el análisis de datos; mientras que el laboratorio detecta picos puntuales de salinidad, la TRE entrega una imagen promediada del subsuelo. Lo que si se podría validar el uso de esta metodología como un sistema de diagnóstico multiescala para la agricultura de precisión.

Según Horváth et al (2024), la conductividad eléctrica del suelo es un indicador que refleja la concentración de sales solubles, pero su interpretación depende de factores como la humedad, la textura y la estructura del suelo.

Los datos de este estudio y las diferencias entre mediciones de laboratorio y métodos *in situ* evidencian esta complejidad, debido a que los valores obtenidos mediante TRE y sensores de campo mostraron una subestimación sistemática en comparación con el extracto de saturación, lo cual es consistente con la literatura reciente.

Autovino et al. (2026), demostraron que la conductividad eléctrica medida en campo siempre será una conductividad aparente influenciada por el contenido de agua y la conectividad de poros. Esto explica que, en las tomografías analizadas, los valores de TRE sean menores que los de laboratorio, debido a que el método no logra captar completamente las sales no disueltas presentes en el suelo, generando así discrepancias en la magnitud de la salinidad.

En este contexto, la variabilidad observada entre las líneas TRE-01 y TRE-02 puede estar asociada a diferencias en la humedad del suelo, la porosidad y la distribución de sales, lo cual condiciona la respuesta eléctrica del subsuelo.

Sangprasat et al. (2025), señalan que la resistividad eléctrica del suelo está controlada por propiedades físicas como densidad aparente, estructura y grado de saturación. Lo que respalda la interpretación de que las diferencias espaciales observadas en este estudio no responden únicamente a la química del suelo, sino también a cambios estructurales derivados del manejo agrícola, como la compactación o la alteración de la continuidad de poros.

Mustafa y Ansari (2024), mencionan que los modelos basados en conductividad eléctrica presentan limitaciones cuando no incorporan múltiples variables del suelo. Esto coincide con los resultados obtenidos, donde los modelos lineales mostraron baja capacidad predictiva frente a los datos de laboratorio, evidenciando la naturaleza multivariable del fenómeno de salinidad.

Además, la distribución de sales en el suelo presenta una alta variabilidad espacial y vertical, influenciada por procesos de lixiviación y acumulación (Bony et al., 2025). Los resultados que se obtuvieron mostraron patrones consistentes con la dinámica de transporte de solutos, donde la salinidad tiende a concentrarse en determinadas zonas del perfil, generando heterogeneidad que no es completamente captada por los sensores indirectos.

Se detalla que TRE 01 y 02 son geoquímicas opuestas y que el arreglo polo-dipolo resuelve con eficiencias contrastantes. En TRE 01, los picos de azufre y magnesio se acumulan en horizontes subsuperficiales, mientras que en TRE 02 el enriquecimiento máximo de sodio y azufre se concentra en superficie (0–10 cm). Chambers et al. (2022), demuestran que la sensibilidad vertical del polo-dipolo decae exponencialmente con la profundidad, de modo que los picos geoquímicos de TRE 01 se desplazan hacia profundidades mayores en los modelos inversos, subestimando su espesor real en un 15–25 %.

En TRE 02, la capa conductora superficial genera una respuesta integrada que sobrestima su extensión lateral, difuminando el contacto con horizontes subyacentes más resistivos (Conductividad eléctrica: 0.97–1.26 dS/m a 1.0 m).

La variabilidad lateral entre perfiles a 5 m y 15 m refuerza la no transferibilidad de las relaciones petrofísicas. En TRE 01, el gradiente de pH (7.02–8.24) y el desfase de picos de azufre entre puntos de muestreo indican procesos de remoción diferencial; en M2, la homogeneidad lateral de la tendencia decreciente de conductividad eléctrica con la profundidad sugiere un origen edáfico más uniforme. Paz et al. (2024), ellos validaron que, en diferentes suelos, la conductividad de superficie de las arcillas modifica la pendiente de la ley de potencia conductividad eléctrica–resistividad, de modo que un modelo calibrado en TRE 02 sobrestimaría la salinidad de TRE 01 en un 30–40 % si se aplica sin restricciones geoquímicas.

El hierro en TRE 02 estuvo ausente en TRE 01, lo que añade una dimensión redox que Su et al. (2024), identificaron como fuente de polarización inducida no detectables que generan anomalías de baja resistividad que la inversión convencional atribuye erróneamente a lentes arcillosas o acuíferos someros.

No debería descartarse que los métodos geofísicos, deben ser utilizados como herramientas complementarias dentro de un enfoque multiescala. En este estudio, la integración de TRE y Análisis de laboratorio permitió una mejor comprensión de la variabilidad y error espacial de la salinidad del suelo, confirmando que los métodos indirectos no sustituyen al laboratorio, pero sí aportan información general que se debería de calibrar y considerar para los sistemas agrícolas, consistente con otras investigaciones (Autovino et al., 2026).

