



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Análisis de respuesta espectral en etapa de antesis y cálculo de fijación de carbono en cultivos de palma aceitera del Ecuador mediante tecnologías geoespaciales

Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Ing. Sinde González, Izar M.Sc.

30 de marzo de 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis_Cisneros_Sebastian_V03.docx (D98844664)

Submitted: 3/19/2021 6:57:00 AM

Submitted By: iisinde@espe.edu.ec

Significance: 1 %

Sources included in the report:

TITULACION 1karikevin.docx (D77260690)

Torres_Vargas_URKUND.docx (D96121529)

<https://docplayer.es/94734512-T-e-s-i-s-determinacion-de-variables-agronomicas-del-cultivo-de-maiz-mediante-imagenes-obtenidas-desde-un-vehiculo-aereo-no-tripulado-vant.html>

<http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/2009/Nicol%20Andrea%20Cetina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instances where selected sources appear:

8

Firma:

.....

Ing. Sinde González, Izar M.Sc.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Análisis de respuesta espectral en etapa de antesis y cálculo de fijación de carbono en cultivos de palma aceitera del Ecuador mediante tecnologías geoespaciales”** fue realizado por el señor **Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de marzo de 2021

Firma:

.....
Ing. Sinda González, Izar M.Sc.

C. C.: 175649127-8



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo**, con cédula de ciudadanía n° 1721540399, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis de respuesta espectral en etapa de antesis y cálculo de fijación de carbono en cultivos de palma aceitera del Ecuador mediante tecnologías geoespaciales** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de marzo de 2021

Firma

Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo

C.C.: 172154039-9



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo**, con cédula de ciudadanía n° 1721540399, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis de respuesta espectral en etapa de antesis y cálculo de fijación de carbono en cultivos de palma aceitera del Ecuador mediante tecnologías geoespaciales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de marzo de 2021

Firma

Cisneros Rivera, Sebastián Marcelo

C.C.: 172154039-9

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mis padres, Marcelo y Patricia, por ser un pilar importante en mi vida con su trabajo y sacrificio para brindarme la mejor educación, por haberme inculcado sus valores y apoyado durante toda esta etapa.

A mi hermana Tania y a mi cuñado Juan Carlos, por estar siempre presentes, me han guiado y ayudado en lo que necesitaba, a Valentina mi sobrina, por ser quien llena de alegría mis días y mi hogar.

A ti, Andrea, por creer en mí, aconsejarme, apoyarme, por amarme y por hacer de los últimos semestres de la universidad los mejores. Te amo.

A mi abuelito, Pepito, quien con sus consejos y bendiciones me alentaba cada día por las mañanas y a mis abuelitas Rosita (†) y Luzmila (†) que desde el cielo sé que estarán muy orgullosas.

A mis primos: Xavier, gracias por brindarme tus conocimientos en los semestres más difíciles, y a ti Lorena, por estar siempre pendiente de mí y brindarme nuevas oportunidades

Agradecimiento

Infinito agradecimiento al Ing. Izar Sinde, por confiar en mí y permitirme haber sido partícipe de este proyecto, sin duda, una gran persona, un gran profesional, gracias por sus conocimientos y enseñanzas.

Al Ing. Vladimir Bravo, por realizar todas las gestiones necesarias y por abrirme las puertas para ejecutar este proyecto, por sus conocimientos brindados en el campo de la agricultura. A la Ing. Lorena Benítez, por hacer posible la utilización de los equipos y por haber estado presente en el trabajo.

A mis padres, a Alejandro y a José Antonio Sinde, gracias por aportar su granito de arena a la hora de realizar el trabajo más duro, el trabajo de campo.

A Andrea, pilar fundamental, que demostró su apoyo incondicional desde las clases y que de igual forma estuvo en cada viaje a campo, gracias por los consejos y por motivarme cada día para alcanzar esta meta.

A mis compañeros, algunos desde primer semestre, otros durante el camino, gracias por haber compartido momentos grandiosos. De manera especial a mis amigos Ricardo, Carlos y David, gracias por su apoyo diario y por su valiosa amistad, sin duda, perdurará por toda la vida.

Índice de contenidos

Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de contenidos	8
Índice de Tablas	15
Resumen	20
Abstract	21
Capítulo I	22
Antecedentes	22
Planteamiento del problema	24
Justificación e importancia	26
Estudios relacionados	28
Descripción del área de estudio	29
Objetivos	30
Objetivo General	30

Objetivos Específicos	30
Metas	31
Capítulo II	32
Teledetección	32
Tipos de sensores	33
Resolución de datos obtenidos	34
Espectroscopía	35
Espectro electromagnético	35
Vehículos Aéreos No Tripulados – UAV	36
Sensores utilizados en los vehículos aéreos no tripulados	37
Teledetección aplicada a cultivos	38
Firma espectral	39
Índices de vegetación	40
Agricultura de precisión	43
Proceso fotogramétrico en la agricultura de precisión	44
Biomasa	46
Ecuaciones alométricas	46
Dasometría	47
Fijación de carbono	49

	10
Palma de aceite	49
Inflorescencia	50
Polinización	50
Estadística	52
Métodos de muestreo	52
Tamaño de la muestra	53
Estadística descriptiva	54
Estadística inferencial	55
Análisis de la varianza - ANOVA	56
Prueba de bondad de ajuste – Prueba de Kolmogorov-Smirnov	57
Prueba de homocedasticidad – Prueba de Levene	57
Análisis de la varianza – Prueba de Welch	57
Análisis Post-Hoc – Prueba de Games-Howell	58
Análisis de concordancia	58
Base Legal	59
Constitución de la República del Ecuador	59
Ley de Fomento y Desarrollo Agropecuario	59
Ley para el Fortalecimiento y Desarrollo de la Producción, Comercialización, Extracción, Exportación e Industrialización de la Palma Aceitera y sus Derivados.	59

	11
Capítulo III	60
Generalidades	60
Materiales y equipos	62
Metodología para la obtención de datos	63
Posicionamiento y postproceso de puntos de control terrestre	63
Captura de imágenes aéreas UAV y procesamiento	64
Imágenes RGB – UAV Mavic Pro	64
Planificación de los vuelos	65
Ejecución de los vuelos	65
Proceso fotogramétrico	66
Imágenes multiespectrales y RGB – UAV Phantom IV	68
Planificación de los vuelos	68
Ejecución de los vuelos	69
Proceso fotogramétrico – imágenes multiespectrales	70
Proceso fotogramétrico – imágenes RGB.	71
Cálculo de índices de vegetación a partir de los ortofotomosaicos	71
Conteo de palmas	71
Índices de vegetación a partir de los ortofotomosaicos multiespectrales	73
Índice de vegetación a partir del ortofotomosaico RGB	75

Captura y procesamiento de datos espectrales con el espectroradiómetro	76
Método de muestreo y tamaño de muestra	76
Captura de datos espectrales	77
Procesamiento de datos espectrales	78
Cálculo de índices de vegetación con los datos espectrales	80
Captura y procesamiento de datos dasométricos en campo	81
Método de muestreo y tamaño de muestra	81
Medidas en campo	82
Estimación de la altura de las plantas.	83
Captura de datos dasométricos a partir del UAV.	84
Modelo de altura del dosel – C.H.M.	85
Estimación de biomasa y fijación de carbono	86
Biomasa y fijación de carbono con datos de campo.	86
Biomasa y fijación de carbono con datos UAV.	88
Análisis estadístico	90
Análisis exploratorio de datos	90
Análisis de la varianza ANOVA	90
Análisis de concordancia y error	92
Capítulo IV	93

Generación del ortofotomosaico RGB	93
Generación de los ortofotomosaicos multiespectrales	93
Generación de índices de vegetación con UAV	95
Análisis estadístico de los índices de vegetación con UAV	96
Análisis exploratorio de datos	96
Prueba ANOVA para los índices de vegetación obtenidos a partir del UAV.	101
Captura de datos con el espectroradiómetro	102
Generación de índices de vegetación con el espectroradiómetro.	102
Análisis estadístico de los índices de vegetación con el espectroradiómetro	103
Análisis exploratorio de datos	103
Prueba ANOVA para índices de vegetación obtenidos a partir del espectroradiómetro	107
Discusión sobre la detección de antesis con métodos espectrales	108
Cálculo de biomasa aérea y fijación de carbono	110
Biomasa aérea y fijación de carbono a partir de datos en campo	110
Biomasa y fijación de carbono a partir de los datos del UAV.	111
Obtención de la altura a partir del UAV.	111
Análisis estadístico de los valores de biomasa obtenidos en campo y con UAV.	114
Análisis exploratorio de datos	114
Análisis de varianza - Prueba Welch para la biomasa obtenida por cuatro métodos.	119

Análisis de concordancia y cálculo del error	120
Discusión sobre el cálculo de biomasa aérea.	121
Capítulo V	125
Conclusiones	125
Recomendaciones	128
Referencias bibliográficas	129
Anexos	144

Índice de Tablas

Tabla 1 Proyectos relacionados _____	28
Tabla 2 Ecuaciones de los índices de vegetación _____	42
Tabla 3 Materiales y equipos _____	62
Tabla 4 Coordenadas de los puntos de control _____	64
Tabla 5 Parámetros de los planes de vuelo – UAV DJI Mavic Pro _____	65
Tabla 6 Coordenadas de los puntos foto identificables _____	67
Tabla 7 Parámetros de los planes de vuelo – UAV DJI Phantom IV + Parrot Sequoia _____	69
Tabla 8 Cantidad de plantas muestreadas _____	77
Tabla 9 Rangos de longitudes de onda _____	80
Tabla 10 Resumen de las estadísticas de los índices calculados a partir del UAV _____	96
Tabla 11 Prueba de normalidad de datos K-S para índices a partir del UAV _____	99
Tabla 12 Prueba de homogeneidad de varianzas – índices a partir del UAV _____	100
Tabla 13 P-valor obtenidos de la prueba ANOVA para índices a partir del UAV _____	101
Tabla 14 Resumen de las estadísticas de los índices calculados con el espectrorradiómetro ____	103
Tabla 15 Prueba de normalidad de datos K-S para índices a partir del espectrorradiómetro ____	106
Tabla 16 Prueba de homogeneidad de varianzas – índices a partir del espectrorradiómetro ____	107
Tabla 17 P-valor obtenidos de la ANOVA para índices a partir del espectrorradiómetro _____	108
Tabla 18 Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono con datos de campo ____	110

Tabla 19 Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono – Ecuación 11 UAV	113
Tabla 20 Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono – Ecuación 12 UAV	113
Tabla 21 Resumen de las estadísticas de biomasa de los cuatro métodos de obtención	114
Tabla 22 Prueba de normalidad de datos K-S para biomasa con la ecuación 11	117
Tabla 23 Prueba de normalidad de datos K-S para biomasa con la ecuación 12	118
Tabla 24 Resumen de la prueba ANOVA - Welch para biomasa con las dos ecuaciones	119
Tabla 25 Resumen de las estadísticas de la prueba Games-Howell	120
Tabla 26 Coeficiente de correlación de concordancia de Lin y RMSE	121

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación de la zona de estudio Finca San Guido – ANCUPA _____	29
Figura 2 Componentes del proceso de la teledetección _____	33
Figura 3 Tipos de sensores en la teledetección _____	34
Figura 4 División del espectro electromagnético _____	36
Figura 5 Formas de evaluación espacial con UAV del estado de los cultivos _____	38
Figura 6 Reflectancia o firma espectral de una hoja en buen estado _____	40
Figura 7 Levantamiento aéreo con UAV y proceso fotogramétrico digital _____	45
Figura 8 Diámetro a la altura del pecho _____	48
Figura 9 Altura total de una palma en pie _____	48
Figura 10 Inflorescencia femenina y masculina en antesis _____	51
Figura 11 Etapas del proceso de polinización asistida _____	52
Figura 12 Metodología general del proyecto _____	60
Figura 13 Materialización y posicionamiento de los puntos de control _____	63
Figura 14 Diseño de los vuelos RGB _____	66
Figura 15 Proceso fotogramétrico con imágenes RGB _____	67
Figura 16 UAV Phantom IV con la cámara multispectral Parrot Sequoia a bordo _____	68
Figura 17 Diseño de los vuelos multispectrales _____	69
Figura 18 Proceso fotogramétrico con imágenes multispectrales _____	71
Figura 19 Visualización de las plantas bajo el uso del índice NDVI _____	72

Figura 20 Conteo de palmas para la generación de las circunferencias _____	73
Figura 21 Modelo utilizado para calcular los índices de vegetación y extraer sus valores _____	74
Figura 22 Tabla obtenida de la herramienta “Zonal Statistics as Table” del índice NDVI, especie Coari __	74
Figura 23 Tabla obtenida de la herramienta “Zonal Statistics as Table” del índice VARI, especie Coari __	75
Figura 24 Modelo utilizado para calcular el índice de vegetación y extraer sus valores _____	76
Figura 25 Espectrorradiómetro de mano PSR-1100 y colectora CETAC PS236 _____	78
Figura 26 Información existente en cada archivo del espectrorradiómetro _____	79
Figura 27 Base de datos de las mediciones espectrales en Excel _____	79
Figura 28 Valores de reflectancia para las bandas espectrales _____	81
Figura 29 Estimación de los ángulos α y β y la distancia _____	82
Figura 30 Observador situado entre la base y el ápice del árbol _____	83
Figura 31 Cálculo de la altura total de la palma _____	84
Figura 32 Tabla obtenida con la herramienta “Zonal Statistics” _____	85
Figura 33 Modelo utilizado para generar el CHM y extraer sus valores _____	86
Figura 34 Cálculo de biomasa aérea por planta con datos de campo _____	87
Figura 35 Cálculo de la fijación de carbono por planta _____	87
Figura 36 Cálculo de biomasa aérea por planta con datos de los CHM _____	88
Figura 37 Cálculo de la fijación de carbono por planta _____	89
Figura 38 Ortofotomosaico RGB de las tres variedades _____	93
Figura 39 Ortofotomosaicos multiespectrales de las tres variedades _____	94

Figura 40 Índices de vegetación calculados a partir del UAV _____	95
Figura 41 Histogramas de los cinco índices calculados a partir del UAV _____	97
Figura 42 Cálculo de los índices de vegetación a partir del espectrorradiómetro _____	102
Figura 43 Histogramas de los índices calculados con datos del espectrorradiómetro _____	104
Figura 44 Altura obtenida a partir de los tres diferentes CHM _____	111
Figura 45 Modelo de altura del dosel – UAV DJI Phantom IV, Cámara Parrot Sequoia RGB _____	111
Figura 46 Histogramas de los cuatro métodos para calcular biomasa (ecuación 11) _____	115
Figura 47 Histogramas de los cuatro métodos para calcular biomasa (ecuación 12) _____	116
Figura 48 Diagramas de cajas de los valores de biomasa ecuación 11 _____	118
Figura 49 Diagramas de cajas de los valores de biomasa ecuación 12 _____	119

Resumen

La polinización asistida en cultivos de palma híbrida es una técnica empleada para mejorar la producción, sin embargo, representa gran trabajo. Por otro lado, las emisiones de dióxido de carbono generan impactos perjudiciales en el medio ambiente, por lo que, para contribuir con información de interés ambiental, es necesario estimar variables agrícolas de los cultivos, pero esto supone un gran problema debido al gran trabajo que implica la toma de datos en campo. El objetivo fue calcular la fijación de carbono y analizar la respuesta espectral mediante el uso de tecnologías geoespaciales para identificar diferencias entre las plantas en etapa de antesis y no antesis. En la fase uno, se posicionaron puntos de control y se obtuvieron imágenes RGB y multiespectrales mediante vuelos UAV, se tomaron datos espectrales y datos biométricos. En la fase dos, a partir del UAV se calcularon diez índices de vegetación, se aplicó un ANOVA y se obtuvo como resultado que el I.V. REDVI presenta diferencias estadísticamente significativas en un rango de [0.2156 – 0.2284] para plantas en antesis. Con los I.V. calculados con datos espectrales no se encontraron diferencias. Se calculó la biomasa con dos ecuaciones alométricas y con la altura de tres modelos de altura del dosel (CHM), dando como resultado que el CHM obtenido con el sensor RGB de la cámara Parrot Sequoia arroja los valores de biomasa más cercanos a los resultados de campo (52 ton/ha), con un coeficiente de concordancia de 0.15 y un RMSE del 16%. A partir de estos valores, la fijación de carbono fue de 90 (ton/ha).

PALABRAS CLAVE:

- **ANTESIS**
- **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**
- **BIOMASA**
- **FIJACIÓN DE CARBONO**

Abstract

Assisted pollination in hybrid palm crops is a technique used to improve production, however, it represents a lot of work. On the other hand, carbon dioxide emissions generate detrimental impacts on the environment, therefore, to contribute information of environmental interest, it is necessary to estimate agricultural variables of the crops, but this represents a great problem due to the great work that involves data collection in the field. The objective was to calculate the carbon fixation and analyze the spectral response using geospatial technologies to identify differences between the plants in the anthesis and non-anthesis stages. In phase one, control points were positioned and RGB and multispectral images were obtained by UAV flights, spectral data and biometric data were taken. In phase two, ten vegetation indices were calculated from the UAV, an ANOVA was applied, and the result was that the I.V. REDVI presents statistically significant differences in a range of [0.2156 - 0.2284] for plants in anthesis. With the I.V. calculated with spectral data, no differences were found. Biomass was calculated with two allometric equations and with the height of three canopy height models (CHM), resulting in that the CHM obtained with the RGB sensor of the Parrot Sequoia camera yields the biomass values closest to the results of field (52 ton/ha), with a concordance coefficient of 0.15 and an RMSE of 16%. From these values, the carbon fixation was 90 (ton/ha).

KEY WORDS:

- **ANTHESIS**
- **VEGETATION INDICES**
- **BIOMASS**
- **CARBON FIXATION**

Capítulo I

Aspectos Generales

Antecedentes

El crecimiento poblacional ha desafiado cada año a la agricultura mundial ya que cada vez se necesitan más áreas para cultivar y con ello es necesario mejorar la producción aplicando nuevas tecnologías. A inicios de los 90 fue cuando el desarrollo de nuevos equipos inteligentes juntamente con la liberación de datos GPS permitieron una mayor eficiencia en el manejo y producción de los cultivos (Bongiovanni et al., 2006). Se considera que el conocimiento espacial de algunos parámetros biofísicos como el contenido de clorofila, el índice de área foliar y el contenido de agua, a nivel de la cubierta del suelo es fundamental para el control y monitoreo de los ecosistemas agrícolas. El monitoreo del crecimiento de los cultivos durante toda su etapa de desarrollo permite determinar anomalías a tiempo y minimizar pérdidas (Pasqualotto et al., 2019).

Los sensores remotos son herramientas que proveen información de la superficie terrestre, de esta manera permiten el monitoreo de cultivos y ayudan a mejorar el manejo de las plantaciones (Chong et al., 2017). Los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) o vehículos aéreos no tripulados (UAV), por sus siglas en inglés, comúnmente conocidos como drones, son cada vez más utilizados dentro de la agricultura, ya que proporcionan imágenes del área de interés de mayor resolución espacial y temporal (Castro et al., 2019), además, son económicamente más accesibles para el agricultor que aquellos que se obtienen mediante satélites (Swain et al., 2010). Castro et al. (2019) usa las imágenes aéreas obtenidas por UAV para el monitoreo sanitario de las plantaciones de palma de aceite, mientras que en el estudio de Araque & Jiménez (2009) se analizan los valores de las bandas espectrales de las imágenes

obtenidas para generar índices de vegetación y de esta manera relacionar el estado fenológico del cultivo.

El estudio de la espectralradiometría permite determinar las distintas longitudes de ondas y patrones espectrales de la vegetación (Swain et al., 2010), los cambios en la reflectancia de la vegetación pueden ser detectables remotamente antes de que éstos puedan ser detectados por el humano (Zhang & Kovacs, 2012), por ello, los índices de vegetación espectral fueron diseñados para resaltar las variaciones en la estructura física de las plantas (Gitelson, 2004). Putra et al. (2019) investiga las bandas apropiadas para el monitoreo de los cultivos de palma, a partir del uso de un espectrómetro obtiene las firmas espectrales de las características del tejido vegetal de la palma y a partir de ortofotomosaicos obtenidos con cámaras RGB y NIR montadas en un UAV, analiza distintos índices de vegetación.

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es un cultivo muy importante para las américas, su crecimiento tanto en extensión como en producción se ha incrementado en los últimos años. Colombia, es el país que tiene la mayor extensión de sembríos de palma en el continente, con un 29% del total de su superficie. Ecuador, es el segundo país con una extensión de sembríos del 24% y constituye uno de los principales ingresos económicos para el país (ANCUPA, 2018). Según el Ministerio de Producción del Ecuador, el sector palmicultor constituye cerca del 4% del PIB agrícola del Ecuador, en los últimos 5 años, se exportó el 58% de aceite de palma producido, generando \$ 271 millones de divisas de exportación (Ministerio de Producción, 2017). A finales del año 2019, la exportación de banano representó el 47% del total de exportaciones agrícolas, las rosas el 10%, el cacao en grano el 9% y el aceite de palma crudo y refinado el 2% (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2019).

Grandes cantidades de áreas forestales han sido sustituidas por plantaciones de palma aceitera debido a las diferentes necesidades de la población, esto, ha generado cambios en la capacidad que tienen los ecosistemas para almacenar carbono en las plantas, en el caso de la palma, la capacidad de secuestrar carbono puede aumentar o disminuir dependiendo de que ecosistema fue reemplazado (Migolet et al., 2020). Mediante la estimación de biomasa aérea, es posible proporcionar una visión de la cantidad de carbono almacenado en una plantación, el método de cosecha es el que arroja resultados más precisos, sin embargo, al ser un método destructivo, es el que más tiempo toma realizar y no es económicamente rentable, por esto, una vez más se recurre a la utilización de las tecnologías geoespaciales que ofrecen nuevas metodologías (Chong et al., 2017). Li et al. (2016) en su estudio, a partir de un UAV, recolecta imágenes de alta resolución con las que genera una nube de puntos y obtiene las métricas necesarias para calcular biomasa aérea de un cultivo de maíz, obteniendo un error de 0.05 [kg/m²] para biomasa aérea. De igual manera, Fawcett et al. (2019) utiliza imágenes de UAV y mediante el proceso fotogramétrico de estructura a partir del movimiento, produce nubes de puntos con una precisión de alrededor de 10 cm, de las que obtiene las métricas necesarias para predecir biomasa aérea y mapear reservas de carbono.

Planteamiento del problema

Los estudios de agricultura de precisión necesitan de imágenes que cuenten con una resolución temporal y espacial alta (imágenes diarias con precisión de centímetros), las imágenes de alta resolución obtenidas a partir de satélites implican un elevado costo y para muchos países adquirir una imagen satelital sin cobertura de nubes puede ser un gran reto, por lo que es necesario el uso de información y tecnologías alternativas como los vehículos aéreos no tripulados (Araque & Jiménez, 2009; Fawcett et al., 2019; Zhang & Kovacs, 2012).

La palma aceitera *Elaeis guineensis* es vulnerable a sufrir enfermedades por plagas debido a sus condiciones genéticas, causando grandes pérdidas en plantaciones. Una solución ante esta problemática ha sido la sustitución de *Elaeis guineensis* por variedades de híbridos de *Elaeis oleífera*, no obstante, estos híbridos presentan baja cantidad de producción de flores masculinas lo que afecta a la producción de polen, generando una baja eficiencia de polinización entomófila natural (por insectos), por lo que es necesaria la polinización asistida a pesar de sus altos costos económicos (Meléndez & Ponce, 2016). Ante este nuevo problema, la polinización asistida ha sido introducida como técnica para mejorar la producción y se ha comprobado que la conformación y peso de los racimos (frutos) mejora hasta en un 50% (Guataquira et al., 2019), sin embargo, el proceso de polinización asistida representa un arduo trabajo y es necesario contar con un especialista para realizar dicha tarea. Este especialista debe recorrer las grandes extensiones de la plantación para identificar a las plantas que están en etapa de antesis (aptas para polinización), una a una, y esto supone una gran pérdida de tiempo y recursos económicos.

Por otro lado, en los últimos años, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) han aumentado debido a la quema de combustibles fósiles provocando así un aumento en la temperatura del planeta (Leblanc et al., 2006). Los impactos que genera el calentamiento global son perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente (Pulhin et al., 2014); para contribuir con información de interés ambiental para el palmicultor, es necesario estimar variables estructurales agrícolas de las plantaciones de palma aceitera como la altura del dosel, la biomasa aérea y el índice de área foliar ya que permiten obtener información sobre el crecimiento, la eficiencia de uso de la luz solar, la cantidad de carbono almacenado, entre otras (Li et al., 2016). Estimar estas variables mediante los métodos tradicionales supone un gran problema debido al gran trabajo que implica la toma de datos en campo.

Según lo expuesto, el presente proyecto de investigación propone utilizar las tecnologías geoespaciales para estudiar las posibles variaciones que las plantas de palma aceitera presenten en sus hojas cuando están en etapa de anthesis, y calcular la fijación de carbono del cultivo, pretendiendo así, proporcionar información de utilidad y nuevas herramientas de trabajo que mejoren el aprovechamiento de sus recursos y generen una producción más eficiente y amigable con el medio ambiente, además de ampliar el campo de uso y aplicación de las tecnologías geoespaciales.

Justificación e importancia

Para el año 2017, la producción de aceite de palma representó el 4% del PIB agropecuario en el país, además, ha generado numerosas fuentes de empleo, aproximadamente 140 000 personas trabajan directa o indirectamente (ANCUPA, 2018). Según la cadena productiva de aceite de palma, PROPALMA, el cultivo de palma representa el 4.5% del PIB agrícola generando cerca de 115 000 empleos (PROPALMA, 2020). Los problemas que más afectan a los cultivos de palma son la falta de asistencia técnica y el alto costo de mano de obra, que representa un 17% de la producción (Banco Central del Ecuador, 2019). Según estudios realizados en Colombia, la mano de obra representa el 39% del costo total de producción de una tonelada de aceite de palma (Fontanilla Díaz et al., 2016) y en especial, la mano de obra para realizar el trabajo de polinización asistida oscila entre los \$380 y \$400 dólares por hectárea (Torres Alarcón, 2013). Según Fontanilla Díaz et al. (2016) un trabajador rinde entre 7.8 y 11.4 hectáreas por día para realizar el proceso de polinización asistida.

Mientras se obtienen ingresos por aceite de palma alrededor de los 3 500 dólares por hectárea, los ingresos por el aprovechamiento de biomasa se estiman cerca de los 1200 dólares, es decir, cerca del 35% del ingreso total de producción de aceite (Osorio Flórez, 2013). Uno de

los objetivos del protocolo de Kioto, vigente desde febrero del 2005 es reducir en un 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero incrementando la capacidad de fijación de carbono de la biosfera mediante los sumideros de carbono (Leblanc et al., 2006), apoyando diversos proyectos en los países que se encuentran en vías de desarrollo mediante los llamados Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), como son: la forestación, reforestación, captura de metano, captura de carbono cambios de combustibles, entre otros (Pulhin et al., 2014).

La información que se obtiene de las imágenes de satélite o de vehículos aéreos no tripulados, como el índice de área foliar, biomasa, estrés hídrico, índices de vegetación, entre otras, ayudan a tener un mejor manejo del rendimiento del cultivo y la protección del medio ambiente (Zhang & Kovacs, 2012). Se han realizado numerosos estudios en palma aceitera a nivel internacional mediante el uso de las tecnologías geoespaciales con el objetivo principal de detectar las enfermedades por plagas que afectan al cultivo y aportar información que permita remediar el problema (Meléndez & Ponce, 2016), sin embargo, se ha descuidado otros problemas que afectan a las plantaciones. Cultivos bien administrados requieren de información antes y durante el proceso de plantación y es ahí donde la detección remota toma importancia (Chong et al., 2017). La oportunidad de tener acceso a información vista desde el cielo posibilita observar características de cultivos que son imperceptibles a nivel del suelo (Candiago et al., 2015).

