

13

HUMEDAD DEL SUELO SATELITAL PARA EL ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE PRODUCCIÓN DE BANANO (ARENILLAS-ECUADOR)

SATELLITE SOIL MOISTURE FOR THE ANALYSIS OF BANANA PRODUCTION VARIABILITY (ARENILLAS-ECUADOR)

Jerry Simón Arreaga Carrillo¹

E-mail: jarreaga1@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6583-9292>

Patricio Javier Arellano Gastiabur¹

E-mail: parellano2@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8407-0848>

Julio Enrique Chabla Carrillo¹

E-mail: jechabla@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9761-5890>

¹Universidad Técnica de Machala, El Oro, Ecuador

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Arreaga Carrillo, J. S., Arellano Gastiabur, P. J., Chabla Carrillo, J.E. (2023). Humedad del Suelo Satelital para el análisis de variabilidad de producción de Banano (Arenillas-Ecuador). . *Revista Científica Agroecosistemas*, 11(3), 96-107. <https://aes.ucf.edu/cu/index.php/aes>

RESUMEN

Mediante la utilización de imágenes satelitales, técnicos agrícolas pueden supervisar de manera efectiva los niveles de humedad del suelo, que permite garantizar que sus cultivos reciban cantidades óptimas de agua, entre otros beneficios. Esta avanzada tecnología puede ser de gran ayuda dentro de la agricultura, además de medir la humedad del suelo, puede proyectar el rendimiento a partir de sensores ópticos, y analizar las características espectrales, climas, fisiología, nutrición y estrés de los cultivos con estos antecedentes se planteó como objetivo analizar la factibilidad de utilización de humedad satelital, para estudio de variabilidad del rendimiento del banano y la detección de periodos críticos en relación con esta variable durante su ciclo vegetativo. Se evaluó ciertas propiedades físicas del suelo, las variables tanto de desarrollo vegetativo y de producción, además se realizó una correlación entre la humedad satelital del suelo y las humedades volumétricas determinada en laboratorio y la medida en tiempo real con Sonda TDR350. Determinándose que la Humedad satelital presenta correlaciones negativas frente a las demás variables, estableciéndose una ligera variabilidad en la producción lo que se atribuye a la incidencia de otros factores, como la textura del suelo, contenido de materia orgánica, el grado de compactación y fertilidad de suelos, cabe enfatizar que el sensor satelital, mide la humedad superficial, por lo que no refleja adecuadamente el contenido de agua en el perfil de suelo y su disponibilidad para las raíces, que conlleven a una alta productividad del cultivo.

Palabras clave:

Sentinel 2, productividad, reflectometría, sensor, Sonda TDR350.

ABSTRACT

By utilizing satellite imagery, agricultural technicians can effectively monitor soil moisture levels, ensuring that their crops receive optimal water amounts, among other benefits. This advanced technology can be of great assistance in agriculture. In addition to measuring soil moisture, it can project yield based on optical sensors and analyze crop spectral characteristics, climates, physiology, nutrition, and stress. The objective of this study was to assess the feasibility of using satellite-derived soil moisture for studying banana yield variability and detecting critical periods in relation to this variable during its vegetative cycle. A correlation was established between satellite-derived soil moisture and volumetric moisture content determined in the laboratory, as well as real-time measurements with the TDR350 Probe. Both vegetative development and production variables were evaluated. It was determined that satellite-derived soil moisture exhibits negative correlations with other variables, with slight variability in production attributed to the influence of other factors such as soil texture, organic matter content, soil compaction, and fertility. Furthermore, the satellite sensor measures surface soil moisture, thus not adequately reflecting water content in the soil profile and its availability to the roots, which ultimately impacts crop productivity.

Keywords:

Sentinel 2, productivity, reflectometry, sensor, sonda TDR350.

INTRODUCCIÓN

La importancia de obtener medidas precisas de la humedad del suelo trasciende la agricultura y se aplica en diversas áreas, incluyendo aspectos ecológicos, el estudio de los ciclos biogeoquímicos y la monitorización de áreas propensas a sufrir deslizamientos de tierras, etc. Además, estas mediciones desempeñan un papel fundamental en la vigilancia de los recursos hídricos a nivel global y son esenciales para evaluar la productividad agrícola.

El uso de imágenes satelitales no solo aumenta la precisión en la medición de la humedad del suelo, sino que también ofrece un análisis minucioso del contenido de humedad en el terreno, lo que enriquece la comprensión de los niveles de humedad en ubicaciones específicas por parte de técnicos y científicos agrícolas (Frackiewicz, 2023).

Los avances tecnológicos recientes en el ámbito de las imágenes satelitales capacitan a los investigadores para adquirir y analizar datos en vastas áreas en lapsos de tiempo relativamente cortos. Adicionalmente, posibilitan la predicción de los niveles de humedad a lo largo del tiempo, lo que simplifica la labor de los investigadores al estudiar como estos niveles afectan el crecimiento de los cultivos y al mismo tiempo, les ayuda a identificar tendencias climáticas (Hernández Mera, 2021).

Las imágenes satelitales desempeñan un papel fundamental en la identificación de áreas afectadas por sequías, inundaciones y otros eventos relacionados con el cambio climático. Esto capacita a los científicos para tomar medidas anticipadas y correctivas con el fin de mitigar los impactos negativos. Además, en investigaciones recientes se ha evaluado la posibilidad de utilizar imágenes satelitales para detectar la presencia de nutrientes y sales solubles en el agua del suelo. Esta aplicación implica la subdivisión de áreas específicas dentro de regiones agrícolas, cada una con requerimientos nutricionales particulares, lo que tiene el potencial de aumentar la productividad al mejorar el desempeño de los cultivos (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2015).

