Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Geomática

ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (*Ananas comosus (*L.) Merr) UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI

Ing. Agr. Wilmer Geovany Colocho Hernández
Asesorado por M. Sc. Ing. Agr. José Alfredo Suárez Urrutia

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (*Ananas comosus (*L.) Merr) UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. AGR. WILMER GEOVANY COLOCHO HERNÁNDEZ
ASESORADO POR M. SC. JOSÉ ALFREDO SUÁREZ URRUTIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN GEOMÁTICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (*Ananas comosus (*L.) Merr) UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 10 de octubre de 2022.

Ing. Agr. Wilmer Geovany Colocho Hernández

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.111.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (*Ananas comosus (L.) Merr)* UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI,** presentado por: **Ing. Agr. Wilmer Geovany Colocho Hernández,** que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Guatemala, febrero de 2024

JFGR/gaoc

Guatemala, febrero de 2024

LNG.EEP.OI.111.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (*Ananas comosus (L.) Merr)* UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI"

presentado por **Ing. Agr. Wilmer Geovany Colocho Hernández** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DIRECTORA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 12 de mayo de 2023

M.A. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Alvarez Coti

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (ANANAS COMOSUS (L.) MERR) UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI.** del estudiante **Wilmer Geovany Colocho Hernández** quien se identifica con número de carné **201400602** del programa de Ingenieria Geomatica.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el ***Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.*** Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

Mtro. Ing. Marlon Antonio Perez Turk
Coordinador
Ingenieria Geomatica
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 12 de mayo de 2023

M.A. Ing. Edgar Darío Alvarez Cotí

Director

Escuela de Estudios de Postgrados

Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Cotí:

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR SUELO EN EL CULTIVO DE LA PIÑA (ANANAS COMOSUS (L.) MERR) UTILIZANDO LOS ÍNDICES NDVI Y SAVI"** del estudiante **Wilmer Geovany Colocho Hernández** del programa de **Ingeniería Geomática** identificado con número de carné 201400602.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Mtro. Ing. José Alfredo Suárez Urrutia

Colegiado No. 3535

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Sin su gracia y bendición no se hubiera cumplido esta meta, por darme salud y colocar a las personas indicadas en los momentos difíciles de este recorrido.
Mi familia	Por ser mi mayor orgullo, de quienes aprendí el valor de la vida, por ser mi motor, mi ejemplo de lucha, perseverancia, fortaleza y su amor incondicional.
Mi asesor	Quien siempre estuvo al pendiente de mi investigación y demostró ser de gran apoyo profesional durante la elaboración de esta.
Mis amigos	Por el apoyo incondicional en este proceso y que compartieron su experiencia y conocimiento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS VII
GLOSARIO IX
RESUMEN XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA XIII
JUSTIFICACIÓN XV
OBJETIVOS XVII
HIPÓTESIS XIX
ANTECEDENTES XXI
ALCANCES XXV
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO XXIX
INTRODUCCIÓN XXXI

1. MARCO TEÓRICO 1
   1.1. Geomática 1
   1.2. Sistemas de información geográfica 1
   1.3. Percepción remota 2
   1.4. Sensores remotos 2
      1.4.1. Sensores pasivos 2
      1.4.2. Sensores activos 3
   1.5. Imágenes satelitales 3
      1.5.1. Imágenes multiespectrales 3
      1.5.2. Espectro electromagnético 4
      1.5.3. Firmas espectrales 5

1.5.4. Programa Sentinel 2 6
1.6. Sistema de producción agrícola de piña 6
1.6.1. Características morfológicas 6
1.6.2. Requerimientos edafo-climáticos 7
1.6.3. Enfermedades 8
1.6.3.1. Phytophthora sp 8
1.6.3.1. Erwinia sp 8
1.6.3.1. Ceratocystisi paradoxa 8
1.6.3.1. Fusarium sp 9
1.6.3.1. Marchitez de la piña 9
1.6.4. Plagas 9
1.6.4.1. Dysmicoccus brevipes 9
1.6.4.2. Metamasis dimidiatepennis 9
1.6.5. Nutrición 10
1.6.6. Variedades de piña 10
1.6.6.1. Cayena lisa 11
1.6.6.2. Hibrido MD2 11
1.6.7. Fenología 11
1.7. Monitoreo agrícola mediante percepción remota 12
1.7.1. Índices vegetales (IV) 14
1.7.1.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) 14
1.7.1.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) 16
1.8. Técnicas de análisis de información 17
1.8.1. Análisis de suelo 17
1.8.1.1. Análisis fisicoquímico 17
1.8.1.2. Método gravimétrico 17
1.8.2. Fichas de campo 18

1.8.3. Prueba de correlación de pearson 18
1.8.4. Regresión lineal 19
1.8.5. Prueba de normalidad 19

2. ANÁLISIS GEOESPACIAL 21
2.1. Área de estudio 21
2.1.1. Descarga de imágenes 25

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 31
3.1. Análisis de las dinámicas de la humedad y la textura de suelo a través de NDVI y SAVI 31
3.1.1. Regresión Lineal 33
3.2. Análisis de la relación entre los índices de vegetación (NDVI y SAVI) y las variables biométricas. 34
3.2.1. Regresión Lineal 35
3.3. Análisis de la relación del IAF y los índices NDVI y SAVI. 35

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 37
4.1. Análisis de las dinámicas de la humedad y textura del suelo a través de NDVI y SAVI 37
4.2. Análisis de la relación entre los índices de vegetación (NDVI y SAVI) y las variables biométricas 39
4.3. Análisis de la relación del IAF y los índices NDVI y SAVI 41

CONCLUSIONES 43
RECOMENDACIONES 45
REFERENCIAS 47
APÉNDICES 57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético....4
Figura 2. Firmas espectrales....5
Figura 3. Grilla Sentinel 2 para Guatemala....22
Figura 4. Mapa de las áreas de producción de piña en Guatemala....23
Figura 5. Etapas fenológicas del cultivo de piña....24
Figura 6. Área de estudio....25
Figura 7. Portal Copernicus Hub....26
Figura 8. Cálculo de NDVI y SAVI....28
Figura 9. Relación de IAF e IV....36

TABLAS

Tabla 1. Ficha de campo....18
Tabla 2. Nomenclatura de las imágenes sentinel 2....27
Tabla 3. Rango de valores de NDVI y SAVI....29
Tabla 4. Sensibilidad de los IV ante las dinámicas de humedad y textura en los lotes....32
Tabla 5. Correlación de variables de suelo e IV....33
Tabla 6. Modelos de regresión lineal de las variables del suelo e IV....33
Tabla 7. Análisis de correlación de las variables biométricas con los IV....34
Tabla 8. Modelos de regresión lineal de las variables biométricas con los IV....35

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h planta	Altura de planta
cm	Centímetro
ø	Diámetro
Ha	Hectáreas
IAF	Índice de Área Foliar
lb	Libra
mm	Milímetro
Pf	Peso fresco
Ps	Peso seco
%	Porcentaje

GLOSARIO

Arvenses	Las plantas que crecen junto o sobre plantas cultivadas, que alteran o impiden el desarrollo normal del cultivo provocando aumentos en los costos y mermas en el rendimiento.
Efecto borde	Interacción de ecosistemas adyacentes forestales y no forestales o usos de suelo, que generan una transición abrupta conocida también como frontera.
Fenología	Observación, registro e interpretación de las etapas de desarrollo de un cultivo.
Índice de área foliar	Cantidad de superficie fotosintética presente con relación a la superficie total del ecosistema o área de estudio.
NIR	Acrónimo con el que se designa a la parte del espectro electromagnético del infrarrojo cercano
Textura del suelo	El contenido de las partículas de arena, limo y arcilla que se encuentran en el suelo.
Variable biométrica	Características de las plantas de interés que se pueden medir en el suelo y estimar mediante teledetección a varias escalas.

RESUMEN

Esta investigación se fundamenta en los principios en la agricultura de precisión, la cual posibilita el monitoreo de las plantaciones agrícolas mediante la observación e interpretación de la interacción de los fenómenos en la superficie terrestre a través de imágenes satelitales.

En el ámbito del monitoreo agrícola, una de las técnicas aplicadas consiste en el empleo de índices de vegetación, siendo el NDVI el más reconocido. Sin embargo, el NDVI se ve afectado por la reflectancia del suelo, generando problemáticas en cultivos poco densos o en etapas iniciales, lo que resulta en inconsistencias en los valores y, por ende, interpretaciones deficientes de la actividad fotosintética de la plantación.

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio fueron obtenidas del satélite Sentinel 2A, durante el periodo comprendido entre noviembre de 2022 a enero del 2023, tomando como criterio las etapas fenológicas F1 y F2 del cultivo de la piña.

Partiendo de esta situación se realizó la estimación de la influencia de la reflectancia del suelo en el cultivo de piña para el monitoreo agrícola utilizando los índices NDVI y SAVI. Los resultados obtenidos en las correlaciones de las variables biométricas (altura, largo, ancho, ø planta) con los IV, presentando mejores valores con SAVI, 0.81, 0.67, 0.59, 0.61 respectivamente en comparación con los obtenidos mediante el NDVI. Asimismo, se evidenció la influencia de la reflectancia del suelo en la correlación que se logran entre el IAF-SAVI (0.648) presentando un mejor valor que la correlación de IAF-NDVI (0.624).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde el campo de la geomática las herramientas para el monitoreo agrícolas han estado en crecimiento, una que ha tomado bastante relevancia es el índice de vegetación (IV). Los IV se ven alterados por la reflectancia del suelo, tal es el caso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), siendo un problema en los cultivos poco densos de follaje, con menor densidad de siembra y los que se encuentran en etapas iniciales de su establecimiento y desarrollo.

Al utilizar el NDVI en plantaciones que cumplen con las características antes mencionadas, como la piña, se tendrá una inconsistencia en los valores y por ende una deficiente interpretación e identificación de distintos factores tales como; estrés hídrico, presencia de enfermedades y plagas, deficiencias nutricionales, variables biofísicas entre otros Aparicio (Carvajal y García, 2016).

El monitoreo agrícola en el cultivo de la piña se realiza de manera empírica por los productores de la aldea El Jocotillo, Villa Canales, debido al desconocimiento de las herramientas de sensoramiento remoto y la poca participación de instituciones como el MAGA y la municipalidad en temas de investigación en el cultivo, generando escasez de información, limitando así las acciones de detección de factores y/o estrés que impacten al cultivo y por ende las prácticas agrícolas preventivas para minimizar daños en las plantaciones.

Esto lleva a plantear la pregunta principal del estudio ¿Cuál es la influencia de la reflectancia del suelo en el monitoreo agrícola del cultivo de la piña a través de índices de vegetación?

Para contestar a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es la influencia de los valores de humedad y textura del suelo en los valores de los índices NDVI y SAVI?

- ¿Qué índice de vegetación (NDVI y SAVI) presenta mejor correlación respecto a las variables biométricas del cultivo de piña?

- ¿Cuál es la influencia de la reflectancia del suelo (a partir del IAF) en el monitoreo agrícola en el cultivo de la piña (*A. comosus* (L.) Merr) utilizando los índices NDVI y SAVI?

JUSTIFICACIÓN

La investigación realizada se justificó dentro del marco de la línea de investigación de la teledetección aplicada al medio ambiente del programa de Maestría en Ciencias de la Geomática de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala..

Mediante los conocimientos adquiridos sobre la influencia del suelo en el índice de vegetación NDVI, se alcanzó una comprensión más amplia de la relación entre el suelo y las plantas. Este conocimiento permitió la realización de monitoreos agrícolas más precisos, fundamentalmente en plantaciones poco densas o en etapas fenológicas iniciales, como en el cultivo de piña.

Esta investigación benefició directamente a los productores de piña y aquellas que participan en cultivos poco densos y utilizan la teledetección para el monitoreo agrícola y la detección de diferentes factores en campo. Contribuyó significativamente a mejorar la selección de los índices de vegetación y comprender las limitaciones en plantaciones con suelo descubierto. Estos descubrimientos posibilitarán realizas ajustes en investigaciones futuras.

OBJETIVOS

General

Evaluar la influencia de la reflectancia del factor suelo en el monitoreo agrícola utilizando índices de vegetación en el cultivo de la piña (*Ananas comosus* (L.) Merr).

Específicos

1. Identificar en que porcentaje la humedad y textura del suelo influyen en la reflectancia del suelo al momento de realizar los cálculos del NDVI y SAVI.

2. Determinar la correlación entre los índices NDVI y SAVI con las variables biométricas del cultivo de la piña (*A. comosus* (L.) Merr).

3. Determinar la influencia de la reflectancia del suelo (a partir del IAF) en el monitoreo agrícola en el cultivo de la piña (*A. comosus* (L.) Merr) utilizando los índices NDVI y SAVI.

.

HIPÓTESIS

General

El uso del índice SAVI permite disminuir la alteración provocada por la reflectancia del suelo, que influye en los valores del NDVI respecto a las variables biométricas que ayudan al monitoreo agrícola del cultivo de piña.

Nula

No existe diferencia significativa en la correlación de los valores de los índices vegetales NDVI y SAVI con las variables biométricas del cultivo de piña

Alternativa

Existe diferencia significativa en la correlación de los valores de los índices vegetales NDVI y SAVI con las variables biométricas del cultivo de piña

ANTECEDENTES

La agricultura ha tenido un cambio tecnológico constante en las últimas décadas, como menciona Giraldo (2021), en el siglo XIX se inició con la Agricultura 1.0, en el siglo XX Agricultura 2.0, entre los años 1960 y 1980 la Agricultura 3.0 dando inicio al uso de imágenes satelitales para el monitoreo de cultivos. La Agricultura 4.0 es utilizada actualmente, logrando revolucionar la tecnología para obtener así la agricultura de precisión, alcanzando a mejorar sus aplicaciones, resultado y siendo está más eficiente.

La percepción remota (teledetección) es una ciencia que ha tenido una creciente participación en la agricultura de precisión utilizando imágenes satelitales de alta resolución y de bajo costo (gratuitas) para obtener información precisa de los cultivos (Mena et al., 2019).

La consideración de la variabilidad espacial (resolución espacial) y temporal (resolución temporal) es de suma importancia para cuantificar la interacción de los factores, estableciendo así una relación directa con la actividad fotosintética y permitiendo monitoreos continuos. Durante el año 2013 y 2019, se utilizaron los índices NDVI y SAVI junto con imágenes de Landsat 8 para estimar el rendimiento de producción del trigo. Los resultados revelaron una mayor precisión con el SAVI, alcanzando una eficiencia del 0.99, en comparación con el NDVI, que registró una eficiencia de 0.57, evaluados mediante el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Este resaltante desempeño con el SAVI es respaldado por las investigaciones de Vargas et al., (2020) y Odunayo D et al. (2020), quienes subrayan la eficacia de este índice en la evaluación del rendimiento de la producción de trigo.

En el ámbito de la agricultura de precisión, se emplean diversos IV como herramientas versátiles para realizar monitoreos agrícolas. Entre estos, destaca el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), reconocido por su capacidad de generar informes agrícolas detallados. Estos informes abarcan aspectos cruciales, como la fecha de brotación, las distintas etapas del desarrollo del cultivo, el Vigo de crecimiento y la salud de la vegetación, proporcionando una visión periódica. Sin embargo, a pesar de la utilidad del NDVI, su simplicidad lo hace susceptible a influencias externas, especialmente en áreas con baja densidad de vegetación, donde la reflectancia del suelo puede afectar sus mediciones (Balbontín et al., 2021).

Granado, (2015), por su parte hacen mención que una de las técnicas aplicadas para disminuir la alteración que causa la reflectancia del suelo en los índices vegetales, se debe considerar un factor de corrección “L” el cual toma muy en cuenta las propiedades físicas y químicas del suelo. Dicho factor se encuentra dentro de la fórmula del Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI por sus siglas en inglés), utilizándolo en áreas con vegetación poco densas y/o que se encuentra en fases iniciales de su establecimiento.

Gameiro et al., (2017), hace mención del factor “L” utilizado en la investigación Evaluación de la cobertura vegetal mediante índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) en la Subcuenca Hidrográfica de Baixo Jaguaribe, CE, fueron valores de 0.25 para vegetaciones densas, 0.5 para vegetación con mediana densidad, 1 para vegetación muy poco densa, y si dicho valor de corrección es igual a 0 los resultados obtenidos serán similares al NDVI.

Gameiro et al., (2017), determinó que el uso del SAVI presenta una mejor discriminación de los objetos comparado con el NDVI, obteniendo valores del índice en la vegetación mayores, lo que indica que tienen un estado de mayor actividad fotosintética que los resultados que obtenidos por el NDVI

Vani y Mandla, (2017), realizó una investigación en 6 tipos de terrenos o clases, utilizando imágenes de diferentes años en la etapa de producción del cultivo, comparando los resultados de los valores del NDVI y SAVI, donde concluyo que pixeles con un 15% de vegetación tienen influencia o alteraciones en los valores del NDVI por la reflectancia del suelo.

Sin embargo, Ren et al., (2018), menciona en el estudio uso del factor de ajuste del suelo negativo en el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para la estimación de biomasa viva aérea en pastizales áridos" que obtuvo mejores resultados con valores negativos del factor de corrección "L" con un valor de -0.2, debido a que los resultados con valores de 0 a 1 eran muy similares al NDVI, por lo cual se planteó ampliar el rango del factor L de -1 a 1.

Zhang, et al., (2015), hace mención en su investigación que el efecto de las sombras es un factor que altera los valores de los índices vegetales, en este caso afecto al SAVI ya que considera las sombras como valores similares a la reflectancia del suelo teniendo un valor promedio de 0.947 y el NDVI un valor promedio de 0.958.

Otro factor que está ligado a la variabilidad de los valores de los índices es la precipitación Teixeira et al., (2017), menciona que en el estudio realizado durante 3 años consecutivos el valor del NDVI y SAVI tuvieron un incremento directamente proporcional al aumento de la precipitación, debido a que existió un incremento en la densidad de la vegetación, sin embargo, el SAVI presento valores promedios menores, siendo un factor que altera los valores de SAVI, la humedad del suelo.