La aplicación de las tecnologías geoespaciales en el ámbito de la agricultura de precisión ayuda a optimizar recursos humanos, económicos y materiales lo que significa obtener una mejor producción que permita mayores ingresos económicos para el agricultor. Con la realización del presente proyecto de investigación y alineándose con el objetivo 12 “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en el que se indica que se debe hacer más y mejores cosas con menos

recursos (Naciones Unidas/CEPAL, 2018), se pretende llenar el vacío de estudios que existen entorno al cultivo de palma aceitera mediante la utilización de tecnologías geoespaciales, de esta manera, se podrá proporcionar nuevos conocimientos de interés general que permitan optimizar recursos (tiempo y dinero) y que puedan ser replicados con mira al desarrollo agrícola.

Estudios relacionados

Son muy pocos los proyectos de investigación que se han realizado a nivel nacional en palma aceitera a través de tecnologías geoespaciales, sin embargo, a nivel internacional destacan aquellos que estudian las plagas y enfermedades, estrés hídrico, conteo de plantas, estimación de edad, de biomasa aérea y de producción. Cabe recalcar que proyectos relacionados a la detección de plantas en etapa de antesis mediante UAV son nulos. En la **Tabla 1** se presentan diversos estudios que respaldan la presente investigación.

Tabla 1

Proyectos relacionados

Autor/es	Tema	Publicación
(Migolet et al., 2020)	Estimation of aboveground oil palm biomass in a mature plantation in the Congo Basin.	Forests
(Fawcett et al., 2019)	Unmanned aerial vehicle (UAV) derived structure- from-motion photogrammetry point clouds for oil palm (<i>Elaeis guineensis</i>) canopy segmentation and height estimation.	International Journal of Remote Sensing
(Zúñiga López, 2018)	Aplicación de sensores remotos para análisis del estado vegetativo del cultivo de palma de aceite por medio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y firmas espectrales mediante fotografías aéreas.	Proyecto de Tesis
(Chong et al., 2017)	A review of remote sensing applications for oil palm studies.	Geo-spatial Information Science

Autor/es	Tema	Publicación
(Araque & Jiménez, 2009)	Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite.	Palmas

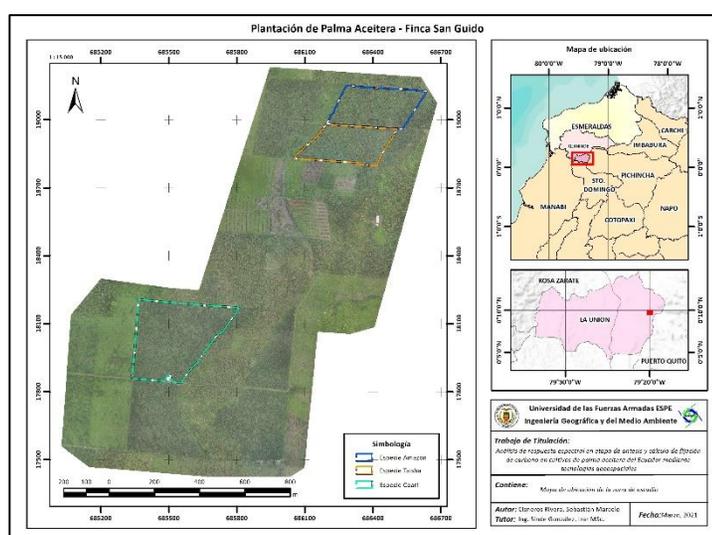
Nota: Investigaciones relacionadas al tema de investigación.

Descripción del área de estudio

La zona de estudio donde se realizó el presente proyecto de investigación fue la plantación de palma aceitera de la Finca San Guido, colaborador de la Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera (ANCUPA), ubicada en la parroquia La Unión, provincia de Esmeraldas. Tiene un área total de 350 hectáreas aproximadamente, sin embargo, el estudio se centró en tres distintas parcelas de 6.03, 5.46 y 11.47 [Ha], correspondientes a las especies de palma de seis años Amazon, Taisha y Coari, respectivamente. En la **Figura 1** se presenta el mapa de ubicación de la finca y las tres parcelas de estudio.

Figura 1

Mapa de ubicación de la zona de estudio Finca San Guido – ANCUPA.



Nota: La figura indica las tres especies de palma aceitera estudiadas y la ubicación de la finca.

Objetivos

Objetivo General

Calcular la fijación de carbono y analizar la respuesta espectral de un cultivo de palma aceitera mediante el uso de imágenes multiespectrales UAV, y un espectroradiómetro de mano para identificar posibles diferencias entre las plantas en etapa de antesis y no antesis con el fin de reducir los costos de producción a los agricultores.

Objetivos Específicos

- Georreferenciar las plantas en etapa de antesis identificadas de manera visual mediante un GPS navegador para su posterior comparación y análisis de los datos obtenidos.
- Obtener la respuesta espectral de la hoja más representativa de las plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis a partir de un espectroradiómetro de mano para analizar sus datos estadísticamente.
- Adquirir y procesar imágenes multiespectrales de la zona de estudio mediante un vehículo aéreo no tripulado para calcular índices de vegetación basados en las bandas del rojo, verde, red-edge e infrarrojo cercano.
- Analizar los datos espectrales del espectroradiómetro y los índices de vegetación de las imágenes multiespectrales mediante la prueba estadística ANOVA para identificar posibles diferencias entre las plantas de palma aceitera que se encuentren en etapa de antesis y no antesis.
- Estimar la biomasa aérea del cultivo de palma aceitera a partir de datos dasométricos obtenidos con UAV y validados con los datos dasométricos obtenidos en campo para calcular la fijación de carbono.

Metas

- Un reporte con coordenadas de las plantas en etapa de antesis y no antesis.
- Una base de datos con todos los registros de firmas espectrales tomados en campo.
- Un ortofotomosaico RGB de la zona de estudio.
- Una nube de puntos obtenida con UAV.
- Un ortofotomosaico multiespectral de 4 bandas (Red, Green, Red-edge y NIR) de la zona de estudio.
- Un reporte estadístico del análisis de los datos espectrales del espectroradiómetro.
- Un reporte estadístico del análisis de los índices de vegetación.
- Una base de datos dasométricos obtenidos en campo y con el UAV.
- Un mapa de estimación de biomasa del cultivo de palma aceitera.
- Un mapa de fijación de carbono del cultivo de palma aceitera.

Capítulo II

Marco Teórico

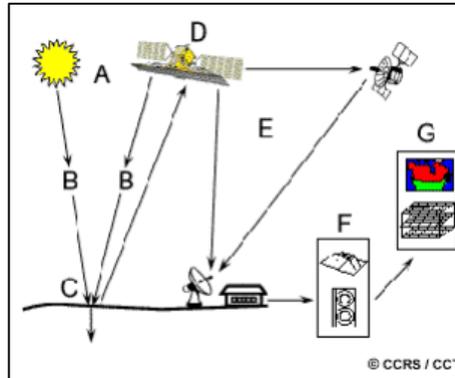
Teledetección

La teledetección, también conocida como sensores remotos, se define como “la práctica de obtener información sobre las superficies terrestres y acuáticas de la Tierra mediante imágenes adquiridas desde una perspectiva aérea, utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejadas o emitidas desde la superficie terrestre” (Campbell & Wynne, 2011), también, otros autores consideran que “se puede considerar que la teledetección significa la observación o la recopilación de información sobre un objetivo por un dispositivo separado de él a cierta distancia y a menudo se considera como sinónimo del uso de satélites artificiales” (Cracknell & Hayes, 2007), físicamente, se considera que la teledetección capta, registra, almacena e interpreta la energía electromagnética producida en el medio (Sobrino et al., 2001).

Es importante conocer que la teledetección se maneja bajo tres términos básicos, que son: la irradiancia, energía luminosa por unidad de tiempo que incide en una superficie, se especifica en vatios por metro cuadrado (W/m^2); la reflectancia, número sin unidades entre 0 y 1 que caracteriza la fracción de luz incidente reflejada por una superficie y; la radiancia, que es la irradiancia normalizada por la dirección de propagación de la luz, normalmente se mide en ($W/m^2/estereorradián$) (Shaw & Burke, 2003).

Figura 2

Componentes del proceso de la teledetección.



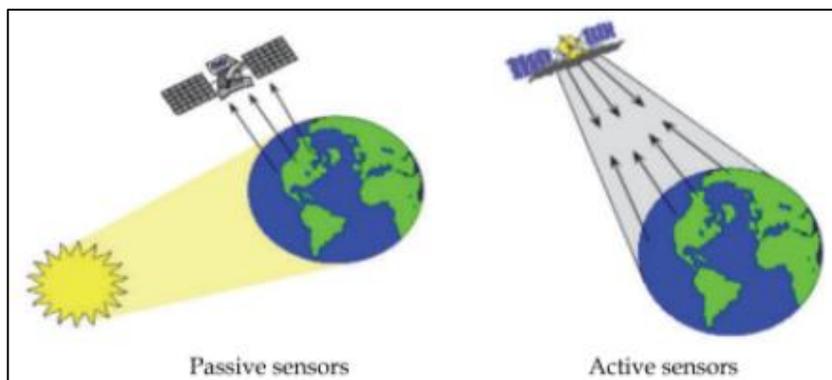
Nota: Proceso de la teledetección. a) Fuente de energía; b) Radiación y atmósfera; c) Interacción con el objetivo; d) Registro de energía por el sensor; e) Transmisión, recepción y procesamiento; f) Interpretación y análisis y g) Aplicación. Tomado de *Fundamentals of Remote Sensing* por Canada Centre for Remote Sensing, s.f.

Tipos de sensores

Los sensores utilizados en la teledetección son capaces de detectar las señales electromagnéticas o radiaciones reflejadas o emitidas por los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre, convirtiendo dicha señal en fotografías o imágenes. Se clasifican en dos tipos, los sensores pasivos, encargados de registrar la radiación emitida del objeto o la radiación solar reflejada, es decir, necesitan de una fuente externa de radiación; y los sensores activos, que emiten una señal electromagnética y registran la misma luego de que ésta haya interactuado con los objetos, es decir, necesitan de una fuente interna de radiación (Sobrino et al., 2001).

Figura 3

Tipos de sensores en la teledetección.



Nota: Representación de la fuente de radiación de los dos tipos de sensores remotos. Tomado de *Introduction to Remote Sensing of Biomass* por Ashraf et al., 2011.

Resolución de datos obtenidos

Al trabajar con información remota o espacial obtenida a través de imágenes, se debe considerar ciertas cualidades que presentan los diferentes sensores, esta cualidad principal es la resolución, entendiéndose como la capacidad de registrar y discriminar información de detalle en distintos aspectos (Sobrino et al., 2001), esta resolución se divide en:

Resolución espacial.- Es el nivel de detalle que ofrece la imagen, viene dado por el tamaño medio del pixel, indica el tamaño mínimo de los elementos discriminables en la imagen, cuanto menor es el tamaño del pixel mejor es la resolución de la imagen (Sobrino et al., 2001).

Resolución radiométrica.- Es la sensibilidad del sensor que le permite diferenciar las señales electromagnéticas, permite identificar el cambio más pequeño en la reflectancia espectral entre varios objetivos. Está dada por los niveles de digitalización, a mayor cantidad de niveles se obtiene una mejor resolución y por ende mejor información (Sobrino et al., 2001).

Resolución espectral.- Describe la capacidad del sensor para definir intervalos de longitud de onda finos, es decir, muestrear la imagen espacialmente segmentada en diferentes intervalos espectrales, lo que permite determinar la irradiancia espectral de la imagen (Aggarwal, 2004).

Resolución temporal.- Es la frecuencia de obtención de datos que proporciona el sensor. La resolución temporal también se llama como la repetitividad del satélite; es la capacidad del satélite/sensor para obtener imágenes de la misma área exacta en el mismo ángulo de visión en diferentes períodos de tiempo (Aggarwal, 2004).

Espectroscopía

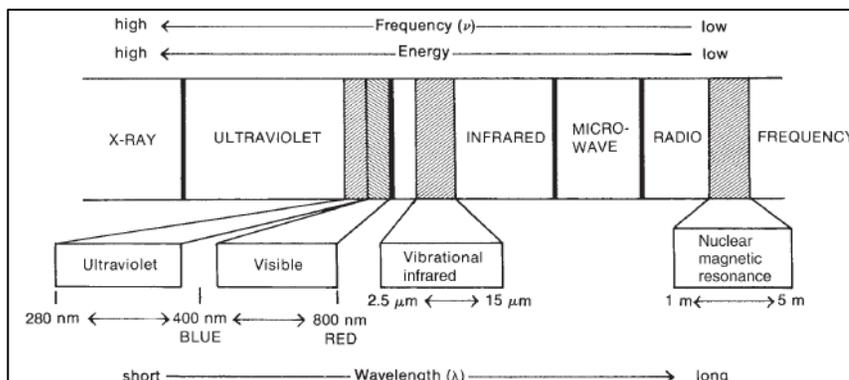
Una de las bases sobre la que la teledetección se fundamenta es la espectroscopía, misma que estudia la absorción, emisión o dispersión de las radiaciones (Hollas, 2004). Se ocupa de estudiar la interacción entre la radiación electromagnética con la materia, entendiendo por radiación a las diferentes vibraciones electromagnéticas, es decir, las ondas eléctricas de baja frecuencia, los rayos ultravioleta, el espectro visible, los rayos infrarrojos y las ondas de alta frecuencia, los rayos X y los rayos gamma (Sharma, 2007).

Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce la radiación electromagnética, normalmente, el espectro electromagnético se divide en bandas de frecuencia no exacta (Luque, 2012). Las ondas que somos capaces de observar son una pequeña parte de todas las ondas que se encuentran dentro del espectro, las ondas mayores a los 700 [nm] se llaman ondas infrarrojas, ondas más largas son las llamadas ondas de radio, por el otro lado, ondas más cortas que la luz visible son las ultravioletas, rayos "x" y rayos gamma (Light and the electromagnetic spectrum, 2012).

Figura 4

División del espectro electromagnético



Nota: El gráfico representa la división del espectro electromagnético. Tomado de *Introduction to Spectroscopy* por Pavia et al., 2013.

La parte del espectro que se llama visible se extiende desde los 400 [nm] hasta aproximadamente los 700 [nm], dentro del espectro visible se tiene el color azul (400 – 500 nm), el color verde (500 – 600 nm) y el color rojo (600 – 700 nm), la parte infrarroja del espectro se divide en tres categorías, infrarrojo cercano o NIR (700 – 1300 nm), infrarrojo medio o de onda corta (1300 – 3000 nm) y el infrarrojo térmico o de onda larga (3000 – 14000 nm), adicionalmente, entre la transición del rojo al infrarrojo, existe una característica espectral conocida como borde rojo (red edge) que se da entre los 680 – 700 [nm] (Lillesand et al., 2015).

Vehículos Aéreos No Tripulados – UAV

Un vehículo aéreo no tripulado es una aeronave a escala diseñada para ser operada sin un piloto humano a bordo, también es conocido como dron, sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS), vehículo pilotado a distancia (RPV) o unmanned aerial vehicle (UAV), entre otros. El término UAS, sistema aéreo no tripulado hace referencia a todo el sistema, que se

conforma por la plataforma aérea y la estación de control terrestre (Nex & Remondino, 2014). Como componentes principales de un sistema aéreo no tripulado se tiene: el vehículo o plataforma, el sistema de control terrestre, el enlace de datos de comunicación, los pilotos, los sensores de navegación, los sensores de imágenes y los sistemas inalámbricos. Las principales aplicaciones que se le han dado a los UAS son: seguridad civil; servicios de emergencia; redes de comunicación; agricultura, silvicultura y pesca; monitoreo del clima, topografía, monitoreo de contaminación, entre otras (Colomina & Molina, 2014).

Sensores utilizados en los vehículos aéreos no tripulados

Los UAV utilizan principalmente cuatro tipos de sensores para los distintos análisis que se realizan dentro de la agricultura de precisión, estos son: Sensores RGB, son los más comunes y económicos, tienen una alta resolución espacial pero una baja resolución espectral (banda roja, banda verde y banda azul), son utilizados para generar modelos digitales de superficie (MDS) como la altura de la vegetación y modelos digitales de elevación (MDE); los sensores RGB modificados, son iguales a los RGB antes descritos, con la diferencia que poseen un filtro que permite registrar información del infrarrojo cercano (NIR); los sensores multiespectrales, a más de poseer el sensor RGB, tienen varios sensores que son sensibles a otras regiones del espectro electromagnético; los sensores hiperespectrales en cambio cubren la totalidad del espectro electromagnético pero comúnmente la región comprendida entre los 400 a 1000 nm; finalmente, los sensores térmicos, tienen una baja resolución espacial y cuentan con una sola banda sensible a la región del infrarrojo de onda larga, son utilizados principalmente para obtener la temperatura de la superficie a analizar (Maes & Steppe, 2019).

Teledetección aplicada a cultivos

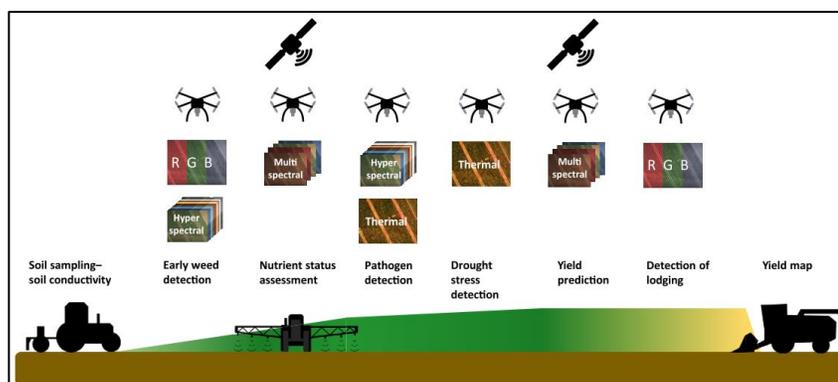
La introducción de nuevas tecnologías en el campo de la agricultura brinda varios beneficios como mejorar el rendimiento de los cultivos, proporcionar información para tomar mejores decisiones de gestión, reducir los costos de productos químicos y fertilizantes mediante una aplicación más eficiente, aumentar el margen de beneficio y reducir la contaminación. Desde el año de 1929, la fotografía aérea fue utilizada para realizar mapas de los recursos del suelo, dando a conocer los beneficios de las imágenes espaciales en la agricultura (Seelan et al., 2003), como principal ventaja de las imágenes de detección remota, independientemente de la fuente que las tome, es el conocer sobre el estado de los cultivos (Hunt & Daughtry, 2018).

La teledetección permite la evaluación del estado de los cultivos basándose en la información de la reflectancia, la temperatura del dosel, la fotosíntesis, entre otra (Seelan et al., 2003). Normalmente, la teledetección se basa en la medición de la radiación reflejada de los objetos presentes en los campos agrícolas, la cantidad de radiación reflejada se relaciona con la cantidad de radiación absorbida por los pigmentos de las plantas (Mulla, 2013).

A partir de esta información es posible realizar varios análisis como: la detección de estrés de los cultivos por sequía mediante el uso de mapas de temperatura; detección de patógenos y aplicación de pesticidas, mediante el uso de imágenes multiespectrales; detección de malezas, discriminando espectralmente las malas hierbas y las plantas del cultivo; vigor de crecimiento y biomasa a partir del uso de las imágenes RGB; predicción del rendimiento y otros estudios (Maes & Steppe, 2019).

Figura 5

Formas de evaluación espacial con UAV del estado de los cultivos.



Nota: El gráfico representa los diferentes tipos de información espacial que se puede extraer de los cultivos mediante el uso de varios sensores montados en UAV. Tomado de *Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture* por Maes & Steppe, 2019.

Firma espectral

El espectro de reflectancia de cada objeto o material es único, todos los objetos (naturales o artificiales) poseen dos características propias, el color y la reflectividad que indican la composición del material. El término “firma espectral”, se refiere al espectro de reflectancia de un material u objeto (Shaw & Burke, 2003).

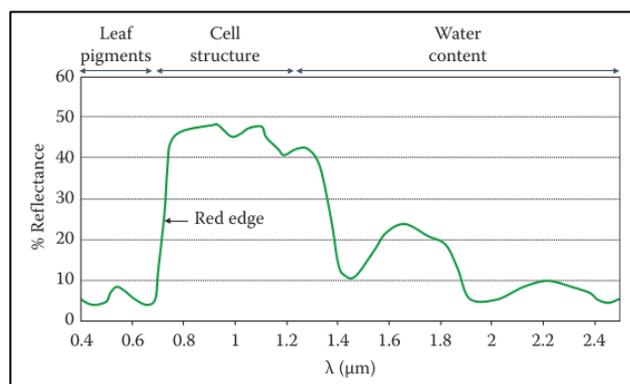
La superficie de la tierra ha sido caracterizada mediante la utilización de diferentes tecnologías de teledetección. Las firmas espectrales de muchos objetos naturales y artificiales han sido obtenidas mediante estudios de campo y laboratorio. La mayoría de los análisis espectrales se han realizado de forma muy detallada considerando cada característica de los objetos de estudio, es decir, una planta se encuentra compuesta por un conjunto de hojas, ramas, tallos y cada uno de estos puede tener su propia firma espectral. Las hojas de las plantas absorben de gran manera la luz visible y ultravioleta, esto gracias a los pigmentos que las componen (clorofilas, carotenoides, xantofilas y antocianinas), no obstante, el porcentaje de

absorción varía entre especies y etapas de crecimiento de las plantas (Satterwhite & Henley, 1990).

Al hablar de la vegetación, la cantidad de radiación que éstas reflejan se encuentra inversamente relacionada con la radiación absorbida por los pigmentos, dependiendo de la longitud de onda que incide (Mulla, 2013). Factores como la edad de las plantas, el estrés nutricional y la salud afectan a la reflectancia y por consiguiente a la firma espectral. En la **Figura 6** se indica una firma espectral típica de una hoja en buen estado. Existen tres regiones espectrales que influyen en las propiedades ópticas, las regiones VIS (visible), NIR (infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de onda corta) (Chuvieco, 2016).

Figura 6

Reflectancia o firma espectral de una hoja en buen estado.



Nota: Se indica la firma espectral típica de la vegetación en buen estado. Tomado de *Fundamentals of satellite remote sensing: An Environmental Approach* por Chuvieco, 2016.

Índices de vegetación

Los índices de vegetación son el resultado de operaciones algebraicas entre bandas espectrales con el objetivo de resaltar las propiedades de la vegetación, los resultados arrojados

varían en un rango de -1 a 1 dependiendo del índice a utilizarse. Algunos de los índices que son posibles de obtener mediante el empleo de sensores multiespectrales son el NDVI, GNDVI y SAVI (Candiago et al., 2015). Fueron diseñados para indicar las variaciones temporales y espaciales en la estructura y densidad de la vegetación (Gitelson, 2004).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es una medida que evidencia a la vegetación verde y saludable, puede saturarse en condiciones de vegetación densa, se calcula bajo el parámetro de relación de bandas, que es la diferencia del valor de radiancia de las bandas roja e infrarroja dividido por su suma, varía entre valores de -1 a 1 (Rouse et al., 1974); el índice de resistencia atmosférica visible (VARI) es utilizado para reducir los efectos de la atmósfera, se asume que los efectos atmosféricos sobre el rojo y verde es el mismo al ser bandas adyacentes dentro del espectro electromagnético por lo que para corregir dichos efectos se incluye la banda azul (Gitelson et al., 2002); el índice de vegetación de proporción verde (GRVI) es sensible a las tasas de fotosíntesis en las copas de los bosques, ya que las reflectancias verde y roja están fuertemente influenciadas por cambios en los pigmentos de las hojas (Sripada et al., 2006); el índice de relación de absorción de clorofila modificada mejorado MCARI2, es uno de los índices que indica la abundancia relativa de la clorofila y es considerado como predictor del índice de área foliar (LAI), además que incorpora un factor de ajuste del suelo; el índice de vegetación triangular modificado MTVI, intenta caracterizar la energía absorbida por los pigmentos de las hojas entre la reflectancia roja e infrarroja cercana junto con la reflectancia en la región verde demostrando buenos resultados al estimar el LAI (Haboudane et al., 2004).

La región del borde rojo es una porción del espectro electromagnético donde existe un cambio brusco en la reflectancia de la vegetación, esto se debe a la transición de la absorción de clorofila en la región del rojo hacia la dispersión celular en la región del infrarrojo cercano, esto es causado por un aumento en el contenido de clorofila de la hoja por lo que permite mejores

estimaciones (Xie et al., 2018). Se han desarrollado o modificado nuevos índices de vegetación que incluyen esta región como:

El índice de razón simple modificada de borde rojo (MSRRE), parte del índice de relación simple (SR) que identifica cambios sensibles en el contenido de clorofila, sin embargo, es muy influenciado por los factores ambientales, razón por la cual se utiliza la relación simple modificada (MSR) para evitar dichas alteraciones y el cambio de la banda del rojo por la banda del borde rojo (Wu et al., 2008); el índice de clorofila de borde rojo RECI, permite estimar la cantidad de clorofila presente en diversos cultivos, se basa en el índice de clorofila verde con la diferencia de cambiar la banda verde por la banda del borde rojo que permite una mejor precisión en la estimación (Gitelson et al., 2005); el índice de vegetación ajustado al suelo de borde rojo RESAVI, utilizado principalmente para predecir el contenido de nitrógeno en cultivos de maíz suprimiendo los efectos del suelo, similar al SAVI y GSAVI pero sustituyendo la banda del borde rojo (Sripada et al., 2006); finalmente el índice de diferencia de vegetación de borde rojo REDVI y el índice de vegetación de diferencia renormalizada de borde rojo RERDVI, son utilizados para estimar la absorción de nitrógeno de la planta, y fueron modificados de los estudios de Tucker (1979) y Roujean & Breon (1995) ya que se sustituye la banda del rojo por la banda del borde rojo (Cao et al., 2013). En la **Tabla 2**, se indica las ecuaciones para cada índice antes mencionado.

Tabla 2

Ecuaciones de los índices de vegetación.

Índice de vegetación	Sigla	Ecuación	Referencia
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$\frac{Nir - Red}{Nir + Red}$	(Rouse et al., 1974) (1)

Índice de vegetación	Sigla	Ecuación	Referencia
Índice de resistencia atmosférica visible	VARI	$\frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$	(Gitelson et al., 2002) (2)
Índice de vegetación de proporción verde	GRVI	$\frac{Nir}{Green}$	(Sripada et al., 2006) (3)
Razón simple modificada de borde rojo	MSRRE	$\frac{\left(\frac{Nir}{Re}\right) - 1}{\sqrt{\left(\frac{Nir}{Re}\right) + 1}}$	(Wu et al., 2008) (4)
Índice de relación de absorción de clorofila modificada mejorado	MCARI2	$\frac{1.5[2.5(Nir - Red) - 1.3(Nir - Green)]}{\sqrt{(2Nir + 1)^2 - (6Nir - 5\sqrt{Red}) - 0.5}}$	(Haboudane et al., 2004) (5)
Índice de vegetación triangular mejorado	MTVI	$1.2[1.2(Nir - Green) - 2.5(Red - Green)]$	(Haboudane et al., 2004) (6)
Índice de clorofila de borde rojo	RECI	$\frac{Nir}{Re} - 1$	(Gitelson et al., 2005) (7)
Índice de vegetación ajustado al suelo de borde rojo	RESAVI	$1.5 \frac{Nir - Re}{Nir + Re + 0.5}$	(Sripada et al., 2006) (8)
Índice de diferencia de vegetación de borde rojo	REDVI	$Nir - Re$	(Cao et al., 2013) (9)
Índice de vegetación de diferencia renormalizada de borde rojo	RERDVI	$\frac{Nir - Re}{\sqrt{Nir + Re}}$	(Cao et al., 2013) (10)

Nota: Listado de los índices de vegetación con sus ecuaciones.