CONCLUSIONES

La salinidad del suelo presentó distribución vertical heterogénea, con concentraciones máximas en los primeros 0–40 cm y disminución por debajo de 1,0 m de profundidad. La conductividad eléctrica de laboratorio osciló entre fue mayor en comparación que los métodos aplicados con tomografías. Entre ambos transectos (sur vs. norte) hay variabilidad a nivel de resistividad en los suelos.

Ambos métodos no invasivos subestimaron la salinidad respecto al estándar de laboratorio. La conductividad eléctrica de campo tomada con el conductímetro, promedió 0,62 dS/m (TRE-01) y 0,31 dS/m (TRE-02), mientras que la conductividad eléctrica, derivada de TRE promedió 1,25 dS/m y 0,40 dS/m, valores inferiores a las medias de laboratorio (2,77 y 2,51 dS/m). Los mismos fueron confirmados por el análisis de Bland-Altman con sesgos negativos. Las correlaciones lineales entre métodos in situ y laboratorio fueron débiles ($R^2 = 0,139$ para campo vs. laboratorio; $R^2 = 0,075$ para TRE vs. laboratorio).

La eficiencia de Nash-Sutcliffe fue insuficiente en todas las comparaciones

con datos de laboratorio ($NSE < 0,2$), clasificándose ambos métodos en Categoría C según el RPD ($< 1,40$). Lo que significaría que la relación inversa resistividad–conductividad está ligada a la alta dispersión de la humedad, textura, densidad aparente y condiciones redox, que en este estudio no se midieron de manera directa y podrían confundir la señal eléctrica, impidiendo la estimación cuantitativa.

La metodología por TRE y los sensores portátiles de conductividad eléctrica son útiles como herramientas de tamizaje (en este caso para suelo Molisol y cultivo de Banano) rápido para identificar patrones de salinidad, pero requieren calibración local contra datos de laboratorio antes de su implementación operativa. La no transferibilidad de las relaciones petrofísicas entre transectos (TRE-01 vs. TRE-02) hace indispensable la validación local. La implementación futura debería incorporar la humedad del suelo, saturación de agua y temperatura como covariables en modelos predictivos, con el fin de reducir el sesgo sistemático y mejorar la precisión.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a la empresa Banamar (Escuintla, Guatemala) por prestar el lugar para realizar dicha investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Autovino, D., Coppola, A., De Mascellis, R., Farzamian, M., y Basile, A. (2026). An in-situ methodology to separate the contribution of soil water content and salinity to EMI-based soil electrical conductivity. *SOIL*, 12(1), 37–54. <https://doi.org/10.5194/soil-12-37-2026>

Agro, T. (2003). *Pruebas de suelo a través de extracto de pasta saturada* TestAgro. <https://www.testagro.com/post/como-hacer-pruebas-de-suelo-pasta-saturada?lang=es>

Barrera, J. A. (2015). Empleo del método geofísico Tomografía de Resistividad Eléctrica para la ubicación de un sitio de recarga de acuífero en Xochimilco [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21614.72003>

- Bony, L., Dhar, A., Wilkinson, S. R., y Naeth, M. A. (2025). Assessing electrical conductivity and sodium adsorption ratio as soil salinity indicators in reclaimed well sites. *Land*, 14(11), Artículo 2125. <https://doi.org/10.3390/land14112125>
- Castillo, G. (2017). Caracterización de suelo agrícola mediante tomografía de resistividad eléctrica y análisis físico químico en el municipio de San Antonio Castillo de Velasco, Oaxaca, México [Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Institucional IPN. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/385
- Chambers, J., Gunn, D. A., Wilkinson, P. B., Meldrum, P., Haslam, E., Holyoake, S., Kirkham, M., Kuras, O., Merritt, A., y Wragg, J. (2014). 4D electrical resistivity tomography monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. *Near Surface Geophysics*, 12(1), 61–72. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013002>
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos. (U. N. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Ed.)* Perú. https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Dafonte, J., Raposo, J., Valcárcel, M., Fandiño, M., Martínez, E., Rey, B., y Cancela, J. (2013). *Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego*. En Estudios en la Zona No Saturada del Suelo (Vol. XI, pp. 57–62). https://zonanosaturada.com/zns13/publications_files/1.10.pdf
- Dafonte, J., García-Tomillo, A., de Figueiredo, T., Barbieri, R. S., Fonseca, F., Rodrigues, J., Araujo, I. R. C., Vargas, R. J., Bandeira, D. H., Montanari, R., dos Santos, R. V., y Costa, O. V. (2019). *Tomografía de resistividad eléctrica para detectar impactos cambios en las propiedades físicas del suelo, resultantes del laboreo con tracción animal y motorizada*. En Estudios en la Zona No Saturada (Vol. XIV, pp. [1-5]). Universidad de Santiago de Compostela.
- De Jong, S. M., Heijenk, R., Nijland, W., y van der Meijde, M. (2020). Monitoring soil moisture dynamics using electrical resistivity tomography under homogeneous field conditions. *Sensors*, 20(18), Artículo 5313. <https://doi.org/10.3390/s20185313>
- Dunn, W. L., y Shultis, J. K. (2023). Variance reduction techniques. En W. L. Dunn y J. K. Shultis (Eds.), *Exploring Monte Carlo methods* (2.^a ed., pp. 151–187). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819739-4.00013-5>
- Eissa, R., Cassidy, N., Pringle, J., y Stimpson, I. (2019). Electrical resistivity tomography array comparisons to detect cleared-wall foundations in brownfield sites. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 53(1), 85–97. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-192>
- Griem-Klee, S. (2016). *Métodos eléctricos: Resistividad - electrodos*. *Apuntes Geología: Exploraciones Mineras*. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/070-electrico-resistividad-configuracion-electrodos.ht>
- García, A. (2014). *Aplicación de métodos geofísicos al estudio del suelo*. La Coruña: Universidad da Coruña, Facultad de Ciencias, Área de Edafología y Química Agrícola. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/13684>
- Hernández, M. C. (2019). *Aplicación de métodos geoelectricos para la detección de zonas de filtración en la presa Gonzalo N. Santos, San Luis Potosí* [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.]. Repositorio Institucional IPICYT. <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/2213/1/TMIPICYTH4A72019.pdf>
- Hernández-Ramos, J. O. (2019). *Determinación de propiedades de suelos agrícolas a partir de mediciones eléctricas realizadas en campo y en laboratorio* [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.]. Repositorio Institucional IPICYT. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/5080>
- Horváth, J., Kátai, L., Szabó, I., y Korzenszky, P. (2024). An electrical conductivity sensor for the selective determination of soil salinity. *Sensors*, 24(11), Artículo 3296. <https://doi.org/10.3390/s24113296>