Aparte de las ventajas anteriormente destacadas, las imágenes cumplen una función significativa al identificar áreas con predisposición a la proliferación de plagas y enfermedades, además de evaluar el nivel de contaminación del suelo debido a la escorrentía de desechos originados por la actividad minera.

En definitiva, las imágenes satelitales se han convertido en una herramienta esencial en la agricultura. Su utilidad va más allá de la monitorización de la humedad del suelo; promueven la adopción de prácticas de agricultura de precisión que evitan la aplicación excesiva de fungicidas y nutrientes en toda el área de cultivo. Además,

permiten la identificación de zonas propensas a la aparición de enfermedades como R4T y Sigatoka, entre otras (Frackiewicz, 2023).

La mayoría de las propiedades físico – químicas del suelo varían de acuerdo a la humedad presente en el mismo. La medición del contenido volumétrico del suelo es necesaria para el estudio del mismo, sirve como una limitante en el comportamiento fisiológico de las plantas donde su nutrición y respuesta hídrica depende de ello (Lestín Ruben, 2018). De acuerdo con (Martínez Varona, 2013), los antecedentes acerca de los requerimientos hídricos del banano indican que es una planta altamente exigente respecto al déficit de humedad en el suelo.

La necesidad de métodos indirectos para obtener contenido de agua o índices de humedad es evidente cuando se considera el tiempo y el trabajo involucrados en el muestreo directo. Entre otros los métodos más usualmente utilizados podemos encontrar la sonda de neutrones, sonda TDR, y sonda FDR, que son medidores portátiles que nos brindan una información al instante (Lestín Ruben, 2018).

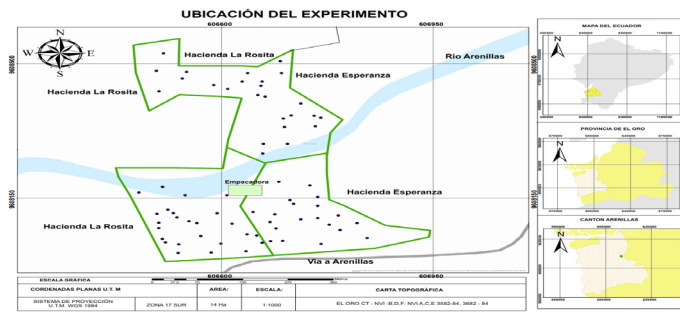
La teledetección ha sido utilizada como una herramienta valiosa y determinante a la hora de establecer indicadores de degradación y conservación de los recursos naturales, de manera especial en evaluar dinámicas en los cambios de usos de suelo y coberturas vegetales. Un aporte destacado de la teledetección espacial al estudio medioambiental es su capacidad de seguir procesos dinámicos ya que las imágenes se captan por un sensor que observa la tierra desde una órbita estable y repetitiva (Santi Ruiz, 2018).

Los datos satelitales permiten recopilar una información coherente, que posteriormente puede ser analizada utilizando los mismos criterios para distintos momentos en el tiempo, de manera que puedan realizarse estimaciones más precisas sobre el cambio (Santi Ruiz, 2018). La adquisición de estas imágenes satelitales hoy en día hay la facilidad de obtenerla en forma de acceso libre para la realización de esta investigación, la cual pretende analizar la factibilidad de su utilización de humedad satelital para el estudio de la variabilidad del rendimiento del banano y la detección de periodos críticos en relación con esta variable a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo de investigación se realizó en la parroquia El Jobo perteneciente al Cantón Arenillas de la Provincia de El Oro, en la finca El Vijagual con las coordenadas geográficas 3° 32' 30.70" S y 80° 02' 12.9" W, a una altura de 26 m.s.n.m. y una temperatura que oscila de 24 a 26 °C y precipitación media de 1250 mm y una humedad relativa promedio mensual de 80% Figura 1.

Figura 1. Mapa de muestreo



Propiedades físico-químicas del suelo

Tabla 1. Propiedades físico químicas del área de estudio

Nro. de Lote	Textura %			Clase textural	da (gr cm-3)	dr (gr cm-3)	Porosidad (%)	pH (H2O)	C.E(ds m-1)
	Arena	Limo	Arcilla						
Lote 1	56,46	10,44	33,1	Franco arcillo Arenoso	1,49	2,5	40,4	6,55	0,36
Lote 2	68,4	11,34	30,26	Franco Arenoso	1,76	2,65	33,6	6,43	0,50
Lote 3	58,42	13,67	17,91	Franco arcillo arenoso	1,51	2,5	39,6	6,80	0,57

Fuente: Elaboración propia

Determinación del tamaño de la Muestra

Según (Martínez Hernández & Bermúdez Camacho, 2016) para el cálculo de estimación de la muestra del tamaño de la muestra se utiliza la siguiente formula:

$$\eta = \frac{N \cdot Z \cdot \infty^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (n-1) + Z \cdot \infty^2 \cdot p \cdot q} \quad (1)$$

N= Total de la población

Z= Nivel de confiabilidad

p= Proporción esperada (se utilizó el 5%=0.05)

Las variables a medir fueron:

Tabla 2. Variables de humedad, desarrollo y producción evaluadas

MÉTODOS DE EVALUACION DE HUMEDAD	VARIABLES DE DESARROLLO	VARIABLES DE PRODUCCIÓN
Método Volumétrica (Θ_v)	Diámetro de Fuste (V-fst)	Peso de Racimo (V-Prm)
Método Sonda TDR350 (SondaTDR350)	Nro. de Hojas (V-Nh)	Peso de Raquis (V-Prq)
Método Humedad Satelital (Hum. Satelital)		Número de manos (V-Nm)
		Longitud dedo (V-LdMs)
		Número de dedos por mano al sol (V-NdMs)
		Hojas a cosecha (V-Hc)

Fuente: Elaboración propia

q= 1-p = 1-0.95=0.05

d= Precisión (se usó el 5%)

Variables de Desarrollo y Producción Evaluadas

Para la medición de las variables no controladas, se dividió la finca en 3 lotes para fijar los sitios de muestreo seleccionando en cada uno de ellos las plantas prontas a la parición, se escogió 70 plantas producto de la aplicación de la fórmula para determinar el tamaño de la muestra cómo se exhibe en la Figura 1.