En Brasil se llevó a cabo una investigación con índices espectrales para determinar la clasificación de uso y cobertura del suelo, en donde (Sousa da et al., 2019), determinó que, para los usos de bosque nativos, bosques sembrados y agricultura se tuvieron valores considerables de la correlación (0.68) con los índices SAVI y NDVI.

El cultivo de la piña se puede clasificar en los siguientes estados o fases: a) suelo desnudo, b) plantilla, c) plantación establecida y d) roza. De estas fases las de interés son la b y c, siendo la b la más afectada por la reflectancia del suelo por ser una plantación más joven (Solano. y Aguilar , 2016).

Rodríguez (2021), hace mención que las plantas de piña tienen niveles estables de nitrógeno en las etapas iniciales, con una buena actividad fotosintética que promueve el crecimiento vigoroso y con una coloración verde oscura. El fósforo se encuentra demandado en mayor cantidad cuando la planta se encuentra en floración y fructificación generando una actividad fotosintética alta.

.

Otro factor importante que menciona Rodríguez (2021) es que los índices vegetales, al utilizar imágenes satelitales de alta precisión no logran identificar con buena exactitud la existencia de arvenses y sombras de las plantas, siendo este un factor que afecta los valores del índice

ALCANCES

El impulso de esta investigación se cimienta en el uso de las imágenes satelitales con sensores multiespectrales para evaluar si existe alteración en los índices vegetales, específicamente en el NDVI, por la reflectancia del factor suelo.

La presente investigación es del tipo cuantitativa, debido a que este estudio tiene como fin evaluar las variables influyentes en la reflectancia del suelo, además de una correlación de las variables biométricas y los valores de los índices NDVI y SAVI, y cuantificar la influencia del factor suelo en el monitoreo agrícola en el cultivo de la piña.

Según las partes descritas en dicha investigación se puede aplicar en investigaciones de las áreas tal como: agricultura de precisión ya que aplica como fundamentos los conocimientos de percepción remota o teledetección para el monitoreo agrícola del cultivo de piña, de análisis estadísticos que se realizaran y el uso de datos digitales e imágenes satelitales emplea lo geoespacial.

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

Como propuesta metodológica para la estimación de la influencia de la reflectancia del suelo en el monitoreo agrícola del cultivo de la piña utilizando el NDVI y SAVI se propone hacerlo en cuatro fases, siendo las siguientes: fase I: determinación del cultivo e índices espectrales que tienen influencia de la reflectancia del suelo para el monitoreo agrícola; fase II: definición y descripción del cultivo de la piña, variables biométricas y del suelo para determinar la influencia de la reflectancia del suelo; fase III: recopilación de los datos para las variables definidas que permitirán determinar la influencia de la reflectancia del suelo y la fase IV: analizar los datos obtenidos para calcular la influencia de la reflectancia del suelo en el monitoreo agrícola de la piña.

En la primera fase se describió el cultivo sus fases fenológicas y la interacción con el suelo, los insumos geoespaciales, las técnicas de análisis geoespacial (IV), y la temporalidad. Las áreas a estudiar fueron derivados de un recorrido de campo, del territorio de estudio. La búsqueda de las imágenes se asoció a las fases fenológicas.

Con la información preliminarmente descrita y analizada, se procedió a la segunda fase, definiendo el cultivo de la piña siendo este el de interés para medir la influencia del suelo utilizando los IV (NDVI y SAVI) en las etapas fenológicas F1 y F2 debido a que son las etapas iniciales de la plantación y en estas presenta una menor cobertura. Considerando las variables de suelo (peso fresco, peso seco % de humedad y textura) y las variables biométricas (altura planta, diámetro, IAF, fase fenológica)

Se optó por utilizar el insumo geoespacial Sentinel 2 debido a sus características técnicas que se adaptan a las fases F1 y F2. Las imágenes fueron descargadas del portal Copernicus Hub en el período temporal desde noviembre de 2022 hasta enero de 2023. Se seleccionaron 6 lotes que conforman el área de estudio con bases a las fases F1 y F2 (Radulovich, 2009).

En la tercera fase, se recopiló la información de las variables del suelo, el peso fresco se determinó a partir de una muestra (3 libras) de suelo que se obtiene a partir de submuestras (17 submuestras por hectárea), para obtener el peso seco se dejan secar las muestras a temperatura ambiente bajo sombra, siendo estas necesarias para determinar el porcentaje de humedad de las muestras, a su vez se enviaron 6 muestras a laboratorio para determinar la textura del suelo de los lotes.

Se determinó que un pixel (100 mt^2) contiene 430 plantas utilizando el cálculo de muestras finitas se establecieron las unidades de muestreo (número de plantas = 140). Las ubicaciones geográficas de estos fueron determinados a partir de la herramienta *create random point* en el software ArcGIS Pro, siendo estas en donde se miden las variables biométricas del cultivo de la piña en la fase F1 y F2. Posteriormente se realizaron los geoprocesamientos necesarios en el software ArcGIS Pro para calcular NDVI y SAVI obteniendo los valores de los mismos a partir de la ubicación geográfica de las unidades de muestreo.

Constatando y analizando los resultados obtenidos en la cuarta fase, determinando la interacción que existe entre las variables estudiadas y los valores de los IV, la determinación de esta interacción se apoyó realizando pruebas de normalidad, homocedasticidad y correlación de Pearson.

INTRODUCCIÓN

La geomática es una disciplina que reúne el estudio de varias geociencias, el sensoramiento remoto o teledetección es una herramienta que pertenece a la agricultura de precisión siendo muy versátil para realizar diferentes observaciones e interpretaciones de las plantaciones agrícolas que se encuentran dentro de la superficie terrestre que son capturadas por las imágenes de satélite o fotografías aéreas.

La agricultura ha tenido diferentes avances tecnológicos en el sensoramiento remoto, por lo cual hoy en día se habla sobre la agricultura de precisión, que incluye herramientas y tecnologías de vanguardia que ayudan a la detección temprana de plagas, enfermedades, desbalances nutricionales, estrés por diferentes causas, entre otros factores en los cultivos.

La teledetección es la técnica de detección que tiene como instrumentos las imágenes satelitales o fotografías aéreas y los índices vegetales (IV), siendo de los más conocido y utilizado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés).

Mediante su aplicación se logra determinar la vigorosidad de la vegetación que se encuentra dentro de la imagen, indicando que estas tienen altos, medios, bajos y nulos niveles de actividad fotosintética. Sin embargo, este índice se ve afectado por la reflectancia del suelo, por lo tanto, se deben utilizar índices que tomen en cuenta este factor como lo es el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI por sus siglas en inglés).

En el siguiente documento se expone la problemática que se tiene al utilizar el NDVI, en cultivos poco densos o en etapas iniciales de su establecimiento, como es el cultivo de la piña, afectando los valores del índice. Por lo tanto, es necesario comparar el SAVI con el NDVI, para determinar la influencia de la reflectancia del suelo y si existe una correlación con las variables biométricas del cultivo.

A nivel nacional se tiene una producción que se encuentra distribuida de la siguiente manera: Guatemala con el 36 %, Izabal 14 %, Escuintla 11 % y el resto de los departamentos con un 3 %. La aldea El Jocotillo pertenece al 36 % del departamento de Guatemala, siendo el área productiva más grande con más de 1000 hectáreas con un rendimiento promedio de 40 a 50 toneladas métricas por hectárea. (MAGA, 2016)

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Geomática

En la actualidad existen varias definiciones para la geomática, una de las más concretas menciona un conjunto de ramas del conocimiento obtenido por los sistemas GNSS, capturando y procesando las imágenes satelitales utilizando los sistemas de información geográfica, para el análisis de los datos espaciales que se relacionan con las características terrestres (Ciampagna, 2014).

1.2. Sistemas de información geográfica

El SIG, es una herramienta que permite el manejo o tratamiento de datos espaciales, logrando estudiarlos y obtener resultados que se interpretan dependiendo de los objetivos propuestos (Sarría, 2006).

Actualmente es muy utilizado en la rama de la agricultura de precisión, debido a los distintos alcances que se pueden obtener en el monitoreo de cultivos, variación del suelo utilizando las imágenes satelitales y/o fotografías aéreas (Olaya, 2014).

1.3. Percepción remota

La también denominada Teledetección, es una herramienta fundamental para la agricultura de precisión, permitiendo la toma o captura de información a distancia sobre áreas agrícolas, sin necesidad de encontrarse físicamente en el área o cerca del objeto y circunscrita a las medidas de la radiación electromagnética (Martini et al., 2010).

En la agricultura esto se traduce a la recolección de información a través de sensores remotos, cubriendo áreas extensas de manera rápida y periódicamente, permitiendo detecciones tempranas de alteraciones en los cultivos y logrando realizar acciones preventivas, logrando reducir costos (Martini et al., 2010).

1.4. Sensores remotos

Son herramientas con la capacidad de leer la energía electromagnética anotando la intensidad del mismo en el rango del espectro, logrando así tomar la imagen. Dentro de estos se pueden encontrar:

1.4.1. Sensores pasivos

Son aquellos que son dependientes de la energía electromagnética emitida por el sol, logrando la captura de la información reflejada por los objetos sobre la superficie terrestre. Son llamados de esta manera ya que no cuentan con una fuente de energía propia, logrando la recopilación de la información solo en horas diurnas y sufre alteraciones por las condiciones atmosféricas o momento del día (Chuvieco, 1995, como se cita en Universidad de Murcia, 2011).

1.4.2. Sensores activos

Se les denomina sensores activos a los que emiten su propia energía electromagnética, recopilándola después de haber interactuado con la superficie terrestre y sus objetos siendo reflejada por los mismos, esta energía es emitida por ondas microondas o láser, estos cuentan con la capacidad de recopilar información tanto en horas diurnas como nocturnas y no sufre alteraciones por la condición atmosférica (Chuvieco, 1995, como se cita en Olaya,2012).

1.5. Imágenes satelitales

Desde la década de los 60, se ha observado la tierra desde el espacio, utilizando cámaras colocadas en los sensores o satélites, hasta llegar a los sensores hiperespectrales utilizados en la actualidad. La cual se utiliza para distintos fines, según su accesibilidad y características.

1.5.1. Imágenes multiespectrales

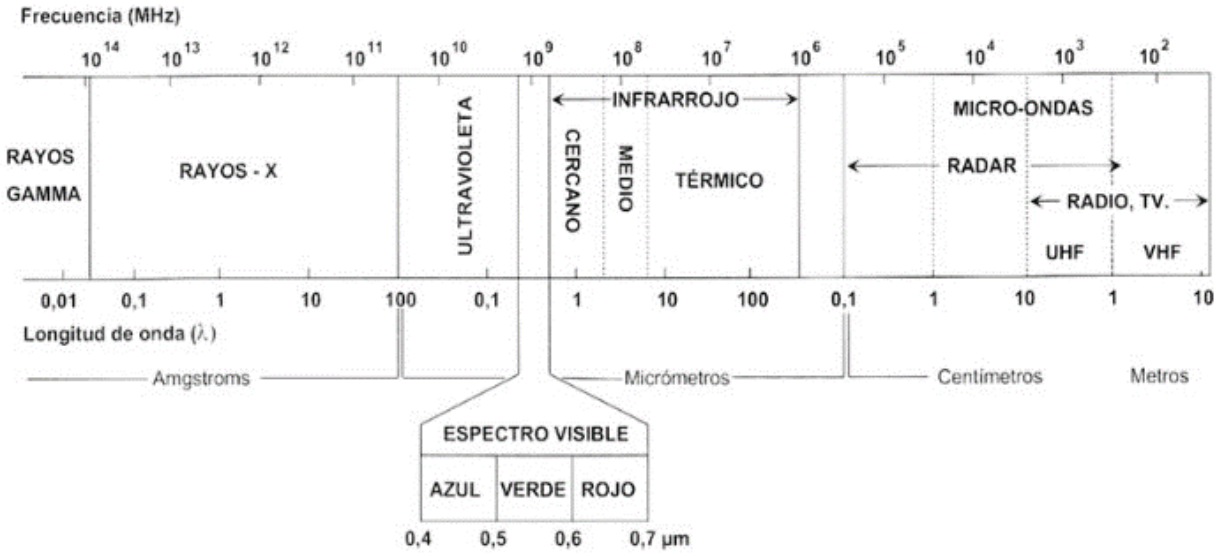
Las imágenes permiten medir y capturar diferentes rangos del espectro electromagnético, denominando al rango como los colores que percibimos y no logramos percibir directamente con el ojo humano y se les conoce como bandas a los rangos de dichas frecuencias (Enviromental Systems Research Institute, Inc. [ESRI], 2021).

1.5.2. Espectro electromagnético

El espectro es conocido como la radiación y luz que se encuentran en un rango demasiado extenso, el cual no cuentan con un límite inferior o superior establecido, por lo tanto, este se divide en regiones. Los dos parámetros con los cuales se pueden referir al espectro son longitud de onda y frecuencia (Fontal, 2005).

Figura 1.

Espectro electromagnético



Nota. El gráfico muestra el comportamiento del espectro electromagnético y su longitud de onda en metros. Obtenido M Andrés, J Cano, P Cruz (2013). *Generación de algoritmo para la identificación de alerce (fitzroya cupressoides) mediante análisis de imágenes hiperespectrales" en el lago tagua- tagua, x región, chile.*(https://www.researchgate.net/publication/332188185_Generacion_de_algoritmo_para_la_identificacion_de_Alerce_Fitzroya_Cupressoides_mediante_analisis_de_imagenes_hiperespectrales_en_el_lago_Tagua-Tagua_X_Region_Chile). Consultado el 2 de octubre de 2023. De dominio público.

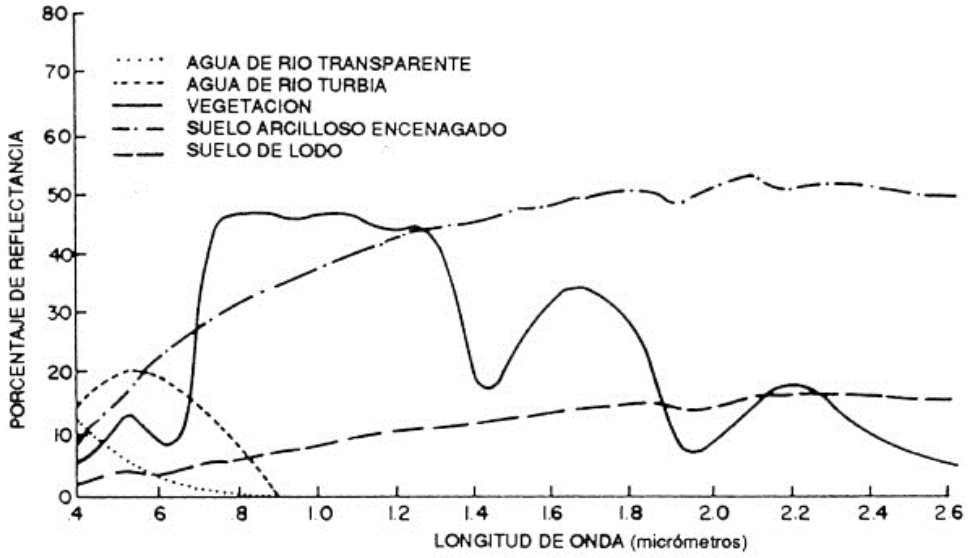
1.5.3. Firmas espectrales

Estas muestran los diferentes valores de la radiación reflejada por los distintos objetos sobre la superficie terrestre basado en la longitud de onda. Permitiendo identificar elementos específicos en las imágenes (ESRI, 2021).

Siendo el resultado de la radiación reflejada según el canal, por lo tanto, un objeto puede tener un valor alto de reflectancia en un canal mientras que en otro absorbe la energía, mostrando una curva que facilita su identificación (Guzmán, 2019).

Figura 2.

Firmas espectrales



Nota. El gráfico muestra las firmas espectrales por cada material. Obtenido de Food and Agriculture Organization of the United Nations (sf). *La Telepercepcion como fuente de datos*. (https://www.fao.org/3/t0446s/T0446S04.htm#fig4.4)Consultado el 2 de octubre de 2023. De dominio público.

1.5.4. Programa Sentinel 2

Son una flota de satélites que pertenecen al programa Copernicus, de la comisión europea, que tiene como fin la vigilancia del medio ambiente y los cambios que sufre. Está dotado con una cámara multiespectral de 13 bandas espectrales, con una resolución espacial de 10 metros que permite una mejor identificación de los objetos y se podrá tener imágenes cada 5 días por su resolución temporal (The European Spacy Agency [ESA], 2015).

1.6. Sistema de producción agrícola de piña

La piña es originaria del Sur de América, específicamente de Argentina, Brasil y Paraguay, siendo el intercambio entre tribus lo que favoreció su expansión por el Caribe. Logrando su expansión masiva por el descubrimiento del nuevo mundo por Cristóbal Colón según (Simmonds,1976 como cito Mendoza, 2017).

Alcanzando su importancia en la comercialización de fruta fresca, jugos, conserva y el uso de las fibras de sus hojas para producción de tela y papel (Mendoza, 2017).

1.6.1. Características morfológicas

Es una planta herbácea con una altura aproximada de 1.20 metros, su morfología por la posición de las hojas es de tipo espiral, tiene un tallo de acerca de 0.25 a 0.50 metros y un ancho de 0.02 a 0.05 metros (Mendoza, 2017).

Una planta adulta puede llegar a tener de 70 a 80 hojas, dispuesta en forma rosetada, tienen una forma alargada y estrecha en la punta. Las hojas jóvenes crecen en un ángulo aproximado de 45 grados, siendo estas utilizadas para distintos estudios (Hernández, 2003).

El sistema radicular se genera mediante un tallo rizomatoso que penetra el suelo, esta alcanza una profundidad máxima de 0.60 metros, encontrando las raíces fibrosas a los 0.20 metros a 0.40 metros, en dirección horizontal (Cristancho V et al., 1991).