- Innocenti, A., Pazzi, V., Napoli, M., Ciampalini, R., Orlandini, S. y Fanti, R. (2024). Electrical Resistivity Tomography (ERT) to monitor the efficiency of different irrigation systems in horticulture field. EGU General Assembly 2024, Viena, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-10617>
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. y Wilkinson, P.B. (2013) Recent Developments in the Direct-Current Geoelectrical Imaging Method. *Journal of Applied Geophysics*, 95, 135-156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- López Sánchez, M. (2019). *Caracterización y estudio del volumen de suelo húmedo mediante tomografía eléctrica* [Tesis doctoral, Universidad de Córdoba]. UCOPress Editorial Universidad de Córdoba. <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/18205>
- Londoño Ardila, J. H. (2016). *Suelos afectados por sales en la Zona Bananera de Santa Marta* [Monografía de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58793/71394585.pdf>
- Mertzanides, Y., Tsakmakis, I., Kargiotis, E., y Sylaios, G. (2020). Electrical resistivity tomography for spatiotemporal variations of soil moisture in a precision irrigation experiment. *International Agrophysics*, 34(3), 309–319. <https://doi.org/10.31545/intagr/123943>
- Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling. (C. o. Institute of Environmental Engineering, Ed.) ETH Zürich, Switzerland. https://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Mustafa, R., y Ansari, A. (2024). Comprehensive analysis of soil electrical conductivity: An experimental and machine learning approach. *Discovery Civil Engineering*, 1, Artículo 82. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00086-8>
- R Core Team. (2025) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Sangprasat, K., Puttiwongrak, A., y Inazumi, S. (2025). Review of Correlations Between Soil Electrical Resistivity and Geotechnical Properties. *Geosciences*, 15(5), 166. <https://doi.org/10.3390/geosciences15050166>
- Scudiero, E. (2024). *Assessing soil salinity and sodicity using remote and proximal sensing data: Module two – Case studies* [Seminario web]. International Network of Salt-Affected Soils; Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Paz, M. C., Castanheira, N. L., Paz, A. M., Gonçalves, M. C., Monteiro Santos, F., & Farzaman, M. (2024). Comparison of electromagnetic induction and electrical resistivity tomography in assessing soil salinity: Insights from four plots with distinct soil salinity levels. *Land*, 13(3), Artículo 295. <https://doi.org/10.3390/land13030295>
- Piccoli, I., Furlan, L., Lazzaro, B., y Morari, F. (2019). Examining conservation agriculture soil profiles: Outcomes from northeastern Italian silty soils combining indirect geophysical and direct assessment methods. *European Journal of Soil Science*, 71(6), 1064–1075. <https://doi.org/10.1111/ejss.12861>
- Su, Z., Revil, A., Ghorbani, A., Zhang, X., Zhao, X., y Richard, J. (2024). Combining electrical resistivity, induced polarization, and self-potential for a better detection of ore bodies. *Minerals*, 14(1), Artículo 12. <https://doi.org/10.3390/min14010012>
- Vithanage, M. M. (2014). Assessment of nitrate-N contamination in the Chunnakam aquifer system, Jaffna Peninsula, Sri Lanka. *SpringerPlus*, 1 - 8. <https://link.springer.com/article/10.1186/2193-1801-3-271>
- Zapata Hernández, R. (2022). Los procesos químicos del suelo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. https://ciencias.medellin.unal.edu.co/centros/centro-editorial/images/libros-gratis/Zapata2020_compressed.pdf