Agricultura de precisión

Se entiende por agricultura de precisión a la aplicación de nuevas tecnologías que permitan un eficiente uso de insumos agrícolas en función del nivel de producción y una optimización de recursos económicos, estas nuevas tecnologías son los sistemas de posicionamiento global (GNSS), sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos, tecnologías de dosis variable y análisis de datos georreferenciados (geoestadística) (Bongiovanni et al., 2006). Aplicar nuevas tecnologías para lograr un control en la variabilidad espacial y

temporal de la producción agrícola contribuye al fin de mejorar el rendimiento de los cultivos y la calidad medioambiental (Pierce & Nowak, 1999).

La agricultura de precisión implica tanto la recopilación y análisis de datos, la gestión de la información, avances tecnológicos como en el procesamiento de la información de campo en computadoras, el posicionamiento en el campo, el monitoreo del rendimiento, la detección remota, el diseño de sensores, el uso de insumos agrícolas como semillas, herbicidas, fertilizantes, de manera eficiente, dividiendo a las grandes extensiones de plantaciones en pequeñas zonas de manejo en las que se aplican dichos insumos de forma personalizada, con el objetivo de lograr una mejor producción y mejorar la calidad ambiental (Mulla, 2013).

Proceso fotogramétrico en la agricultura de precisión

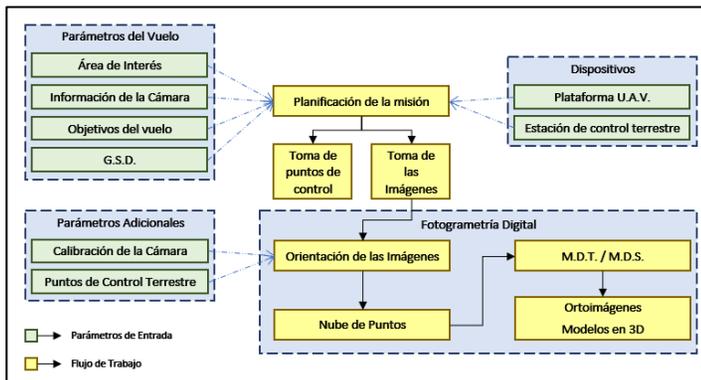
La fotogrametría es considerada como la ciencia que permite realizar mediciones sobre imágenes o fotografías, el principio está en obtener coordenadas de cualquier punto (generalmente objetos) con los que se puedan calcular datos geométricos. Estos datos geométricos pueden ser distancias, áreas, entre otros. Si se dispone de una sola imagen se trabaja sobre el plano bidimensional, es decir, se pueden obtener solamente coordenadas de dos dimensiones (x, y). Para obtener coordenadas tridimensionales (x, y, z), es necesario disponer de dos o más imágenes del mismo objeto pero tomadas en diferentes posiciones, con esto, se logra el principio de la visión estereoscópica (Linder, 2003).

Un levantamiento aéreo con UAV, consta de prácticamente dos pasos, el primero es realizar la planificación de la misión o plan de vuelo y el segundo es el vuelo como tal, es decir, la adquisición de las imágenes y la toma de puntos de control terrestre (de ser necesario) (Nex & Remondino, 2014).

El proceso fotogramétrico inicia con la calibración de la cámara y la orientación de las imágenes adquiridas en el levantamiento aéreo, estas tareas se dan con la extracción de características comunes visibles en todas las imágenes posibles (puntos de enlace) seguido de un ajuste de conjunto. Luego, los datos de los puntos de control terrestre (GNSS) son incorporados para georreferenciar directamente las imágenes, este paso es opcional ya que depende de la calidad métrica (precisión) requerida en el trabajo. Una vez que las imágenes han sido orientadas y georreferenciadas, se genera la nube de puntos dispersa o densa, la nube de puntos densa es generalmente preferida para generar los modelos digitales del terreno y los modelos digitales de superficie. Con estos productos, finalmente se generan las ortoimágenes y el modelo en tercera dimensión de ser necesario (Nex & Remondino, 2014). En la **Figura 7** se detalla el proceso del levantamiento aéreo y fotogramétrico con UAV.

Figura 7

Levantamiento aéreo con UAV y proceso fotogramétrico digital.



Nota: Se indica el proceso para realizar un levantamiento aéreo con UAV y el proceso general de la fotogrametría digital. Tomado de *UAV for 3D mapping applications: A review* por Nex & Remondino, 2014.

Biomasa

La biomasa se entiende como la cantidad total de materia orgánica viva en árboles y plantas sobre el suelo, esto incluye hojas, ramas, tronco, corteza y se expresa como toneladas por unidad de área (Brown, 1997). La estimación de biomasa es importante para aclarar las interacciones que se da entre la biósfera y la atmósfera, ya que se le considera como un sumidero de carbono, la mayoría de los métodos para cuantificar la biomasa son destructivos, es decir, se debe cosechar y pesar la materia, sin embargo, las ecuaciones alométricas se han introducido como un método para facilitar el proceso de cuantificación ya que se basan en la altura, diámetro a la altura del pecho y densidad de la madera. Con el surgimiento de las innovaciones tecnológicas, la teledetección es un método de mejor aplicación y se usa donde los datos de campo son difíciles de conseguir, pues existe correlación entre la biomasa y la reflectancia en diferentes longitudes de onda (Anaya et al., 2009).

Ecuaciones alométricas

Según Gayon (2000) la alometría se refiere a “los cambios en las dimensiones relativas de partes de un organismo que se correlacionan con cambios en el tamaño general; o, de forma más concisa, la relación entre los cambios de forma y el tamaño total.” El uso de las ecuaciones alométricas permite predecir una medida de un árbol (comúnmente la biomasa) en función de otras medidas (diámetro, altura, etc.), estas medidas son conocidas como características dendrométricas. La ecuación alométrica es una fórmula que formaliza la relación antes mencionada (Picard et al., 2012).

En los estudios de Asari et al. (2013), Migolet et al. (2020) y Khalid et al. (1999) se generan varios modelos para estimar la biomasa a partir de las ecuaciones alométricas tomando como variable independiente a la altura total de una palma, el último modelo (ecuación (11))

presenta el mejor coeficiente de determinación ($r^2 = 0.96$) razón por la que se utiliza en el presente estudio, adicionalmente, Manrique De Lara & Ronald (2014) proponen un modelo (ecuación (12)) con un coeficiente de determinación de 0.85 que además de la altura, considera la edad de la palma como variable independiente, este modelo también fue utilizado en el presente estudio.

$$W\left(\frac{kg}{\text{árbol}}\right) = (725 + 197 * H_{Tot}) * 0.27 \quad (11)$$

$$Biomasa\left(\frac{ton}{planta}\right) = 0.0428 * edad^{0.6749} * altura^{0.5891} \quad (12)$$

Dasometría

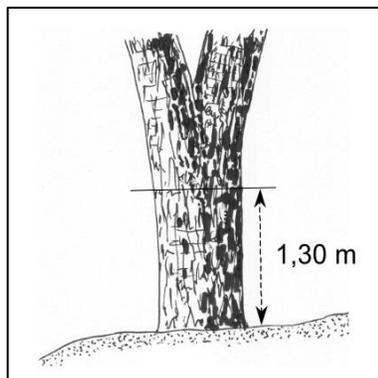
Según Diéguez Aranda et al. (2005), la dasometría es la “ciencia que se ocupa de la determinación de volúmenes y crecimientos de los árboles y de las masas forestales, así como del estudio de las relaciones métricas y leyes que rigen su desarrollo”.

Para referirse a las mediciones de un solo individuo o árbol se utiliza el término dendrometría, existen diferentes variables que se pueden medir de un árbol, como por ejemplo el diámetro, la altura, el espesor de la corteza, el crecimiento diametral, las dimensiones de la copa, la edad, entre otros (Diéguez Aranda et al., 2005).

El diámetro y la altura son las variables que más comúnmente se miden en los estudios y permiten caracterizar el estado de los bosques. De estas dos variables, el diámetro es considerado el más fácil de obtener y se encuentra fuertemente relacionado con la altura del árbol, el volumen del fuste, el tamaño de la copa y la biomasa. Se lo debe medir a una altura aproximada de 1.30 [m] sobre el suelo (**Figura 8**) que generalmente es a la altura del pecho, de ahí su nombre de “diámetro a la altura del pecho” (Cancino, 2012).

Figura 8

Diámetro a la altura del pecho.

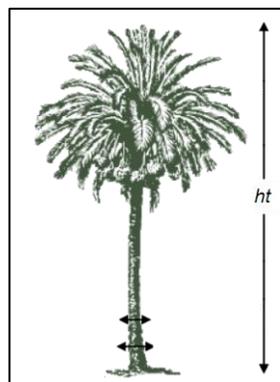


Nota: La figura indica la localización de la altura de 1.30 [m] sobre el suelo. Tomado de *Prácticas de dasometría* por Diéguez Aranda et al., 2005.

La altura, es la longitud que se mide desde la base del tronco (nivel del suelo) hasta algún punto sobre éste, es una variable que sirve para caracterizar un rodal, calcular volúmenes, clasificar árboles, etc. (Cancino, 2012). La altura total de un árbol en pie (h) (es la distancia entre la base y el ápice (parte más alta de la copa) (Diéguez Aranda et al., 2005).

Figura 9

Altura total de una palma en pie.



Nota: La figura indica la distancia entre la base y el ápice de una palma. Tomado de *Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) in Northeastern Brazil* por Sanquetta et al., 2015.

Fijación de carbono

El carbono es un componente fundamental que forma parte de todos los compuestos orgánicos, se encuentra permanentemente circulando entre la materia viva y la materia muerta, de manera que la vegetación viva fija el carbono de la atmósfera en su biomasa, pero la respiración, la poda y la muerte de la vegetación devuelve a la atmósfera parte del carbono fijado. Cerca del 30% de la superficie de la Tierra se encuentra cubierta por ecosistemas forestales de la que se estima que el 80% del carbono se encuentra contenido en la biomasa aérea y un 40% en la biomasa subterránea (raíces, residuos, suelos, etc.) (Montero et al., 2005).

El carbono puede ser calculado a partir de la cuantificación de biomasa, aproximadamente el 50% del total de biomasa es carbono, sin embargo, este porcentaje varía entre especies, pero se recomienda utilizarlo en caso de no contar con información específica, adicionalmente, la proporción entre el peso de la molécula de CO₂ y el átomo de C se obtiene la relación necesaria para calcular los kilogramos de CO₂ contenida en la biomasa (Montero et al., 2005). La siguiente ecuación resume lo antes descrito.

$$CO_{2(acumulado)} = kg_{biomasa} * \%_{contenido\ de\ carbono} * \frac{44}{12} \quad (13)$$

Palma de aceite

La palma de aceite pertenece al orden *Arecales* y la familia *Arecaceae*, una de las más grandes monocotiledóneas, con más de 190 géneros y 2.364 especies. Esta familia está dividida en cinco subfamilias: *Calamoidae*, *Nipoideae*, *Coriophoidae*, *Ceroxyloideae* y *Arecoideae*; dentro

de esta última se encuentra la tribu *Cocoseae*, y la subtribu *Elaeidinae* a la que pertenece el género *Elaeis* compuesto por las especies *Elaeis guineensis* Jacq., comúnmente conocida como palma africana y *Elaeis oleifera* (Kunt) Cortes, como palma americana. La palma africana, como su nombre lo indica, es nativa de África tropical mientras que la palma americana es nativa de Centroamérica y Suramérica. Ante el problema de la enfermedad de la pudrición del cogollo (PC) que afecta a la producción de miles de hectáreas, se ha optado por sembrar plantas híbridas (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*), permitiendo producir aceite más rico en ácidos grasos insaturados, crecimiento lento y la razón principal, tolerancia a las enfermedades (Forero Hernández et al., 2012).

Inflorescencia

Existen dos tipos de floración dentro de la familia *Arecaceae*, la floración hapaxántica, que se da una vez que la planta ha terminado su crecimiento vegetativo, es decir, la planta florece y muere; y la floración pleonantica, que ocurre a medida que la planta sigue su crecimiento vegetativo, es decir, se dan numerosas floraciones (Forero Hernández et al., 2012).

La *Elaeis guineensis* tiene una condición monoica de inflorescencia, es decir, las flores masculinas y femeninas se producen en la misma planta y se tiene como resultado una reproducción alógama o polinización cruzada. Las primeras inflorescencias se dan a partir de los 20 a 24 meses después que la planta haya sido sembrada en el campo, dicho de otra manera, se dan cuando la planta completa su madurez (2.5 a 3 años) (Forero Hernández et al., 2012).

Polinización

La *Elaeis guineensis* produce inflorescencias femeninas **Figura 10** y masculinas por separado en la misma planta en ciclos alternados de duración variable, el desarrollo inicial de una inflorescencia toma de dos a tres años, la antesis (inflorescencia) femenina ocurre en la hoja

17-20. Naturalmente la palma aceitera presenta polinización anemófila y entomófila (por insectos) siendo el polinizador más eficaz, sin embargo, el híbrido presenta características que obstaculizan la polinización natural y están asociadas con la baja producción de inflorescencias masculinas, por ende, la baja viabilidad del polen, por lo que para garantizar la formación de racimos comercialmente aprovechables, es necesario realizar la polinización asistida (Forero Hernández et al., 2012).

Figura 10

Inflorescencia femenina y masculina en antesis.

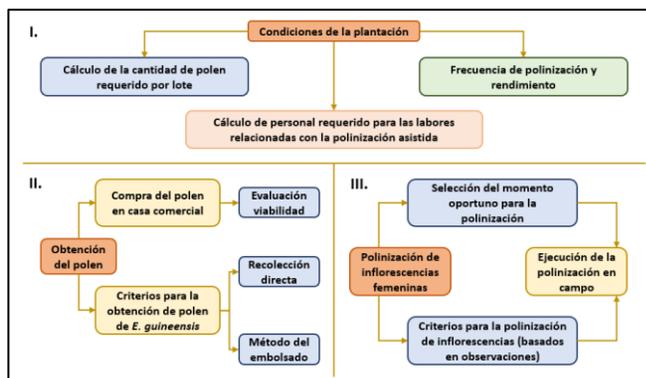


Nota: La figura indica la inflorescencia femenina (izquierda) e inflorescencia masculina (derecha) cuando se encuentra en la etapa de antesis, apta para la recepción del polen.

La polinización asistida es una actividad a cargo de trabajadores especialistas que consiste en la colecta y liberación controlada de polen sobre las inflorescencias femeninas en la fase de antesis. Se requiere de personal entrenado y calificado, polen de buena calidad, aplicar técnicas adecuadas para la recolección y conservación del polen y la identificación de la inflorescencia femenina (etapa de antesis) (Forero Hernández et al., 2012). En la **Figura 11** se indica las etapas para realizar el proceso de polinización asistida.

Figura 11

Etapas del proceso de polinización asistida.



Nota: En la figura se indica las etapas importantes en el proceso de polinización asistida en palma de aceite. Tomado de *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* por Forero Hernández et al., 2012.

Estadística

La estadística es una ciencia, sistema o método que se utiliza para recolectar, organizar, analizar, presentar e interpretar datos o información numérica, con el fin de ayudar a la toma de decisiones, estudia el comportamiento de un grupo de datos o variables. Tiene dos fases, la estadística descriptiva y la estadística inductiva o inferencial (Lind et al., 2012; Martínez Bencardino, 2012).

Métodos de muestreo

Una muestra es una porción o parte de una población de interés, estudiar o analizar una muestra es una práctica que resulta más accesible que el estudio de toda la población (Lind et al., 2012). Tomar información solamente de una parte de todos los elementos de una población es un proceso que se conoce como muestreo, el conjunto de elementos seleccionados dentro de

este proceso recibe el nombre de muestra y la cantidad o número de elementos que conforman este conjunto se llama tamaño muestral (Pérez, 2010).

Existen numerosos tipos o métodos de muestreo, pero para que una muestra sea representativa de la población es necesario que todos los elementos tengan igual probabilidad de ser seleccionados, es decir, la muestra debe ser aleatoria, al azar o probabilística. El muestreo aleatorio es el más común, práctico, rápido y económico, dentro de este tipo de muestreo se tiene: muestreo aleatorio simple, muestreo aleatorio estratificado, muestreo por conglomerados, muestreo por fases y muestreo sistemático (Martínez Bencardino, 2012).

El muestreo aleatorio sistemático es aquel en el que se hace la selección de los elementos en intervalos regulares y con un orden sistemático, se selecciona un punto aleatorio inicial y posteriormente se elige cada k-ésimo elemento de la población (Lind et al., 2012; Martínez Bencardino, 2012).

Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra generalmente es conocido por el investigador, sin embargo, existen casos en que se debe determinar mediante las fórmulas establecidas, existen dos fórmulas que son para población infinita cuando el número de elementos es indeterminado o demasiado grande y para población finita cuando el número de elementos es limitado o conocido y se considera relativamente pequeña (Martínez Bencardino, 2012).

Tiene tres elementos o componentes técnicos, la varianza (σ^2), es el grado de variabilidad que presentan los elementos de la población, mientras más grande sea σ^2 mayor será el tamaño de la muestra; el nivel de confianza (N.C.), tiene una relación directa ya que a mayor N.C., más grande deberá ser el tamaño de muestra; y la precisión de la estimación (E), es el margen de error que el investigador establece de acuerdo al parámetro a estudiar, también se

lo conoce como error de muestreo (Martínez Bencardino, 2012). Las fórmulas para calcular el tamaño de la muestra para población infinita y finita están dadas por:

- Población infinita:

$$n = \frac{Z^2 * P * Q}{E^2} \quad (14)$$

- Población finita:

$$n = \frac{Z^2 * N * P * Q}{(N - 1)E^2} \quad (15)$$

En donde:

Z = Valor normal estándar correspondiente al nivel de confianza deseado.

N = Total de la población.

P = Probabilidad de éxito o proporción esperada.

Q = Probabilidad de fracaso.

E = Error de muestreo máximo admisible.

Estadística descriptiva

Es la parte de la estadística que se encarga de recopilar, organizar, resumir y presentar los datos de manera informativa (Lind et al., 2012), su finalidad es indicar los aspectos que caracterizan al grupo de interés (promedios, tendencias, variabilidad, etc.), se realiza a través de gráficos, cuadros, diagramas, entre otros (Martínez Bencardino, 2012).

- *Tabla de distribución de frecuencias*: Se utiliza para organizar y resumir la información, indicando la frecuencia o número de veces que se repite, permite reducir grandes

cantidades de información en cuadros o tablas y se complementa con gráficos (Martínez Bencardino, 2012).

- *Histograma*: Es un gráfico en el que se señalan las clases en el eje horizontal y las frecuencias en el eje vertical, se utiliza para indicar la forma que tiene una distribución (Lind et al., 2012).
- *Media*: Medida de promedio más utilizada y entendida, es muy estable en el muestreo pero sensible a cambios en los datos de la distribución (Martínez Bencardino, 2012).
- *Mediana*: Es el punto medio de los datos luego de que se hayan ordenado de mayor a menor o viceversa, los valores extremos no tienen incidencia alguna (Lind et al., 2012).
- *Varianza*: Es la media aritmética de los cuadrados de las diferencias o desviaciones entre los valores de la variable con su media, se utiliza para representar la variabilidad de los datos respecto a la media (Martínez Bencardino, 2012).
- *Desviación estándar*: Es la raíz cuadrada de la varianza y también se utiliza para medir el grado de dispersión o variabilidad de los datos (Lind et al., 2012).
- *Diagrama de cajas*: Representación gráfica de una distribución de datos que ha sido diseñada para tomar decisiones, representa una medida de tendencia central, dos de dispersión e indica la simetría o asimetría (Flores & Flores, 2018).
- *Gráfico de probabilidad Q-Q Plot*: Método gráfico que permite comparar la distribución de un conjunto de datos con una distribución especificada (conocida) (Castillo Gutiérrez & Lozano, 2007).

Estadística inferencial

Es la parte de la estadística que utiliza métodos para encontrar o determinar propiedades o características de una población a partir de una muestra de ella (Lind et al.,

2012), intenta explicar el comportamiento de las observaciones, probar la significancia o validez de resultados, entre otros (Martínez Bencardino, 2012).

Análisis de la varianza - ANOVA

Según Scheffé (1999) El análisis de la varianza “es una técnica estadística que se utiliza para analizar las medidas que dependen de varios tipos de efectos que operan simultáneamente, esto permite decidir qué tipos de efectos son los más importantes y a su vez se puede estimar los mismos”, para Sawyer (2009) el análisis de varianza “es una herramienta estadística que se utiliza para detectar diferencias entre las medias de los grupos experimentales”.

Está garantizado en diseños experimentales con una variable dependiente que es una medida de resultado numérica paramétrica continua y múltiples grupos experimentales dentro de una o más variables independientes (categóricas). En la terminología de ANOVA, las variables independientes se denominan factores y los grupos dentro de cada factor se denominan niveles. Las mediciones u observaciones que se analizan pueden ser de tipo experimental o no experimental y su aplicación principal se da con los problemas de experimentación agrícola (Scheffé, 1999). Para que un conjunto de datos pueda ser analizado bajo la prueba ANOVA, debe cumplir los siguientes criterios:

- Las poblaciones siguen una distribución normal.
- Las poblaciones tienen desviaciones estándares iguales (homocedasticidad).
- Las poblaciones son independientes (Lind et al., 2012).

Prueba de bondad de ajuste – Prueba de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov, fue desarrollada por los estadísticos A. N. Kolmogorov y N. V. Smirnov y se define como un método no paramétrico de sencilla aplicación para probar si existe diferencia significativa entre una distribución de frecuencias observada y una distribución de frecuencias teórica. La prueba de K-S es una medida de la bondad de ajuste de una distribución de frecuencia teórica, tiene dos principales ventajas sobre otros tipos de pruebas de bondad de ajuste: es una prueba más poderosa y es más fácil de usar ya que no es necesario que los datos se agrupen de alguna manera. El estadístico de K-S, es útil para juzgar qué tan cerca está la distribución de frecuencias observada de la distribución de frecuencias esperada (Levin & Rubin, 2004).

Prueba de homocedasticidad – Prueba de Levene

La homogeneidad de varianzas es cuando la cantidad de dispersión de datos (varianza) es similar entre los diferentes grupos o conjuntos de datos, comúnmente se utilizan dos pruebas de homogeneidad de varianza que son las de Levene y Brown & Forsythe (Sawyer, 2009).

La prueba desarrollada por Levene es simple de ejecutar ya que utiliza técnicas de análisis de varianza ordinarias y es insensible a la violación del supuesto de normalidad en la mayoría de los casos. Es un análisis unidireccional de la varianza de los valores absolutos de las diferencias entre cada observación y la media de su grupo (Glass, 1966).

Análisis de la varianza – Prueba de Welch

El análisis de varianza es una prueba robusta en contra del supuesto de normalidad, sin embargo, puede ser inapropiado su uso cuando no se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas ya que se puede incurrir en un error de tipo I, ante esto, el ANOVA de Welch es una

prueba que demuestra buenos resultados puesto que mantiene la tasa del error de tipo I cercana al 5% (Hajji & Leyrat, 2018; Liu, 2015)

La prueba de Welch fue desarrollada para probar la hipótesis de considerar que las poblaciones muestreadas (normales e independientes) tienen una igual media, sin tomar en cuenta la condición de que sus varianzas sean iguales (Welch, 1951).

Análisis Post-Hoc – Prueba de Games-Howell

La prueba de Games-Howell (GH) es una extensión de la prueba de Tuckey Kramer, pero ofrece un mejor rendimiento cuando se realiza las comparaciones por pares, además que mantiene una tasa de error baja. Se recomienda utilizar cuando los tamaños de muestra son mayores de cinco y que el conjunto de datos cumpla con ser independientes, sigan una distribución normal y que el estadístico ANOVA sea significativo (Shingala & Rajyaguru, 2015).

Análisis de concordancia

La concordancia entre datos continuos que se han medido a partir de diferentes métodos de medición ha recibido una gran atención por parte de la comunidad científica, el coeficiente de correlación de concordancia (CCC) de Lin definido en 1989 es un procedimiento utilizado para medir la concordancia para dos conjuntos de datos asumiendo que se distribuyen de forma normal (Carrasco & Jover, 2003).

El coeficiente toma valores entre -1 y 1, un valor positivo de 1 indica concordancia perfecta y un valor negativo de 1 indica una discordancia perfecta entre los 2 métodos. Se ha demostrado que este método es superior a otros que se usen para fines similares (Camacho-Sandoval, 2008; Carrasco & Jover, 2004).

Base Legal

Constitución de la República del Ecuador

- **Artículo 385.-** El sistema nacional de ciencia, tecnología, innovación y saberes ancestrales, en el marco del respeto al ambiente, la naturaleza, la vida, las culturas y la soberanía, tendrá como finalidad:
 1. Generar, adaptar y difundir conocimientos científicos y tecnológicos.
 2. Recuperar, fortalecer y potenciar los saberes ancestrales.
 3. Desarrollar tecnologías e innovaciones que impulsen la producción nacional, eleven la eficiencia y productividad, mejoren la calidad de vida y contribuyan a la realización del buen vivir (Asamblea Constituyente, 2008).

Ley de Fomento y Desarrollo Agropecuario

- **Artículo 5.-** La investigación agropecuaria se orientará a elevar la productividad de los recursos humanos y naturales mediante la generación y adopción de tecnologías de fácil difusión y aplicación a fin de incrementar la producción de:
 - a) Productos alimenticios básicos de alto contenido nutritivo;
 - b) Productos destinados a la exportación;
 - c) Productos destinados a la sustitución de importaciones, y,
 - d) Materia prima para la industria nacional; (Asamblea Constituyente, 2016).

Ley para el Fortalecimiento y Desarrollo de la Producción, Comercialización, Extracción, Exportación e Industrialización de la Palma Aceitera y sus Derivados.

- **Artículo 6.-** Mejoramiento de la productividad de la palma aceitera.
- **Artículo 9.-** Investigación del cultivo de la palma aceitera; (Asamblea Nacional, 2020).