1.6.2. Requerimientos edafo-climáticos

La altitud en la cual la piña se desarrolla de una manera idónea es de 0 a 1500 m.s.n.m. presentando hojas más cortas y angostas en las regiones con mayor elevación.

Es una planta con una demanda alta de agua, con un promedio de 2 a 3 mm diarios, o bien 1,000 a 2,500 mm al año, demandando un 70 a 80% de capacidad de campo en la floración y fructificación (Naciones Unidas, 2015; Serrato, 2016).

Por ser una planta de zonas tropicales, no se desarrolla en temperaturas bajas, por lo tanto, las condiciones óptimas para su crecimiento son temperaturas promedias de 22 a 30 grados centígrados.

Requiere de una luminosidad de 1200 a 1500 horas de radiación solar por año. Los suelos deben tener un sistema de drenado optimo, de textura franco-limoso con un pH de 5 a 6, con porcentajes de inclinación no mayor a 5 % (Hernández, 2003; Mendoza, 2017).

1.6.3. Enfermedades

El cultivo de la piña se ve afectado por distintas enfermedades, que impactan directamente en su rendimiento, a continuación, se mencionan algunas de estas, las cuales se logran observar en el follaje de la planta (Serrato, 2016).

1.6.3.1. Phytophthora sp

Es una enfermedad fúngica que provoca daños en la fruta y la planta, iniciando el daño por el sistema radicular, lo que dificulta su identificación. Las hojas de un color verde pasan a un tono amarillo y rojizo rosado, la estructura de la planta se debilita y cae al suelo (Serrato, 2016).

1.6.3.2. Erwinia sp

Esta bacteria genera pudrición, lográndose identificar en las hojas centrales con una coloración café claro que pasan a un color amarillento con los ápices secos presentando un mal olor y con un tallo blando (Muñoz M. M., 2018).

1.6.3.3. Ceratocystisi paradoxa

Este hongo causa una pudrición en la parte aérea de la planta ingresando por heridas no cicatrizadas, generando una producción blanda en el tallo y presenta manchas blancas en las hojas (Serrato, 2016).

1.6.3.4. Fusarium sp

Hongo que provoca clorosis en el follaje y tallo llegando a presentar una necrosis, con un acucharamiento de follaje por síntomas de deshidratación (Muñoz M. M., 2018).

1.6.3.5. Marchitez de la piña

Esta enfermedad produce daños principalmente en las hojas y raíces, generando una clorosis con una reducción del 50% de la producción (Hernández, 2003).

1.6.4. Plagas

El cultivo de piña se ve afectado por distintas plagas a continuación se mencionan algunas de las más importantes y que causan daños en el follaje.

1.6.4.1. Dysmicoccus brevipes

Esta cochinilla de 2 a 6 mm de tamaño de color blanco provoca amarillamiento en la planta y retarda su crecimiento, ya que basa su alimentación de la savia de los frutos, tallos y raíces (Hernández, 2003; Vargas, 2009).

1.6.4.2. Metamasis dimidiatepennis

Este escarabajo se alimenta succionando la savia del tallo y de las hojas provocando galerías en el interior y esta se observa como una clorosis en las hojas (Muñoz M. M., 2018; Hernández, 2003).

1.6.5. Nutrición

El nitrógeno es un elemento relacionado al color verde y el crecimiento de la planta, este presenta sus síntomas de deficiencia con clorosis y con tallos delgados (Montoya, 2016).

El fósforo se asocia a la producción de raíces, cuando se encuentra en niveles bajos las plantas detienen su crecimiento observando plantas menos desarrolladas (Montoya, 2016).

El incremento para la producción de azucares y almidones en las hojas es función del potasio, ayudando a la planta a los cambios abruptos, por lo tanto, la deficiencia de este elemento se presenta secándose las orillas de las hojas, con manchas necróticas (Retana, 2015).

El magnesio tiene un papel muy importante debido que es un nutriente elemental para la clorofila, este al encontrarse en carencia se manifiesta en hojas viejas con clorosis y forman manchas que inician del margen de las hojas al centro (Retana, 2015).

La formación de las láminas de las células depende del calcio por lo tanto al encontrarse en niveles bajos presenta una clorosis en las hojas jóvenes (Retana, 2015).

1.6.6. Variedades de piña

De las distintas variedades de piña que existen, a continuación, se mencionan las dos más utilizadas para la producción comercial en Guatemala.

1.6.6.1. Cayena lisa

Presenta los márgenes de las hojas lisos y de coloración verde o rojiza, sus frutos pesan alrededor de 3 kg, siendo de forma cilíndrica con pulpa de color blanco (Retana, 2015).

1.6.6.2. Hibrido MD2

También conocida como Maya Gold, Extra-Sweet y Golden Ripe, presenta hojas de coloración verde claro, frutos de color amarillento (Retana, 2015).

1.6.7. Fenología

La piña cuenta con 6 fases fenológicas, siendo las siguientes:

- Foliación (F1 y F2)
- Inflorescencia (F3)
- Floración (F4)
- Fructificación (F5)
- Maduración (F6)

La etapa de la foliación o crecimiento vegetativo ocurre después de la siembra, está se considera que ha iniciado al tener un crecimiento en las hojas de 2 centímetros, tiene una duración aproximada de 10 a 12 meses dependiendo de las condiciones climáticas.

Seguida por la inflorescencia que inicia al aparecer la parte superior del tallo (3 centímetros de diámetro) dentro de las hojas. La floración inicia al observar la aparición de las flores en la base de la inflorescencia durando alrededor de dos semanas. Al cumplir el ciclo de la inflorescencia inicia la fructificación observándose el desarrollo del fruto está etapa hasta la madurez del fruto dura entre 5 a 7 meses (Murillo L, 2014).

1.7. Monitoreo agrícola mediante percepción remota

El aplicar las técnicas de percepción remota (PR) o teledetección según Ustin et al. (2010) citado por Rivera (2015), en la agricultura de precisión, genera la integración de distintas disciplinas tales como; agronomía, edafología, climatología y fisiología vegetal entre otras.

Creando ventajas en; mapeo de cultivos, identificación de fenología, discriminación de variedades, deficiencias nutricionales, daños por plagas y enfermedades, entre otros (Rivera, 2015).

La información que se genera mediante los sensores remotos para la agricultura es amplia, como la descripción de sus características fenológicas, morfológicas y estructurales; es sistema que es la relación de suelo-planta y su ecosistema así de su variación en espacio y tiempo, los cuales son inferidos o deducidos por la relación entre las mismas características y como se miden (A Andreu, 2021).

Por lo que se han generado distintos índices utilizados con el fin de cuantificar las estimaciones de los cultivos (conocido como reflectancia espectral), basados en parámetros biofísicos y bioquímicos, dentro de los cuales se pueden encontrar; área foliar, porcentaje de biomasa, altura de planta, actividad fotosintética entre otras (Balbotín C, 2016).

Las variables biofísicas son conocidas como variables primarias, estas están involucradas en el proceso de transferencia radiativa, los cuales permiten describir el estado y dinámica del suelo-vegetación, tales como; el índice de área foliar (IAF), contenido bioquímico de la hoja, altura de la vegetación, radiación absorbida por la vegetación, temperatura del suelo/vegetación, humedad del suelo, entre otros (Andreu A, 2021).

Logrando para cada píxel la interacción de la energía electromagnética emitida por la planta, siendo las propiedades espectrales la función de los cambios entre estas siendo dependientes de la interacción planta-suelo, morfología de la planta, densidad de siembra entre otras (Rivera, 2015).

El aumento en la demanda de la producción agrícola ha impulsado a que se monitoree de manera precisa el crecimiento y estado del cultivo, logrando la prevención y alerta temprana de distintos eventos minimizando el impacto en la plantación. Optimizando las prácticas de manejo con una visión a largo plazo (A Andreu, 2021).

1.7.1. Índices vegetales (IV)

Los IV son definidos como los parámetros que se calculan a partir de los calores reflejados por ondas que son sensibles a la vegetación, Gilabert et al., (1997) citado por Aguayo (2013). También se les conoce como un resumen de la información sobre la vegetación que ha generado un satélite, en la cual reduce la interacción de otros factores tales como; suelo, vegetación seca, atmosfera entre otras, que permite evaluar de manera metodológica el desarrollo del cultivo.

Las plantas absorben, transmiten y reflejan la energía o radiación solar en distintas longitudes de onda que van de 280 a 2800 micrómetros, relacionado directamente con la fotosíntesis y los macro y micronutrientes.

El espectro de reflectancia en el visible (VIS) de las plantas adultas y sanas, tienen una alta absorción en el azul (400 a 500 nm), incremento en la reflectancia del verde (500 a 600 nm) la absorción del rojo (600-700 nm) con una reflectancia y transmitancia (50%) en el infrarrojo cercano (700 a 1500 nm). (Rivera, 2015; Balbotín, 2016).

1.7.1.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI, índice fundamental en teledetección, evalúa la salud y densidad del desarrollo vegetativo. Se basa en la absorción de energía roja por la clorofila y en la reflectancia del infrarrojo cercano por la disposición celular de la hoja. Cuando las plantas están estresadas por enfermedades o plagas, pierden agua, aumentando la reflectancia en el NIR y el rojo debido a la reducción en la absorción clorofílica. El NDVI produce un indicador adimensional que varía de -1 a 1, mostrando una correlación directa con el vigor del cultivo o la biomasa.

Cuando existe la presencia de alta densidad vegetal o biomasa el valor del NDVI se acerca a uno, presentando una reflectancia mayor en el infrarrojo cercano y menor en el rojo; en el caso de la presencia de suelo desnudo los valores de los índices son cercanos a cero; y los valores negativos generalmente identifican cuerpos de agua y nubes (Rubio A, 2020).

Para estimar este índice es requerida la información de la banda roja (Red) e infrarroja (NIR). Calculando este con la siguiente formula (Rouse et al., 1974 como se cita en Muñoz y Gutiérrez, 2006).

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right)$$

Según Tasseled (2015) (citado por Piedad Rubio et.al. 2020), la principal problemática del NDVI se debe a la influencia de la reflectancia del suelo sobre la banda roja e infrarroja, que puede alterar la reflectancia de la vegetación en cultivos poco densos o etapas iniciales de crecimiento. Zhongminga (2009) (citado por Rubio 2020), menciona que el NDVI no es sensible al verde cuando es reducida la densidad de vegetación, realizando una sobre o subestimar la vegetación.

Otro factor que altera el valor del NDVI es la dispersión de Rayleigh como menciona Shao et al (2020) esto sucede debido a que la longitud de onda depende de la dispersión atmosférica, lo que indica que en la longitud de onda corta (roja) es tres veces mayor en comparación con la longitud de onda más larga (infrarrojo cercano). Sin embargo, esta alteración atmosférica logra ser corregida por las plataformas Sentinel-2 y Landsat como menciona (Frantz 2019 citado por Shao, et al, 2020).

1.7.1.2. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

El SAVI por sus siglas en inglés, tiene el objetivo de corregir o disminuir la influencia que tiene la reflectancia del suelo en los estudios realizados en la vegetación sobre áreas donde se encuentra el suelo expuesto. Este cuenta con un facto de ajuste del suelo (L).

En la firma espectral del suelo, la reflectividad es similar en la banda infrarroja cercana y roja, aumentando o disminuyendo paralelamente. Al aumentar la humedad del suelo, la reflectancia disminuye en ambas bandas, caso contrario ocurre en suelos secos, en donde aumenta el valor de reflectividad en ambas bandas.

En áreas donde existe presencia de vegetación el valor de reflectancia de la banda roja es menor y la del infrarrojo cercano es más alto en comparación con áreas de suelo desnudo (Aguilar C, 2014).

Este índice es adecuado para estudios de cultivos en etapas iniciales de desarrollo, baja densidad de siembra o cultivos con poca área foliar (menor del 40%). Este utiliza las mismas bandas NIR y RED. Siendo la formula la siguiente:

$$SAVI = \left(\frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)}\right) * (1 + L)$$

El factor L el encargado de aminorar los valores del suelo, siendo los siguientes criterios para incluirlo en la fórmula: L = 0 zonas con alta densidad de vegetación, L= 1 zonas con poca densidad de vegetación y L= 0.5 zonas con mediana densidad de vegetación (Huete, 1988, citado por Muñoz A y Gutiérrez C.P. , 2006).

1.8. Técnicas de análisis de información

Las técnicas que serán utilizadas en la investigación son:

1.8.1. Análisis de suelo

Para obtener las variables del suelo se plantean las siguientes técnicas;

1.8.1.1. Análisis fisicoquímico

Será enviada una muestra de suelo al laboratorio para determinar la textura de suelo del área productiva.

1.8.1.2. Método gravimétrico

Técnica que será utilizada para determinar el contenido de humedad del suelo de los puntos de monitoreo de campo (Radulovich, 2009).

$$\%\ de\ humedad\ del\ suelo\ = \left(\frac{Pf - Ps}{Ps}\right) * 100$$

1.8.2. Fichas de campo

Libretas de campo en las cuales serán anotados los datos medidos de las variables biométricas del cultivo, tales como: fase o etapa fenológica, número de hojas, altura de planta y diámetro de tallo.

Tabla 1.

Ficha de campo

				Hoja							
Fecha toma de datos	No. Lote	Área (ha)	No. muestra	Peso húmedo (lb)	h planta (cm)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área hoja en mt^2	Densidad poblacional en mt^2	Ø Planta	Fase Fenológica
PROMEDIO											

Nota. Ficha utilizada para levantar la información de campo. Elaboración propia realizada en Excel.

$$IAF = \frac{(\text{área foliar } (m^2) * \text{densidad poblacional})}{\text{área sembrada } (m^2)}$$

1.8.3. Prueba de correlación de pearson

Para determinar la relación que existe entre las variables biométricas, textura y humedad del suelo con los valores de los IV, se desarrollara la prueba de correlación de Pearson, el cual comprende los valores de -1 a +1, indicando un signo negativo que mientras una variable aumenta la otra disminuye, un signo positivo que mientras una aumenta la otra también y valor 0 las variables son independientes (González Br. y López E, 2018).

1.8.4. Regresión lineal

Esta trata de explicar la relación que se presenta entre las variables una dependiente y otra independiente, el cual permite generar modelos lineales de las mismas y se realizara en el software Infostat (Montoro).

1.8.5. Prueba de normalidad

La prueba de normalidad será realizada en el software Infostat para los datos obtenidos de las variables, para determinar si los datos obtenidos tienen una distribución normal (Tapia F y Cevallos. E., 2021).

2. ANÁLISIS GEOESPACIAL

2.1. Área de estudio

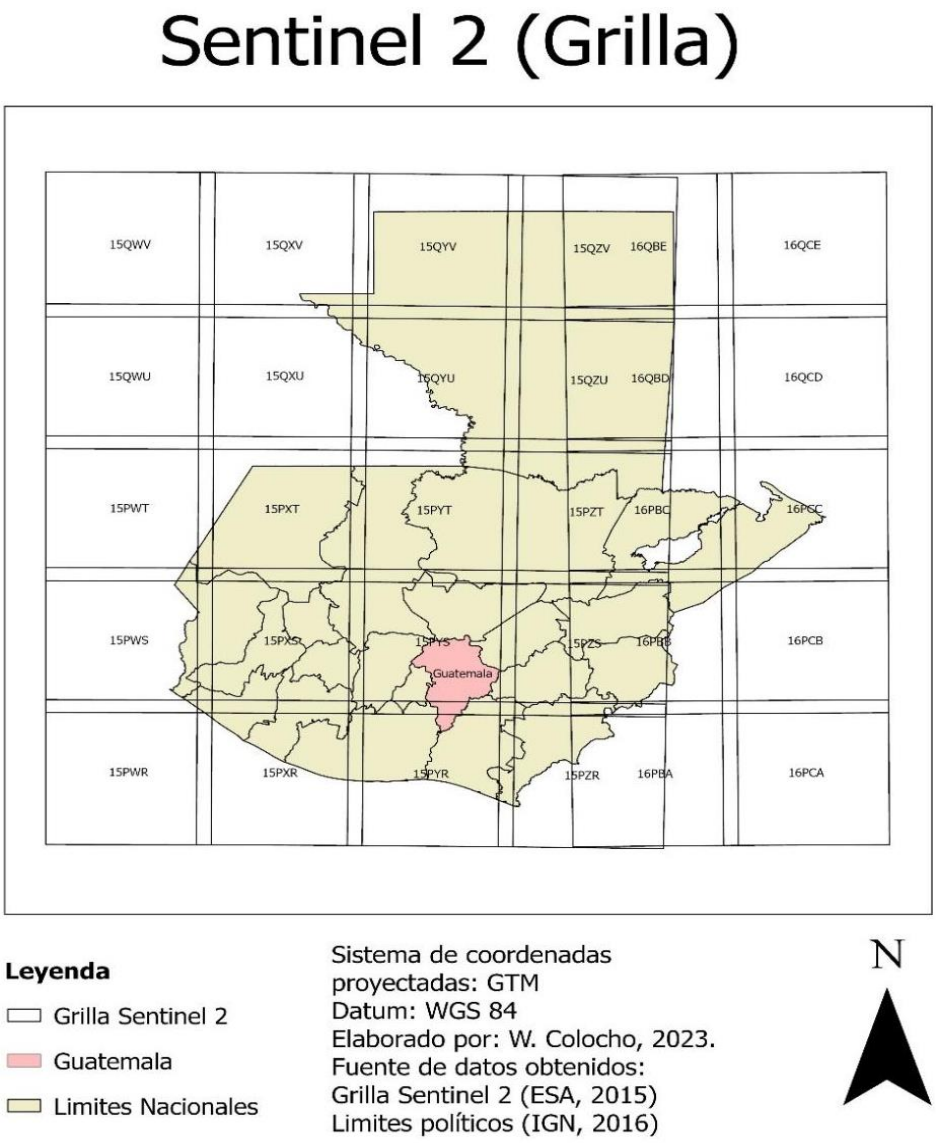
Para la definición del área de estudio, se eligió la zona centro y sur que estuviera comprendida en una imagen Sentinel 2. En tal motivo, se utilizó el área contenida en el tile 15YR, localizada en los límites de Guatemala.