La medición de humedad de suelo se la realizó de 3 formas diferentes que se detallaran a continuación:

Humedad de suelo por el Método gravimétrico,

La humedad se determinó en base al suelo seco (θ_g), fundamentada en el peso perdido de una muestra húmeda sometida a la estufa a 105°C durante 48 horas, se empleó una balanza analítica de precisión con una sensibilidad al 0,0001 g. (Lopez Bravo et al., 2021). Las muestras de suelo recogidas fueron en relación a los 3 sitios de muestreo que se le dio seguimiento. Es el único método directo de medición de la humedad del suelo. Sin embargo, no puede usarse para obtener un registro continuo de la humedad del suelo de un lugar determinado, porque es necesario extraer muestras del suelo para su análisis en el laboratorio (Vélez Zapata, 2021).

$$(1) \quad \theta_g(\%) = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) \times 100$$

Donde:

P_{sh} = Peso del suelo húmedo

P_{ss} = Peso del suelo seco

Contenido Volumétrico de Agua en el suelo,

Según (Radulovich, 2009) se calcula esta variable de la siguiente manera, mediante el análisis de muestras en laboratorio, con la siguiente fórmula:

$$(2) \quad \theta_v(\%) = \theta_g \times da$$

Donde:

$\theta_g(\%)$ = Contenido gravimétrico de agua en el suelo

da = Densidad Aparente. $g \cdot cm^{-3}$

Medición de humedad volumétrica del suelo: Método de Sonda TDR 350

Según (García Lopez et al., 2010) se determinó la humedad volumétrica ($cm^3 \cdot cm^{-3}$) con una sonda electromagnética del tipo TDR, que fue calibrada para el tipo de suelo en específico de la zona de estudio.

La toma de datos en campo se utilizó varillas electrodos de 20 cm, en estratos de 0-20 cm y de 20-40 cm, lo que proporcionó los contenidos de humedad del suelo, su temperatura (°C) y la conductividad eléctrica (dS/m) en cada punto de muestreo, registrados en 3 periodos diferentes

Imágenes satelitales

Existen varios proveedores de imágenes satelitales, como Landsat, Sentinel, MODIS, Planet, entre otros. Cada uno ofrece diferentes resoluciones y frecuencias de revisita.

En esta investigación se utilizó una imagen del satélite Sentinel-2A, las imágenes son correspondientes a los días que se realizó las tomas de muestras, a. La imagen fue descargada de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Ovando et al., 2021)

A recomendación de Sandoval García et al., 2021, las imágenes se les hizo una corrección atmosférica para realizar una clasificación supervisada, y se recortaron geométricamente para ajustar a la extensión del área de interés.

Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI):

El índice de diferencia normalizada de humedad se utilizó para determinar el contenido de agua de la vegetación. Se calcula como una relación entre los valores NIR y SWIR (Álvarez García, 2022).

Fórmula:

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad NDMI = (B08 - B11) / (B08 + B11)$$

Donde:

NIR = Banda infrarroja cercana

SWIR = Banda infrarroja de onda corta

Análisis Estadístico

Se introdujeron todas las variables de interés en el programa IBM SPSS STATISTICS 23, para conocer si existen diferencias significativas, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA), previo al cumplimiento de normalidad de datos de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas. Se realizó posteriormente la prueba de Post Hoc de Tukey para identificar los subconjuntos homogéneos con un nivel de significancia de 0,05. La estadística descriptiva de las variables de estudio se realizó mediante el cálculo de la media, mínimo, máximo y coeficiente de correlación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se realizó la prueba de normalidad de cada variable de humedad, aceptando la hipótesis nula y a su vez denotando que los datos para cada variable medida presentaron una distribución normal en los datos debido a que el p-valor de la prueba Kolmogórov-Smirnov fue mayor al nivel de significancia alta predefinido $\alpha=0,05$

Tabla 3. Pruebas de normalidad de los datos en función de las variables humedad

Pruebas de normalidad de Humedad							
N° de Lote	Variable	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Lote 1	SondaTDR350	0,099	25	,200*	0,96	25	0,413
	Θv	0,084	25	,200*	0,979	25	0,863
	Hum. Satelital	0,065	25	,200*	0,981	25	0,901
Lote 2	SondaTDR350	0,125	25	,200*	0,925	25	0,066
	Θv	0,106	25	,200*	0,948	25	0,226
	Hum. Satelital	0,15	25	0,15	0,93	25	0,085
Lote 3	SondaTDR350	0,146	20	,200*	0,965	20	0,638
	Θv	0,129	20	,200*	0,936	20	0,201
	Hum. Satelital	0,2	20	0,035	0,863	20	0,009

Fuente: Elaboración propia

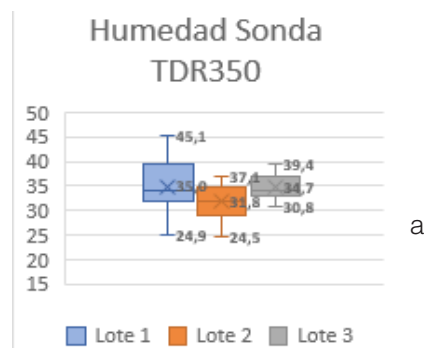
Las variables fueron sometidas a un análisis exploratorio de datos para verificar la visualización de valores atípicos que pudiera afectar en el procedimiento estadístico con cada una de las variables. Estos datos se eliminaron para mantener distribuciones normales y homogéneas, el diagrama de cajas y bigotes permitió comparar la distribución y dispersión de los datos de las diferentes variables biométricas respecto a la media, que se les dio seguimiento en este estudio.