Capítulo III

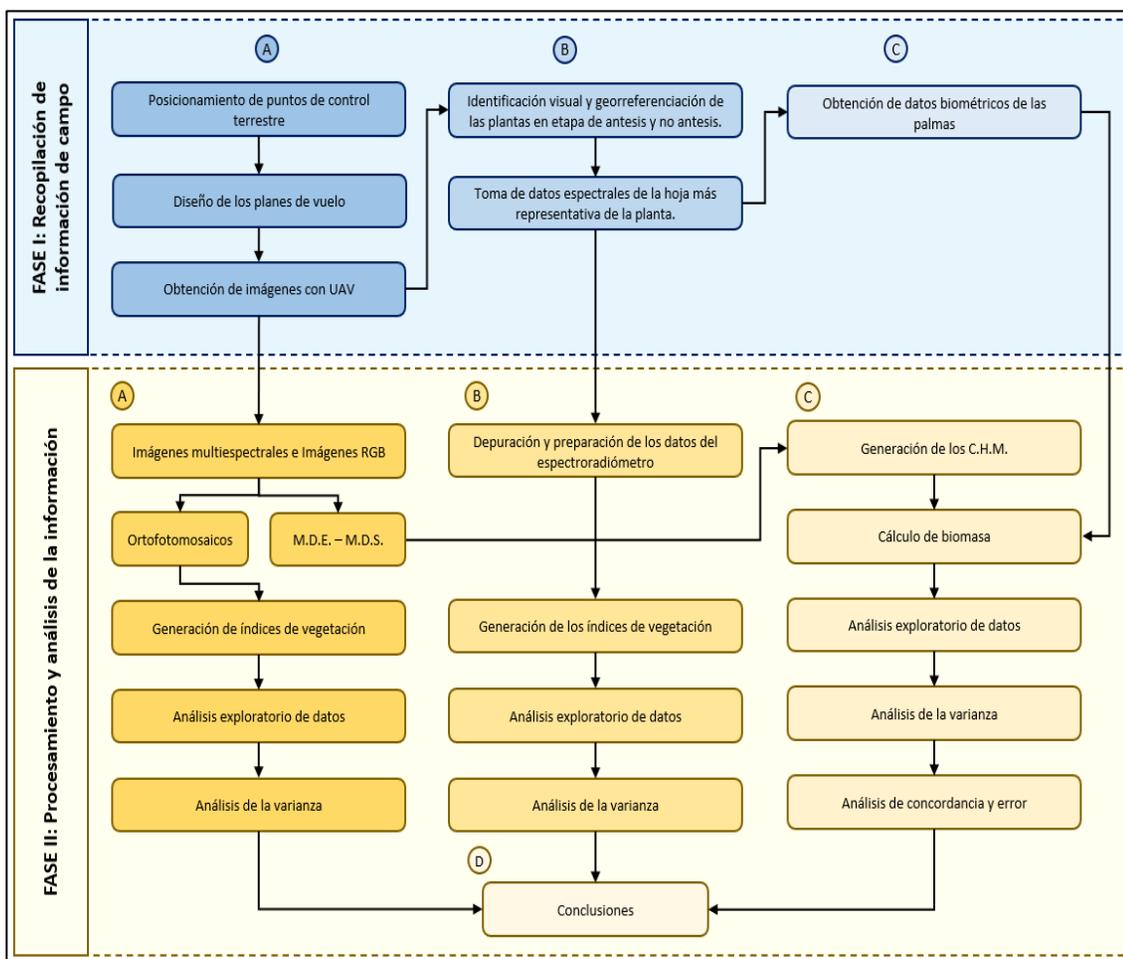
Metodología

Generalidades

El proyecto de investigación se realizó en dos fases, la fase 1, recopilación de la información en campo y la fase 2, procesamiento y análisis de la información recopilada. En la **Figura 12** se indica el flujograma general de la metodología aplicada.

Figura 12

Metodología general del proyecto.



Nota: En la figura se detalla la metodología seguida durante el proyecto de investigación.

En la fase uno, se posicionaron cinco puntos de control con dos antenas GNSS doble frecuencia, se realizaron los planes de vuelo correspondientes y se obtuvieron las imágenes multiespectrales y RGB mediante los vuelos UAV. Seguidamente, se identificaron las plantas que se encontraron en etapa de antesis y no antesis, se tomaron los datos espectrales mediante el uso del espectroradiómetro de mano y se georreferenciaron con un GPS navegador. Finalmente, se tomaron datos biométricos que se detallaran en las secciones subsiguientes.

En la fase dos, con las imágenes multiespectrales de la cámara Parrot Sequoia y las imágenes RGB del UAV DJI Mavic Pro, se generaron los ortofotomosaicos y se calcularon los índices de vegetación, se aplicó un análisis exploratorio de datos y el análisis de varianza (ANOVA) para identificar las posibles diferencias entre plantas en antesis y no antesis. Después de esto, se integraron y se depuraron los datos del espectroradiómetro en una base de datos Excel, se generaron los índices de vegetación, se aplicó un análisis exploratorio de datos y el análisis estadístico ANOVA con el mismo fin.

Los datos biométricos de campo se digitalizaron y se depuraron en una base de datos Excel para calcular la cantidad de biomasa mediante la ecuación alométrica. Con las imágenes de las dos cámaras antes mencionadas, se generaron los modelos digitales de elevación y modelos digitales de superficie para calcular tres modelos digitales de altura del dosel de los que se estimaron la altura de las plantas. A partir de estos valores de altura, también se calculó la cantidad de biomasa. Se realizó un análisis exploratorio de datos y un análisis de varianza (Welch-ANOVA) para identificar diferencias entre los métodos. Finalmente, se calculó un coeficiente de concordancia y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Con el método de estimación que mejor se ajustó a los datos de campo se calculó la fijación de carbono del cultivo.

Materiales y equipos

En la **Tabla 3** se detallan los materiales utilizados para el levantamiento de la información en campo y para su procesamiento en gabinete.

Tabla 3

Materiales y equipos.

N°	Equipo / Material	Descripción
1	GNSS	2 equipos, marca Trimble R8s
2	Mojones	5 cilindros de cemento
3	Paineles	5 dianas de tela de color naranja y negro
4	UAV's	2 UAV, DJI Phantom IV y DJI Mavic Pro
5	Cámara Multiespectral	Marca Parrot Sequoia
6	Tarjeta de calibración	MicaSense Calibrated Reflectance Panel
7	Celulares	iPhone 7 – Xiaomi Mi Note 10 Lite
8	Pix4D Capture	Software para planificación del vuelo y toma de imágenes
9	Espectroradiómetro	Spectral evolution PRS-1100
10	Clinómetro	Equipo para determinar ángulos de inclinación
11	Cinta	Cinta métrica
12	GPS Navegador	Garmin Etrex
13	Computador	Laptop Lenovo
14	Windows Mobile	Software de descarga de archivos del espectroradiómetro
15	TBC	Software para el procesamiento de los puntos de control
16	Pix4D Mapper	Software para el procesamiento fotogramétrico
17	Agisoft	Software para procesamiento fotogramétrico
18	ArcGIS - ArcMAP	Software comercial SIG
19	SPSS	Software para el análisis estadístico

Nota: La tabla muestra los equipos, materiales y software utilizados para el levantamiento de la información en campo y análisis en gabinete.

Metodología para la obtención de datos

Posicionamiento y postproceso de puntos de control terrestre

El día 15 de diciembre de 2020 se establecieron cinco puntos de control terrestre materializados en hitos cilíndricos de cemento de 30 [cm] de alto y 15 [cm] de diámetro, se posicionaron mediante el uso de dos antenas GNSS Trimble R8s (**Figura 13**) aplicando el método estático rápido con una duración de 30 minutos para cuatro puntos y una base con una duración de 6 horas, el intervalo de registro fue de 1 segundo y la máscara de elevación de 15 grados.

Figura 13

Materialización y posicionamiento de los puntos de control.



Nota: La figura indica el hito y el equipo utilizado en el posicionamiento de los puntos de control terrestre.

El post proceso se realizó en el software comercial Trimble Business Center – TBC, mediante el uso de una licencia gratuita. Se procesó el punto base PSG-0 respecto a la estación de monitoreo continuo El Carmen (ECEC) propiedad del Instituto Geográfico Militar,

posteriormente, se procesaron los cuatro puntos restantes en base al punto PSG-0 y se obtuvieron las coordenadas con sus respectivas precisiones en el sistema de referencia WGS84, proyección UTM Zona 17 norte, época 2020.96 y la altura se corrigió en base al modelo geoidal EGM96. Estas coordenadas se detallan en la **Tabla 4** y se utilizaron para georreferenciar las imágenes obtenidas de los vuelos con los UAV. Las monografías de cada punto de control se detallan en los **Anexos 1 – 5**.

Tabla 4

Coordenadas de los puntos de control.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura Elipsoidal [m]	Altura ortométrica [m]	Precisión Horizontal [m]	Precisión Vertical [m]
PSG-0	18547.462	686371.723	137.283	118.024	± 0.009	± 0.035
PSG-1	18963.002	686536.228	136.370	117.110	± 0.005	± 0.007
PSG-2	18989.958	686112.982	138.705	119.475	± 0.005	± 0.010
PSG-3	17853.252	685340.801	147.652	128.462	± 0.003	± 0.007
PSG-4	17798.864	686012.373	138.517	119.277	± 0.004	± 0.010

Nota: La tabla indica las coordenadas de los puntos de control con sus respectivas precisiones.

Captura de imágenes aéreas UAV y procesamiento

Imágenes RGB – UAV Mavic Pro

Se realizaron dos vuelos con el UAV DJI Mavic Pro para generar un modelo digital de superficie y un modelo digital de elevación con el objetivo de extraer la información dasométrica (insumo para el cálculo de biomasa) y un ortofotomosaico a fin de calcular el índice VARI y extraer los puntos foto identificables.

Planificación de los vuelos

Para la ejecución de los dos planes de vuelo se utilizó la aplicación Pix4D Capture en la que se ingresaron parámetros (**Tabla 5**) como el traslape longitudinal, el traslape transversal y la altura de vuelo. Adicionalmente, los parámetros como el área del terreno, tiempo de vuelo, cantidad de líneas de vuelo, GSD y velocidad fueron calculados automáticamente por la aplicación.

Tabla 5

Parámetros de los planes de vuelo – UAV DJI Mavic Pro

Parámetros	Primer Vuelo	Segundo Vuelo
Área del terreno	71.17 [Ha]	79.13 [Ha]
Altura de vuelo	200 [m]	200 [m]
Traslape transversal	80%	80%
Traslape longitudinal	70%	70%
Tiempo de vuelo	12m 53s	13m 09s
Líneas de vuelo	6	6
Velocidad	13 [m/s]	13 [m/s]
G.S.D.	8.75 [cm/pix]	8.75 [cm/pix]

Nota: La tabla indica los parámetros con los que se realizaron los dos vuelos RGB.

Ejecución de los vuelos

Se colocaron paneles aproximadamente de un metro cuadrado de color naranja y negro en los 5 puntos de control terrestre previamente establecidos, se configuraron los planes de vuelo en la aplicación Pix4D Capture de acuerdo con los parámetros detallados en la **Tabla 5** y se realizaron los dos vuelos que se indican en la **Figura 14**.

Figura 14

Diseño de los vuelos RGB.



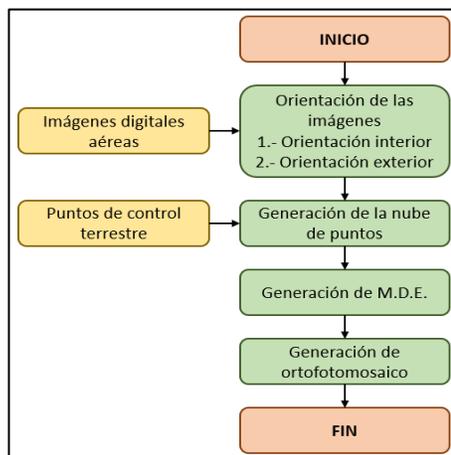
Nota: En la figura se indican los dos vuelos realizados con el UAV DJI Mavic Pro.

Proceso fotogramétrico

El proceso fotogramétrico (**Figura 15**) de las imágenes RGB se realizó en el software Agisoft Metashape Professional, este proceso se dividió en 4 fases: en la primera fase se ingresaron 283 imágenes, se verificó que el sistema de referencia sea el correcto y se realizó la orientación interior y exterior. Esta orientación utiliza las coordenadas de los centros de cada imagen, los parámetros de calibración de la cámara y los ángulos de rotación de la cámara, parámetros que son leídos de forma automática por el software. También se generaron puntos de enlace automáticos y se creó una nube de puntos dispersa. En la segunda fase se ingresaron los puntos de control terrestre y se marcaron en todas las imágenes en las que estos aparecen, esto permitió georreferenciar y escalar los productos. Se reoptimizaron las imágenes y se generó la nube de puntos densa y la malla. En la tercera fase se realizó una clasificación de la nube de puntos de la que se generó un modelo digital del terreno y un modelo digital de superficie y en la cuarta y última fase se generó el ortofotomosaico.

Figura 15

Proceso fotogramétrico con imágenes RGB.



Nota: La figura indica los pasos que sigue el proceso fotogramétrico en el software Agisoft Metashape.

Del ortofotomosaico RGB georreferenciado, se extrajeron 4 puntos foto identificables que se utilizaron para georreferenciar las imágenes multiespectrales de los vuelos con el UAV DJI Phantom IV en conjunto con las coordenadas de los puntos de control, estas nuevas coordenadas se detallan en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Coordenadas de los puntos foto identificables.

Punto	Norte [m]	Este [m]	Altura ortométrica [m]
PFI-1	18982.452	686273.435	119.862
PFI-2	17837.496	685548.493	127.887
PFI-3	18186.171	685777.351	128.619
PFI-4	18206.792	685374.521	127.762

Nota: La tabla indica las coordenadas extraídas del ortofotomosaico RGB.

Imágenes multiespectrales y RGB – UAV Phantom IV

Se realizaron dos vuelos con el UAV DJI Phantom IV con la cámara multiespectral Parrot Sequoia (Figura 16) a bordo, con el fin de generar modelos digitales de superficie y elevación, para extraer la información dasométrica (cálculo de biomasa) y cuatro ortofotomosaicos multiespectrales de bandas: verde, rojo, borde de rojo (Red Edge), e infrarrojo cercano, para el cálculo de los índices de vegetación.

Figura 16

UAV Phantom IV con la cámara multiespectral Parrot Sequoia a bordo.



Nota: La figura indica el equipo utilizado para realizar los vuelos multiespectrales.

Planificación de los vuelos

Para la ejecución de los dos planes de vuelo se utilizó la aplicación Pix4D Capture en la que se ingresaron parámetros como el traslape longitudinal, traslape transversal y la altura de vuelo, adicionalmente, los parámetros como el área del terreno, tiempo de vuelo, cantidad de líneas de vuelo, GSD y velocidad fueron calculados automáticamente por la aplicación. Todos estos parámetros se detallan en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Parámetros de los planes de vuelo – UAV DJI Phantom IV + Parrot Sequoia.

Parámetros	Primer Vuelo	Segundo Vuelo
Área del terreno	28.26 [Ha]	30.10 [Ha]
Altura de vuelo	100 [m]	100 [m]
Traslado transversal	80%	80%
Traslado longitudinal	70%	70%
Tiempo de vuelo	15m 00s	16m 00s
Líneas de vuelo	9	10
Velocidad	15 [m/s]	15 [m/s]
GSD - RGB	2.76 [cm/pix]	2.78 [cm/pix]
GSD - Multiespectral	10.23 [cm/pix]	10.51 [cm/pix]

Nota: La tabla indica los parámetros con los que se realizaron los dos vuelos multiespectrales.

Ejecución de los vuelos

Se colocaron paneles de un metro cuadrado de color naranja y negro en los 5 puntos de control terrestre previamente establecidos, se configuraron los planes de vuelo en la aplicación Pix4D Capture de acuerdo con los parámetros detallados en la **Tabla 7** y se realizaron los dos vuelos que se indican en la **Figura 17**, el primer vuelo abarcó los cultivos con las especies de palma Amazon y Taisha y el segundo vuelo los cultivos con la especie Coari. Adicionalmente antes del vuelo, se obtuvieron imágenes de la tarjeta de calibración MicaSense Calibrated Reflectance Panel para la corrección radiométrica de las imágenes.

Figura 17

Diseño de los vuelos multiespectrales.



Nota: En la figura se indican los dos vuelos realizados con el UAV DJI Phantom IV + Parrot Sequoia.

Proceso fotogramétrico – imágenes multiespectrales

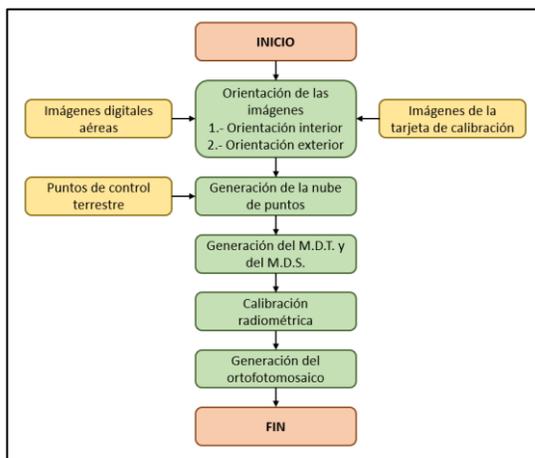
Para realizar el proceso fotogramétrico (**Figura 18**) de las imágenes multiespectrales se utilizó el software Pix4D Mapper con la plantilla Ag Multiespectral y se realizó un proceso diferente para cada vuelo, sin embargo, los pasos aplicados fueron los mismos.

En el primer paso se ingresaron las imágenes multiespectrales (2576 para el primer procesamiento y 2144 para el segundo) y las imágenes de la tarjeta de calibración para que el software realice la calibración radiométrica. Se configuraron los parámetros y se ejecutó el procesamiento inicial dónde se realiza la orientación interior y exterior de las imágenes utilizando las coordenadas de los centros de cada imagen, los parámetros de calibración y los ángulos de rotación de la cámara respectivamente. En esta fase también se generaron los puntos de enlace automáticos. En el segundo paso se realizó la calibración geométrica, para esto se ingresaron los puntos de control terrestre y los puntos foto identificables y se marcaron en todas las imágenes en las que estos aparecen, se reoptimizaron las imágenes y se generaron las nubes de puntos y las mallas. En el tercer y último paso el software generó automáticamente un

modelo digital del terreno, un modelo digital de superficie y los ortofotomosaicos multispectrales.

Figura 18

Proceso fotogramétrico con imágenes multispectrales.



Nota: La figura indica el proceso fotogramétrico en el software Pix4D Mapper.

Proceso fotogramétrico – imágenes RGB.

Para realizar el proceso fotogramétrico de las imágenes RGB se utilizó el software Pix4D Mapper con la plantilla Ag RGB y se realizó un proceso diferente para cada vuelo, sin embargo, los pasos aplicados fueron los mismos que los mencionados anteriormente.

Cálculo de índices de vegetación a partir de los ortofotomosaicos

Conteo de palmas

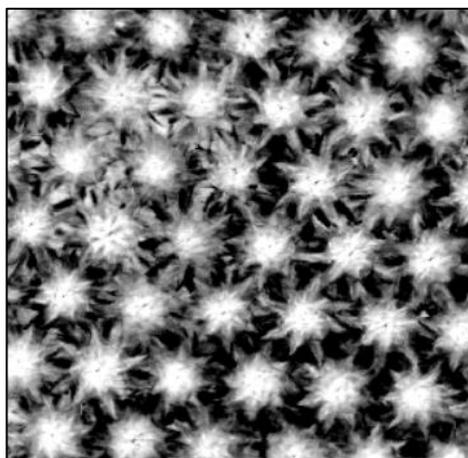
En un modelo ráster existen varios píxeles con información de reflectancia asociados para cada palma, razón por la que se realizó el conteo de plantas, ya que el producto final es un shape que identifica a cada planta con una circunferencia de diámetro variable y a partir de esta

circunferencia se puede extraer la información de los píxeles. Este procedimiento se realizó en el software ENVI.

Se utilizó la herramienta “Count Crops” y como insumo un ráster en el que se visualice fácilmente a cada planta, este ráster se obtuvo del uso del cálculo de los índices de vegetación. Para calcular estos índices de vegetación se realizó la composición de bandas (ortofotomosaicos multiespectrales) con la herramienta “Build Layer Stack” y se ingresó el valor de la longitud de onda para cada banda, luego, se calculó el índice NDVI con la herramienta “Band Math”, ya que fue el que mejor identificación de plantas presentó (**Figura 19**).

Figura 19

Visualización de las plantas bajo el uso del índice NDVI.



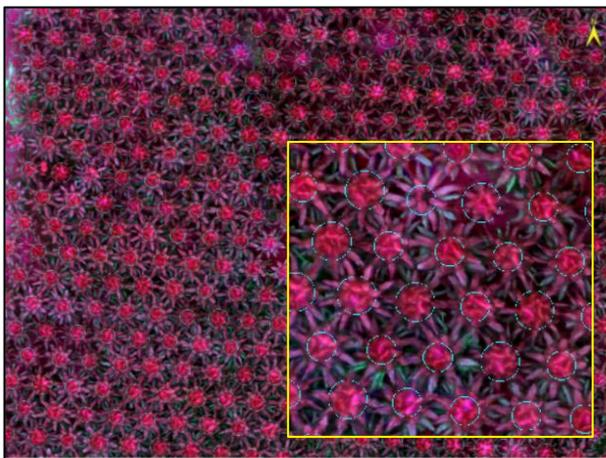
Nota: La figura indica la identificación de las palmas con el índice NDVI.

Adicional a este insumo, “Count Crops” necesita datos como el diámetro mínimo y máximo del cultivo, estos valores se midieron en varias plantas directamente en el software, finalmente, el resultado se pasó por una última herramienta llamada “Find Rows and Remove

Outliers” que identifica las filas del cultivo y elimina aquellas plantas que se encuentren por fuera de estas. El resultado se indica en la **Figura 20**.

Figura 20

Conteo de palmas para la generación de las circunferencias.



Nota: La imagen indica las circunferencias generadas en el software.

Los dos archivos shapefile generados de este proceso fueron editados en un SIG debido a que, a pesar de haber realizado el filtrado, aún existieron circunferencias que no correspondían a plantas de palma, adicionalmente, se añadió un campo de tipo numérico para registrar las plantas que fueron muestreadas en campo (espectroradiómetro y biomasa) y obtener los datos únicamente de éstas.

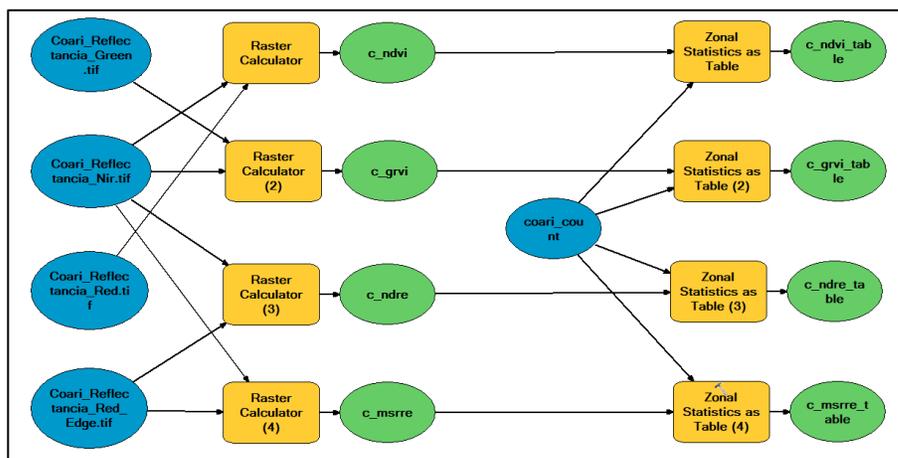
Índices de vegetación a partir de los ortofotomosaicos multiespectrales

Se utilizaron los valores de reflectancia de los ortofotomosaicos multiespectrales para calcular los índices de vegetación NDVI, GRVI, MSRRE, MCARI2, MTVI2, RECI, RESAVI, REDVI y RERDVI aplicando las ecuaciones descritas en la **Tabla 2**. El proceso se realizó en el software ArcMap.

Mediante la herramienta “Raster Calculator” se generaron los índices de vegetación antes mencionados para cada especie y para extraer los valores de los píxeles se utilizó la herramienta “Zonal Statistics as Table”, que devolvió una tabla (**Figura 22**) con las estadísticas (valor mínimo, valor máximo, media, desviación estándar y suma) de los valores de los píxeles según el shapefile de conteo de plantas. De estos valores se utilizó la media para el análisis estadístico. El modelo de la **Figura 21** indica el proceso realizado para la especie Coari, el mismo proceso fue utilizado para las especies Amazon y Taisha.

Figura 21

Modelo utilizado para calcular los índices de vegetación y extraer sus valores.



Nota: La figura indica parte del proceso utilizado en “Model Builder” del software ArcMap.

Figura 22

Tabla obtenida de la herramienta “Zonal Statistics as Table” del índice NDVI, especie Coari.

Rowid	NUM	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	0	2692971	29723.946404	0.455764	0.945303	0.48954	0.888405	0.022821	2392449.502104
2	45	1786	19.71316	0.847436	0.93322	0.085783	0.894976	0.014822	1598.241788
3	46	3159	34.86779	0.827545	0.923695	0.09615	0.878608	0.016967	2775.524187
4	47	1786	19.71316	0.846308	0.9225	0.076192	0.893803	0.014585	1596.332465
5	48	1786	19.71316	0.822651	0.913497	0.090845	0.883671	0.013789	1578.236904
6	49	1786	19.71316	0.819776	0.924881	0.104805	0.885771	0.01176	1599.84706
7	50	1786	19.71316	0.851633	0.929964	0.078331	0.902475	0.013612	1611.820426
8	51	1786	19.71316	0.850189	0.923586	0.073417	0.89763	0.012364	1603.166299
9	52	1786	19.71316	0.829487	0.923234	0.094448	0.895847	0.013693	1600.16172
10	53	3159	34.86779	0.844344	0.922968	0.078623	0.891505	0.014598	2816.265512
11	54	1786	19.71316	0.845462	0.929827	0.084375	0.900797	0.013739	1608.823708
12	55	2195	24.22754	0.826031	0.924694	0.098663	0.89369	0.016774	1961.650283
13	56	1786	19.71316	0.81214	0.929265	0.09051	0.904246	0.013778	1614.983742
14	57	1786	19.71316	0.848951	0.939425	0.090473	0.902706	0.018449	1612.23297
15	58	1786	19.71316	0.806903	0.902961	0.096058	0.86066	0.016378	1537.138595
16	59	1786	19.71316	0.814258	0.933973	0.119715	0.895325	0.017337	1599.050481
17	60	1786	19.71316	0.834517	0.921481	0.086964	0.897018	0.012091	1602.074618
18	61	1786	19.71316	0.83008	0.932273	0.102192	0.905653	0.014499	1617.496045
19	62	1786	19.71316	0.834912	0.923843	0.089031	0.899249	0.01309	1606.058743
20	63	1786	19.71316	0.849778	0.919614	0.069836	0.89517	0.012473	1598.773049
21	64	1786	19.71316	0.855373	0.925295	0.070222	0.896445	0.01117	1601.050467
22	65	1786	19.71316	0.855397	0.930603	0.075207	0.902238	0.014322	1611.396228
23	66	1786	19.71316	0.848864	0.9314	0.082537	0.900662	0.015607	1608.58237
24	67	1786	19.71316	0.826296	0.920206	0.093911	0.891807	0.015024	1592.167614
25	68	1786	19.71316	0.849022	0.934553	0.085531	0.893355	0.017905	1599.103567
26	69	1786	19.71316	0.854144	0.923847	0.069703	0.894437	0.012649	1597.46401
27	70	1786	19.71316	0.842651	0.933373	0.090723	0.899044	0.015839	1605.69298

Nota: La figura indica las estadísticas generadas en el software ArcMap del índice NDVI.

Índice de vegetación a partir del ortofotomosaico RGB

El ortofotomosaico obtenido del proceso fotogramétrico proporciona una imagen compuesta con las bandas roja, verde, y azul, en cada píxel se tiene valores digitales de 0 a 255, a partir de los que se calculó el índice VARI aplicando la ecuación descrita en la **Tabla 2**.