En la figura tres se observa la grilla de Sentinel 2 para el área seleccionada. El área fue definida de acuerdo con las áreas dedicadas a la producción de piña, según los datos de uso de la tierra DIGEGER-MAGA 2020.

En tal motivo, esta área es la óptima para evaluar si las correlaciones de los IV con las variables del suelo y las variables biométricas pueden estimar la influencia del suelo en el monitoreo agrícola.

Figura 3.

Grilla Sentinel 2 para Guatemala

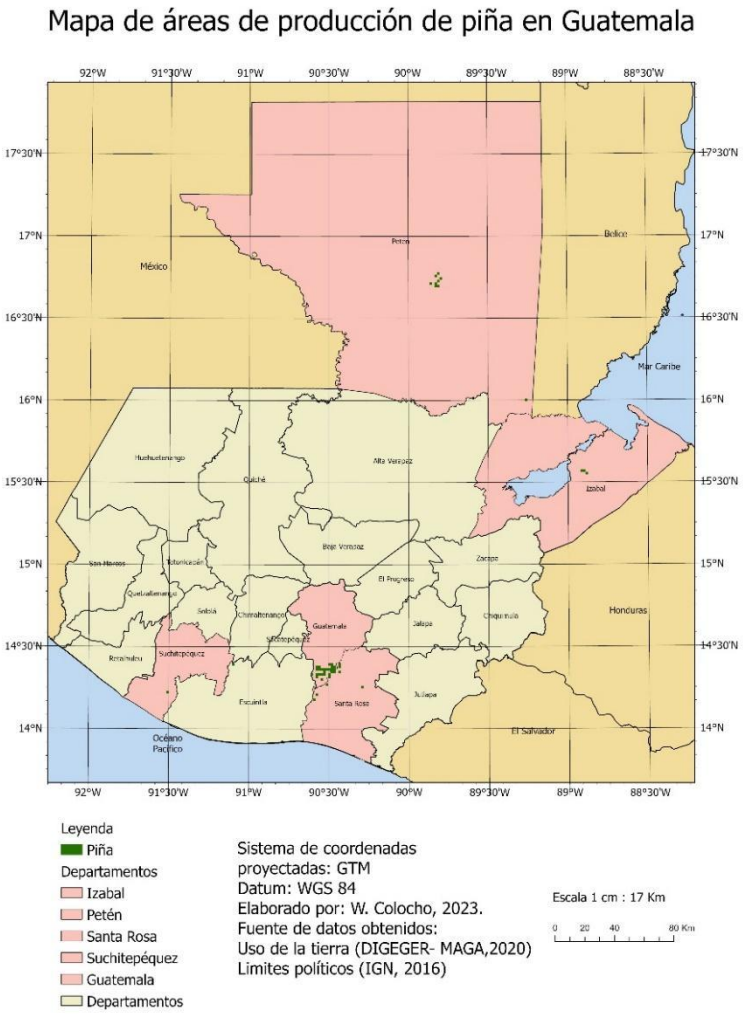


Nota. Grilla de Sentinel 2. Elaboración propia , realizado con ArcGIS Pro.

El municipio de Villa Canales se encuentra en la región del centro del país, con alrededor de 1,000 ha destinadas a la producción de piña, lo que equivale al 36 % del área productiva nacional, según datos de DIGEGER-MAGA 2020. La aldea El Jocotillo es la más importante para esta actividad.

Figura 4.

Mapa de las áreas de producción de piña en Guatemala



Nota. Mapa de áreas de producción de piña en Guatemala. Elaboración propia, realizado en ArcGIS Pro.

Continuando con la determinación del área de estudio, fue necesario definir las etapas fenológicas del cultivo de la piña, tal como se observan en la figura cinco. Las etapas F1 y F2, son las requeridas para el desarrollo de esta investigación.

Figura 5.

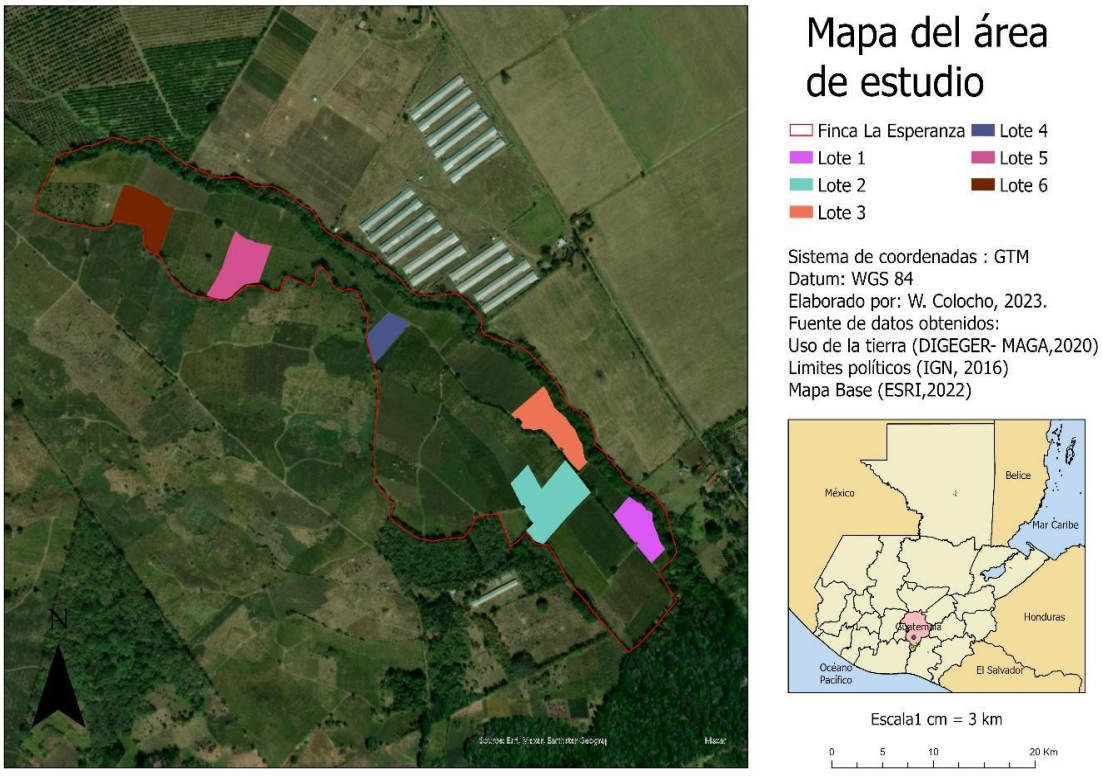
Etapas fenológicas del cultivo de piña

Nota. Fases fenológicas del cultivo de piña. Elaboración propia, realizado en Excel.

El área de estudio final es un total de 3.74 hectáreas (6 lotes), lo cual representa un 14 % de la superficie total destinada a la producción de piña de la finca La Esperanza (26.6 ha). La figura seis hace referencia al mapa en donde se ubica el área de estudio y la distribución espacial de los lotes.

Figura 6.

Área de estudio



Nota. Área de estudio, finca La Esperanza, aldea El Jocotillo, Villa Canales Guatemala. Elaboración propia, realizado en ArcGIS pro.

2.1.1. Descarga de imágenes

La búsqueda y selección de las imágenes se realizaron en los buscadores de imágenes de la Agencia Espacial Europea (ESA), concretamente en el portal Copernicus Hub. La selección de las imágenes se llevó a cabo de acuerdo a las siguientes características:

- Imágenes colectadas de noviembre 2022 a enero 2023 para garantizar consistencia con las etapas fenológicas.
- Ausencia de nubes, bruma y otros efectos atmosféricos.

Figura 7.

Portal Copernicus Hub

Nota. El gráfico muestra la plataforma para descarga de imágenes satelitales de programa Sentinel 2. Obtenido de Copernicus Hub (s.f). *Portal Copernicus Hub*. (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home) consultado el 9 de abril de 2023. De dominio público.

Las imágenes seleccionadas corresponden al satélite Sentinel 2, con un tratamiento previo de la imagen L-2A (corrección atmosférica) (Utreras, 2019)**,** como se observa en la tabla dos Estas cumplen con el requisito de las etapas fenológicas definidas con anterioridad. En la Tabla 2 se muestra que la temporalidad de las imágenes es de noviembre del 2022 al enero de 2023, lo que permite tener disponibilidad de datos en campo.

Tabla 2.

Nomenclatura de las imágenes Sentinel 2

Atributo	**Nomenclatura**		
ID de la misión	S2A	S2A	S2A
Nivel de producto	2A	2A	2A
Fecha toma de datos	15/11/2022	15/12/2022	14/01/2023
Tiempo toma de datos	06:25:41	06:27:01	06:26:31
Número de referencia procesamiento	N0400	N0509	N0509
Número de órbita	R040	R040	R040
Número de teselas	15PYR	15PYR	15PYR

Nota. Nomenclatura del nombre de las imágenes Sentinel 2A. Elaboración propia, realizado en Excel.

2.1.2. Cálculo de índices espectrales

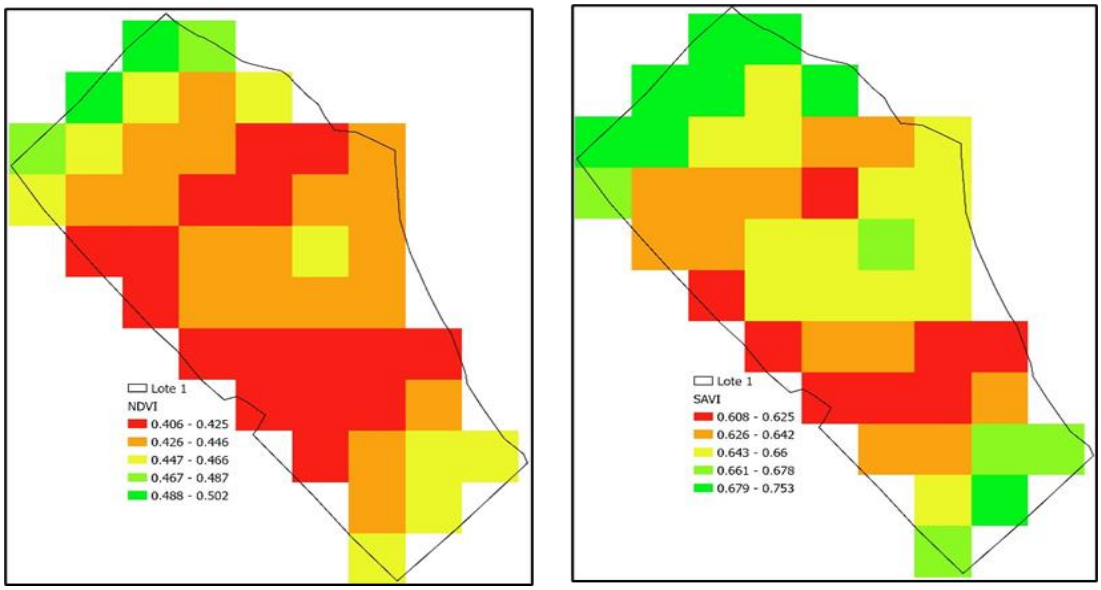
Las imágenes seleccionadas y descargadas se encuentran en un formato de bandas individuales, por ello fue necesario realizar una extracción de las bandas de interés con base a los seis lotes de las áreas de estudio. Este proceso se realizó con la ayuda del software ArcGIS Pro ®. Las bandas utilizadas para el cálculo de los IV fueron la B04 y B08 (Rojo e Infrarrojo cercano), seleccionadas según la revisión literaria realizada que indica que estas bandas permiten identificar la actividad fotosintética de las plantas.

El cálculo de los IV se realizó con la herramienta de calculadora ráster, en el software GIS. Para el NDVI, únicamente se utilizaron las bandas mencionadas con anterioridad, en tanto que para calcular el SAVI se requiere de “L”, que es un factor de corrección que para dicha investigación se utilizó el valor de 0.5.

En la figura ocho, se presenta el cálculo del NDVI y SAVI obtenido para el lote 1 en el mes de noviembre, en el que se observa el rango que se divide 5 categorías, siendo para el NDVI de 0.406 hasta 0.502 y para el SAVI 0.608 hasta 0.753.

Figura 8.

Cálculo de NDVI y SAVI



Nota. El gráfico muestra cómo se observa el cálculo del NDVI y SAVI, para el lote 1 en la temporalidad de noviembre de 2022. Elaboración propia, realizado en ArcGIS Pro.

En la tabla tres, se presentan los rangos de los valores de los índices calculados, así mismo los promedios obtenidos de los valores para los seis lotes en las temporalidades consideradas. Los valores de los índices van desde -1 a 1, siendo los números negativos la ausencia de la actividad fotosintética. Con base a esto, se evidencia que en los lotes existe una interacción de la energía electromagnética que es percibida por las imágenes satelitales, por lo tanto, la presencia de actividad fotosintética.

Tabla 3.

Rango de valores de NDVI y SAVI

		RANGO				PROMEDIO	
Fecha	**Lote**	**NDVI**		**SAVI**		**NDVI**	**SAVI**
15/11/2022	1	0.405	0.502	0.607	0.726	0.428	0.645
	2	0.243	0.544	0.365	0.817	0.439	0.660
	3	0.302	0.559	0.452	0.839	0.425	0.632
	4	0.422	0.548	0.632	0.822	0.512	0.756
	5	0.330	0.484	0.495	0.726	0.370	0.554
	6	0.356	0.556	0.533	0.834	0.438	0.645
15/12/2022	1	0.407	0.506	0.610	0.758	0.449	0.674
	2	0.278	0.552	0.417	0.827	0.460	0.688
	3	0.361	0.519	0.541	0.779	0.430	0.645
	4	0.328	0.532	0.492	0.798	0.459	0.689
	5	0.339	0.461	0.509	0.691	0.361	0.542
	6	0.329	0.513	0.493	0.770	0.432	0.648
14/01/2023	1	0.412	0.541	0.618	0.811	0.465	0.697
	2	0.288	0.536	0.432	0.804	0.450	0.677
	3	0.355	0.509	0.533	0.764	0.431	0.644
	4	0.305	0.541	0.457	0.812	0.457	0.686
	5	0.360	0.440	0.540	0.660	0.386	0.578
	6	0.310	0.514	0.465	0.771	0.440	0.660

Nota. La tabla muestra cómo se observan los rangos de los índices en las temporalidades de noviembre 2022, diciembre 2022 y enero de 2023 obtenidos a partir de ArcGIS Pro. Elaboración propia, realizado con Excel.

En el monitore agrícola, existen distintos factores que generan ruido o alteraciones en los valores de los IV. Con base a esto se observa que el valor máximo de los lotes, como el dos, presenta un 0.5591 (NDVI) y 0.8386 (SAVI). Sin embargo, en el siguiente mes este disminuye 0.5191 (NDVI) y 0.7785 (SAVI).

Esto se debe a que en el mes de noviembre se observó en campo la presencia de arvenses (Apéndice 1), estas por la competencia de nutrientes con las plantas presentan una actividad fotosintética mayor. No obstante, para el mes de diciembre se observa de nuevo el comportamiento esperado para un cultivo con un manejo agrícola adecuado (Apéndice 2).

Otros de los factores que influyen son los daños que tiene la plantación ocasionados por plagas y/o enfermedades (apéndice tres), lo cual reducen la actividad fotosintética, hasta causar la perdida de las plantas. Esto conlleva a realizar prácticas de resiembra lo que puede provocar una diferencia de desarrollo de la plantación del mismo lote.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación aportan a la agricultura de precisión, al analizar la influencia de la reflectancia del suelo en el monitoreo agrícola de cultivos poco densos o en etapas iniciales de su desarrollo. Comparando el NDVI con SAVI para determinar cuál es más preciso.

3.1. Análisis de las dinámicas de la humedad y la textura de suelo a través de NDVI y SAVI

Para abordar el primer objetivo específico, se procedió a determinar los porcentajes de humedad de los lotes en las temporalidades mencionadas en la tabla dos y la textura del suelo de los mismo.

Las texturas de suelo fueron determinadas utilizando el método Bouyoucos mediante un análisis de laboratorio en el Instituto de Ciencias y Tecnologías Agrícolas (ICTA) y los cálculos de los IV que se presentaron en la tabla tres. Con base a los resultados se determinó que los lotes L1 y L3 presentan una textura Franco Arenosa (Fr-A) y los lotes L2, L4, L5 y L6 la textura es Arena Franca (A-Fr).

Tabla 4.

Sensibilidad de los IV ante las dinámicas de humedad y textura en los lotes

Fecha	Lote	Textura	%humedad	NDVI	SAVI
15/11/2022	L1	Franco arenosa	14	0.428	0.6445
	L2	Arena Franca	9	0.439	0.6600
	L3	Franco arenosa	14	0.425	0.6320
	L4	Arena Franca	14	0.512	0.7560
	L5	Arena Franca	14	0.370	0.5540
	L6	Arena Franca	12	0.438	0.6540
15/12/2022	L1	Franco arenosa	11	0.449	0.6740
	L2	Arena Franca	7	0.460	0.6880
	L3	Franco arenosa	12	0.430	0.6450
	L4	Arena Franca	11	0.459	0.6890
	L5	Arena Franca	9	0.361	0.5420
	L6	Arena Franca	10	0.432	0.6480
14/01/2023	L1	Franco arenosa	9	0.465	0.6970
	L2	Arena Franca	5	0.450	0.6770
	L3	Franco arenosa	10	0.431	0.6440
	L4	Arena Franca	10	0.457	0.6860
	L5	Arena Franca	7	0.386	0.5780
	L6	Arena Franca	7	0.440	0.6600

Nota. Texturas obtenidas de los análisis de suelo realizado por ICTA, porcentaje de humedad determinados en fase de gabinete y valores de IV obtenidos de ArcGIS Pro. Elaboración propia, realizado en Excel.