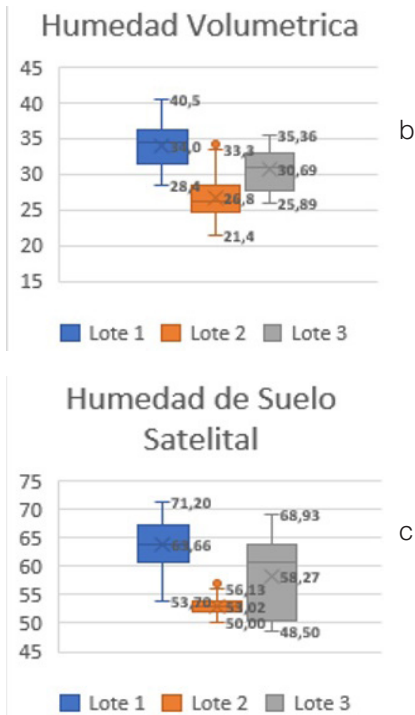
En la Figura 2(a), se observa una significativa variación en la humedad del suelo en los tres lotes analizados mediante la sonda TDR 350, con un valor máximo de humedad que llega hasta el 45,1%. Estos resultados concuerdan con las observaciones previas de Largaespada & Henríquez (2015). Es importante destacar que el segundo se muestran niveles de humedad considerablemente más bajos, lo que podría estar relacionado con las propiedades físicas de este suelo, se nota una gran diferencia en el contenido de arena en comparación con los otros (Tabla 1), probablemente por la cercanía a las riberas del río Arenillas y un canal de riego colateral a este que pasa por el predio.

Se muestra que en la Figura 2(b), en el Lote 1, los niveles de humedad del suelo registrados mediante imágenes satelitales, presentan valores notablemente elevados en comparación con las demás áreas, alcanzando un punto máximo del 71.2%. Por otro lado, en el segundo indicó una menor variabilidad en los datos; sin embargo, en este caso, se observan los valores más bajos de humedad del suelo. Esta disparidad podría estar relacionada con la presencia significativa de arena en esta área, lo cual, de acuerdo con las investigaciones de Serrano Amaya (2020), tiende a promover la pérdida de agua en la capa superficial del suelo. Respecto al tercero, se aprecia una mayor dispersión y asimetría de la humedad del suelo en comparación con la mediana.

En la Figura 2(c), se presenta el contenido de humedad volumétrica del suelo, con muestras que han sido sometidas a análisis de laboratorio. El Lote 1 sobresale debido a su contenido de humedad significativamente mayor en comparación con los demás. Podría atribuirse al hecho de que, según las determinaciones de la textura del suelo, este tiene el contenido más elevado de arcilla. Estos resultados están en línea con los obtenidos por Zapata Sierra et al., (2015), quienes también informaron un aumento notable en los niveles de humedad en suelos con un contenido más alto de arcilla. En cuanto al segundo, se caracteriza por tener un contenido de humedad menor, con un promedio del 26.8% y un valor atípico de 34.3%. Se destaca que existe una similitud notable en los datos entre los cuartiles. En contraste, en el caso del tercero, se observa una dispersión de los datos de humedad del suelo considerablemente menor.

Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes de las Humedades del suelo registrada con Sonda Tdr350(a), Satelital(b), Volumétrica de laboratorio(c)



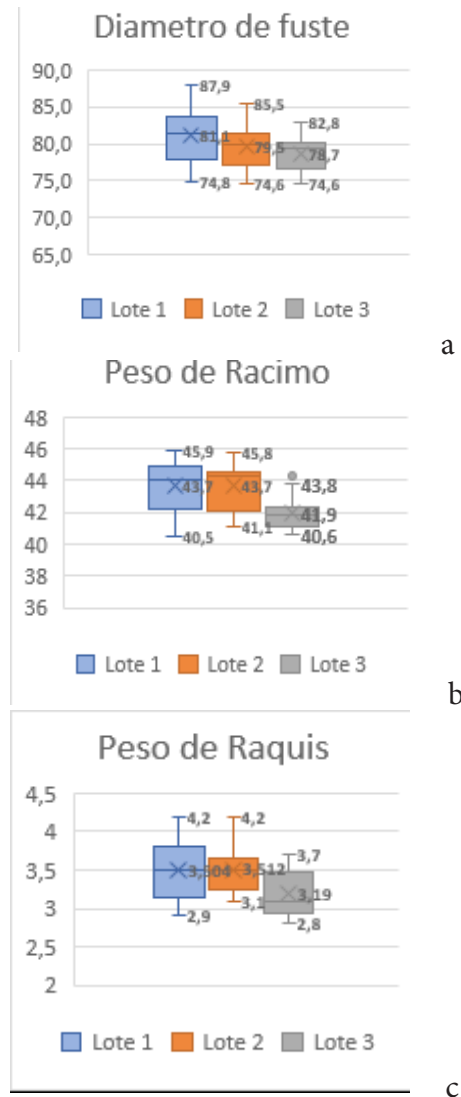


En relación a la variable Diámetro de Fuste, se han registrado valores máximos de 87,9 cm y mínimos de 75,6 cm. En lote 2, se aprecia una mayor dispersión de los datos, con una simetría negativa. Es relevante destacar que en este mismo se ha observado un menor diámetro de fuste en comparación con los demás, esta discrepancia podría explicarse por la mayor variabilidad en los niveles de humedad de suelo de acuerdo a Galán Saúco & Robinson (2013), tanto en la Θ_v como SondaTDR350, que son mediciones realizadas en el lugar y donde se registra el menor contenido de humedad. Por otro lado, en el tercero, se ha constatado una menor dispersión de los datos, lo cual vuelve a reflejar una asimetría negativa, tal como se ilustra en la Figura 3(a).