Mediante la herramienta “Raster Calculator” se generó el índice de vegetación VARI para cada especie y para extraer los valores de los píxeles se utilizó la herramienta “Zonal Statistics as Table”, que devolvió una tabla (**Figura 23**) con las estadísticas (valor mínimo, valor máximo, media, desviación estándar y suma) de los valores de los píxeles según el shapefile de conteo de plantas, de estos valores se utilizó la media para realizar el análisis estadístico. El modelo de la **Figura 24** indica el proceso para las dos especies.

Figura 23

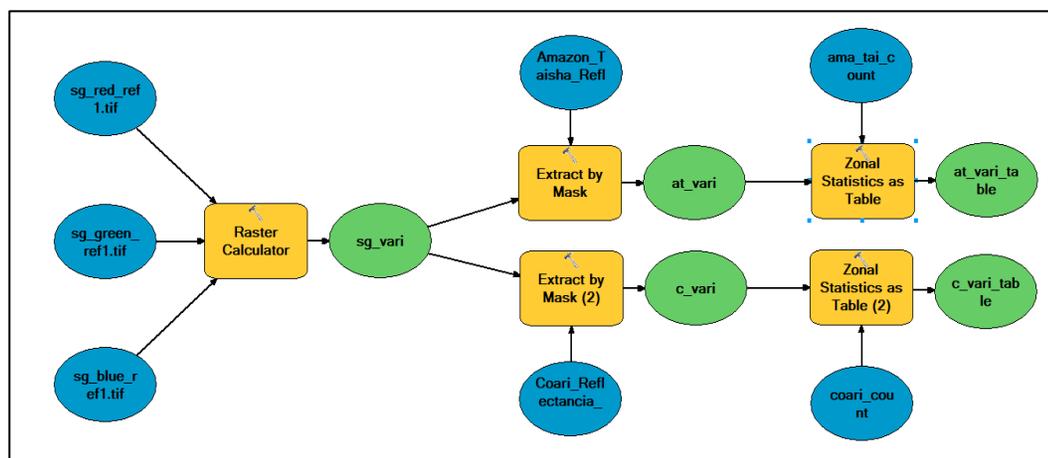
Tabla obtenida de la herramienta “Zonal Statistics as Table” del índice VARI, especie Coari.

Rowid	NUM	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD
1	0	7185181	29674.450222	-1.875	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000	1.#INF00e+000	1
2	45	4754	19.63379	-0.09375	0.55	0.64375	0.25316	0.068337
3	46	8466	34.964171	0.0375	0.475	0.4375	0.200919	0.05478
4	47	4754	19.63379	0.054545	0.682927	0.628381	0.240684	0.058711
5	48	4742	19.584231	-0.028455	0.574074	0.602529	0.252739	0.059615
6	49	4762	19.68683	0.04918	0.6	0.55082	0.273522	0.06443
7	50	4756	19.64205	0.020833	0.695652	0.674819	0.240196	0.06509
8	51	4754	19.63379	0.060976	0.85	0.789024	0.292563	0.07872
9	52	4753	19.62966	0.044118	0.690476	0.646359	0.267477	0.07292
10	53	9449	34.99382	-0.058924	0.702128	0.760951	0.244495	0.067617
11	54	4752	19.62553	0.012658	0.564103	0.551444	0.25842	0.06452
12	55	5866	24.226296	0.060976	0.666667	0.605691	0.297107	0.08071
13	56	4750	19.61727	0.02951	0.636384	0.606513	0.281298	0.06509
14	57	4759	19.65444	0.106667	0.742857	0.63619	0.307457	0.09132
15	58	4761	19.6627	-0.034483	0.44	0.474483	0.175942	0.05307
16	59	4755	19.63792	-0.064516	0.594595	0.659111	0.26935	0.068511
17	60	4752	19.62553	0.03325	0.666667	0.573141	0.297416	0.06313
18	61	4759	19.65444	0.095652	0.952381	0.856729	0.290292	0.06454
19	62	4750	19.61727	0	0.634921	0.634921	0.26012	0.06178
20	63	4757	19.64618	0.033333	0.606061	0.572727	0.267752	0.0575
21	64	4756	19.64205	0.099154	0.642857	0.546703	0.280386	0.06269
22	65	4751	19.6214	0.128205	0.6	0.471795	0.324608	0.063941
23	66	4744	19.592491	0.061856	0.772727	0.710872	0.297177	0.07093
24	67	4747	19.604881	0.061856	0.690909	0.629054	0.309182	0.06264
25	68	4752	19.62553	-0.125	0.642857	0.767657	0.294044	0.07684
26	69	4755	19.63792	0.083333	0.6	0.516667	0.262667	0.0598
27	70	4755	19.63792	0.1	1.2	1.1	0.322264	0.06832

Nota: La figura indica las estadísticas generadas en el software ArcMap del índice VARI.

Figura 24

Modelo utilizado para calcular el índice de vegetación y extraer sus valores.



Nota: La figura indica el proceso utilizado en "Model Builder" del software ArcMap.

Captura y procesamiento de datos espectrales con el espectroradiómetro

Método de muestreo y tamaño de muestra

Para la captura de los datos espectrales con el espectroradiómetro se aplicó el muestreo aleatorio simple debido a que no existe ningún patrón o comportamiento especial de las plantas

en etapa de antesis. El tamaño de muestra fue calculado de acuerdo con la ecuación (14), tamaño de muestra para población infinita ya que se desconoce el total y se considera una población grande, con un nivel de confianza del 95% y un error de muestreo del 20%, dando como resultado 24 plantas. Como el estudio se aplicó a 3 especies (poblaciones) diferentes de palma, sin embargo, no se muestreo 24 plantas por especie ya que como se mencionó antes, la etapa de antesis presenta un comportamiento aleatorio, es decir, pueden existir más plantas o menos plantas. En la **Tabla 8** se detalla la cantidad de plantas muestreadas en etapa de antesis y no antesis por especie.

Tabla 8

Cantidad de plantas muestreadas.

Especie	Total	Antesis	No Antesis
Amazon	12	6	6
Taisha	33	22	11
Coari	26	19	7
Total	71	47	24

Nota: En la tabla se detalla el total de las plantas muestreadas, la cantidad en etapa de antesis y no antesis de acuerdo con la especie.

Captura de datos espectrales

Los datos espectrales fueron obtenidos con el espectroradiómetro de mano PSR-1100, este equipo cuenta con una controladora CETAC PS236 (**Figura 25**) en la que se grafican las firmas espectrales justo en el momento de la toma de los datos y una placa de calibración. El rango de medición del equipo parte desde los 320 [nm] hasta los 1100 [nm] del espectro electromagnético.

Figura 25

Espectroradiómetro de mano PSR-1100 y colectorora CETAC PS236.



Nota: La figura indica el espectroradiómetro utilizado.

Antes de comenzar la captura de los datos, se ensambló el equipo, se configuró los parámetros iniciales e información general y se calibró realizando mediciones en la placa de calibración de color blanco y negro, si los valores arrojados de reflectancia en el color blanco son cercanos a 100 y en el color negro son cercanos a 0, entonces, el equipo se encuentra calibrado.

Finalizada la calibración, se procedió con la toma de los datos espectrales, para esto se puso en contacto directo la pistola (fuente de luz) del equipo con la hoja de la planta. De las palmas identificadas en etapa de antesis y no antesis, con la ayuda del especialista se identificó la hoja número 17 que es la más representativa y se tomaron los datos espectrales en 3 foliolos distintos, es decir, se obtuvo 3 datos espectrales por palma.

Procesamiento de datos espectrales

El equipo generó archivos con extensión .sed que se descargaron al computador mediante el software Windows Mobile Device Center. Estos archivos son compatibles con el

software Excel y contienen la información general del trabajo (nombre, fecha, hora, modelo del equipo, coordenadas GPS, etc.) y los valores de la longitud de onda y el porcentaje de reflectancia en la primera y última columna respectivamente (**Figura 26**).

Figura 26

Información existente en cada archivo del espectralradiómetro.

Version: 2.0				
File Name: \Extended Storage\Union\1344418_00044.sed				
Instrument: PSR-1100_SN1344418				
Detectors: 512,0,0				
Measurement: REFLECTANCE				
Date: 12/15/2020,12/15/2020				
Time: 10:27:58,12:43:42				
Temperature (C): 21.70,26.78				
Battery Voltage: 7.46,7.44				
Averages: 10,10				
Integration: 3,9				
Dark Mode: AUTO,AUTO				
Foreoptic: FIBER1: (RADIANCE),FIBER1: (RADIANCE)				
Radiometric Calibration: RADIANCE				
Units: W/m ² /sr				
Wavelength Range: 320,1100				
Latitude: 0.17098				
Longitude: -79.32459				
Altitude: 129.80				
GPS Time: 15:56:06				
Satellites: 10/12				
Wvl	Rad. (Ref.)	Rad. (Target)	-log Reflect	Reflect. %
320	3.01E-03	5.96E-04	0.70193	19.863
321	3.14E-03	6.19E-04	0.70551	19.705
322	3.16E-03	6.59E-04	0.6815	20.821
323	3.39E-03	7.46E-04	0.65746	22.005
324	3.55E-03	7.68E-04	0.66443	21.676
325	3.63E-03	7.30E-04	0.69619	20.126

Nota: La figura indica la información contenida en cada uno de los archivos .sed.

Con los valores de longitud de onda, las tres mediciones del porcentaje de reflectancia y el promedio se generó una base de datos en el software Excel para cada planta (**Figura 27**).

Figura 27

Base de datos de las mediciones espectrales en Excel.

Planta Long. O.	17				18			
	1344418_00044	1344418_00045	1344418_00046	Promedio	1344418_00047	1344418_00048	1344418_00049	Promedio
320	19.863	21.943	21.353	21.0530	22.599	18.194	17.302	19.3650
321	19.705	21.072	21.685	20.8207	22.652	18.465	18.396	19.8377
322	20.821	21.954	19.228	20.6677	21.601	18.411	17.375	19.1290
323	22.005	21.69	20.237	21.3107	21.638	19.011	18.586	19.7450
324	21.676	21.636	20.579	21.2970	20.611	20.047	18.857	19.8383
325	20.126	21.87	19.906	20.6340	18.905	20.854	17.768	19.1757
326	19.878	21.369	21.274	20.8403	19.742	19.622	17.086	18.8167
327	19.958	21.249	21.03	20.7457	20.229	18.984	16.363	18.5253
328	19.774	21.107	19.781	20.2207	20.186	18.962	16.105	18.4177
329	18.45	20.021	19.304	19.2583	19.856	19.072	17.218	18.7153

Nota: La figura indica parte de los valores de la longitud de onda, las tres mediciones espectrales y el promedio para cada planta.

Cálculo de índices de vegetación con los datos espectrales

Los valores de reflectancia del espectroradiómetro se encuentran en porcentaje, razón por la que estos valores se dividieron sobre cien y se promediaron (**Figura 28**) según el rango de longitudes de onda de la **Tabla 9**.

Tabla 9

Rangos de longitudes de onda.

Banda	Rango [nm]	Fuente
Azul (B)	[400 – 500)	(Chuvieco, 2016; Lillesand et al., 2015)
Verde (G)	[500 – 600)	(Chuvieco, 2016; Lillesand et al., 2015)
Rojo (R)	[600 – 680)	(Chuvieco, 2016; Lillesand et al., 2015)
Borde Rojo (Red Edge)	[680 – 750)	(Blackburn, 1998; Lillesand et al., 2015)
Infrarrojo Cercano (NIR)	[750 – 1100)	(Chuvieco, 2016; Lillesand et al., 2015)

Nota: La tabla indica el rango de longitudes de onda utilizadas

Figura 28

Valores de reflectancia para las bandas espectrales.

Especie	Punto GPS	Bandas [Reflectancia]				
		Azul	Verde	Rojo	Borde Rojo	NIR
Taisha	17	0.0709	0.1275	0.0973	0.2825	0.5179
Taisha	18	0.0657	0.1026	0.0870	0.2405	0.5083
Taisha	19	0.1055	0.1479	0.1255	0.3107	0.5910
Taisha	20	0.0545	0.1002	0.0842	0.2424	0.4786
Taisha	21	0.0704	0.1076	0.0970	0.2507	0.4984
Taisha	22	0.0649	0.1007	0.0846	0.2412	0.4904
Taisha	23	0.0408	0.0843	0.0607	0.2489	0.5332
Taisha	24	0.0640	0.0995	0.0825	0.2440	0.5115
Taisha	25	0.0357	0.0768	0.0543	0.1998	0.4111
Taisha	26	0.0693	0.1047	0.0858	0.2352	0.4702
Taisha	27	0.0487	0.0853	0.0658	0.2095	0.4444
Taisha	28	0.0359	0.0675	0.0536	0.1824	0.3940
Taisha	29	0.0494	0.0780	0.0623	0.1925	0.4134
Taisha	30	0.0494	0.0965	0.0755	0.2622	0.5427

Nota: La figura indica parte de los promedios de reflectancia según los rangos citados.

Se utilizó el software Excel, para realizar el cálculo de los índices de vegetación aplicando las ecuaciones descritas en la **Tabla 2**.

Captura y procesamiento de datos dasométricos en campo

Método de muestreo y tamaño de muestra

Para la toma de los datos dasométricos se aplicó el muestreo aleatorio sistemático debido a que la plantación de las palmas sigue un patrón específico, se tomaron datos aproximadamente cada 7 plantas a lo largo de las filas y columnas, empezando en una planta seleccionada al azar. Cabe mencionar que este valor no fue exacto debido a que existieron ciertas plantas que no eran aptas para muestrear. El tamaño de muestra fue calculado de acuerdo con la ecuación (14), tamaño de muestra para población infinita ya que se desconoce el total y se considera una población grande, con un nivel de confianza del 95% y un error de muestreo del 20%.

De acuerdo con la ecuación utilizada, el número de plantas a muestrear fue 24, sin embargo, debido al tiempo y dificultad de obtener los datos dasométricos se redujo a 20 plantas por especie, dando un total de 60 plantas muestreadas.

Medidas en campo

Las medidas obtenidas en campo (**Figura 29**) fueron: el ángulo a la copa (α), el ángulo a la base (β) y la distancia (D) entre la planta y el observador de los ángulos, con estos tres datos se calculó la altura de la planta misma que se utilizó para estimar la biomasa mediante la ecuación alométrica. El ángulo a la copa y a la base se midió utilizando un clinómetro y la distancia se midió con una cinta métrica.

Figura 29

Estimación de los ángulos α y β y la distancia.



Nota: La figura indica el empleo del clinómetro para la medición de los ángulos.

Adicionalmente se obtuvieron datos de: número de hojas, número de folíolos, ancho, profundidad y longitud del peciolo, longitud del raquis, ancho y longitud de seis folíolos centrales y la distancia de la corona foliar, estos datos no fueron utilizados en este proyecto, sin

embargo, fueron medidos para entregar al especialista a manera de colaboración por su ayuda brindada. En el **Anexo 6** se indican los datos obtenidos en campo.

Estimación de la altura de las plantas.

Para obtener la altura se adoptó la metodología propuesta por Diéguez Aranda et al. (2005) mediante el empleo de una cinta y un clinómetro. El proceso se explica a continuación:

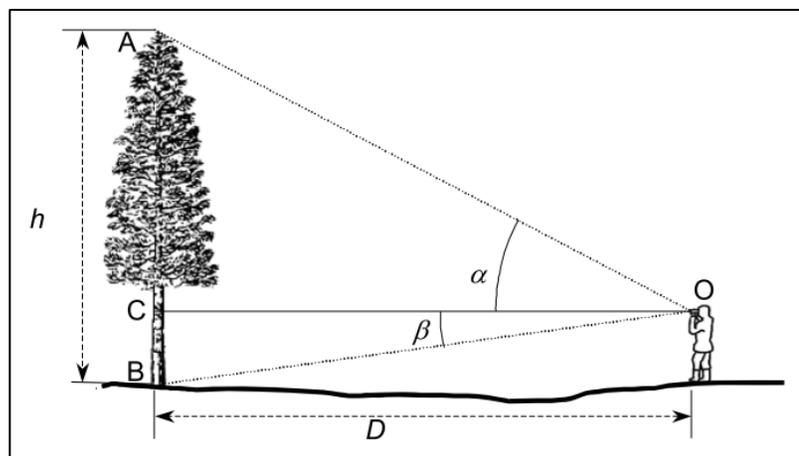
1. Colocarse a una distancia arbitraria similar a la altura del árbol.
2. Con el clinómetro, medir el ángulo a la copa y el ángulo a la base.
3. Con la cinta, medir la distancia entre el árbol y el observador.

Al seguir esta metodología, se dan tres casos según la posición que ocupa el observador respecto al árbol: situado entre la base y el ápice del árbol, situado por debajo de la base del árbol y situado por encima del ápice del árbol, la palma, al ser una plantación que se realiza en terreno relativamente plano, se asumió el primer caso (**Figura 30**) y se calculó la altura (**Figura 31**) con la siguiente ecuación:

$$h = D * (\tan \alpha + \tan \beta) \quad (16)$$

Figura 30

Observador situado entre la base y el ápice del árbol.



Nota: La figura indica los ángulos medidos para el primer caso.

Figura 31

Cálculo de la altura total de la palma.

DATOS				Cálculo Altura total					
Planta	Angulo a la Copa (α) [°]	Angulo a la Base (β) [°]	Dist. Observador Planta [m]	Angulo a la Copa (α) [rad]	Angulo a la Base (β) [rad]	$\tan(\alpha)$	$\tan(\beta)$	$\tan(\alpha) + \tan(\beta)$	Altura total [m]
1	60	-15	4.51	1.0472	-0.2618	1.7321	-0.2679	1.4641	6.60
2	44	-12	6.85	0.7679	-0.2094	0.9657	-0.2126	0.7531	5.16
3	45	-13	6.85	0.7854	-0.2269	1.0000	-0.2309	0.7691	5.27
4	48	-8	7.2	0.8378	-0.1396	1.1106	-0.1405	0.9701	6.98
5	50	-14	6.74	0.8727	-0.2443	1.1918	-0.2493	0.9424	6.35
6	46	-10	7.5	0.8029	-0.1745	1.0355	-0.1763	0.8592	6.44
7	52	-11	8.05	0.9076	-0.1920	1.2799	-0.1944	1.0856	8.74
8	59	-11	6.75	1.0297	-0.1920	1.6643	-0.1944	1.4699	9.92
9	60	-14	6.51	1.0472	-0.2443	1.7321	-0.2493	1.4827	9.65
10	62	-15	5.68	1.0821	-0.2618	1.8807	-0.2679	1.6128	9.16
11	44	-13	6.32	0.7679	-0.2269	0.9657	-0.2309	0.7348	4.64

Nota: En la figura se indica parte de los cálculos realizados para obtener la altura total de la palma.

Captura de datos dasométricos a partir del UAV.

Tomar datos dasométricos de un cultivo de palma, especialmente la altura, representa un trabajo de ardua labor y que conlleva cierta dificultad, por lo que se ha intentado buscar otra

metodología que permita estimar dicho valor mediante el uso de las tecnologías geoespaciales. Uno de los productos del proceso fotogramétrico con UAV es la obtención de la nube de puntos, a partir de esta, se puede generar un ráster que indique el valor de altura de cada planta, este procedimiento se lo conoce como el modelo de altura del dosel.

Modelo de altura del dosel – C.H.M.

El modelo de altura del dosel (Canopy Height Model – CHM) se define como una simple diferencia entre el modelo digital de superficie y el modelo digital de elevación ($CHM = MDS - MDE$) (Avtar et al., 2020). Cabe recalcar que para poder realizar la operación los dos modelos digitales deben tener igual tamaño de píxel. Luego de haber generado los CHM, se extrajeron los valores de todos los píxeles de cada palma mediante la herramienta “Zonal Statistics” (**Figura 32**) empleando los polígonos creados en el proceso del conteo de palmas y se escogió el valor más alto ya que representa el punto de máxima altura de la planta. El proceso generalizado se indica en la **Figura 33**.

Se utilizaron los modelos digitales de elevación y los modelos digitales de superficie generados del proceso fotogramétrico de las imágenes RGB del UAV DJI Mavic Pro y de las imágenes multiespectrales y RGB de la cámara Parrot Sequoia, para obtener la altura de las plantas.

Figura 32

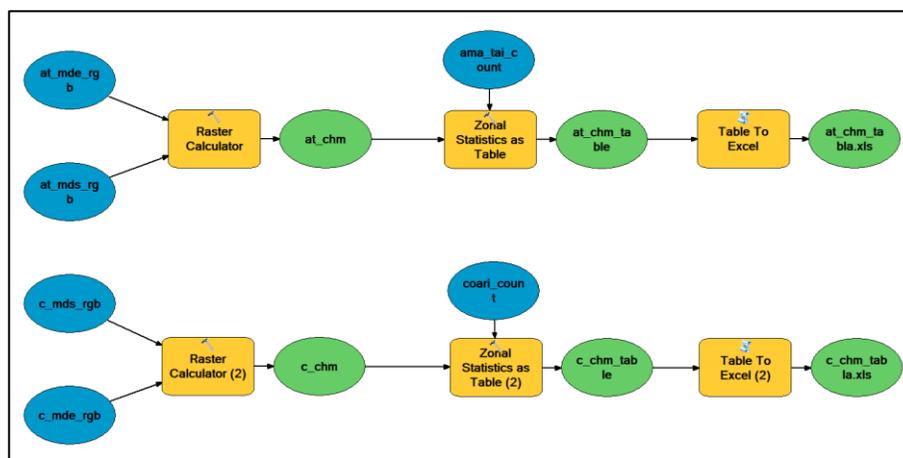
Tabla obtenida con la herramienta “Zonal Statistics”.

Rowid	GPS_BIOMAS	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	0	8724691	36032.439994	-0.135323	14.556892	14.692215	3.00394	1.220258	26206447.850677
2	1	7117	29.392775	0.283646	6.758019	6.474373	4.486927	0.875305	31927.055725
3	2	7102	29.330825	0.107346	5.129141	5.014595	3.312003	0.814597	23521.842903
4	3	7101	29.326696	0.600082	5.343178	4.743096	2.975997	0.69491	21132.55336
5	4	7101	29.326696	1.671745	4.958641	3.286896	3.417321	0.430422	24206.393936
6	5	7106	29.347345	0.10321	4.843147	4.739937	3.632007	0.839132	29796.250481
7	6	7099	29.318436	1.753983	5.21106	3.457077	3.742704	0.593105	26569.453423
8	7	7099	29.318436	1.230072	7.27002	6.039948	5.247395	0.7321	37251.259842
9	8	7102	29.330825	0.555999	6.965439	6.40844	3.830497	0.990824	27204.18618
10	9	7103	29.334955	0.061691	5.514732	5.453041	2.649487	0.946948	18919.305206
11	10	7096	29.306046	0.660034	5.867592	5.207568	3.783226	0.89386	26845.769012
12	11	7101	29.326696	1.816376	5.936928	4.120552	4.167911	0.693919	29596.335037
13	12	7102	29.330825	1.537041	5.819898	4.081657	3.888629	0.522123	27617.044657
14	13	7103	29.334955	0.655379	4.985786	4.327408	2.970546	0.557622	20389.490211
15	14	7101	29.326696	0.231796	4.798119	4.566322	3.260549	0.843466	23153.161606
16	15	7101	29.326696	0.439796	4.197426	3.757629	2.634561	0.681777	18708.018951
17	16	7098	29.314306	0.029332	5.161591	5.135658	3.111135	0.862555	22082.838516
18	17	7102	29.330825	0.353363	5.634407	5.281044	3.97849	0.77676	28255.23333
19	18	7093	29.293656	0.204117	5.41745	5.213333	3.220095	1.014676	22840.133965
20	19	7111	29.367995	0.080528	5.725861	5.645332	3.582798	1.129127	25417.276267
21	20	7104	29.339085	0.120033	6.135979	5.223976	4.551787	0.872051	32335.965538
22	42	7102	29.330825	1.154381	5.631691	4.47731	3.79702	0.712098	26966.434616
23	43	7101	29.326696	1.280762	5.162262	3.8815	3.207267	0.480369	22774.804008
24	44	7101	29.326696	0.128738	6.50869	6.379951	2.549248	1.16477	18102.21228
25	45	7094	29.297798	0.039803	5.377602	5.337799	2.696642	1.062542	18874.557521
26	46	7103	29.334955	0.09816	4.584984	4.486624	2.1317	0.807449	15141.462532
27	47	7100	29.322566	0.133537	4.761818	4.628281	2.871099	0.791578	20384.803307
28	48	7112	29.372125	0.163589	4.630737	4.467148	3.109286	0.601736	22113.239143
29	49	7087	29.110176	0.058792	4.668771	4.090479	2.684226	0.817111	14791.74881

Nota: La figura indica el valor máximo de altura para cada planta.

Figura 33

Modelo utilizado para generar el CHM y extraer sus valores.



Nota: La figura indica el proceso realizado en el software ArcMap.

Estimación de biomasa y fijación de carbono

Biomasa y fijación de carbono con datos de campo.

El cálculo de biomasa (Figura 34), se realizó mediante la aplicación de la ecuación (11) y la ecuación (12).

Figura 34

Cálculo de biomasa aérea por planta con datos de campo.

Datos				Biomasa Ec.	Biomasa Ec.
Planta	Especie	Edad [años]	Altura total [m]	11	12
1	Amazon	6	6.60	546.80	435.92
2	Amazon	6	5.16	470.15	377.04
3	Amazon	6	5.27	475.98	381.74
4	Amazon	6	6.98	567.26	450.71
5	Amazon	6	6.35	533.61	426.20
6	Amazon	6	6.44	538.51	429.83
7	Amazon	6	8.74	660.57	514.31
8	Amazon	6	9.92	723.49	554.26
9	Amazon	6	9.65	709.17	545.34
10	Amazon	6	9.16	683.00	528.79
11	Amazon	6	4.64	442.77	354.40
12	Amazon	6	7.38	588.32	465.60
13	Amazon	6	7.71	606.08	477.89
14	Amazon	6	6.42	537.48	429.06
15	Amazon	6	4.64	442.77	354.40

Nota: La figura indica parte de los cálculos realizados con las ecuaciones alométricas para obtener biomasa por planta.

Para la conversión de biomasa en carbono, es necesario considerar un coeficiente o porcentaje de contenido de carbono, varios estudios realizados en palma aplican diferentes porcentajes. Thenkabail et al. (2004) utiliza un coeficiente de 0.5, Pulhin et al. (2014) considera un coeficiente de 0.45, Sanquetta et al. (2015) trabaja con 0.47, mientras que Aranda Arguello et al. (2018) encuentran que el promedio de porcentaje de carbono que se encuentra en la biomasa es de 47.15%, es decir, un coeficiente de 0.4715.

Para la estimación de la fijación de carbono (**Figura 35**), se utilizó la ecuación (13), a partir de los valores de biomasa obtenidos considerando un coeficiente de 0.47.

Figura 35

Cálculo de la fijación de carbono por planta.