En la Tabla 5, se presenta la correlación de Pearson para la asociación de las variables; textura del suelo, la humedad del suelo y la reflectancia del suelo medida a través de los IV, NDVI y SAVI.

Tabla 5.

Correlación de variables de suelo e IV

Textura	Variables	HUMEDAD
Franco Arenosa	NDVI	-0.76
	SAVI	-0.75
Arena Franca	NDVI	0.09
	SAVI	0.06

Nota. Análisis de correlación entre las variables del suelo y los IV obtenido en el software Infostat. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.1. Regresión Lineal

Con base a la información anterior se procedió a realizar las regresiones lineales para las dos texturas identificadas, como se muestra en la tabla 6, se cuenta con el modelo según la textura y para cada IV.

Tabla 6.

Modelos de regresión lineal de las variables del suelo e IV

Textura	modelo	R^2
Franco Arenosa	NDVI = 0.51 - 0.58 (Humedad)	0.585
	SAVI = 0.76 - 0.88 (humedad)	0.555
Arena Franca	NDVI = 0.42 + 0.14 (humedad)	0.09
	SAVI = 0.64 + 0.13 (humedad)	0.04

Nota. Análisis de regresión lineal obtenido en el software Infostat. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. Análisis de la relación entre los índices de vegetación (NDVI y SAVI) y las variables biométricas

Como parte del segundo objetivo de la investigación se procedió a levantar la información en campo con base a la ficha de campo (Tabla 1), tomando los valores de las variables biométricas del cultivo de piña entre las fases fenológicas F1 y F2.

Con el cálculo previo de los índices de vegetación, se procede a extraer los valores de las unidades de muestreo, con los datos obtenidos se realiza el análisis de correlación como se muestra en la Tabla 7. .

Tabla 7.

Análisis de Correlación de las variables biométricas con los IV

	Planta	Hoja					
Variables	**Altura**	**Largo**	**Ancho**	**IAF**	**ø Planta**	**NDVI**	**SAVI**
Altura	1	0.00002	0.00004	3.00E-06	5.50E-07	0.00012**	0.00005**
Largo	0.83227	1	0.00066	8.60E-11	0.00001	0.00409**	0.00254**
Ancho	0.81625	0.72524	1	2.80E-06	1.10E-06	0.01308**	0.0098**
IAF	0.86805	0.96571	0.86965	1	5.20E-08	0.00558**	0.00361**
ø Planta	0.89449	0.83853	0.88517	0.92227	1	0.01132**	0.00776**
NDVI	0.78415*	0.64172*	0.57221*	0.62464*	0.58174*	1	0
SAVI	0.80945*	0.66618*	0.59097*	0.64835*	0.60539*	0.99822	1

Nota. Esta table muestra el análisis de correlación entre las variables biométricas y los IV. Con el símbolo (*) se resaltan las correlaciones de interés, con (**) los valores de p de las correlaciones de interés obtenido en el software Infostat. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.1. Regresión Lineal

Con base a las correlaciones obtenidas anteriormente se procede a realizar la regresión lineal para las variables que presentan una relación entre ambas variables (IV y variables biométricas), lo que permite generar un modelo para predecir el valor de una a partir de la otra. En tal sentido se obtuvieron las regresiones lineales, para obtener el modelo de estimación de las variables biométricas a partir de los índices como se observa en la tabla ocho .

Tabla 8.

Modelos de regresión lineal de las variables biométricas con los IV

Índice	Modelo	R^2
NDVI	altura = -40.7 +204.84 NDVI	0.61
	IAF = -0.05 + 0.2 NDVI	0.39
SAVI	altura= -45.65 + 144.38 SAVI	0.66
	IAF = -0.05 + 0.14 SAVI	0.42

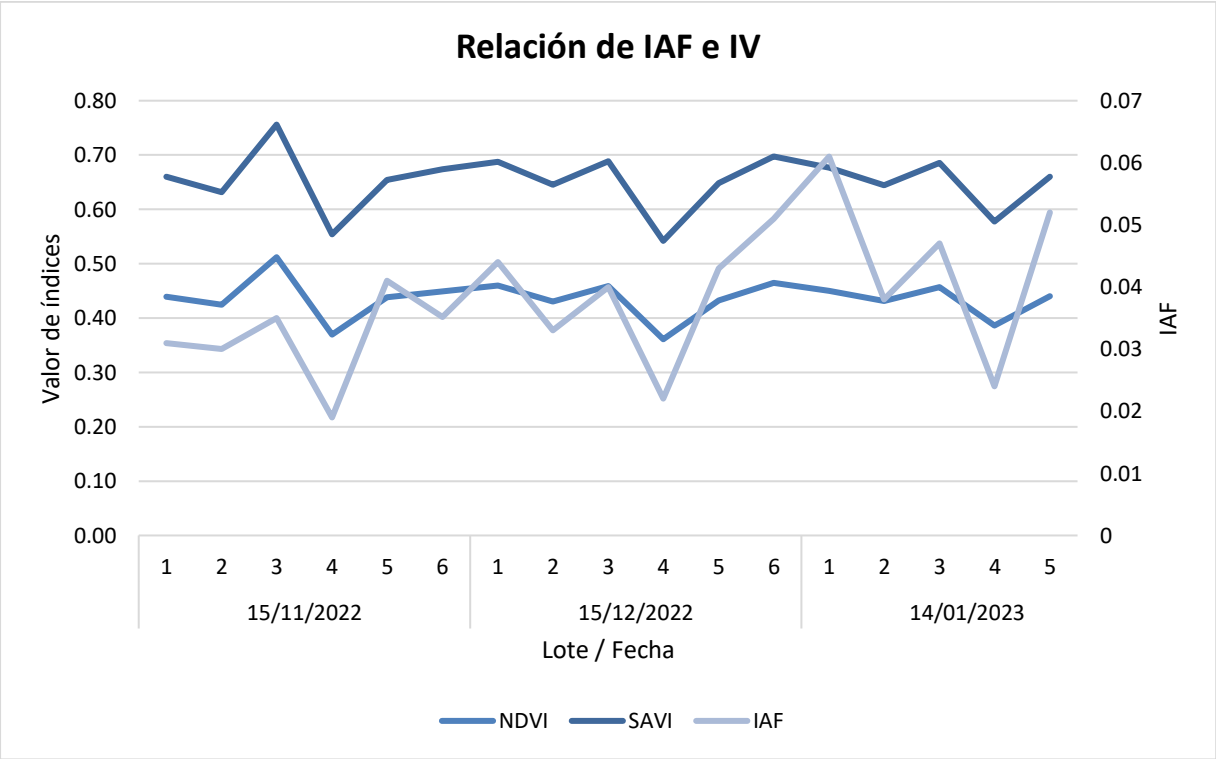
Nota. Análisis de regresión lineal obtenido en el software Infostat. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3. Análisis de la relación del IAF y los índices NDVI y SAVI

Como parte de los resultados obtenidos para el tercer objetivo específico, se procedió a determinar la correlación del IAF con los IV los cuales se muestra en la Tabla 7. En la Figura 9, se presenta de manera gráfica la relación del IAF y los IV a través del tiempo.

Figura 9.

Relación de IAF e IV



Nota. Relación del IAF e IV, % de humedad determinados en fase de gabinete y valores de IV obtenidos de ArcGIS Pro. Elaboración propia, realizado con Excel

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de las dinámicas de la humedad y textura del suelo a través de NDVI y SAVI

Las dinámicas de los porcentajes de humedad se observan en la tabla 4 las cuales van desde 14 % a 5 % respecto a la temporalidad en donde fueron calculados, determinando que para el periodo noviembre-diciembre A-Fr reduce en promedio un 2.8 % y de diciembre-enero un 2 %, en tanto que para Fr-A se reduce 2.5 % y 2 % respectivamente.

Determinada la textura de suelo y calculado el % de humedad del suelo se procedió a realizar el análisis para determinar si las variables están asociadas esto mediante la correlación de Pearson para obtener la interacción de las variables de textura, % humedad e IV, en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de esta interacción.

Presentando para la correlación de la textura Fr-A una alta relación negativa con las variables de; porcentaje de humedad e IV, siendo para el NDVI -0.76 y SAVI -0.75, lo que indica que a medida que el porcentaje de humedad aumenta en el suelo, los valores de NDVI y SAVI disminuirán, debido a que la arena tiende a retener menor cantidad de agua por lo cual aumenta su reflectancia, (López, 2021) sin embargo, esta interacción resulta ser no estadísticamente significativa debido al p-valor 0.074 y 0.089, respectivamente.

Para la textura de suelo A-Fr, tiene una baja correlación positiva con él % de humedad y los IV, siendo para el NDVI 0.09 y SAVI 0.06, esta sugiere que la humedad y textura del suelo puede influir de manera diferente en la reflectancia del suelo, por ende, en los valores de los IV. El aumento de las proporciones de limo y arcilla permitirían un aumento en la capacidad de retención de agua por lo cual aumenta la absorción de energía, como menciona (Ramos. G., 2008), a pesar de ello, esta asociación de variables es estadísticamente no significativa debido al p-valor 0.77 y 0.85 respectivamente (Balbontín, C; et al 2016).

Para comprender más a profundidad la relación entre la humedad y los IV en estos tipos de suelos, se determinó el modelo de regresión lineal, para observar como una variable influye sobre la otra. Los resultados muestran que; para la textura Fr-A el modelo no logra explicar el comportamiento del NDVI o SAVI a partir de la humedad en este tipo de suelo; siendo p-valor superior a 0.05, 0.076 y 0.089 y un R^2 de 0.59 y 0.56 respectivamente.

Para la textura A-FR, los resultados obtenidos para de la regresión lineal tanto para NDVI como SAVI, tampoco logran explicar el comportamiento de la humead en este tipo de suelo, presentando un R^2 de 0.09 y 0.04 con p-valores de 0.77 y 0.85 respectivamente.

Estos resultados se atribuyen al que el contenido de arena en estos suelos es superior al limo y las arcillas; esto a su vez tiene un impacto en la capacidad de retención de humedad del suelo, al ser partículas con menor estructura la permeabilidad de estos es alta, como se observa en la tabla 4, el % de humedad es bajo, el cual no logra superar un 14 %, lo que se vuelve muy poco perceptible para los IV. Por lo tanto, se concluye que para esta investigación no existe un % de humedad y textura de suelo que influyan en la reflectancia del suelo al momento de realizar los cálculos de los IV.

4.2. Análisis de la relación entre los índices de vegetación (NDVI y SAVI) y las variables biométricas

Las correlaciones de interés son las que se dan entre las variables biométricas y los índices NDVI y SAVI, con base a lo antes mencionado se espera que los valores sean lo más cercano a 1 y que sean correlaciones positivas. Como se presenta en la Tabla 7, las correlaciones de SAVI con las variables biométricas presentan mejores valores comparado a las que se obtienen con el NDVI.

Las correlaciones Altura-SAVI es la correlación con el valor más alto siendo de 0.81, comparado a Altura-NDVI que tiene un valor de 0.78, en base a esto está indicando que las variables miden las mismas características y al ser positivas indica que son directamente proporcional, al aumentar la altura en centímetros deberá aumentar el valor del índice. Siendo el p valor de Altura-SAVI (0.00005) menor a 0.05 lo que indica que si existe una correlación significativamente estadística.

Para las variables de la hoja, que está conformada por el largo y el ancho de esta, las correlaciones presentan mejores valores con el SAVI, siendo el largo-SAVI un valor de 0.67 y ancho-SAVI 0.59, con un valor de p de 0.00254 y 0.0098 respectivamente lo que indica que es una correlación significativamente estadística debido a que su p valor es menor a 0.05, comparado con los valores largo-NDVI 0.64 ancho-NDVI 0.57 y con valores de p 0.01308 y 0.00558, respectivamente.

La correlación del IAF con los índices será abordada posteriormente en el inciso 4.3. (Análisis de la relación del IAF y los índices NDVI y SAVI).

Para comprender de una manera más amplia estas asociaciones de las variables biométricas e IV, se han determinado los modelos de regresión lineal (tabla 8). Los resultados obtenidos muestran que estos modelos cumplen con el predicho de que los valores de p son menores a 0.05, para SAVI-altura (0.0001) y SAVI- IAF (0.0036) y para NDVI-altura (0.0001) y NDVI-IAF (0.0056).

El modelo de ø Planta presento valores mayores a 0.05, tanto en SAVI (0.885) como en NDVI (0.749), por lo cual, el índice no está logrando explicar adecuadamente el comportamiento del diámetro.

El coeficiente de determinación (R^2), está indicando que para el modelo de altura se tiene un mejor nivel de varianza con el SAVI, que presenta un valor de 0.66 comparado con el del NDVI de 0.61, se puede concluir que el modelo, explica de mejor manera la variabilidad de los datos.

En lo que respecta a la normalidad de los datos en el apéndice 5 se presentan los resultados obtenidos de la prueba de Shapiro Wilks, se espera que W tienda a 1, y el p-valor sea mayor a 0.05, ambos supuestos se cumplen, para las variables altura, IAF y ø Planta con SAVI presentan los resultados de 0.94, 0.97,0.97 y con NDVI presentan los valores de W^* de 0.95, 0.97y 0.98 respectivamente. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula que indica que el comportamiento de los datos es normal para las variables estudiadas.

Estos hallazgos son relevantes, ya que las variables biométricas son indicativos del desarrollo del cultivo. La correlación de SAVI con altura, largo y ancho de la hoja estarán indicando la actividad fotosintética de la piña, lo que permitirá realizar monitoreos agrícolas más eficientes debido a que este índice reduce la alteración de la reflectancia del suelo, siendo necesario para la toma de decisiones de campo y las prácticas agrícolas con datos más certeros.

4.3. Análisis de la relación del IAF y los índices NDVI y SAVI

La tabla 7 presenta la correlación que existió entre los índices NDVI y SAVI con las variables biométricas. Se observa que el IAF tiene una fuerte correlación positiva con las demás variables (altura y diámetro de planta, largo y ancho de la hoja), esto demuestra que el IAF es un buen indicador para medir el desarrollo del cultivo y poder ser utilizado en el monitoreo agrícola.

El IAF es un indicador de la cobertura vegetal sobre el suelo, influyendo en la cantidad de energía electromagnética que percibe el suelo, por lo tanto, la cantidad que puede absorber y reflejar el mismo. Como menciona (Gilabert M.A., 2014), al tener valores de IAF que van de 0.6 a 1.7 se tiene mayor influencia de la reflectancia del suelo sobre los valores obtenidos para el NDVI.

Para comprender de mejor manera la interacción de las variables se determinó el valor mínimo y máximo del IAF, siendo de 0.019 y 0.061 respectivamente (figura 9), para las fases F1 y F2, estos resultados indican que hay influencia del suelo en el NDVI. El SAVI que es el índice adecuado para abordar esta influencia muestra ser efectivo al presentar una correlación de 0.65 con el IAF, comparado con la del NDVI (0.62). Además, los valores de p de 0.00361 y 0.00558 respectivamente indican que estas correlaciones son estadísticamente significativas.

Los modelos de regresión lineal presentados en la tabla 8, respaldan la asociación de las variables IAF-SAVI, en comparación con el NDVI. Para el SAVI se obtuvo un p-valor de 0.0036 y un R^2 de 0.42, mientras que para el NDVI un p-valor de 0.0056 y un R^2 de 0.39, lo cual demuestra que el modelo del IAF se explica mejor con el SAVI.

Los hallazgos respaldan que el IAF es un indicador de la influencia del suelo en los IV, y que el SAVI es más apto para mitigar la influencia en comparación con el NDVI. Estos resultados tienen impacto positivo para el monitoreo agrícola y la toma de decisiones para el manejo de cultivos utilizando la agricultura de precisión en cultivos en etapas iniciales de su desarrollo.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que, la humedad y textura del suelo pueden influir de manera diferente en la reflectancia del suelo. La variación del % de humedad a lo largo del tiempo fue mínima (2% promedio mensual). Para la textura Fr-Ar a los diferentes % de humedad del suelo, presento una alta correlación negativa para NDVI (-0.76) y SAVI (-0.75), sin embargo, no son estadísticamente significativas por su p-valor de 0.074 y 0.089, respectivamente. En tanto, la textura A-Fr, presenta correlaciones positivas bajas NDVI (0.09) y SAVI (0.06), las cuales resultan ser no estadísticamente significativas por su p-valor de 0.77 y 0.85 respectivamente.

2. Para determinar la correlación de los IV y las variables biométricas del cultivo de la piña se analizó la relación del SAVI y el NDVI con la altura de la planta, el largo y ancho de la hoja y el diámetro de la planta. Se concluye con base a los resultados tabulados en la tabla 7 y las fases fenológicas F1 y F2, que el SAVI presenta mejores correlaciones con las variables de; altura de planta (0.81), largo (0.67), ancho de la hoja (0.59) y diámetro (0.61), comparado con NDVI. Lo que indica que el SAVI es más idóneo para el monitoreo agrícola en las fases iniciales de un cultivo poco denso como la piña, siendo estadísticamente significativo presentando valores de p, 0.00005, 0.00254 y 0.0098 respectivamente.

3. Se determinó la influencia de la reflectancia del suelo a partir del IAF, analizando la relación del IAF y los IV. Los resultados muestran que la correlación IAF-SAVI (0.648) es más sólida comparada con la de IAF-NDVI (0.624), evidenciando la alteración que provoca la reflectancia del suelo en el monitoreo agrícola de la piña en las etapas F1 y F2, al utilizar el NDVI. Estas diferencias son estadísticamente significativas con valores de p de 0.00361 y 0.00558 respectivamente.