En la Figura 3 (b), al construir el diagrama de cajas y bigotes, se puede apreciar que en los Lote 1 y 2 existen valores que muestran una dispersión considerable por debajo de la media de la variable Peso de Racimo. En contraste, en el tercero, se observa menor dispersión de los datos, y destaca un valor atípico de 44,3 libras. Según Zarate & Kuiper (2013) el déficit de agua en el cultivo de banano puede provocar una pérdida del 34% del rendimiento además de una disminución en la calidad de la fruta.

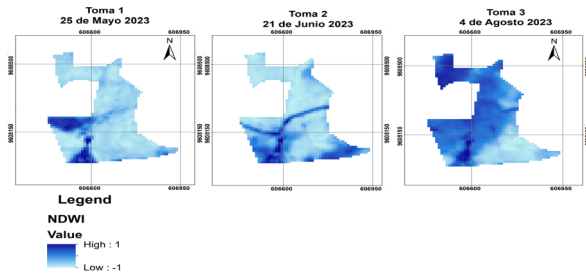
En la Figura 3(c), se representa la variabilidad de los datos en el Peso de Raquis, con valores máximos alcanzando las 4,2 libras y mínimos hasta las 2,8 libras. Por lo tanto, se puede observar que en el lote 3 se registró la media más baja en términos de peso.

Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes de las variables Diámetro de Fuste, Peso de Racimo y Peso de Raquis



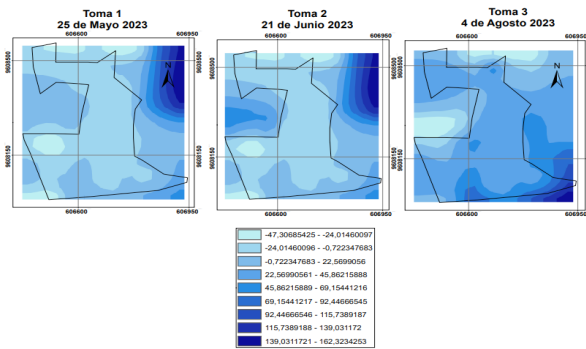
En las figuras 4, se puede observar la medición de humedad realizada por el satélite, muestra que en la primera y segunda toma no se presentan cambios sustanciales en los niveles de humedad. Sin embargo, en la tercera se evidencia un aumento significativo de la humedad del suelo. Según Villatoro (2021) los índices de humedad varían entre 1 y -1, los cuales se concuerdan con esta investigación ya que presenta valores que varían entre el rango antes mencionado.

Figura 4. Distribución espacial de la Humedad del Suelo Satelital en la finca el Vijahual



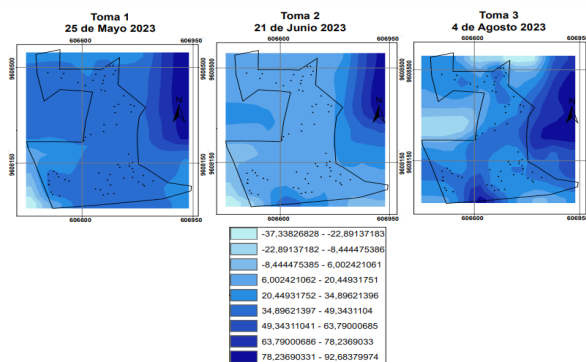
Se observa la distribución del contenido volumétrico de agua en el suelo medida por la Sonda TDR 350. En la Figura 5 en la toma 1 y 2 con una media de 30%, mientras que en la tercera se muestra más variabilidad de la humedad.

Figura 5. Distribución espacial de la Humedad volumétrica medida por Sonda TDR 350



En la figura 6 se muestra la distribución de la humedad en las tres tomas que se realizó, se puede observar que la finca presenta buena humedad en la primera medición, manteniendo una media de casi el 50% de contenido de agua en el suelo, en la segunda presenta una media de humedad de 25% y se puede contemplar que en la tercera existe variabilidad de humedad.

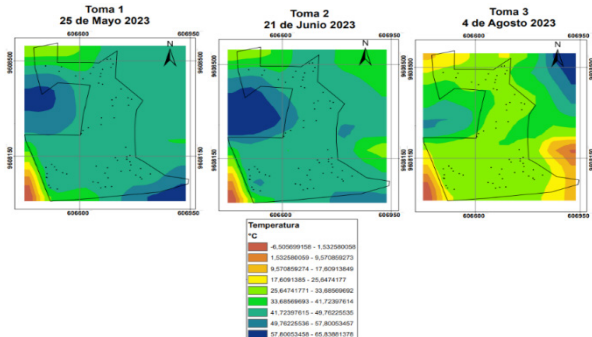
Figura 6. Distribución espacial de la humedad Volumétrica determinada en laboratorio de la finca el Vijahual



En la Figura 7, se observa que en las primeras dos mediciones no registraron cambios significativos en la temperatura del suelo, en contraste con la tercera medición que se evidenció una disminución. Estos resultados permiten

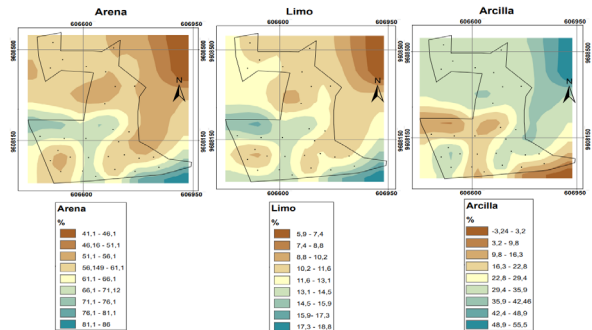
inferir una relación entre las condiciones de humedad de humedad representadas en las Figuras 9, 10, 11 y la temperatura. De acuerdo con Globe (2005) los suelos con humedad tienden a calentarse de manera más gradual que los suelos secos, ya que el agua presente en los poros tiene una capacidad superior para absorber calor en comparación con el aire.