Planta	Especie	Edad [años]	Datos			Fij. Carbono Ec. 11	Fij. Carbono Ec. 12
			Altura total [m]	Biomasa Ec. 11	Biomasa Ec. 12		
1	Amazon	6	6.60	546.80	435.92	942.33	751.24
2	Amazon	6	5.16	470.15	377.04	810.23	649.77
3	Amazon	6	5.27	475.98	381.74	820.28	657.86
4	Amazon	6	6.98	567.26	450.71	977.57	776.73
5	Amazon	6	6.35	533.61	426.20	919.59	734.48
6	Amazon	6	6.44	538.51	429.83	928.03	740.73
7	Amazon	6	8.74	660.57	514.31	1138.37	886.33
8	Amazon	6	9.92	723.49	554.26	1246.82	955.17
9	Amazon	6	9.65	709.17	545.34	1222.13	939.81
10	Amazon	6	9.16	683.00	528.79	1177.04	911.29
11	Amazon	6	4.64	442.77	354.40	763.04	610.74
12	Amazon	6	7.38	588.32	465.60	1013.88	802.38
13	Amazon	6	7.71	606.08	477.89	1044.48	823.56
14	Amazon	6	6.42	537.48	429.06	926.25	739.42
15	Amazon	6	4.64	442.77	354.40	763.04	610.74

Nota: La figura indica parte de los cálculos realizados para estimar la fijación de carbono.

Biomasa y fijación de carbono con datos UAV.

El cálculo de biomasa a partir de los datos del UAV (**Figura 36**), se realizó empleando la ecuación (11) y ecuación (12) con los valores de los tres modelos de altura de dosel.

Figura 36

Cálculo de biomasa aérea por planta con datos de los CHM.

Punto GPS	Especie	Edad [años]	Altura total [m]			Biomasa 11 Mavic	Biomasa 11 PS MS	Biomasa 11 PS RGB	Biomasa 12 Mavic	Biomasa 12 PS MS	Biomasa 12 PS RGB
			CHM MAVIC RGB	CHM PS MS	CHM PS RGB	[kg/planta]	[kg/planta]	[kg/planta]	[kg/planta]	[kg/planta]	[kg/planta]
1	Amazon	6	6.76	7.09	7.74	555.21	573.13	607.43	442.04	454.89	478.82
2	Amazon	6	5.12	6.51	7.51	468.19	542.11	595.03	375.44	432.48	470.27
3	Amazon	6	5.34	6.14	8.92	479.95	522.58	670.28	384.91	417.95	520.62
4	Amazon	6	4.96	5.86	8.32	459.50	507.51	638.38	368.35	406.48	499.71
5	Amazon	6	4.84	5.41	9.13	453.36	483.69	681.16	363.27	387.89	527.62
6	Amazon	6	5.21	5.72	9.57	472.93	499.86	704.98	379.28	400.57	542.72
7	Amazon	6	7.27	6.70	7.32	582.44	551.89	585.05	461.48	439.63	463.31
8	Amazon	6	6.97	6.47	6.78	566.24	539.90	556.13	449.99	430.86	442.71
9	Amazon	6	5.51	5.53	7.39	489.08	489.76	588.83	392.15	392.68	465.95
10	Amazon	6	5.87	5.56	7.28	507.85	491.44	583.02	406.74	394.00	461.88
11	Amazon	6	5.94	5.77	8.75	511.54	502.83	661.23	409.57	402.87	514.75
12	Amazon	6	5.62	6.72	6.72	494.61	553.01	553.01	396.49	440.44	440.44
13	Amazon	6	4.99	5.25	8.71	460.94	474.81	658.87	369.53	380.79	513.20
14	Amazon	6	4.80	5.13	6.65	450.96	468.65	549.57	361.27	375.82	437.95
15	Amazon	6	4.20	4.43	5.57	419.01	431.63	492.09	333.90	344.90	394.51

Nota: La figura indica parte de los cálculos realizados con los diferentes CHM para obtener la biomasa por planta.

Para la estimación de la fijación de carbono (**Figura 37**), se utilizó la ecuación (13) a partir de los valores de biomasa de los tres modelos de altura, considerando un coeficiente de 0.47.

Figura 37

Cálculo de la fijación de carbono por planta.

Ecuación 11							
Punto GPS	Especie	Biomasa 1 Mavic [kg/planta]	Biomasa 2 PS MS [kg/planta]	Biomasa 3 PS RGB [kg/planta]	Fijación de Carbono 1 [kg/planta]	Fijación de Carbono 2 [kg/planta]	Fijación de Carbono 3 [kg/planta]
1	Amazon	555.21	573.13	607.43	956.81	987.69	1046.81
2	Amazon	468.19	542.11	595.03	806.84	934.23	1025.44
3	Amazon	479.95	522.58	670.28	827.12	900.59	1155.12
4	Amazon	459.50	507.51	638.38	791.87	874.61	1100.15
5	Amazon	453.36	483.69	681.16	781.29	833.56	1173.87
6	Amazon	472.93	499.86	704.98	815.01	861.42	1214.92
7	Amazon	582.44	551.89	585.05	1003.74	951.09	1008.24
8	Amazon	566.24	539.90	556.13	975.82	930.43	958.39
9	Amazon	489.08	489.76	588.83	842.85	844.02	1014.75
10	Amazon	507.85	491.44	583.02	875.19	846.91	1004.74
11	Amazon	511.54	502.83	661.23	881.55	866.54	1139.52
12	Amazon	494.61	553.01	553.01	852.38	953.01	953.01
13	Amazon	460.94	474.81	658.87	794.36	818.25	1135.44
14	Amazon	450.96	468.65	549.57	777.16	807.64	947.10
15	Amazon	419.01	431.63	492.09	722.10	743.85	848.03

Ecuación 12							
Punto GPS	Especie	Biomasa 1 Mavic [kg/planta]	Biomasa 2 PS MS [kg/planta]	Biomasa 3 PS RGB [kg/planta]	Fijación de Carbono 1 [kg/planta]	Fijación de Carbono 2 [kg/planta]	Fijación de Carbono 3 [kg/planta]
1	Amazon	442.04	454.89	478.82	761.79	783.93	825.16
2	Amazon	375.44	432.48	470.27	647.02	745.30	810.43
3	Amazon	384.91	417.95	520.62	663.34	720.26	897.20
4	Amazon	368.35	406.48	499.71	634.78	700.51	861.16
5	Amazon	363.27	387.89	527.62	626.03	668.46	909.26
6	Amazon	379.28	400.57	542.72	653.62	690.32	935.29
7	Amazon	461.48	439.63	463.31	795.28	757.63	798.43
8	Amazon	449.99	430.86	442.71	775.48	742.51	762.93
9	Amazon	392.15	392.68	465.95	675.80	676.73	802.99
10	Amazon	406.74	394.00	461.88	700.95	679.00	795.98
11	Amazon	409.57	402.87	514.75	705.82	694.29	887.08
12	Amazon	396.49	440.44	440.44	683.28	759.03	759.03
13	Amazon	369.53	380.79	513.20	636.83	656.23	884.42
14	Amazon	361.27	375.82	437.95	622.60	647.67	754.73
15	Amazon	333.90	344.90	394.51	575.42	594.37	679.88

Nota: La figura indica parte de los cálculos realizados para estimar la fijación de carbono.

Análisis estadístico

Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos se realizó para ordenar, visualizar y analizar la cantidad, calidad y distribución de los datos, se obtuvieron medidas de tendencia central, medidas de dispersión, diagramas de cajas y gráficas de los índices de vegetación calculados con el espectroradiómetro, índices de vegetación calculados a partir de los ortofotomosaicos y, biomasa obtenida con datos de campo y con datos del UAV. Estos análisis se realizaron mediante la herramienta “Explorar” del software SPSS Statistics.

Adicionalmente se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para poblaciones mayores de 60, para ratificar que los datos se distribuyan de forma normal utilizando la herramienta “Prueba K-S de una muestra”. La prueba de hipótesis en la que se basa Kolmogorov-Smirnov es:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ Los datos siguen una distribución normal} \\ H_1: & \text{ Los datos no siguen una distribución normal} \end{aligned}$$

Finalmente, se aplicó la prueba de homogeneidad de varianzas que, de igual manera, se basa en las pruebas de hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ Las varianzas son homogéneas} \\ H_1: & \text{ Las varianzas son heterogéneas} \end{aligned}$$

Análisis de la varianza ANOVA

Tras comprobar estadísticamente que los datos a analizar siguen una distribución normal y las varianzas son homogéneas, se aplicó la prueba ANOVA entre las plantas en etapa de antes y no antes para conocer si existe diferencia significativa entre los índices de

vegetación, tanto los calculados a partir de los datos del espectroradiómetro como para los calculados a partir de los ortofotomosaicos.

Para poder conocer si existía diferencia significativa entre la cuantificación de biomasa con datos de campo y la cuantificación de biomasa con datos del UAV, se aplicó el análisis de varianza bajo la prueba de Welch, ya que los datos no cumplieron el supuesto de homocedasticidad, pero sí de normalidad. Adicionalmente, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Games-Howell para determinar específicamente entre que métodos existía la diferencia, esta prueba se basa en las siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ No existe diferencia significativa entre los métodos} \\ H_1: & \text{ Existe diferencia significativa entre los métodos} \end{aligned}$$

Para todas las pruebas antes mencionadas y para las pruebas de hipótesis del ANOVA se plantearon tomando en cuenta el p -valor, con una significancia de 0.05 (nivel de confianza de 95%) lo que establece que se rechaza la hipótesis nula si el p -valor es menor o igual al nivel de significancia y si el p -valor es mayor o igual no se rechaza la hipótesis nula.

$$\begin{aligned} H_0 &= p \geq 0.05 \\ H_1 &= p < 0.05 \end{aligned}$$

Las hipótesis que se utilizaron para el análisis de la varianza fueron:

Detección de diferencias entre plantas en etapa de antesis y no antesis con el espectroradiómetro:

- H_0 : Los índices de vegetación calculados con el espectroradiómetro no permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis.
- H_1 : Los índices de vegetación calculados con el espectroradiómetro permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis.

Detección de diferencias entre plantas en etapa de antesis y no antesis con UAV:

- H_0 : Los índices de vegetación calculados con los ortofotomosaicos no permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis.
- H_1 : Los índices de vegetación calculados con los ortofotomosaicos permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis.

Cálculo de fijación de carbono:

- H_0 : La cantidad de biomasa cuantificada con datos de campo es igual a la cantidad de biomasa cuantificada con los modelos de altura del dosel obtenidos del UAV.
- H_1 : La cantidad de biomasa cuantificada con datos de campo es diferente a la cantidad de biomasa cuantificada con los modelos de altura del dosel obtenidos del UAV.

Análisis de concordancia y error

El análisis de concordancia y correlación se realizó para conocer el grado de concordancia entre la biomasa obtenida en campo con la biomasa obtenida de los modelos de altura de dosel mediante la aplicación de las dos ecuaciones.

Se aplicó el coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC) luego de haber realizado el análisis de la varianza y únicamente para los casos en los que no existía diferencia significativa, es decir, el CCC se utilizó para los métodos en los que el valor de significancia calculado con la prueba Games-Howell fue mayor a 0.05. Adicionalmente, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) entre el método de campo y los métodos del UAV, de igual manera, para las dos ecuaciones.

Capítulo IV

Resultados y discusión

Generación del ortofotomosaico RGB

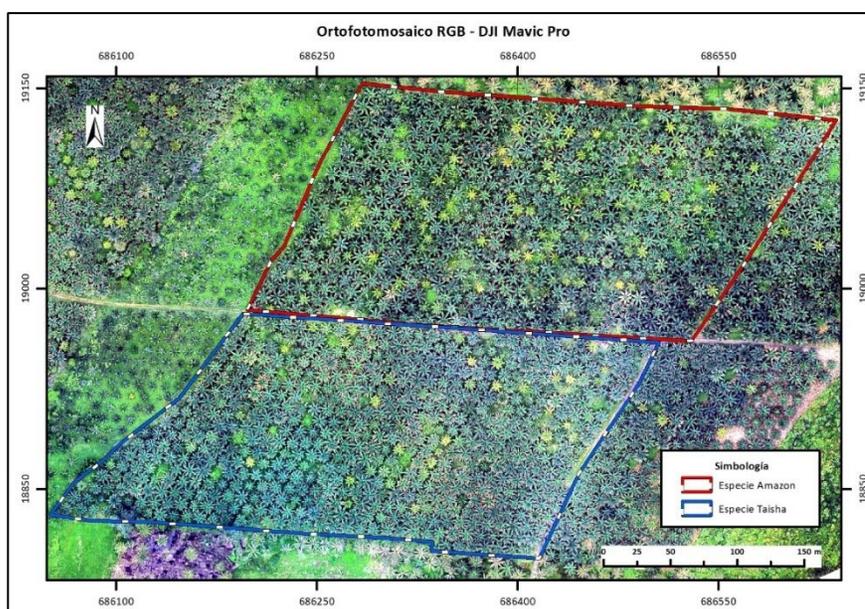
Se generó un ortofotomosaico RGB (**Figura 38**) del área de estudio, dividido en dos zonas. Una de las zonas abarcó las especies Amazon y Taisha y la otra abarcó la especie Coari. Estos ortofotomosaicos sirvieron como insumo para calcular el índice de vegetación VARI. En el anexo 7 se observa a mayor detalle el mapa del ortofotomosaico RGB.

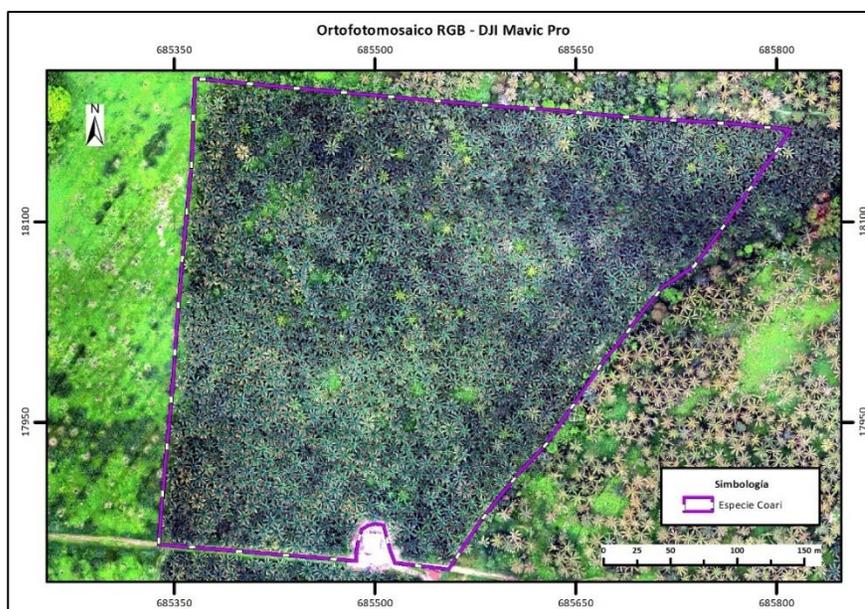
Generación de los ortofotomosaicos multiespectrales

Se generaron dos ortofotomosaicos multiespectrales (**Figura 39**) de las dos zonas antes descritas que sirvieron como insumo para calcular los restantes índices de vegetación. En el anexo 8 se observa a mayor detalle el mapa del ortofotomosaico multiespectral.

Figura 38

Ortofotomosaico RGB de las tres variedades.

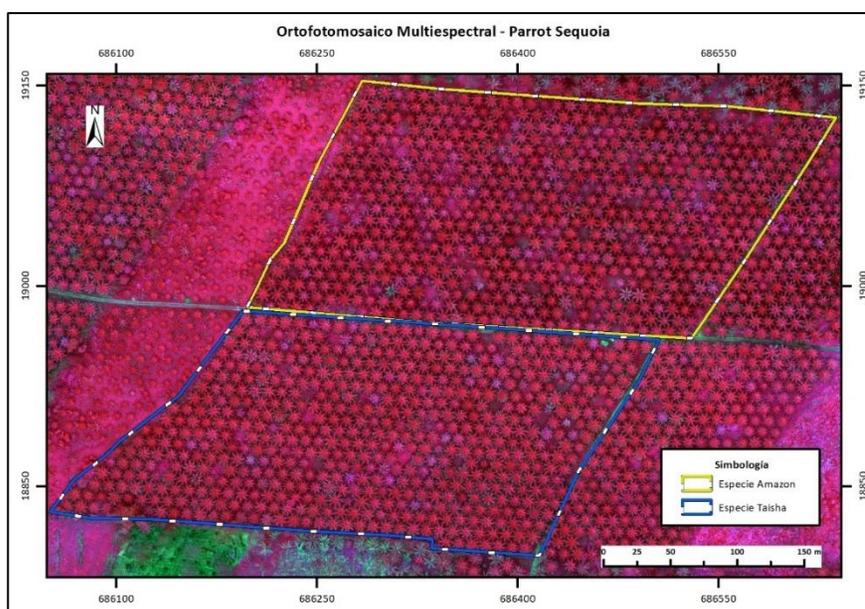


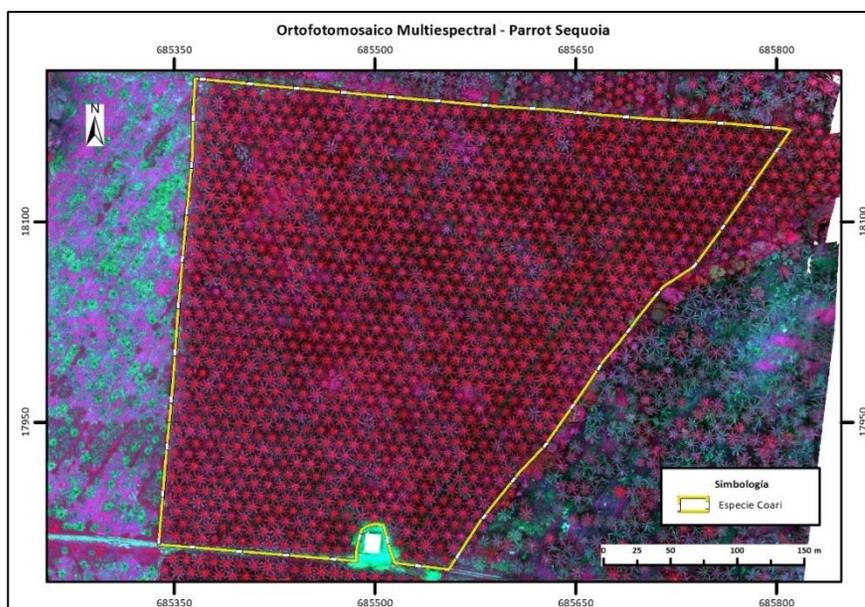


Nota: La figura indica los ortofotomosaicos RGB.

Figura 39

Ortofotomosaicos multiespectrales de las tres variedades.





Nota: La figura indica los dos ortofotomosaicos multiespectrales.

Generación de índices de vegetación con UAV

A partir de los ortofotomosaicos multiespectrales y el ortofotomosaico RGB se calcularon los índices descritos en la **Tabla 2** para las dos zonas. Para este análisis, la planta número 66 fue eliminada debido a que se encontró fuera del área de estudio de cobertura del UAV. En la **Figura 40** se indica parte de la base de datos en la que se recopiló los valores de los índices de vegetación calculados según las plantas muestreadas en campo.

Figura 40

Índices de vegetación calculados a partir del UAV.

Especie	Punto GPS	Índices de Vegetación									
		NDVI	VARI	GRVI	MSRRE	MCARI2	MTVI	RECI	RESAVI	REDVI	RERDVI
Taisha	17	0.6837	0.1962	4.0615	0.3253	0.8201	0.8422	0.5170	0.2009	0.1959	0.1998
Taisha	18	0.7077	0.1262	4.9525	0.5002	0.8315	0.8441	0.8450	0.2852	0.2677	0.2811
Taisha	19	0.6497	0.1335	3.9952	0.3751	0.7992	0.7953	0.6062	0.2210	0.2053	0.2175
Taisha	20	0.7007	0.1231	4.7755	0.4142	0.8042	0.7931	0.6790	0.2407	0.2221	0.2364
Taisha	21	0.6741	0.0791	4.6302	0.4543	0.8140	0.8010	0.7553	0.2592	0.2380	0.2544
Taisha	22	0.7056	0.1331	4.8718	0.4227	0.8101	0.8055	0.6948	0.2455	0.2280	0.2415
Taisha	23	0.7955	0.2265	6.3220	0.4730	0.8199	0.8113	0.7915	0.2687	0.2472	0.2638
Taisha	24	0.7223	0.1441	5.1415	0.4006	0.7985	0.7880	0.6531	0.2340	0.2157	0.2298
Taisha	25	0.7667	0.2361	5.3534	0.4489	0.8278	0.8336	0.7446	0.2605	0.2450	0.2570
Taisha	26	0.6914	0.1560	4.4919	0.3733	0.8320	0.8554	0.6030	0.2267	0.2213	0.2256
Taisha	27	0.7422	0.1904	5.2130	0.3744	0.8462	0.8967	0.6047	0.2311	0.2322	0.2315
Taisha	28	0.7607	0.1638	5.8360	0.3430	0.8131	0.8390	0.5485	0.2091	0.2021	0.2076
Taisha	29	0.7380	0.1718	5.3037	0.3832	0.8221	0.8449	0.6210	0.2307	0.2230	0.2291
Taisha	30	0.7557	0.1710	5.6266	0.3828	0.8271	0.8538	0.6207	0.2312	0.2246	0.2298
Taisha	31	0.7246	0.2076	4.7601	0.4142	0.8042	0.8067	0.6787	0.2412	0.2235	0.2372
Taisha	32	0.7361	0.1446	5.4260	0.4460	0.7868	0.7759	0.7418	0.2518	0.2272	0.2463
Taisha	33	0.7442	0.1792	5.3926	0.5089	0.8199	0.8124	0.8627	0.2842	0.2596	0.2786
Taisha	35	0.8001	0.2609	6.1849	0.4195	0.7855	0.7625	0.6901	0.2391	0.2150	0.2336
Taisha	36	0.7392	0.1922	5.2046	0.4196	0.7866	0.7723	0.6891	0.2404	0.2178	0.2353

Nota: La figura indica parte de la base de datos de los índices de vegetación calculados a partir de los ortofotomosaicos UAV.

Análisis estadístico de los índices de vegetación con UAV

Análisis exploratorio de datos

Se realizó el análisis exploratorio de datos para los índices calculados a partir de los ortofotomosaicos del UAV, la **Tabla 10** resume los estadísticos descriptivos de los índices.

Tabla 10

Resumen de las estadísticas de los índices calculados a partir del UAV.

Índice	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Varianza
NDVI	0.893	0.860	0.910	0.007	0.001
VARI	0.286	0.180	0.450	0.058	0.003
GRVI	8.764	6.320	10.190	0.738	0.545
MSRRE	0.427	0.310	0.510	0.044	0.002
MCARI2	0.812	0.710	0.850	0.023	0.001
MTVI	0.801	0.660	0.900	0.044	0.002
RECI	0.704	0.490	0.860	0.083	0.007
RESAVI	0.246	0.180	0.290	0.021	0.0004

Índice	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Varianza
REDVI	0.226	0.150	0.270	0.021	0.0004
RERDVI	0.241	0.170	0.280	0.021	0.0004

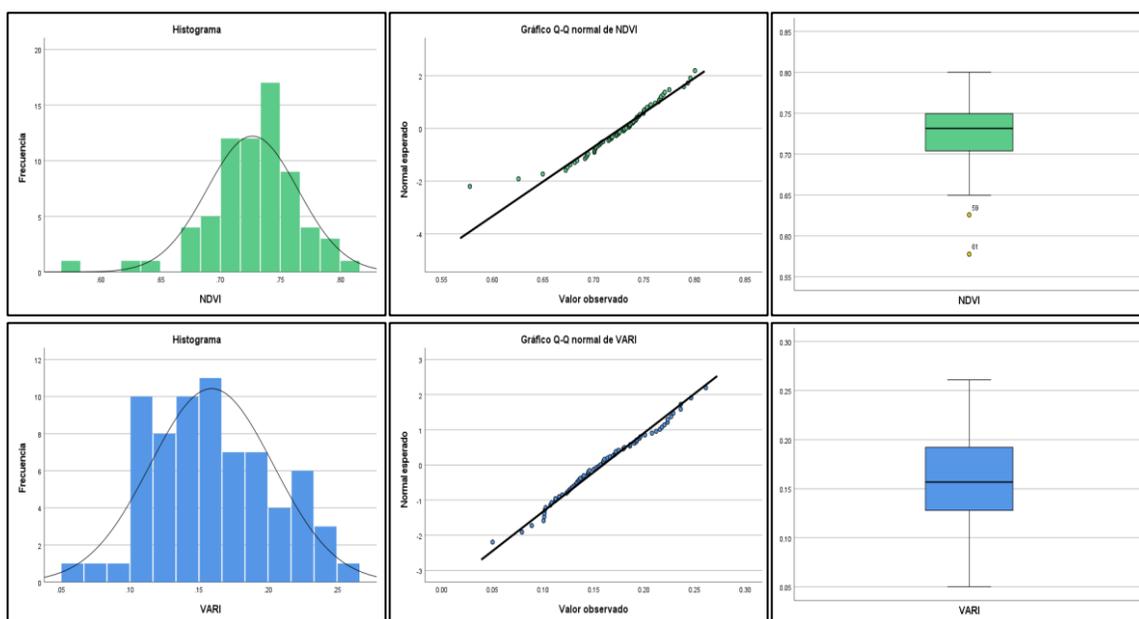
Nota: La tabla indica la media y la desviación estándar de cada índice de las plantas en etapa de antesis y no antesis.

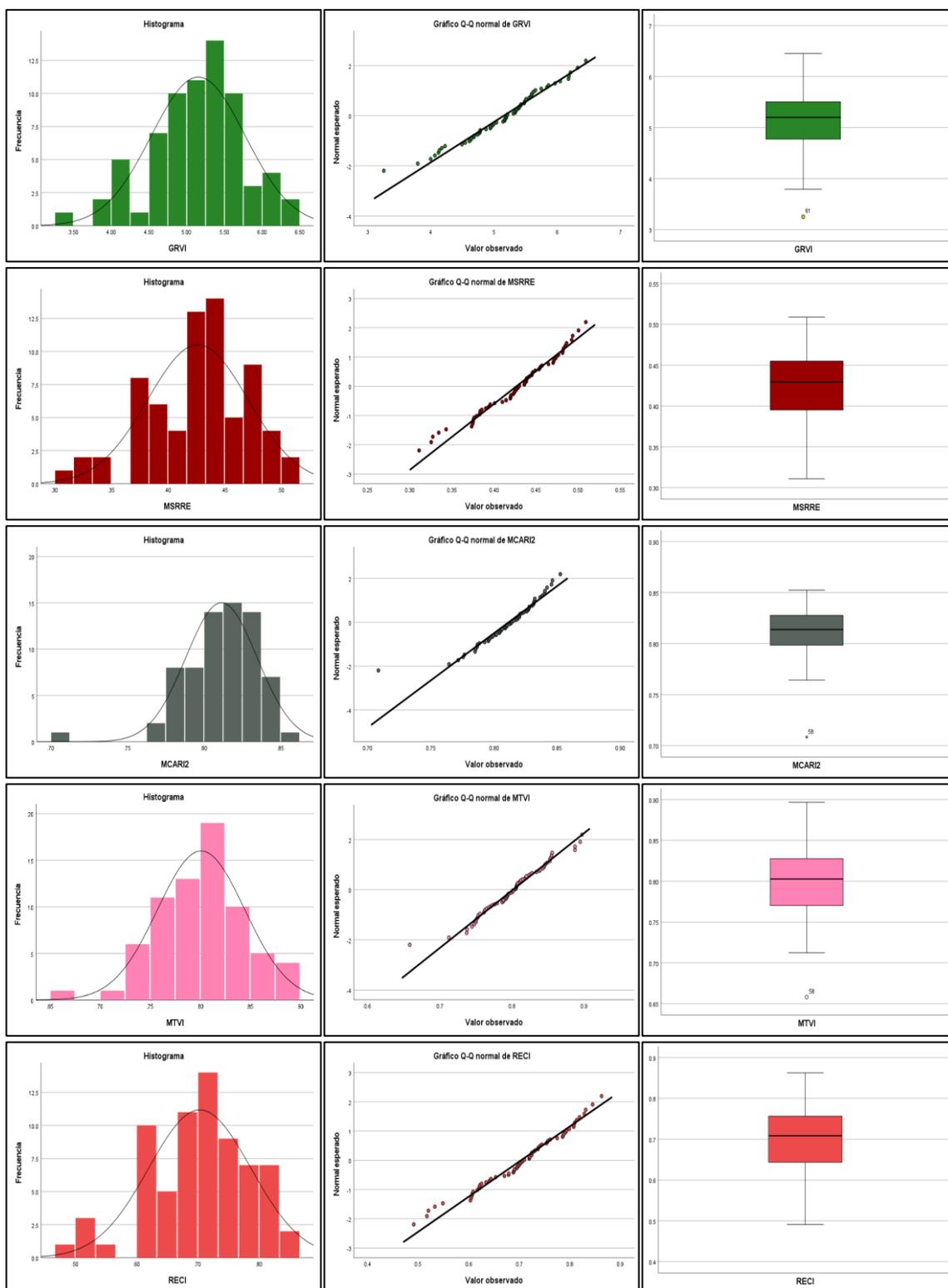
En la **Tabla 10**, se observa que el índice GRVI presenta un alto valor de la desviación estándar, es decir, los valores se encuentran bastante dispersos respecto a la media.