4. Los IV son sensibles a la reflectancia del suelo en los cultivos poco densos y en etapas iniciales de su desarrollo, que se describe como la relación suelo-planta que captan los sensores. Con base a los resultados obtenidos el SAVI se ajusta mejor en la determinación de las variables biométricas del cultivo de piña. SAVI tanto como el IAF, describen la relación suelo-planta debido a que considera el área foliar del cultivo y el área de suelo desnudo dentro de una plantación, que no necesariamente considera el NDVI. Sin embargo, para las variables edáficas se encontró únicamente una relación alta para los suelos de textura Fr-A, pero estas resultan ser no estadísticamente significativas.

RECOMENDACIONES

1. El SAVI demostró ser efectivo en el monitoreo agrícola de la piña en el municipio de Villa Canales, se le sugiere al Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación llevar a cabo investigaciones adicionales en las diversas regiones productores de piña en el país como; Santa Rosa, Izabal, Escuintla y Petén. Esto permite evaluar el desempeño del IV en condiciones edafoclimáticas distintas

2. En este estudió los resultados obtenidos para el SAVI son aceptables para el monitoreo agrícola de la piña. Se sugiere a facultad de agronomía de la Universidad de San Carlos realizar análisis en las demás fases del cultivo (F3, F4, F5 y F6) con el fin de identificar las fases de mayor actividad fotosintética. Esto permitirá una mejor planificación de las labores agrícolas y optimizar los rendimientos en el cultivo de piña.

3. Se sugiere a la Escuela de Estudios de Postgrado a través de la maestría en Geomática realizar investigaciones exploratorias con otros índices (MSAVI, OSAVI y EVI), que al igual al SAVI consideren la relación suelo-planta, en fases fenológicas y cultivos que cumplan el mismo criterio.

4. Los resultados de esta investigación resaltan la efectividad del SAVI en el monitoreo agrícola, en cultivos poco densos y/o en etapas iniciales de su desarrollo tal como el cultivo de la piña. Se sugiere al sector académico que incluye a la Facultad de Agronomía y la Maestría en Geomática de la Universidad de San Carlos con base en los resultados obtenidos que explore investigaciones adicionales que profundicen en uso del SAVI en cultivos con estas características

REFERENCIAS

Aguayo, P. M. (2013). *Índices de Vegetación.* Centro de información de Recursos Naturales. https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion

Aguilar, C. (8 de abril de 2014). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat / ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador.* [Tesis Maestría, Universidad Nacional de La Plata]. Archivo digital http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf?sequence=1

Andreu, A., Carpintero. E., y González, MP. (22 de marzo de 2021). Teledetección para la agricultura. *Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera*. Junta de Andalucía. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registroservifapa/bdac6055-21a9-4dd7-8cba-06a3e9d67873

Balbontín, C., Odi, M., y Selles, G. (2021). Teledetección; apoyando a la agricultura desde el cielo. *Especial Gestión Hídrica 62, 28-31.* https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/67624/NR41563.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Balbontín C; Odi. M; Poblete R; Garrido J; Campos I y Calera A. (2016). Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6542?show=full

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial.* RIALP, S.A. http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf

Ciampagna, J. M. (2014). *Geomática.* [Diapositivas de power point]. Lincoln Institute of Land Policy. https://elprofejose.files.wordpress.com/2014/10/geomc3a1tica.pdf

Cristancho, V., Buitrago, M., y Corredor, L. (1991). *Cultivo de piña.* Subdirección de formación profesional y desarrollo social. https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/5505/cultivo_de_pi%F1a.PD;jsessionid=3130D78163BE48D3FE3FC47500B68DE6?sequence=1

Enviromental Systems Research Institute, Inc. (2021). *The ArcGIS Imageny Book.* Esri Press. https://learn.arcgis.com/es/arcgis-imagery-book/chapter4/

Fontal, B. (2005). *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones.* Escuela venezolana para la enseñanza de la Química. http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16746/espectro_electromagnetico.pdf;jsessionid=99ED31F035126239CE122E338A94F26B?sequence=1

Gameiro, S., Teixeira, C., Silva, T., Lopes, M., Duarte C.R., Souto, M., Zimback C.R. (2017). *Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação* (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terræ*, 13(1-2),15-22. https://www.ige.unicamp.br/terrae/V13/PDFv13/TE067-2.pdf

Gilabert, M.A., Piqueras, J. y García, J. (2014). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección,* 8, 33-44. https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion

Giraldo, A. (2021). Tan Cerca y tan lejos de la agricultura 4.0 en Colombia. *Universidad EAFIT. Revista Universidad EAFIT*, *55*(175), 78-85. https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17128/document%20(12).pdf?sequence=3

González, B. (2018). *Estadística fundamentos y aplicaciones en agronomía y ciencias afines usando lenguaje*. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. https://archive.org/details/NotasDeEstadsticaEstadsticaGeneralEdicinMarzo2018/page/n1/mode/2up

López, S. M. (2021). *Teledetección de la humedad presente en la fenología del cultivo de arroz y su relación con el estado de la vegetación del suelo.* [Tesis de pregrado, Universidad de Holguín]. Archivo digital. https://repositorio.uho.edu.cu/xmlui/bitstream/handle/uho/8835/Solangel%20Moy%c3%a9%20L%c3%b3pez.pdf?sequence=1&isAllowed=y

MAGA. (2016*). El Agro en cifras*. https://precios.maga.gob.gt/archivos/agro-en-cifras/individuales/Pi%C3%B1a%20Agro%20en%20Cifras%202016.pdf

Martini, A., Bragachini, M., Bianchini, A., Martelloto, A. y Méndez, A. (2010). *Percepción Remota.* INTA. http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASH7090.dir/doc.pdf

Mena, C. Ormazábal, R. y Barrientos, V Y. (2019). *Geomática aplicada.* https://docplayer.es/118387015-Geomatica-aplicada-carlos-mena-frau-yony-ormazabal-rojas-viviana-barrientos-lardinois-editores.html

Mendoza, J. F. (febrero de 2017). *Caracterización agronómica, morfológica, sensorial y bromatológica del cultivar de piña Ananas comosus (L) Merr. Jocotillo, en Villa Canales, Guatemala*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. https://dokumen.tips/documents/universidad-de-san-carlos-de-guatemala-facultad-de-conceptual-3-211-el-cultivo.html?page=1

Montoro, D. (s.f.*). Diseños factorial y multivariante, Métodos y técnicas de investigación*. http://www4.ujaen.es/~dmontoro/Metodos/Tema%209.pdf

Montoya, J. L. (2016). *Determinación de los requerimientos nutricionales de la piña variedad MD-2 en suelos ácidos del municipio de Santander de Quilichao.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Archivo digital. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58735/2018-07-Jennifer_Lopez_Montoya.pdf?sequence=1

Muñoz, A. y Gutiérrez C. P. (julio de 2006*). Teledetección nociones y aplicaciones*. https://mundocartogeo.files.wordpress.com/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf

Muñoz, M. M. (2018). *Guía para la identificación de las principales plagas y enfermedades en el cultivo de piña*. http://cica.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/11/Manual-de-plagas-Pi%C3%B1a-CICA-08-10-20191_compressed.pdf

Murillo L. (2014). *Periodos fenológicos del cultivo de piña CV. MD2, con nutrición mineral, zona Machala*. [Tesis de pregrado, Universidad técnica de Machala]. Archivo digital. http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/1032/7/CD302_TESIS.pdf

Naciones Unidas. (2015) *Conferencia de las Naciones Unidas Sobre Comercio y Desarrollo PIÑA*. https://unctad.org/es/system/files/official-document/INFOCOMM_cp09_Pineapple_es.pdf

Odunayo, D. Sbazo, A. Tamaz, J. y Naggy, A. (2020). Wheat Yield Forecasting Base on Landsat NDVI and SAVI time series. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202007.0065.v1

Olaya, V. (octubre de 2014). *Sistemas de Información Geográfica.* https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf

Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense,* 33(1),121-124 https://www.redalyc.org/pdf/436/43612054010.pdf

Ramos, G. (noviembre de 2008). Correlación del tipo de suelo-nivel freático-cobertura vegetal en el corredor de ripiario del río Colorado en el tramo FFCC-VADO Carranza. [Tesis de maestría, Universidad autónoma de baja california]. Archivo digital. https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/df827042-04e1-445e-8d02-231d768c0341/content

Ren, H. Zhou, G. y Zhang F. (2018). Using negative soil adjustment factor in soil-adjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *ScienceDirect*. 209, 439-445. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425718300804

Retana, J. P. (noviembre de 2015). Manual Agronómico cultivo de la piña. APROPIC. http://www.competitividad.org.do/wp-content/uploads/2016/05/Manual-Agron%C3%B3mico-Cultivo-de-la-Pi%C3%B1a.pdf

Rivera, N. A. (2015). Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6(2), 399-405. http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n2/v6n2a14.pdf

Rodríguez, A. J. (2021). *Evaluación del uso de imágenes multiespectrales como herramienta para la predicción del estado nutritivo y riesgo de floración natural en el cultivo de piña (Ananas comosus).* [Tesis de pregrado, Instituto tecnológico de Costa Rica Campus Tecnológico Local San Carlos]. Archivo digital. https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/13323

Rubio, AM; Hernández D.R.; Lárraga H.R. y Zacarías E. (2020) Teledetección en la Agricultura de Precisión: Estado del arte de los índices de vegetación. *Tectzapic,* *6*(2), 47-59. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8504957.pdf

Sarría, F. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf

Serrato, J. I. (2016). *Establecimiento y manejo de un cultivo de piña en la sede de la asociación de ingenieros agrónomos del llano de Villavicencio*. [Tesis de pregrado, Universidad de Los Llanos]. Archivo digital. https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/handle/001/341/Establecimiento%20y%20manejo%20de%20un%20cultivo%20de%20pi%F1a.pdf;jsessionid=81233D0E24ACA28D239020B412F4AF18?sequence=1

Shao, G., Huang, S., Tang, L., Hupy, J. y Wang Y. (2020). A commentary review on the use of normalized diference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research* (32),6. https://www.researchgate.net/publication/341782370_A_commentary_review_on_the_use_of_normalized_difference_vegetation_index_NDVI_in_the_era_of_popular_remote_sensing

Solano, M. y Aguilar H. (2016). *Desarrollo de una firma espectral para la identificación del cultivo de piña a través de sensores remotos e in situ en Costa Rica*. (1). https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/7871/Auilar_H_Desarrollo_firma_espectral_identificacion_cultivos_pina_informe_I_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sousa da Silva V., Salami, G, da Silva M., Araújo E., Monteiro J., y Alba E. (2019). Methodological evaluation of vegetation indexes in land use and land cover (LULC) classification. *Geologý, ecology and landscapes* 4(2), 159-169. https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1608409

Tapia, F. y Cevallos, E. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilks y Kolmogorov-Smirnov. *Societas,* 23(2),15

Teixeira, D. Teixeira, L. y Costa, C. (2017). Correlation between precipitation and vegetation indexes under preserved Caatinga condition. *Journal of Hyperespectral Remote Sensing*. 6 (1), 21-30. https://periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs/article/view/22765/18862

The European Spacy Agency. (junio de 2015). *Sentinel 2*. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2

Universidad de Murcia. (2011). Tema; Plataformas, sensores y canales. https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf

Utreras, F. I. (junio de 2019). Copernicus: Datos Abiertos y Gratuitos. [Diapositivas de power point]. Copernicus, Europe´s eyess on the Earth. https://www.ide.cl/descargas/Workshop_2019/Presentaciones/10.CopernicusDatosAbiertosyGratuitos-Florencio-Utreras.pdf

Vani, V. y Mandla, V. (abril de 2017). Comparative study of NDVI and SAVI vegetation indices in anantapur districti semi-arid areas. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 8(4), 559-566. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_8_ISSUE_4/IJCIET_08_04_063.pdf

Vargas, P. y Best S. (septiembre de 2021). *Aplicación de la agricultura tecnológica 4.0*. [Folleto]. Instituto de investigación agropecuarias. https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/4011/NR42318.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vargas, V. (diciembre de 2009). Manejo técnico del cultivo de piña. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/180/1/Manejo_tecnico_pina_2009.pdf

Zhang L, Member, S., Sub, X, Wu, T., y Zhang, H. (2015). An Analysis of Shadow Effects on Spectral Vegetation Indexes Using a Ground-Based Imaging Spectrometer. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12(11),1-5 https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7180331

APÉNDICES

Apéndice 1.

Lote de piña en F1 y F2 con presencia de arvenses

Nota. Se muestra la presencia de arvenses en los lotes del cultivo de piña. Elaboración propia.

Apéndice 2.

Lote de piña en F2 sin presencia de arvenses

Nota. Se muestra el lote de piña en F2 con el control manual realizado de arvenses. Elaboración propia.

Apéndice 3.

Lote de piña en F2 con resiembra

Nota. Se muestra el lote de piña en F2 con daños de plagas y/o enfermedades por lo cual se realiza la práctica de resiembra. Elaboración propia.

Apéndice 4.

Lote de piña en F2

Nota. Se muestra el lote de piña en F2 con un buen manejo agrícola y buen desarrollo fisiológico. Elaboración propia.

Apéndice 5.

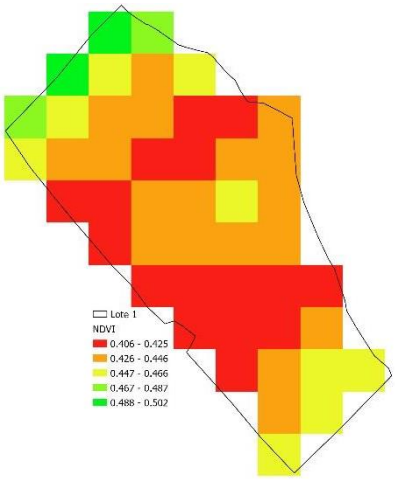
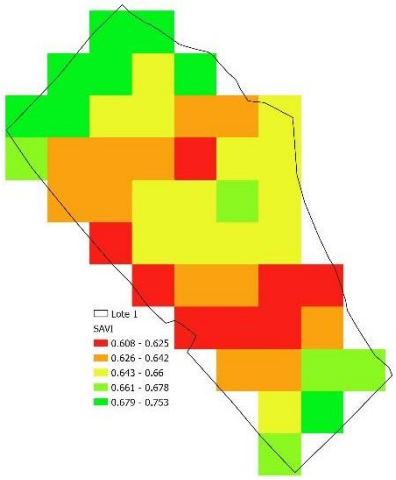
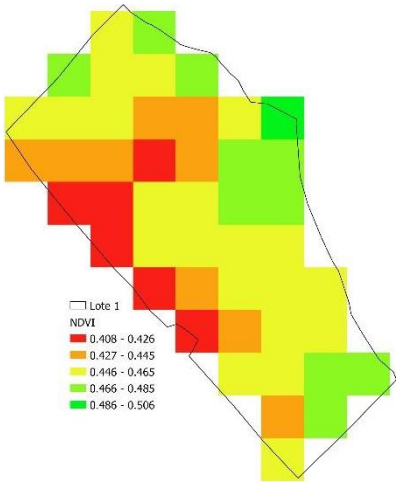
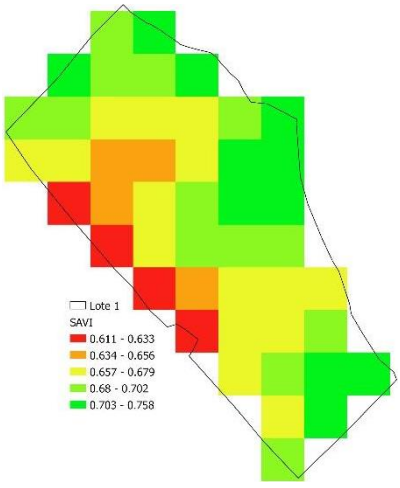
Prueba de Shapiro-Wilks de las variables biométricas y los IV

Índice	Variable	W*	P (unilateral D)
NDVI	RE-ALTURA	0.95	0.6205
	RE IAF	0.97	0.9121
	RE ø Planta	0.98	0.9413
SAVI	RE-ALTURA	0.94	0.5625
	RE IAF	0.97	0.9412
	RE ø Planta	0.97	0.9236

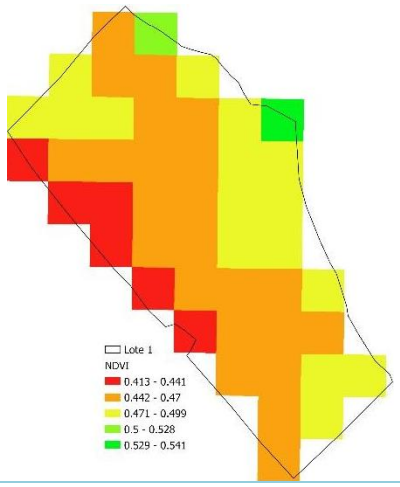
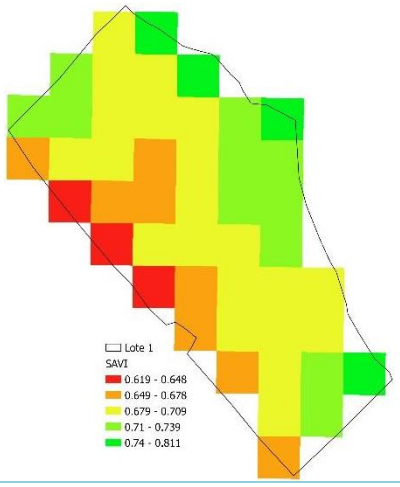
Nota. Análisis de regresión lineal. Elaboración propia, realizado con Excel.

Apéndice 6.