Figura 7. Mapa de variación de la temperatura del suelo por sonda TDR350 en las diferentes tomas en la finca el Vijahual



De acuerdo a los datos obtenido de contenido de arena, limo y arcilla se puede observar en la figura 8 su distribución espacial en la finca, se visualizan los alto valores de arena que contiene presentando datos entre 66,1 y 71,1%. Por lo que se puede definir que la finca tiene un suelo de clase textural franca arenosa, coincidiendo con los resultados obtenidos por Villaseñor (2015) que nos define que suelos de esta zona tienen un alto contenido de arena.

Figura 8. Distribución espacial de los contenidos de Arena, Limo y Arcilla de la hacienda el Vijahual



Estadística descriptiva

En la Tabla 4 se observa que los contenidos de humedad determinados con la SondaTDR350 y Θ_v en laboratorio en los 3 puntos de muestreo, presentan una media que oscila entre 26,3 y 35,93% valores que están dentro de los contenidos de humedad señalados en base a las propiedades físicas de los suelos, un coeficiente de variación entre 8 y 12% cantidades que se consideran normales según los rangos establecidos por Pearson, una asimetría que se encuentra entre 1 y -1 y la curtosis que se establece en el rango de 1,71 a -1,66. No obstante la humedad Satelital se muestran datos elevados de humedad con una media de 53,4 a 64,2%.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos del contenido de humedad determinada por varios métodos

N° Lotes	Descriptivos	Media (%)	Mediana (%)	CV (%)	DS (σ)	Mín.	Máx.	Asimetría	Curtosis
Lote 1	Sonda TDR350	34,54	33,90	12,27	4,24	24,90	41,30	-0,08	-0,28
	Θ_v	33,96	34,40	9,40	3,19	28,40	40,50	0,09	-0,68
	Hum. Satelital	64,2	64,2	7,10	0,05	0,54	0,71	-0,24	-0,32
Lote 2	Sonda TDR350	35,93	35,20	8,96	3,22	30,80	45,40	1,11	1,71
	Θ_v	26,75	26,30	10,94	2,93	21,40	34,20	0,84	1,21
	Hum. Satelital	53,4	53,6	3,35	0,02	0,50	0,57	0,84	1,01
Lote 3	Sonda TDR350	31,13	31,60	10,20	3,18	24,50	37,10	0,09	-0,19
	Θ_v	30,69	31,00	10,15	3,11	25,89	35,36	-0,12	-1,31
	Hum. Satelital	58,8	61,4	12,21	0,07	0,49	0,69	-0,16	-1,66

Fuente: Elaboración propia

El análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor, realizado en las variables de la Tabla 6, permite señalar que existe diferencias significativas entre los distintos métodos de medición de humedad. En relación todos los parámetros asociados al desarrollo vegetativo, se constata que los valores de humedad Satelital, SondaTDR350, Diámetro de fuste (V-fst), Numero de hojas (V-Nh), presentan un p-valor inferior a 0,05, lo que indica que estas diferencias son altamente significativas.

Tabla 6. Efecto del factor de estudio en las variables medida

ANOVA				
Variables	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Hum. Satelital	1,238	61,9	61,543	,000
SondaTDR350	118,476	59,238	3,361	,037
Θ_v	4,359	2,180	,113	,893
V-fst	4980,064	2490,032	225,875	,000
V-Nh	1473,029	736,514	1376,156	,000

Fuente: Elaboración propia

El análisis post-hoc de Tukey respalda la conclusión de que las tres tomas en las variables Satelital y SondaTDR350 pertenecen a diferentes subconjuntos. Esto implica que las tomas de muestra de humedad cambian entre cada toma a excepción de la variable Θ_v que pertenece a un solo subconjunto, quiere decir que la humedad de suelo no varía en las tres tomas, como se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7. Prueba Post-Hoc de Tukey

Variables	Toma	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
			1	2
SondaTDR350	Toma 2	70	32,1929	
	Toma 3	70	33,1714	33,1714
	Toma 1	70		34,0314
	Sig.		,354	,447
Hum. Satelital	Toma 1	70	52,06	
	Toma 2	70	54,48	
	Toma 3	70		69,42
	Sig.		,327	1,000
Θ_v	Toma 3	70	33,3783	
	Toma 2	70	33,4097	
	Toma 1	70	33,6984	
	Sig.		,903	

Fuente: Elaboración propia

Correlación de Pearson

En la Tabla 8 presenta la correlación entre las variables SondaTDR350, Satelital y Θ_v , a lo largo de toda la zona de estudio, se observa que la más significativa se estableció entre la Θ_v y la SondaTDR350, con un valor máximo de 0.906 y un mínimo de 0,723. Estos resultados concuerdan con obtenidos por Largaespada & Henríquez (2015), quienes también identificaron una correlación positiva entre estas variables. Por otro lado, la correlación más baja se detectó en el Lote 1 entre la Satelital y SondaTDR350, con un valor de -0.298 lo que indica que estas variables varían en direcciones opuestas en este contexto específico.