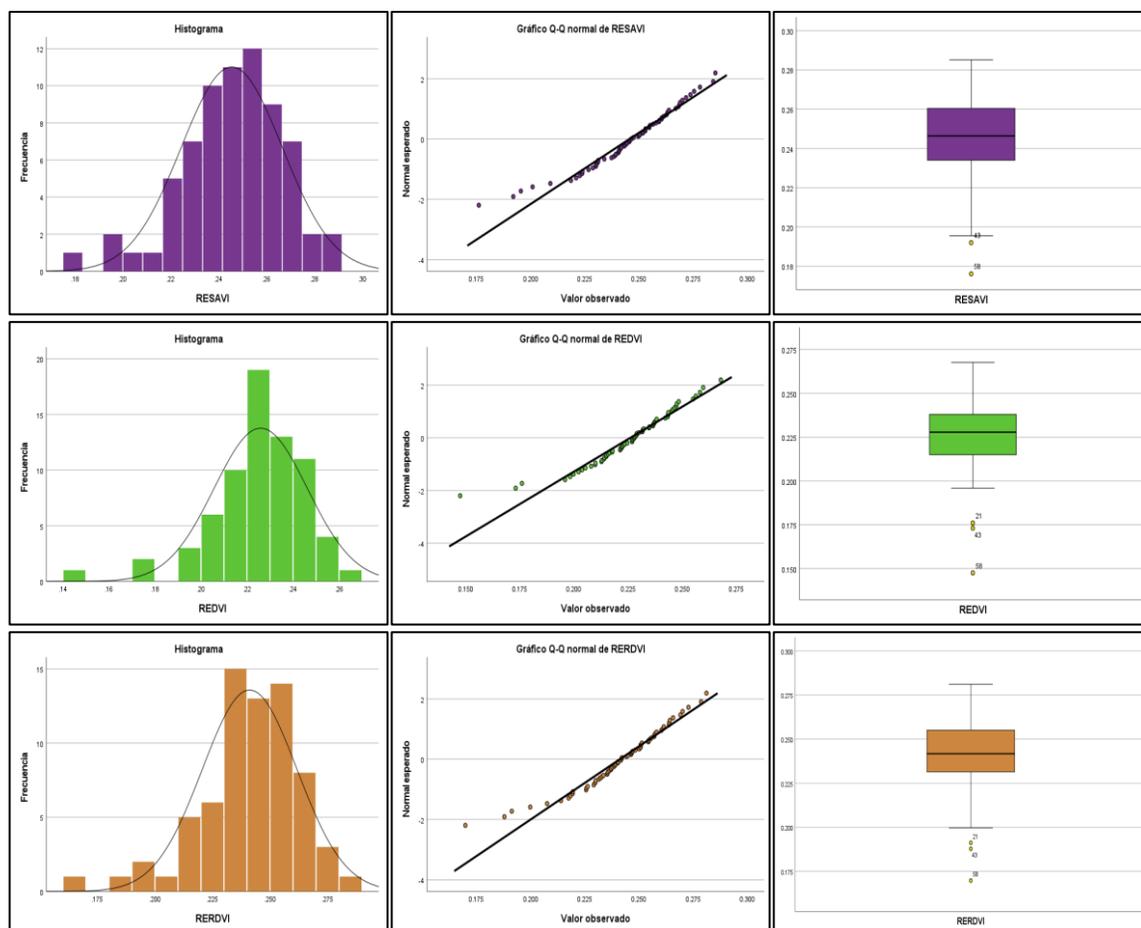
Los histogramas y gráficos Q-Q (**Figura 41**), demuestran que los conjuntos de datos de los índices siguen una distribución normal, requisito importante para realizar una prueba ANOVA, esto se confirma mediante la prueba K-S (**Tabla 11**), en la que el p-valor es mayor o igual a 0.05.

Figura 41

Histogramas de los cinco índices calculados a partir del UAV.







Nota: La figura indica los gráficos estadísticos realizados para cada índice de vegetación.

Tabla 11

Prueba de normalidad de datos K-S para índices a partir del UAV

	Estadístico	gl	Sig.
NDVI	0.076	70	0.200
VARI	0.060	70	0.200
GRVI	0.094	70	0.200
MSRRE	0.106	70	0.050
MCARI2	0.077	70	0.200
MTVI	0.067	70	0.200
RECI	0.097	70	0.099
RESAVI	0.096	70	0.184

	Estadístico	gl	Sig.
REDVI	0.095	70	0.196
RERDVI	0.093	70	0.200

Nota: La tabla indica la prueba K-S con los p-valor (Sig.) para cada conjunto de datos.

Además, los diagramas de caja (**Figura 39**) indican la presencia de valores atípicos en cinco plantas, estos valores atípicos se consideran resultado de un error en la generación de los ortofotomosaicos y no fueron eliminados del estudio debido a que no influyeron en los resultados finales.

Finalmente, se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas (**Tabla 12**), en la que el p-valor es mayor a 0.05, lo que confirma que todos los índices cumplen el requisito de homocedasticidad para aplicar el análisis de varianza.

Tabla 12

Prueba de homogeneidad de varianzas – índices a partir del UAV.

Índice	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
NDVI	1.396	1	68	0.242
VARI	0.896	1	68	0.347
GRVI	2.412	1	68	0.125
MSRRE	1.082	1	68	0.302
MCARI2	1.398	1	68	0.241
MTVI	0.213	1	68	0.646
RECI	0.883	1	68	0.351
RESAVI	1.236	1	68	0.270
REDVI	1.427	1	68	0.236
RERDVI	1.197	1	68	0.278

Nota: La tabla indica la prueba de homogeneidad de varianzas indicando el p-valor (Sig.).

Prueba ANOVA para los índices de vegetación obtenidos a partir del UAV.

Se planteó el análisis de la varianza para cada índice de vegetación tomando como tratamiento a cada etapa, es decir, palmas en etapa de antesis y palmas en etapa de no antesis. Adicionalmente, se realizó el análisis con los mismos tratamientos, pero por cada especie, los resultados se indican en la **Tabla 13**.

Tabla 13

P-valor obtenidos de la prueba ANOVA para índices a partir del UAV.

Índice	Palmas en general	Amazon	Taisha	Coari
NDVI	0.127	0.361	0.360	0.391
VARI	0.232	0.683	0.640	0.075
GRVI	0.289	0.175	0.425	0.884
MSRRE	0.085	0.107	0.247	0.452
MCARI2	0.089	0.488	0.176	0.325
MTVI	0.154	0.508	0.352	0.462
RECI	0.087	0.107	0.250	0.461
RESAVI	0.039	0.120	0.180	0.372
REDVI	0.019	0.163	0.113	0.354
RERDVI	0.031	0.126	0.157	0.366

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de los índices en el que se observa el p-valor.

El índice REDVI fue el que menor p-valor (0.019) presentó en el análisis ANOVA, razón por la que fue escogido para generar los intervalos de confianza, es decir, si el valor de REDVI de una planta se encuentra entre [0.216 – 0.228] se puede decir que se encuentra en etapa de antesis, pero si se encuentra entre (0.228 – 0.240] se puede considerar en etapa de no antesis al 95% de confianza.

Captura de datos con el espectroradiómetro

Se capturaron tres firmas espectrales por cada planta dando un total de 213 firmas, 141 de palmas en etapa de antesis y 72 de palmas en etapa de no antesis, de estas tres firmas espectrales de cada planta, se realizó el promedio de los valores de longitud de onda.

Generación de índices de vegetación con el espectroradiómetro.

Se calcularon diez índices de vegetación (**Figura 42**): NDVI, VARI, GRVI, MSRRE, MCARI2, MTVI, RECI, RESAVI, REDVI y RERDVI, las ecuaciones utilizadas se describen en la **Tabla 2**.

Figura 42

Cálculo de los índices de vegetación a partir del espectroradiómetro.

Especie	Punto GPS	Índices de Vegetación									
		NDVI	VARI	GRVI	MSRRE	MCARI2	MTVI	RECI	RESAVI	REDVI	RERDVI
Taisha	17	0.6837	0.1962	4.0615	0.4951	0.5635	0.6528	0.8334	0.2716	0.2354	0.2631
Taisha	18	0.7077	0.1262	4.9525	0.6311	0.5590	0.6311	1.1137	0.3217	0.2678	0.3095
Taisha	19	0.6497	0.1335	3.9952	0.5295	0.5591	0.7053	0.9021	0.3000	0.2803	0.2952
Taisha	20	0.7007	0.1231	4.7755	0.5648	0.5362	0.5928	0.9741	0.2901	0.2361	0.2781
Taisha	21	0.6741	0.0791	4.6302	0.5715	0.5185	0.5945	0.9878	0.2974	0.2477	0.2861
Taisha	22	0.7056	0.1331	4.8718	0.5931	0.5474	0.6093	1.0328	0.3035	0.2492	0.2913
Taisha	23	0.7955	0.2265	6.3220	0.6444	0.6677	0.7172	1.1423	0.3326	0.2843	0.3215
Taisha	24	0.7223	0.1441	5.1415	0.6229	0.5753	0.6443	1.0960	0.3195	0.2675	0.3077
Taisha	25	0.7667	0.2361	5.3534	0.6049	0.5568	0.5490	1.0577	0.2853	0.2113	0.2704
Taisha	26	0.6914	0.1560	4.4919	0.5769	0.5276	0.5831	0.9990	0.2924	0.2350	0.2798
Taisha	27	0.7422	0.1904	5.2130	0.6346	0.5546	0.5756	1.1212	0.3054	0.2349	0.2905
Taisha	28	0.7607	0.1638	5.8360	0.6529	0.5243	0.5120	1.1608	0.2950	0.2117	0.2788
Taisha	29	0.7380	0.1718	5.3037	0.6471	0.5229	0.5300	1.1482	0.2997	0.2210	0.2839
Taisha	30	0.7557	0.1710	5.6266	0.6108	0.6288	0.7055	1.0703	0.3225	0.2806	0.3127
Taisha	31	0.7246	0.2076	4.7601	0.5733	0.5570	0.5962	0.9916	0.2891	0.2303	0.2763
Taisha	32	0.7361	0.1446	5.4260	0.6313	0.5990	0.6755	1.1140	0.3274	0.2799	0.3165
Taisha	33	0.7442	0.1792	5.3926	0.6291	0.6342	0.7376	1.1092	0.3360	0.3009	0.3276
Taisha	35	0.8001	0.2609	6.1849	0.5853	0.6272	0.6267	1.0165	0.2931	0.2325	0.2799
Taisha	36	0.7392	0.1922	5.2046	0.6293	0.5582	0.5861	1.1097	0.3065	0.2390	0.2920

Nota: La figura indica parte de los valores de los índices calculados para cada planta.

Análisis estadístico de los índices de vegetación con el espectroradiómetro

Análisis exploratorio de datos

Se realizó el análisis exploratorio de datos para todos los índices calculados con los datos espectrales del espectroradiómetro de mano, la **Tabla 14** resume los estadísticos descriptivos de los índices.

Tabla 14

Resumen de las estadísticas de los índices calculados con el espectroradiómetro.

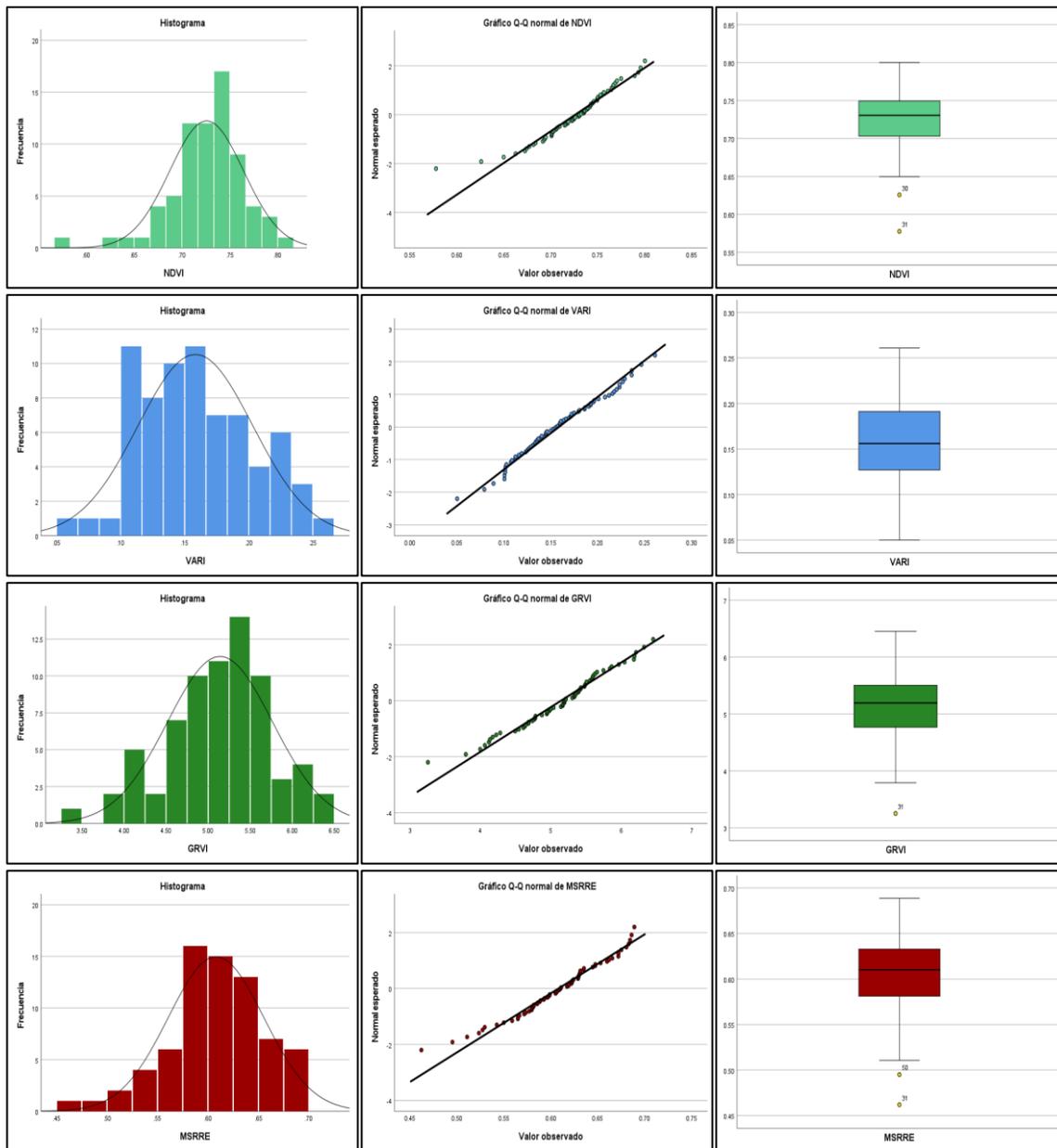
Índice	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Varianza
NDVI	0.726	0.580	0.800	0.039	0.001
VARI	0.158	0.050	0.260	0.045	0.002
GRVI	5.141	3.250	6.450	0.626	0.392
MSRRE	0.608	0.460	0.690	0.047	0.002
MCARIZ	0.555	0.410	0.690	0.063	0.004
MTVI	0.601	0.450	0.790	0.092	0.009
RECI	1.066	0.770	1.240	0.099	0.010
RESAVI	0.303	0.240	0.360	0.027	0.001
REDVI	0.244	0.170	0.320	0.038	0.001
RERDVI	0.290	0.230	0.350	0.028	0.001

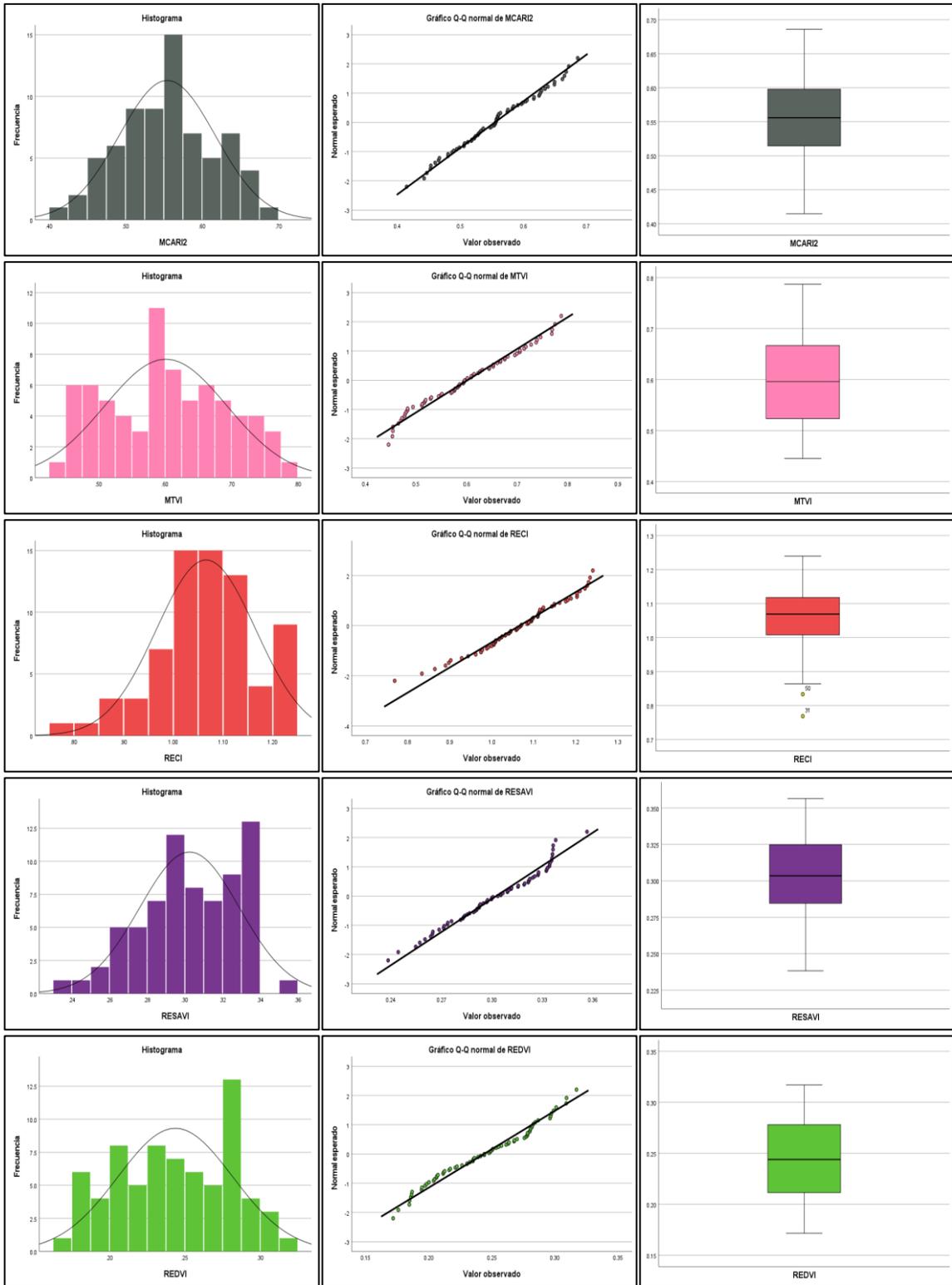
Nota: La tabla indica la media, el valor mínimo y máximo, la desviación estándar y la varianza de cada índice calculado.

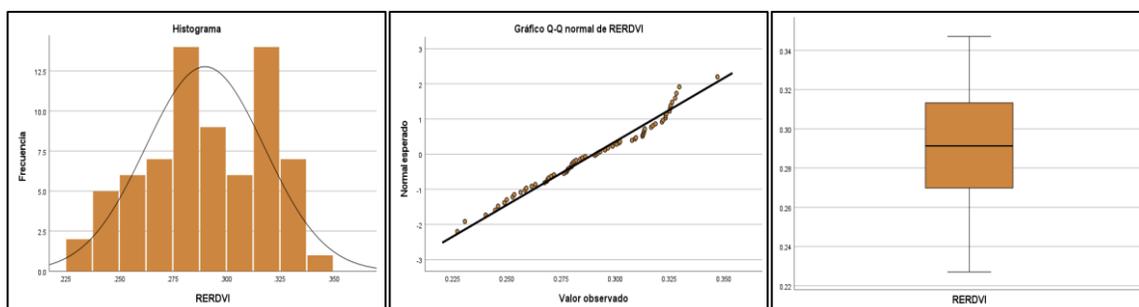
Los histogramas y gráficos Q-Q (**Figura 43**), demuestran que los conjuntos de datos de cada índice siguen una distribución normal, requisito importante para realizar una prueba ANOVA, esto se confirma mediante la prueba K-S (**Tabla 15**), en la que el p-valor es mayor a 0.05.

Figura 43

Histogramas de los índices calculados con datos del espectroradiómetro.







Nota: La figura indica los gráficos estadísticos realizados para cada índice de vegetación.

Tabla 15

Prueba de normalidad de datos K-S para índices a partir del espectroradiómetro.

Índice	Estadístico	gl	Sig.
NDVI	0.074	71	0.200
VARI	0.061	71	0.200
GRVI	0.094	71	0.198
MSRRE	0.062	71	0.200
MCARI2	0.080	71	0.200
MTVI	0.069	71	0.200
RECI	0.061	71	0.200
RESAVI	0.088	71	0.200
REDVI	0.096	71	0.177
RERDVI	0.101	71	0.071

Nota: La tabla indica la prueba K-S con los p-valor (Sig.) para cada índice de vegetación.

Además, los diagramas de caja (**Figura 43**) indican la presencia de valores atípicos en tres plantas, según Hawkins (1980) el efecto que generan los valores atípicos dentro de un análisis de conjuntos de datos depende del mecanismo por el cual se cree que se generan, si se asume que el mecanismo es la obtención de datos, entonces los valores atípicos son observaciones válidas, por lo tanto, los valores atípicos en este estudio se consideraron

resultado de un error en el manejo del equipo, por lo tanto, no fueron eliminados, además, al realizar el análisis eliminando esos valores, los resultados finales fueron los mismos.

Finalmente, se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas (**Tabla 16**), en la que el p-valor es mayor a 0.05 para todos los índices, confirmando el requisito de homocedasticidad para aplicar el análisis de varianza.

Tabla 16

Prueba de homogeneidad de varianzas – índices a partir del espectroradiómetro.

Índice	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
NDVI	0.578	1	69	0.450
VARI	0.673	1	69	0.415
GRVI	1.532	1	69	0.220
MSRRE	1.568	1	69	0.215
MCARI2	0.005	1	69	0.943
MTVI	0.005	1	69	0.941
RECI	1.441	1	69	0.234
RESAVI	0.261	1	69	0.611
REDVI	0.061	1	69	0.806
RERDVI	0.221	1	69	0.640

Nota: La tabla indica la prueba de homogeneidad de varianzas indicando el p-valor (Sig.).

Prueba ANOVA para índices de vegetación obtenidos a partir del espectroradiómetro

Se planteó el análisis de la varianza para cada índice de vegetación tomando como factor o tratamiento a cada etapa, es decir, palmas en etapa de antesis y palmas en etapa de no antesis. Adicionalmente, se realizó el análisis con los mismos tratamientos, pero por cada especie, los resultados se indican en la **Tabla 17**.

Tabla 17

P-valor obtenidos de la prueba ANOVA para índices a partir del espectroradiómetro.

Índice	Palmas en general	Amazon	Taisha	Coari
NDVI	0.228	0.801	0.360	0.391
VARI	0.340	0.457	0.640	0.075
GRVI	0.420	0.406	0.425	0.884
MSRRE	0.273	0.398	0.627	0.487
MCARI2	0.227	0.671	0.559	0.598
MTVI	0.363	0.535	0.905	0.916
RECI	0.284	0.391	0.637	0.501
RESAVI	0.218	0.261	0.690	0.713
REDVI	0.324	0.278	0.927	0.951
RERDVI	0.235	0.254	0.756	0.746

Nota: La tabla muestra el análisis de varianza de los índices en el que se observa el p-valor (Sig.).

Discusión sobre la detección de antesis con métodos espectrales

En la literatura actual no existen estudios en palma aceitera u otros cultivos que utilicen índices de vegetación para diferenciar la etapa de antesis y no antesis, sin embargo, existen estudios específicos para palma aceitera que se centran en utilizar los índices de vegetación para detectar las enfermedades en etapa temprana, como por ejemplo el estudio realizado por Shafri & Hamdan (2009) en el que utiliza el cálculo de los índices de vegetación a partir de una imagen hiperespectral con el fin de determinar la enfermedad de la ganoderma obteniendo como resultado que el índice NDVI proporciona un 78% de precisión para la detección de la enfermedad. Izzuddin et al. (2018) emplea de igual manera, imágenes hiperespectrales para calcular varios índices de vegetación con el fin de realizar la detección temprana de la pudrición basal del tallo en palma aceitera generado por ganoderma, sin embargo, el índice NDVI presenta la menor precisión con un porcentaje del 33.3%.

Como resultado de los análisis de varianza de los índices calculados con el espectroradiómetro, a un nivel de confianza del 95%, según los p-valor de la **Tabla 17**, ningún índice de vegetación demuestra diferencia estadísticamente significativa entre palmas en etapa de antesis y no antesis en ningún tratamiento, es decir, los p-valor son mayores a 0.05 para todos los casos por lo que se conserva la hipótesis nula: “H₀: Los índices de vegetación calculados con el espectroradiómetro no permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis”. Al realizar el ANOVA por especies, el índice VARI generó un p-valor de 0.075 para la especie Coari siendo el índice que más cerca estuvo de presentar diferencia entre etapas. Esto podría deberse a los rangos considerados para promediar la longitud de onda, o por el bajo número de datos espectrales tomados por planta, es decir, se deberían tomar los datos de más de una hoja, seleccionados en toda la palma.