Índices de vegetación Lote 1

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

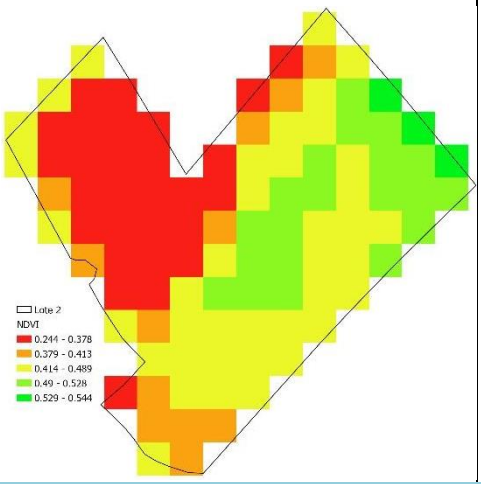
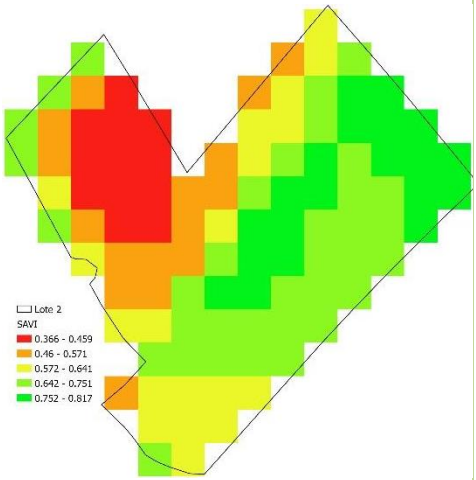
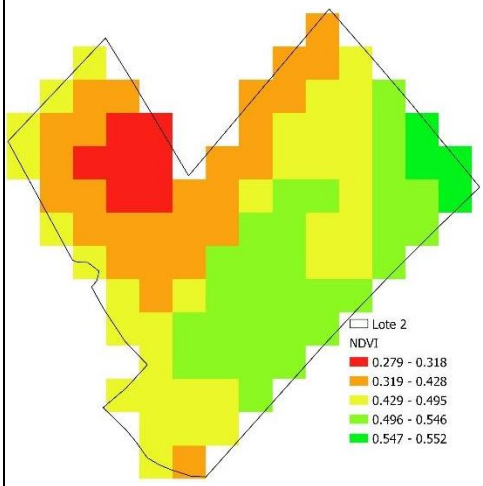
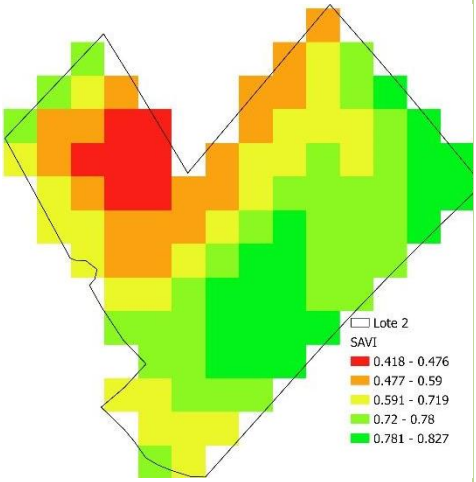
Continuación Apéndice 6.

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

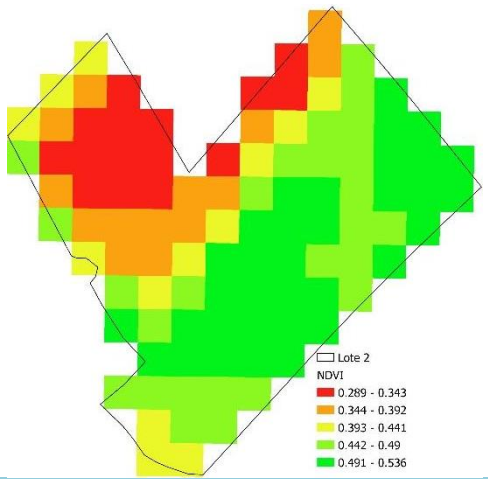
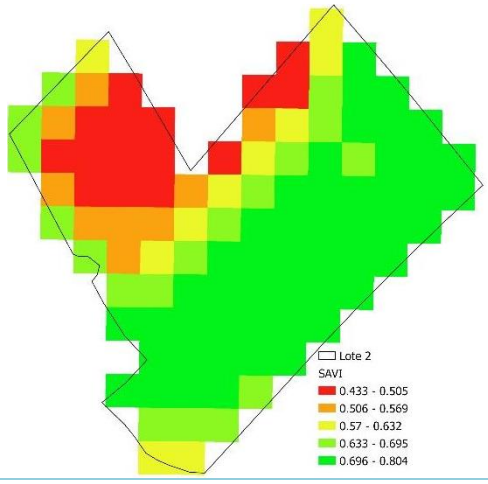
Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 7.

Índices de vegetación Lote 2

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

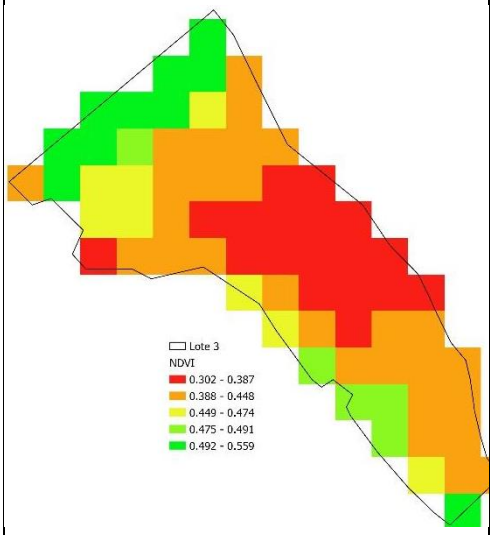
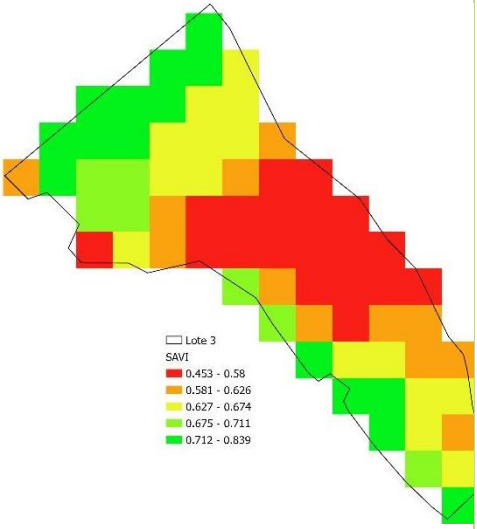
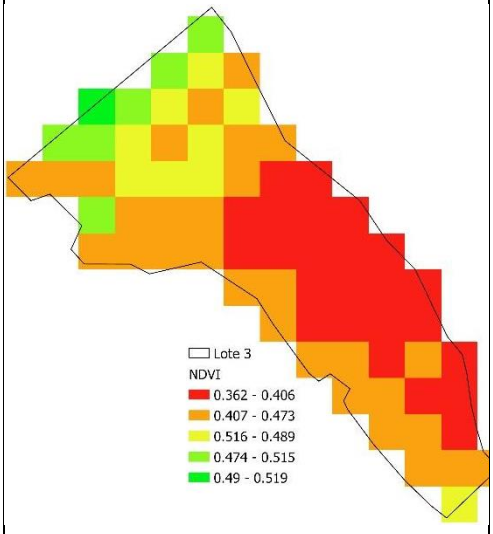
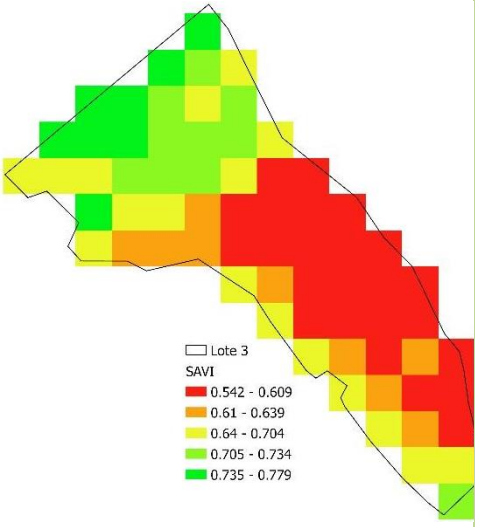
Continuación Apéndice 7

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

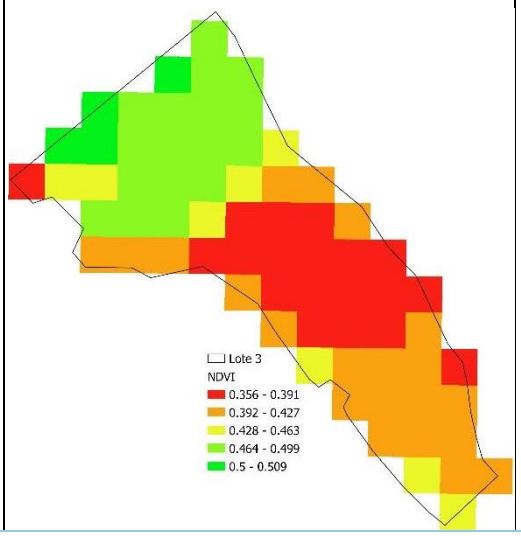
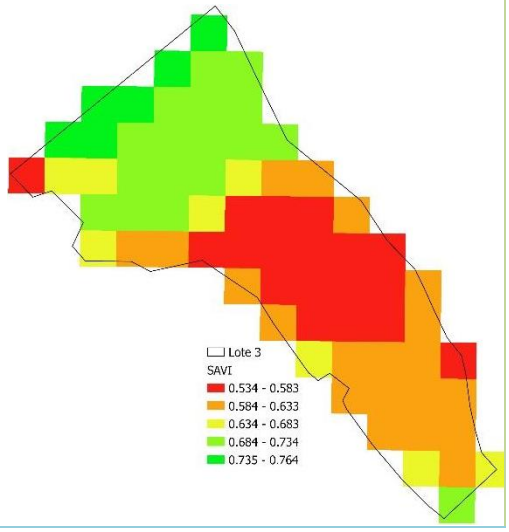
Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 8.

Índices de vegetación Lote 3

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

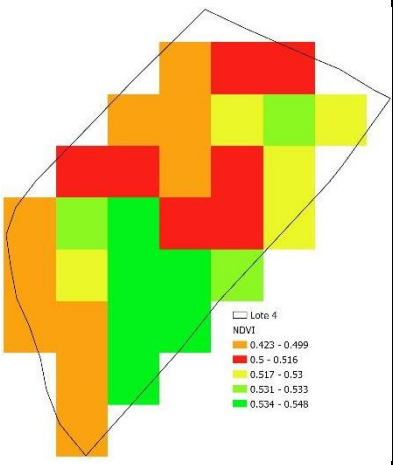
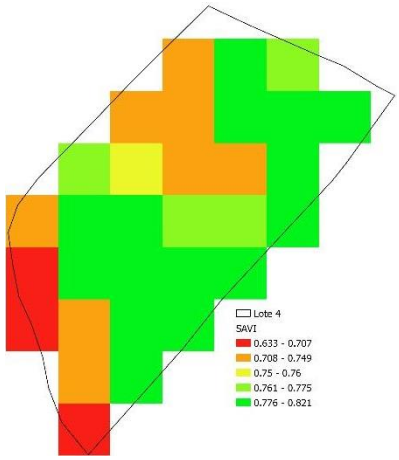
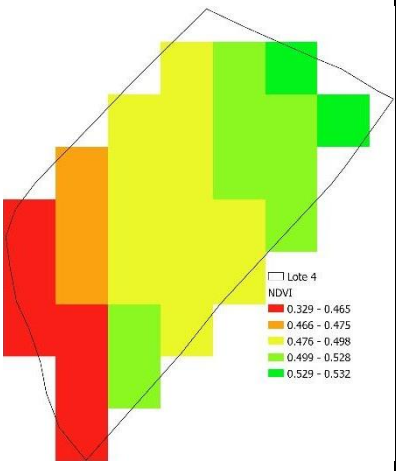
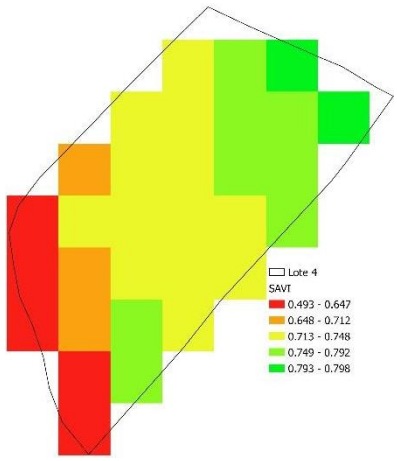
Continuación Apéndice 8

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

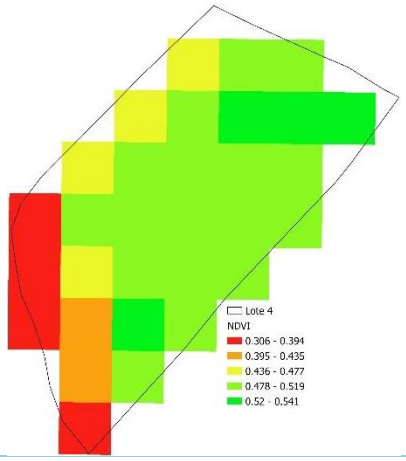
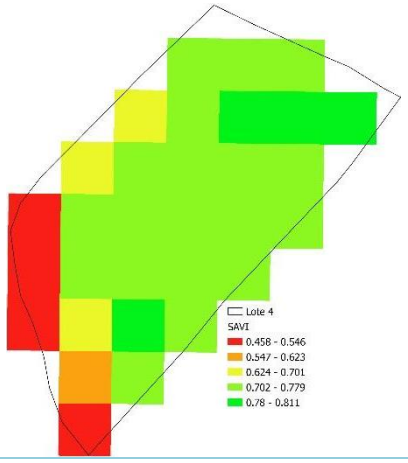
Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 9.

Índices de vegetación Lote 4

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

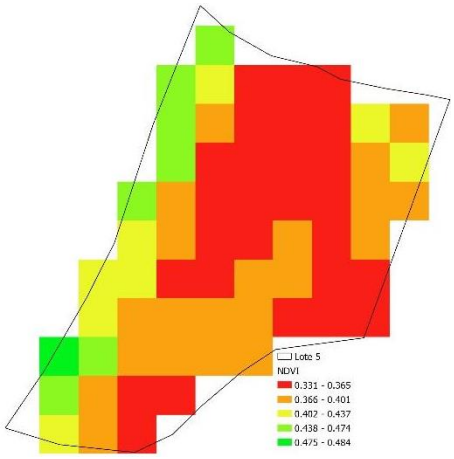
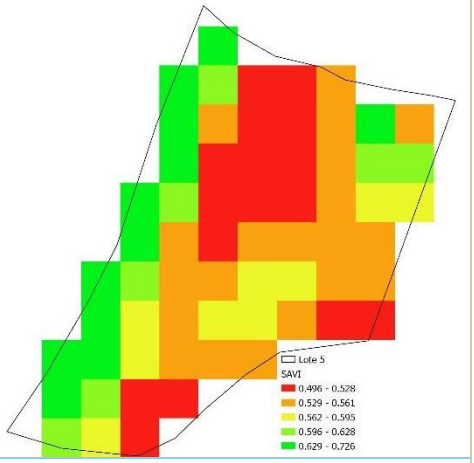
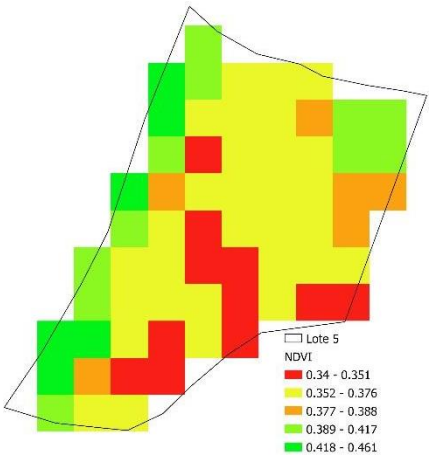
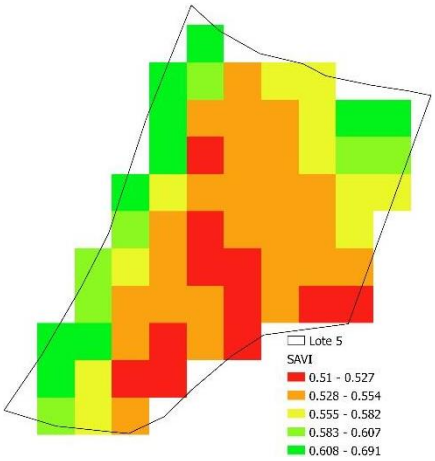
Continuación Apéndice 9.

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

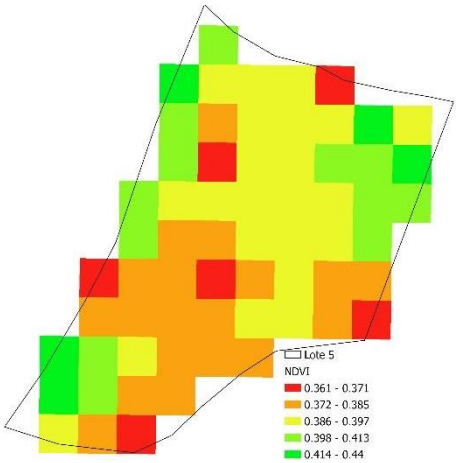
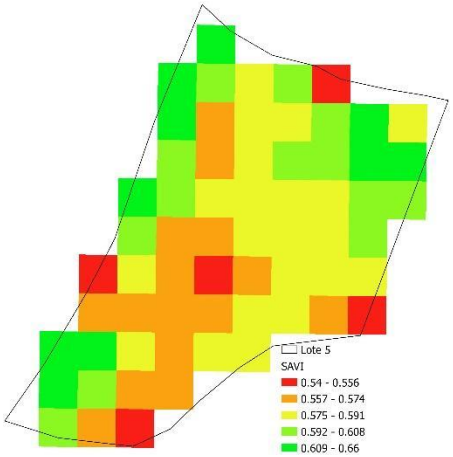
Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 10.