Tabla 8. Correlación de Pearson de las variables de humedad

Nro Lotes	Variables	SondaTDR350		Hum. Satelital		Øv	
		Correlación de Pearson	p-valor	Correlación de Pearson	p-valor	Correlación de Pearson	p-valor
Lote 1	SondaTDR350			-,298	,148	,870**	,000
	Hum. Satelital	-,298	,148			-,228	,273
	Øv	,870**	,000	-,228	,273		
Lote 2	SondaTDR350			,313	,127	,723**	,000
	Hum. Satelital	,313	,127			,157	,453
	Øv	,723**	,000	,157	,453		
Lote 3	SondaTDR350			,109	,646	,906**	,000
	Hum. Satelital	,109	,646			,014	,955
	Øv	,906**	,000	,014	,955		

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se observa las diversas correlaciones entre los niveles de humedad y las variables relacionadas con el desarrollo y producción en el Lote 1. Se muestra que la correlación más fuerte se encuentra entre la SondaTDR350 y el Diámetro de Fuste (V-fst), con valor de 0.766 altamente significativa, seguido por el Número de Manos por Racimo (V-Nmr) con una alta significancia

de 0,60 y Numero de Mano al Sol (NdMs) con una correlación de 0,576. Por otro lado, las correlaciones más bajas se dieron entre la Satelital y todas las variables de desarrollo y producción, con valores próximos a -1, lo que evidencia que hay una ausencia de relación entre estas.

Tabla 9. Correlación de Pearson entre la Humedad y las de variables de desarrollo y Producción Lote 1

Correlación Humedad- Variables Biométricas Lote 1						
Variables	Sonda TDR350		Hum. Satelital		v	
	Correlación de Pearson	p-valor	Correlación de Pearson	p-valor	Correlación de Pearson	p-valor
V-fst	,766**	,000	-,092	,663	,548**	,005
V-Nh	-,239	,249	-,008	,970	-,287	,164
V-Hc	-,197	,345	-,197	,345	-,169	,419
V-Nmr	,600**	,002	-,217	,297	,397*	,049
V-NdMs	,576**	,003	-,406*	,044	,544**	,005
V-LdMs	-,183	,381	-,218	,296	-,369	,069
V-Prm	,724**	,000	-,358	,079	,552**	,004
V-Prq	,721**	,000	-,163	,437	,703**	,000

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 10 presenta las diversas correlaciones entre las humedades y las variables de desarrollo y producción en el Lote 2, nos manifestó mayor correlación entre la SondaTDR350y el Número de Manos por Racimo (V-Nmr) con un valor de 0.802, seguido por el peso de raquis (V-Prq) de 0,732, el Diámetro de Fuste (V-fst) alcanzando un valor de 0.706 y el Peso del Racimo (V-Prm) con un

valor de 0.668 todas estas altamente significativas, mientras que la relación entre la Øv y Numero de Hojas (V-Nh) y Hojas a la cosecha (V-Hc) es negativa tendiendo a -1. Así mismo en la Satelital la correlación entre esta y el Numero de manos (NdMs) es inversamente proporcional. Entre tanto En la SondaTDR350 mostró una correlación inversa con la variable de Longitud del dedo Mano Sol (V-LdMs)

Tabla 10. Correlación de Pearson entre la Humedad y las de variables de desarrollo y Producción Lote 2

Correlación Humedad-Variabes Biométricas Lote 2						
Variables	Sonda TDR350		Hum. Satelital		Θv	
	Correlación de Pearson	P-valor	Correlación de Pearson	P-valor	Correlación de Pearson	P-valor
V-fst	,706**	,000	,036	,863	,486*	,014
V-Nh	,032	,880	,350	,087	-,131	,532
V-Hc	,051	,808	,249	,230	-,030	,888
V-Nmr	,802**	,000	,146	,486	,555**	,004
V-NdMs	,293	,155	-,025	,906	,174	,405
V-LdMs	-,103	,625	,110	,602	,003	,990
V-Prm	,668**	,000	,040	,849	,442*	,027
V-Prq	,732**	,000	,283	,170	,742**	,000

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 11 la correlación entre la humedad y las variables de desarrollo y producción en Lote 3 nos presentó una mayor correlación en la SondaTDR350 y la Θv con las siguientes variables: Diámetro de Fuste (V-fst), Numero de Manos por Racimo (V-Nmr), Número de dedos a manos al sol (NdMs), longitud de dos de manos al sol (V-LdMs),

Peso de Racimo (V-Prm) y el Peso de Raquis (V-Prq). La menor correlación se manifestó en las correlaciones entre la Satelital y las siguientes variables: Numero de Hojas (V-Nh), Numero de Hojas a la Cosecha (V-Hc) y en el Peso del Raquis (V-Prq) mostranso valores con tendencia a ⁻¹.

Tabla 11. Correlación de Pearson entre la Humedad y las de variables de desarrollo y Producción Lote 3

Correlación Humedad-Variabes Biométricas Lote 3						
Variables	Sonda TDR350		Hum. Satelital		Θv	
	Correlación de Pearson	P-valor	Correlación de Pearson	P-valor	Correlación de Pearson	P-valor
V-fst	,860**	,000	,177	,455	,864**	,000
V-Nh	,265	,258	-,210	,374	,241	,305
V-Hc	,380	,098	-,168	,479	,293	,210
V-Nmr	,674**	,001	,143	,549	,597**	,005
V-NdMs	,589**	,006	,160	,500	,570**	,009
V-LdMs	,249	,290	,400	,081	,072	,762
V-Prm	,855**	,000	,080	,738	,825**	,000
V-Prq	,852**	,000	-,060	,803	,864**	,000

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

De acuerdo con el objetivo planteado se llegó a la conclusión de que la falta de correlación entre la Humedad Satelital y las variables tanto de desarrollo como de producción puede atribuirse a varios factores, debido a que el satélite mide la humedad superficial del suelo, que puede no reflejar adecuadamente la disponibilidad de agua en las raíces de las plantas, además de otros elementos como la salud de la planta y posibles estreses hídricos.

Las diferencias entre las humedades del suelo y el rendimiento del banano pueden variar según las condiciones específicas de cada lote. Esto destaca la importancia de

adaptar las estrategias de monitoreo y gestión agrícola a las características individuales de cada área de cultivo.

Que la relación entre la humedad satelital y las variables biométricas puede ser más compleja de lo que se supone inicialmente, y podría requerir un enfoque más detallado y específico.

La falta de correlación puede indicar que otros factores, como la calidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes o las prácticas de manejo agrícola, podrían estar influyendo de manera más significativa en las variables biométricas y el rendimiento del banano.

La detección de periodos críticos en la producción podría requerir un enfoque mas general que considere múltiples variables y factores que afectan al cultivo, en lugar de depender exclusivamente de la humedad satelital.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Álvarez García, H. (2022). Evaluación, análisis espacial y tratamiento de imágenes Sentinel 2. Índices de vegetación y humedad de la cuenca mediterránea andaluza. [Trabajo para obtencion de Maestría. Universidad Complutense Madrid, Madrid]. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/73985>
- Frąckiewicz, M. (05 de Abril de 2023). Ts2. <https://ts2.space/es/el-uso-de-imagenes-satelitales-para-el-monitoreo-de-la-humedad-del-suelo/#:~:text=La%20humedad%20del%20suelo%20es,de%20manera%20r%C3%A1pida%20y%20precisa.>
- Galán Saúco, V., & Robinson, J. (2013). FISIOLÓGIA, CLIMA Y PRODUCCIÓN DE BANANO. *Agroislas*, 15. https://agroislas.com/wp-content/uploads/2021/02/Galan_Sauco_V_Robinson_JC_2013_Fisiologia_clima_y_produccion_de_banano_Acrobat_Brasil_43-57_15_p..pdf
- García Lopez, A., Cun González, R., & Lorenzo Montero, S. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 5. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000300002
- Hernández Mera, K. E. (2021). Análisis multicriterio de la dinámica de distribución de Mora (*Rubus niveus* Thonb) como especie invasora de la zona agrícola en Santa Cruz, Galápagos. [Tesis. Universidad Central del Ecuador, Galapagos, Pichincha, Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/23047/1/UCE-FAG-HERNANDEZ%20KATHERINE.pdf>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (24 de Agosto de 2015). *Gobierno de Mexico*. <https://www.gob.mx/imta/articulos/estimacion-de-la-humedad-del-suelo-mediante-imagenes-satelitales>
- Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 12. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000300137
- Lestin Ruben, G. O. (2018). Evaluación de la humedad del suelo por medio de la sonda de reflectometría magnética (fdr) en el cultivo de banano. [Trabajo de Titilacion. Universidad Tecnica de Machala, Machala, Ecuador].
- Lopez Bravo, E., González Cueto, O., Hernández Pérez, L. M., & Herrera Suarez, M. (2021). Efectos en el suelo y la cepa de la actividad mecanizada en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(3), 9. <https://doi.org/http://orcid.org/0000-0002-2285-3413>
- Martínez Hernández, C. M., & Bermúdez Camacho, T. d. (2016). Caracterización de algunas propiedades físico– mecánicas y químicas en el banano (*Musa* spp.). *Centro Agrícola*, 43(3), 10. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0253-57852016000300006&script=sci_arttext&tling=en
- Martinez Varona, R. (2013). Efecto de riego deficitario controlado en la productividad del banano. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(2), 5. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000200009
- Ovando, G., de la Casa, A., Díaz, G., Díaz, P., Bressanini, L., & Miranda, C. (2021). Desempeño de diferentes índices de vegetación de Sentinel-2A para estimar el rendimiento de soja en agricultura de. *Agriscientia*, 38(2), 12. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n2.25148>
- Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense*, 33(1), 4. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6739/6427>
- Sandoval García, R., González Cubas, R., & Jimenez Pérez, J. (2021). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 26. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816>
- Santi Ruiz, N. A. (2018). Análisis de uso del suelo a partir de las imágenes Landsat en el cantón el Empalme, provincia del Guayas, en el periodo 1998 – 2015 provincia del Guayas, en el periodo 1998 – 2015. [Proyecto de Investigación. Universidad Estatal de Quevedo, Quevedo, Los Rios, Ecuador].
- Serrano Amaya, D. H. (2020). Estimación de la humedad superficial del suelo por medición indirecta y enfoque geométrico y estadístico con imágenes satelitales en una cuenca hidrográfica andina tropical colombiana. [Tesis de Grado. UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, Ibagué]. <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/e7d4b312-cd4b-4b52-9832-a08a15803798/content>
- Vélez Zapata, H. M. (2021). Determinación de las curvas de retención de humedad de un suelo mediante diferentes metodologías para su aplicación en el manejo de riego. [Trabajo para obtención de maestría]. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/177694>

- Villatoro, B. (2021). Uso de índices de vegetación ndwi y msi obtenidos de imágenes satelitales sentinel-2 y landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar. *Cengicana*, 19. <https://cengicana.org/files/20200723113155764.pdf>
- Zapata Sierra, A. J., Conretras Paris, J. I., Usero, M., & Baeza Cano, R. (2015). Influencia de la textura del suelo en los bulbos húmedos desarrollados en suelo enarenado con emisores de riego localizado de bajo caudal. *Universitat Politècnica de València, Valencia* 2015, 11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4995/CN-Riegos.2015.1431>
- Zarate, E., & Kuiper, D. (2013). *Evaluación de Huella Hídrica del banana para pequeños productores en Perú y Ecuador*. Good Stuff International. http://www.goodstuffinternational.com/images/PDF/Reporte%20GSI_HH_Bananas_pequenos_productores.pdf