Índices de vegetación Lote 5

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

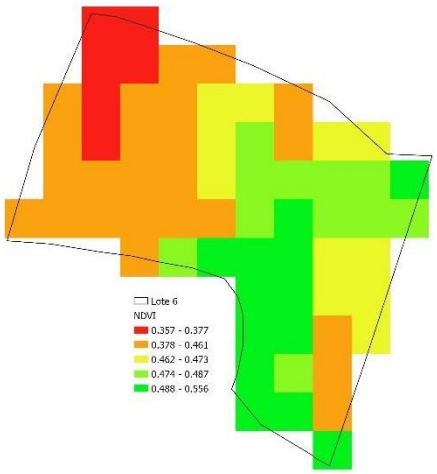
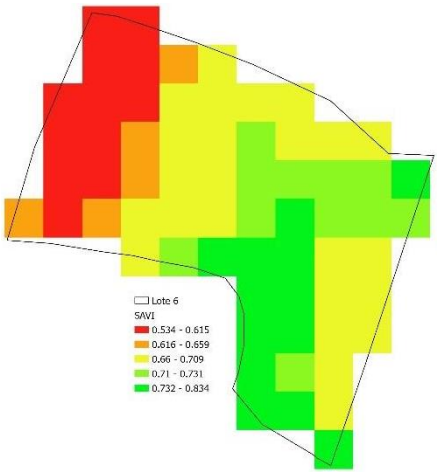
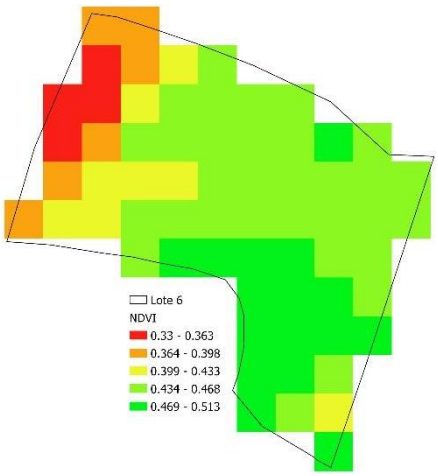
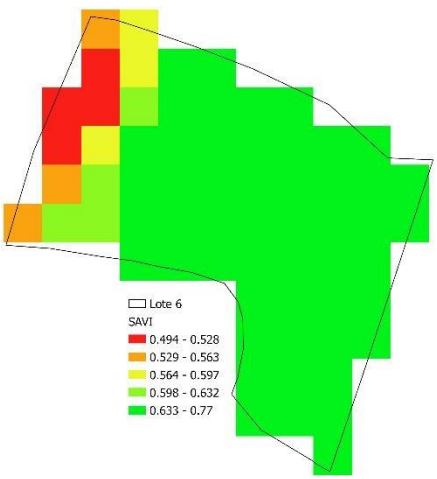
Continuación Apéndice 10

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

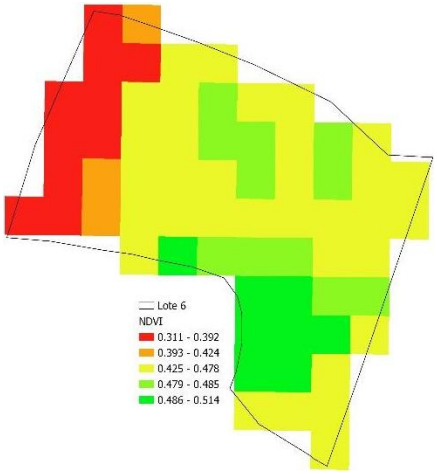
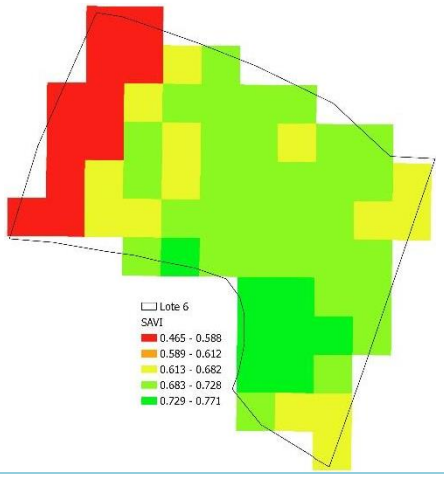
Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 11.

Índices de vegetación Lote 6

Fecha	NDVI	SAVI
Noviembre		
Diciembre		

Continuación Apéndice 11

Fecha	NDVI	SAVI
Enero		

Nota. Se muestra de manera gráfica el comportamiento de los índices espectrales y sus valores. Elaboración propia, realizado con ArcGIS pro.

Apéndice 12.

Análisis de suelo de Lote 1

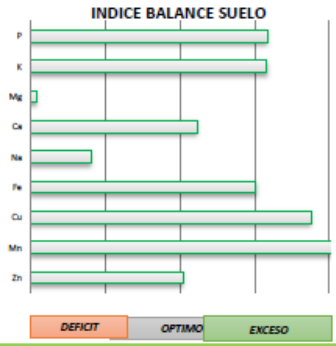
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M1
Finca	S/D	**Departamento**	Guatemala
Municipio	Villa Canales	**Cultivo**	Piña
Fecha	21/4/2023	**Informe No.**	14923
Ref. Lab	14923		

					ρa (g/cm3)	***0.86***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		Kg/ha
pH	4.9	-	-	-	-
MATERIA ORGA.	7.6	%	3.00	6.00	-
FOSFORO(P)	22.2	ppm	12.00	16.00	***38***
POTASIO (K)	1.0	meq/100g	0.40	0.80	***637***
MAGNESIO (Mg)	0.10	meq/100g	1.50	3.00	***21***
CALCIO (Ca)	6.7	meq/100g	4.00	8.00	***2309***
SODIO (Na)	0.2	meq/100g	0.10	1.00	***89***
HIERRO (Fe)	56.6	ppm	25.00	50.00	***97.4***
COBRE (Cu)	5.7	ppm	2.00	4.00	***9.7***
MANGANESO (Mn)	21.7	ppm	5.00	10.00	***37.2***
ZINC (Zn)	4.1	ppm	3.00	5.00	***7.1***
ARCILLA	7	%	-	-	-
LIMO	16	%	-	-	-
ARENA	77	%	-	-	-
CLASE TEXTURAL	Franco arenosa		-	-	-
Sumatoria de bases	7.99	meq/100g			
CICE	9.75				

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**67.12**	3.00	6.00
Ca/K	**7.06**	15.00	30.00
Mg/K	**0.11**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**7.17**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**2.82**	5.00	15.00
% Sat. De K	**11.89**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**84.03**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**1.25**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**81.94**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (ρa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 1. Elaboración ICTA 2023.

Apéndice 13.

Análisis de suelo de Lote 2

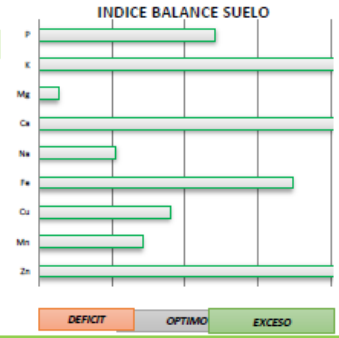
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M2
Finca	S/D	**Departamento**	Guatemala
Municipio	Villa Canales	**Cultivo**	Piña
Fecha	21/4/2023	**Informe No.**	15023
Ref. Lab	15023		

			ρa (g/cm3)		***1.1***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		**Kg/ha**
pH	7.2	-	-	-	-
MATERIA ORGA.	8.9	%	3.00	6.00	-
FOSFORO(P)	16.9	ppm	12.00	16.00	***37***
POTASIO (K)	2.0	meq/100g	0.40	0.80	***1673***
MAGNESIO (Mg)	0.30	meq/100g	1.50	3.00	***80***
CALCIO (Ca)	13.7	meq/100g	4.00	8.00	***6028***
SODIO (Na)	0.3	meq/100g	0.10	1.00	***147***
HIERRO (Fe)	65.0	ppm	25.00	50.00	***143.0***
COBRE (Cu)	2.7	ppm	2.00	4.00	***5.9***
MANGANESO (Mn)	5.4	ppm	5.00	10.00	***11.8***
ZINC (Zn)	9.7	ppm	3.00	5.00	***21.3***
ARCILLA	5	%	-	-	-
LIMO	20	%	-	-	-
ARENA	75	%	-	-	-
CLASE TEXTURAL	Arena franca		-	-	-
Sumatoria de bases	**16.24**	meq/100g			
CICE	16.34				

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**45.30**	3.00	6.00
Ca/K	**7.03**	15.00	30.00
Mg/K	**0.16**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**7.18**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**1.78**	5.00	15.00
% Sat. De K	**12.01**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**84.35**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**1.86**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**99.39**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (pa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 2. Elaboración ICTA 2023.

Apéndice 14.

Análisis de suelo de Lote 3

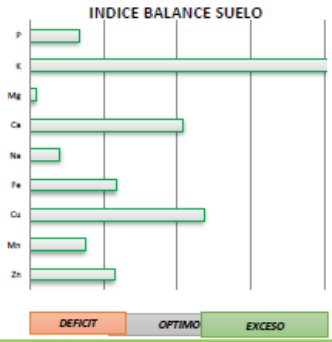
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M3
Finca	S/D	**Departamento**	Guatemala
Municipio	Villa Canales	**Cultivo**	Piña
Fecha	21/4/2023	**Informe No.**	15123
Ref. Lab	15123		

					ρa (g/cm3)	***1.1***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		**Kg/ha**
pH	5.5	-	-	-	-
MATERIA ORGA.	8.4	%	3.00	6.00	-
FOSFORO(P)	4.65	ppm	12.00	16.00	***10***
POTASIO (K)	1.4	meq/100g	0.40	0.80	***1201***
MAGNESIO (Mg)	0.10	meq/100g	1.50	3.00	***26***
CALCIO (Ca)	6.2	meq/100g	4.00	8.00	***2745***
SODIO (Na)	0.1	meq/100g	0.10	1.00	***57***
HIERRO (Fe)	22.0	ppm	25.00	50.00	***48.4***
COBRE (Cu)	3.6	ppm	2.00	4.00	***7.8***
MANGANESO (Mn)	2.8	ppm	5.00	10.00	***6.2***
ZINC (Zn)	2.3	ppm	3.00	5.00	***5.1***
ARCILLA	9	%	-	-	-
LIMO	18	%	-	-	-
ARENA	73	%	-	-	-
CLASE TEXTURAL	Franco arenosa		-	-	-
Sumatoria de bases	7.85	meq/100g			
CICE	8.15				

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**62.38**	3.00	6.00
Ca/K	**4.46**	15.00	30.00
Mg/K	**0.07**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**4.53**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**1.44**	5.00	15.00
% Sat. De K	**17.83**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**79.45**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**1.27**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**96.32**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (pa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 3. Elaboración ICTA 2023.

Apéndice 15.

Análisis de suelo de Lote 4

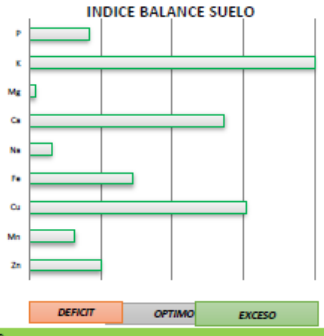
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M4
Finca	S/D	**Departamento**	Guatemala
Municipio	Villa Canales	**Cultivo**	Piña
Fecha	21/4/2023	**Informe No.**	15323
Ref. Lab	15323		

					ρa (g/cm3)	***1.1***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		**Kg/ha**	
pH	5.4	-	-	-	-	
MATERIA ORGA.	7.7	%	3.00	6.00	-	
FOSFORO(P)	5.85	ppm	12.00	16.00	***13***	
POTASIO (K)	1.2	meq/100g	0.40	0.80	***1030***	
MAGNESIO (Mg)	0.10	meq/100g	1.50	3.00	***26***	
CALCIO (Ca)	8.2	meq/100g	4.00	8.00	***3601***	
SODIO (Na)	0.1	meq/100g	0.10	1.00	***44***	
HIERRO (Fe)	27.2	ppm	25.00	50.00	***59.8***	
COBRE (Cu)	4.6	ppm	2.00	4.00	***10.0***	
MANGANESO (Mn)	2.4	ppm	5.00	10.00	***5.3***	
ZINC (Zn)	2.0	ppm	3.00	5.00	***4.4***	
ARCILLA	5	%	-	-	-	
LIMO	18	%	-	-	-	
ARENA	77	%	-	-	-	
CLASE TEXTURAL	Arena franca		-	-	-	
Sumatoria de bases	9.57	meq/100g				
CICE	9.94					

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**81.84**	3.00	6.00
Ca/K	**6.82**	15.00	30.00
Mg/K	**0.08**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**6.90**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**0.91**	5.00	15.00
% Sat. De K	**12.54**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**85.50**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**1.04**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**96.28**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (ρa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 4. Elaboración ICTA 2023.

Apéndice 16.

Análisis de suelo de Lote 5

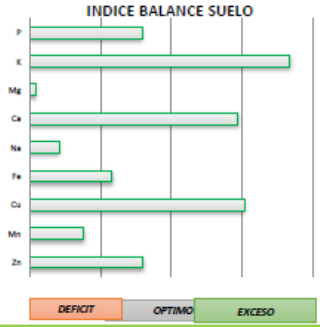
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M5
Finca	S/D		
Municipio	Villa Canales	**Departamento**	Guatemala
Fecha	21/4/2023	**Cultivo**	Piña
Ref. Lab	15423	**Informe No.**	15423

					ρa (g/cm3)	***1.1***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		**Kg/ha**
pH	5.7	-	-	-	-
MATERIA ORGA.	4.4	%	3.00	6.00	-
FOSFORO(P)	11.1	ppm	12.00	16.00	***24***
POTASIO (K)	1.1	meq/100g	0.40	0.80	***944***
MAGNESIO (Mg)	0.10	meq/100g	1.50	3.00	***26***
CALCIO (Ca)	8.8	meq/100g	4.00	8.00	***3875***
SODIO (Na)	0.1	meq/100g	0.10	1.00	***57***
HIERRO (Fe)	21.8	ppm	25.00	50.00	***48.0***
COBRE (Cu)	4.6	ppm	2.00	4.00	***10.0***
MANGANESO (Mn)	2.9	ppm	5.00	10.00	***6.3***
ZINC (Zn)	3.2	ppm	3.00	5.00	***7.0***
ARCILLA	7	%	-	-	-
LIMO	16	%	-	-	-
ARENA	77	%	-	-	-
CLASE TEXTURAL	Arena franca		-	-	-
Sumatoria de bases	**10.12**	meq/100g			
CICE	10.31				

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**88.07**	3.00	6.00
Ca/K	**8.01**	15.00	30.00
Mg/K	**0.09**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**8.10**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**1.12**	5.00	15.00
% Sat. De K	**10.87**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**87.02**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**0.99**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**98.16**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (pa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 5. Elaboración ICTA 2023.

Apéndice 17.

Análisis de suelo de Lote 6

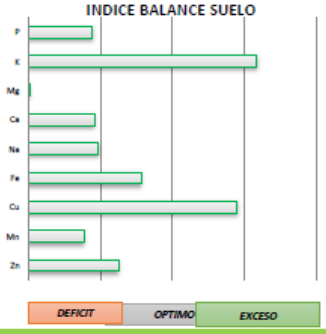
GOBIERNO de GUATEMALA | MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN

Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Wilmer Colocho	**Identificación de muestra**	M6
Finca	S/D		
Municipio	Villa Canales	**Departamento**	Guatemala
Fecha	21/4/2023	**Cultivo**	Piña
Ref. Lab	15523	**Informe No.**	15523

					ρa (g/cm3)	***1.1***
PARAMETRO	**VALOR**	**UNIDAD**	**RANGO ADECUADO**		**Kg/ha**	
pH	5.3	-	-	-	-	
MATERIA ORGA.	8.5	%	3.00	6.00	-	
FOSFORO(P)	6.25	ppm	12.00	16.00	***14***	
POTASIO (K)	1.0	meq/100g	0.40	0.80	***815***	
MAGNESIO (Mg)	0.02	meq/100g	1.50	3.00	***5***	
CALCIO (Ca)	2.7	meq/100g	4.00	8.00	***1208***	
SODIO (Na)	0.3	meq/100g	0.10	1.00	***135***	
HIERRO (Fe)	29.3	ppm	25.00	50.00	***64.5***	
COBRE (Cu)	4.4	ppm	2.00	4.00	***9.6***	
MANGANESO (Mn)	2.9	ppm	5.00	10.00	***6.4***	
ZINC (Zn)	2.5	ppm	3.00	5.00	***5.5***	
ARCILLA	5	%	-	-	-	
LIMO	18	%	-	-	-	
ARENA	77	%	-	-	-	
CLASE TEXTURAL	Arena franca		-	-	-	
Sumatoria de bases	3.98	meq/100g				
CICE	4.53					

RELACIONES CATIONICAS		**RANGO ADECUADO**	
Ca/Mg	**148.23**	3.00	6.00
Ca/K	**2.89**	15.00	30.00
Mg/K	**0.02**	10.00	15.00
(Ca+Mg)/K	**2.91**	20.00	40.00
% Sat. De Na	**6.69**	5.00	15.00
% Sat. De K	**23.87**	5.00	7.00
% Sat. De Ca	**68.97**	50.00	70.00
% Sat. De Mg	**0.47**	15.00	25.00
% Sat. De Bases	**87.86**	35.00	50.00



MÉTODOS ANALÍTICOS

Bases de cambio Absorción Atómica, Extracción con acetato de amonio pH 7; CICE: Sumatoria de bases y Al; Conductividad Eléctrica (CE) Electrométrico extracto de saturación; P disponible Colorimétrico: Melich I; Micronutrientes Absorción Atómica, Extracción con Melich I; Materia Orgánica: Walkley Black; pH: Potenciométrico, relación suelo:agua 1:2.5; Textura: Bouyoucos o según solicitud. Densidad aparente (ρa) con base en la textura. Kg/ha: Aproximacion de los contenidos totales en suelo. Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Nota. Se muestra el análisis de laboratorio realizado para el lote 6. Elaboración ICTA 2023.