Como resultado del análisis de varianza de los índices de vegetación calculados a partir de la cámara multispectral Parrot Sequoia montada en el UAV, según los p-valor de la **Tabla 13** obtenidos de la prueba ANOVA, los índices RESAVI, REDVI y RERDVI muestran significancia estadística (p-valor < 0.05) al 95% de confianza, por lo que se rechaza la hipótesis nula: “H₀: Los índices de vegetación calculados con los ortofotomosaicos no permiten diferenciar entre plantas de palma aceitera en etapa de antesis y no antesis”, adicionalmente, los índices MSRRE, MCARI2 y RECI, estuvieron cerca de cumplir con la hipótesis planteada.

Al realizar el análisis por especies, ningún índice presentó diferencias estadísticamente significativas, salvo el VARI, que como en el caso de los índices calculados con el espectroradiómetro, para el análisis por especies, estuvo cerca de presentar diferencias para la especie Coari, a diferencia del estudio realizado por Viera Torres et al. (2020) en el que se concentra en detectar de forma temprana la enfermedad del anillo rojo y la pudrición del cogollo en cultivos de palma aceitera en el Ecuador utilizando índices de vegetación calculados a

partir de imágenes RGB y multiespectrales obtenidas con UAV de bajo costo, concluyendo que el índice VARI basado en la región óptica del espectro, presentó los mejores resultados.

Cálculo de biomasa aérea y fijación de carbono

Biomasa aérea y fijación de carbono a partir de datos en campo

Se utilizó la ecuación alométrica (11) desarrollada por Khalid et al. (1999) a partir de datos de biomasa de palmas de aproximadamente 23 años, la ecuación correlaciona el peso fresco de biomasa con la altura total de la palma por lo que se utiliza el coeficiente de 0.27, derivado del mismo estudio, para transformar de peso fresco a peso seco. Adicionalmente, se utilizó la ecuación alométrica (12) desarrollada por Manrique De Lara & Ronald (2014) en la que a más de la variable altura, incluye la variable de la edad de la palma.

En la **Tabla 18** se presenta el promedio de los resultados del cálculo de biomasa y fijación de carbono en kilogramos por planta y en toneladas por hectárea. Para elevar a estas unidades, se consideró una densidad de 114 plantas por hectárea, valor calculado a partir del ortofotomosaico.

Tabla 18

Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono con datos de campo.

Especie	Biomasa aérea		Fijación de carbono	
	[kg/planta]	[ton/ha]	[kg/planta]	[ton/ha]
Ecuación 11				
Amazon	574.915	65.540	990.771	112.948
Taisha	591.001	67.374	1018.491	116.108
Coari	570.609	65.049	983.349	112.102
General	578.842	65.988	997.537	113.719
Ecuación 12				

Especie	Biomasa aérea		Fijación de carbono	
	[kg/planta]	[ton/ha]	[kg/planta]	[ton/ha]
Amazon	453.674	51.719	781.832	89.129
Taisha	464.371	52.938	800.266	91.230
Coari	450.778	51.389	776.841	88.560
General	456.274	52.015	786.313	89.640

Nota: La tabla indica los valores promedio de biomasa y fijación de carbono obtenidos.

Biomasa y fijación de carbono a partir de los datos del UAV.

Obtención de la altura a partir del UAV.

La obtención de los datos de altura (**Figura 44**) de cada planta se obtuvo a partir de los tres modelos de altura del dosel (**Figura 45**) generados con los UAV.

Figura 44

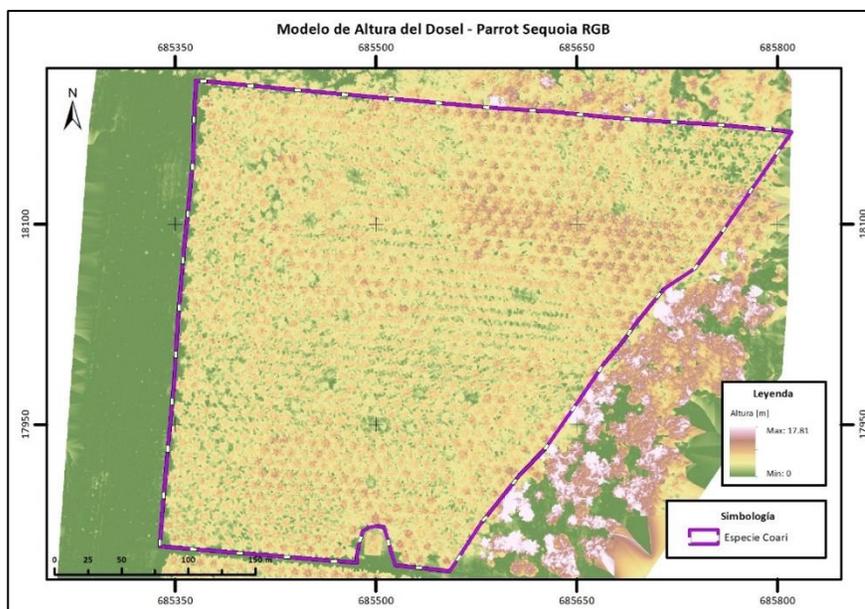
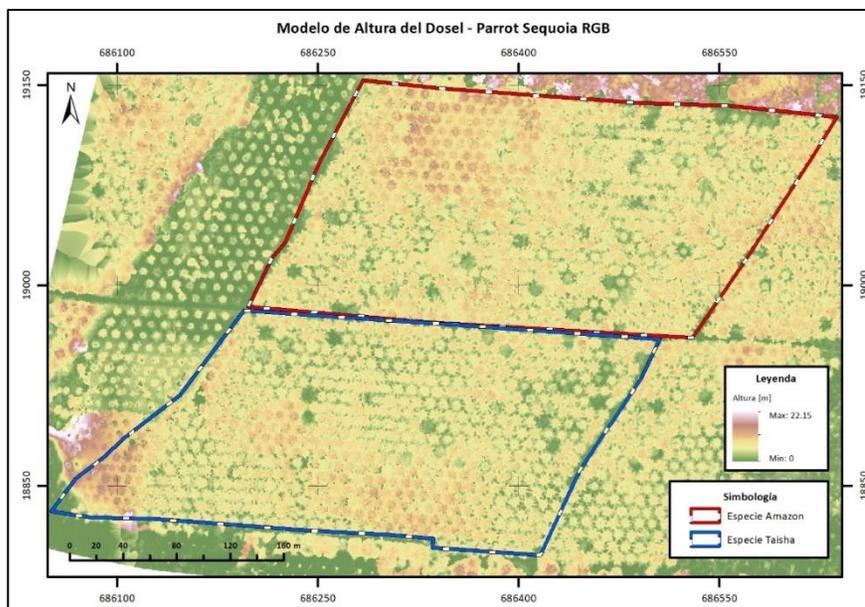
Altura obtenida a partir de los tres diferentes CHM.

Planta	Especie	Altura total [m] Campo	Altura total [m] CHM MAVIC RGB	Altura total [m] CHM PS MS	Altura total [m] CHM PS RGB
1	Amazon	6.60	6.76	7.09	7.77
2	Amazon	5.16	5.12	6.51	7.51
3	Amazon	5.27	5.34	6.14	8.88
4	Amazon	6.98	4.96	5.86	8.33
5	Amazon	6.35	4.84	5.41	9.12
6	Amazon	6.44	5.21	5.72	9.56
7	Amazon	8.74	7.27	6.70	7.32
8	Amazon	9.92	6.97	6.47	6.78
9	Amazon	9.65	5.51	5.53	7.40
10	Amazon	9.16	5.87	5.56	7.30
11	Amazon	4.64	5.94	5.77	8.76
12	Amazon	7.38	5.62	6.72	6.72
13	Amazon	7.71	4.99	5.25	8.68
14*	Amazon	6.42	4.80	5.13	6.66
15	Amazon	4.64	4.20	4.43	5.63

Nota: La figura indica la altura de las plantas obtenidas a partir de los tres diferentes CHM.

Figura 45

Modelo de altura del dosel – UAV DJI Phantom IV, Cámara Parrot Sequoia RGB.



Nota: La figura indica el modelo de altura del dosel.

A partir de la ecuación (11) y la ecuación (12) se calculó la biomasa utilizando la altura de las palmas de los tres modelos de altura de dosel, así también, con la ecuación (13) se estimó la fijación de carbono.

En la **Tabla 19** se presenta el promedio de los resultados del cálculo de biomasa con la ecuación (11) y fijación de carbono en kilogramos por planta y en toneladas por hectárea de los tres modelos por cada especie. En la **Tabla 20** se presenta los resultados del cálculo de biomasa con la ecuación (12) y fijación de carbono.

Tabla 19

Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono – Ecuación 11 UAV.

Especie	Biomasa		Fijación de Carbono	
	[kg/planta]	[ton/ha]	[kg/planta]	[ton/ha]
CHM – RGB Mavic Pro				
Amazon	492.194	56.110	848.214	96.696
Taisha	446.028	50.847	768.654	87.627
Coari	478.404	54.538	824.450	93.987
General	472.209	53.832	813.773	92.770
CHM – Multispectral Parrot Sequoia				
Amazon	509.867	58.125	878.672	100.169
Taisha	468.292	53.385	807.023	92.001
Coari	480.076	54.729	827.330	94.316
General	486.078	55.413	837.675	95.495
CHM – RGB Parrot Sequoia				
Amazon	590.402	67.306	1017.459	115.990
Taisha	535.503	61.047	922.849	105.205
Coari	514.098	58.607	885.962	101.000
General	546.667	62.320	942.090	107.398

Nota: La tabla indica los valores promedio de biomasa y fijación de carbono obtenidos.

Tabla 20

Resultados del promedio de biomasa y fijación de carbono – Ecuación 12 UAV.

Especie	Biomasa		Fijación de Carbono	
	[kg/planta]	[ton/ha]	[kg/planta]	[ton/ha]
CHM – RGB Mavic Pro				
Amazon	393.764	44.889	678.587	77.359
Taisha	355.795	40.561	613.153	69.899
Coari	382.718	43.630	659.551	75.189
General	377.426	43.027	650.430	74.149
CHM – Multispectral Parrot Sequoia				
Amazon	407.706	46.478	702.613	80.098
Taisha	374.903	42.739	646.082	73.653
Coari	382.512	43.606	659.196	75.148
General	388.374	44.275	669.297	76.300
CHM – RGB Parrot Sequoia				
Amazon	465.701	53.090	802.558	91.492
Taisha	426.041	48.569	734.210	83.700
Coari	410.954	46.849	708.211	80.736
General	434.232	49.502	748.326	85.309

Nota: La tabla indica los valores promedio de biomasa y fijación de carbono obtenidos.

Análisis estadístico de los valores de biomasa obtenidos en campo y con UAV.

Análisis exploratorio de datos

Se realizó el análisis exploratorio de datos para la biomasa [kg/planta] cuantificada con los datos de campo y de la biomasa obtenida por los tres modelos de altura del dosel, aplicando las dos ecuaciones. La **Tabla 21** resume los estadísticos descriptivos.

Tabla 21

Resumen de las estadísticas de biomasa de los cuatro métodos de obtención.

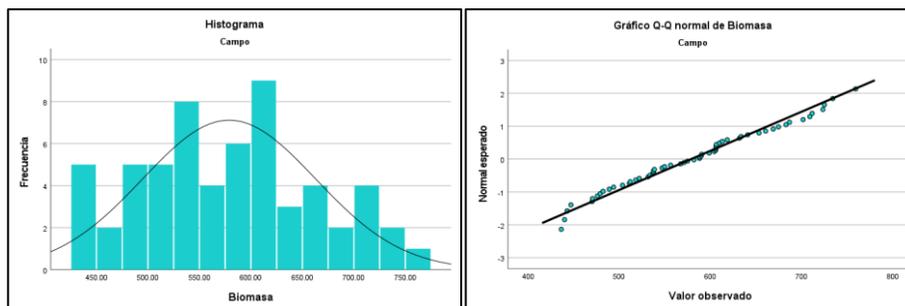
Método	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Ecuación 11				
Campo	578.845	436.320	759.440	84.131
Mavic Pro	472.209	364.650	583.360	46.279
Parrot S. MS	486.079	376.300	624.370	50.541
Parrot S. RGB	546.667	434.190	704.980	61.935
Ecuación 12				
Campo	456.274	348.920	576.190	59.575
Mavic Pro	377.426	283.290	462.120	37.456
Parrot S. MS	388.374	294.640	490.330	39.936
Parrot S. RGB	434.232	347.100	542.720	44.980

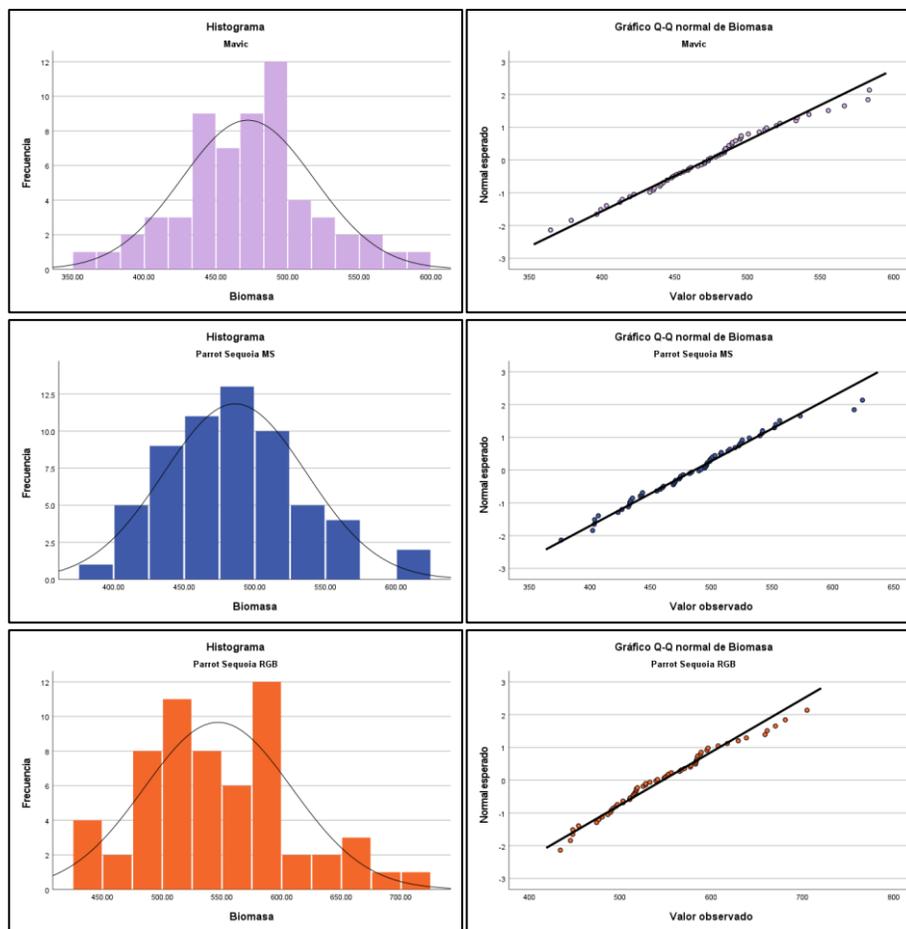
Nota: La tabla indica las estadísticas descriptivas principales de cada método de obtención.

Los histogramas y gráficos Q-Q de la **Figura 46** y **Figura 47**, demuestran que los conjuntos de datos de la biomasa por métodos siguen una distribución normal, requisito importante para realizar una prueba ANOVA, esto se confirma mediante la prueba K-S (**Tabla 22** y **Tabla 23**), en la que el p-valor es mayor o igual a 0.05.

Figura 46

Histogramas de los cuatro métodos para calcular biomasa (ecuación 11).

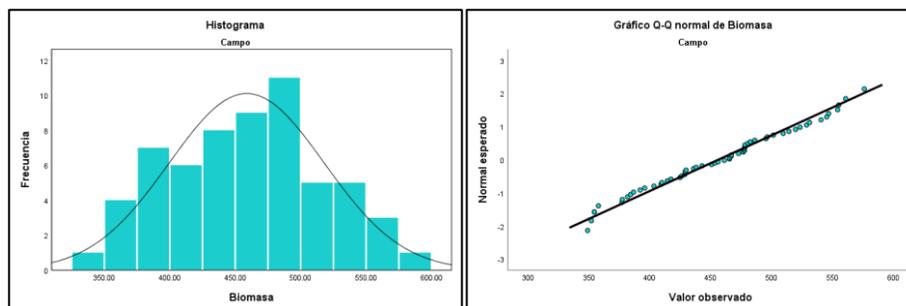


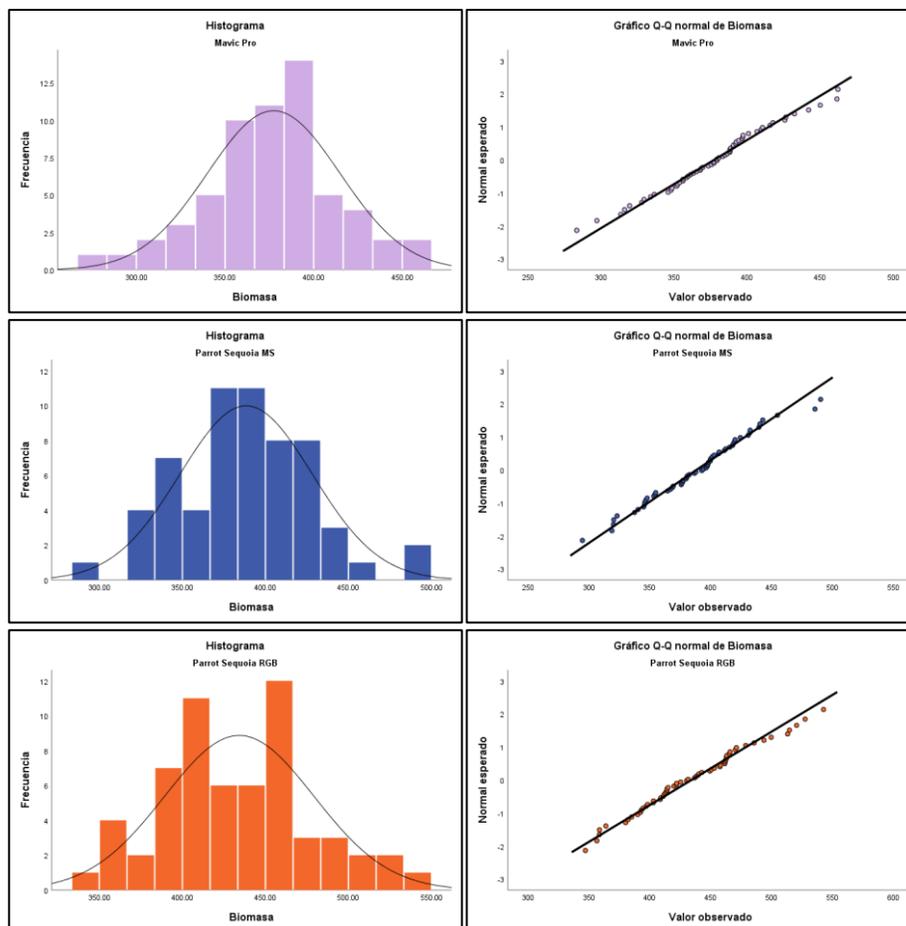


Nota: La figura indica los gráficos estadísticos realizados para cada método.

Figura 47

Histogramas de los cuatro métodos para calcular biomasa (ecuación 12).





Nota: La figura indica los gráficos estadísticos realizados para cada método.

Tabla 22

Prueba de normalidad de datos K-S para biomasa con la ecuación 11.

	Estadístico	gl	Sig.
Campo	0.068	60	0.200
Mavic Pro	0.091	60	0.200
Parrot S. MS	0.053	60	0.200
Parrot S. RGB	0.090	60	0.200

Nota: La tabla indica la prueba K-S con los p-valor (Sig.) para cada conjunto de datos.

Tabla 23

Prueba de normalidad de datos K-S para biomasa con la ecuación 12.

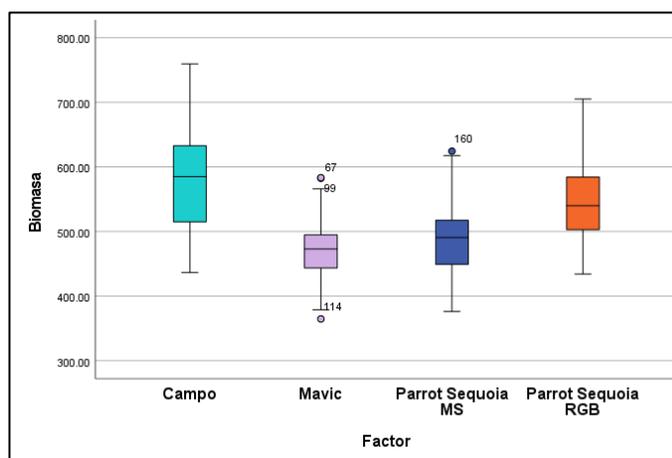
	Estadístico	gl	Sig.
Campo	0.061	60	0.200
Mavic Pro	0.083	60	0.200
Parrot S. MS	0.062	60	0.200
Parrot S. RGB	0.081	60	0.200

Nota: La tabla indica la prueba K-S con los p-valor (Sig.) para cada conjunto de datos.

Además, los diagramas de caja (**Figura 48 y Figura 49**) indican la presencia de valores atípicos en dos métodos, estos valores atípicos se consideran resultado de un error en la generación de los modelos digitales de superficie y elevación y no fueron eliminados del estudio debido a que no influyeron en los resultados finales.

Figura 48

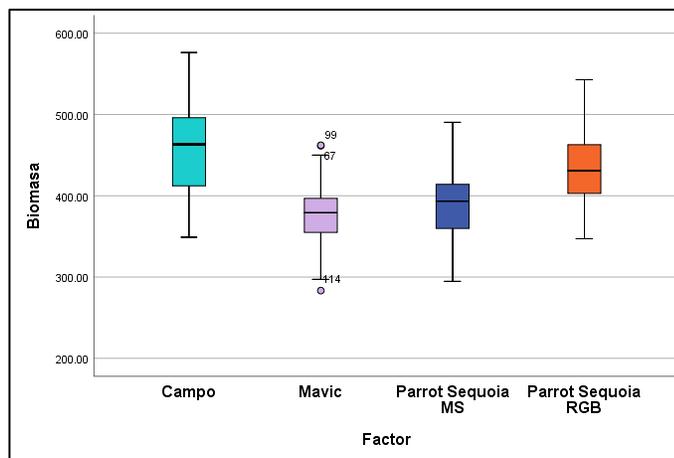
Diagramas de cajas de los valores de biomasa ecuación 11.



Nota: La figura indica los valores atípicos de biomasa.

Figura 49

Diagramas de cajas de los valores de biomasa ecuación 12.



Nota: La figura indica los valores atípicos de biomasa.

Finalmente, se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas, en la que el p-valor fue menor a 0.05, lo que confirmó que los valores de biomasa no cumplen con el requisito de homocedasticidad para los datos de las dos ecuaciones, sin embargo, como cumplen con el supuesto de que los datos siguen una distribución normal, no es posible aplicar la prueba de Kruskal – Wallis, por lo tanto, se aplicó el análisis de varianza bajo la prueba de Welch.

Análisis de varianza - Prueba Welch para la biomasa obtenida por cuatro métodos.

Se planteó el análisis de varianza bajo la prueba Welch tomando como tratamiento a cada método de obtención de la fijación de carbono, los resultados se indican en la **Tabla 24** y

Tabla 24

Resumen de la prueba ANOVA - Welch para biomasa con las dos ecuaciones.

Prueba	Estadístico	Significancia
Ecuación 11		

Prueba	Estadístico	Significancia
ANOVA	38.974	< 0.001
Welch	36.890	< 0.001
Ecuación 12		
ANOVA	39.120	< 0.001
Welch	37.172	< 0.001

Nota: La tabla muestra las estadísticas de la prueba ANOVA – Welch.

Al conocer que existe diferencia significativa en al menos dos de los cuatro métodos de obtención de biomasa, se planteó la prueba de comparaciones múltiples Games-Howell, en la que se evaluó el p-valor bajo las mismas hipótesis (**Tabla 25**).

Tabla 25

Resumen de las estadísticas de la prueba Games-Howell.

Factor (i)	Factor (j)	Diferencia de medias (i-j)	Error estándar	Significancia
Ecuación 11				
Campo	Mavic Pro	106.636	12.396	< 0.001
	Parrot S. MS	92.766	12.670	< 0.001
	Parrot S. RGB	32.177	13.487	0.086
Ecuación 12				
Campo	Mavic Pro	78.849	9.085	< 0.001
	Parrot S. MS	67.901	9.259	< 0.001
	Parrot S. RGB	22.042	9.637	0.107

Nota: La tabla muestra los p-valor (significancia) de la prueba Games-Howell.

Análisis de concordancia y cálculo del error

Según la prueba de comparaciones múltiple, el método de obtención de biomasa en campo y el método de obtención de biomasa con la cámara Parrot Sequoia RGB para las dos

ecuaciones, no presenta diferencia significativa, por lo que se calculó el coeficiente de correlación de concordancia de Lin. Adicionalmente se calculó el error cuadrático medio RMSE para estimar la cantidad de error entre los métodos de obtención de biomasa. Los resultados se indican en la (Tabla 26).

Tabla 26

Coefficiente de correlación de concordancia de Lin y RMSE.

Método A	Método B	C.C.C.	R.M.S.E. [kg/planta]
Ecuación 11			
	Mavic Pro	0.066	138.149
Campo	Parrot S. MS	0.121	126.077
	Parrot S. RGB	0.136	100.828
Ecuación 12			
	Mavic Pro	0.072	101.415
Campo	Parrot S. MS	0.130	91.726
	Parrot S. RGB	0.154	71.039

Nota: La tabla muestra el valor de coeficiente de concordancia.

Discusión sobre el cálculo de biomasa aérea.

Como resultados de las ecuaciones (11) y (12) se obtuvo que las palmas híbridas de este estudio con 6 años de desarrollo tienen un promedio de 65.99 [ton/ha] y 51.72 [ton/ha] de biomasa aérea y de fijación de carbono 113.72 [ton/ha] y 89.13 [ton/ha] respectivamente, en general de todas las palmas, entre los valores obtenidos por especies no se evidencian amplias diferencias, aunque se ve que las palmas de especie Taisha son las que generan mayor cantidad de biomasa y las Coari menos.

Contrastando estos resultados, se encontró que Khalid et al. (1999) estima un promedio de 85 [ton/ha] de biomasa aérea en palmas de 23 años y con rango de altitud de 6 a 9 metros mediante el método destructivo, un valor mucho más alto del obtenido en este proyecto, esto puede deberse a la diferencia entre la edad de las palmas y la altura, ya que para este estudio, como se mencionó, las palmas analizadas tenían 6 años con un promedio de altura de 7 metros. En otro estudio, Asari et al. (2013) calcula biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas sin aplicar el método destructivo, generando resultados de 47.19 [ton/ha], un valor mucho más cercano al obtenido con la ecuación (12) de este proyecto.

De los datos de los UAV se obtuvo como resultados en la **Tabla 19**, un promedio de 53.83 [ton/ha] de biomasa aérea y 92.77 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (11) y 43.03 [ton/ha] de biomasa aérea y 74.15 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (12), utilizando el CHM generado con las imágenes RGB del UAV Mavic Pro.

Utilizando el CHM generado con las imágenes multiespectrales de la cámara Parrot Sequoia se obtuvo un promedio de 55.41 [ton/ha] de biomasa aérea y 95.50 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (11) y 44.28 [ton/ha] de biomasa aérea y 76.30 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (12). Por último, utilizando el CHM generado con las imágenes RGB de la cámara Parrot Sequoia se obtuvo un promedio de 62.32 [ton/ha] de biomasa aérea y 107.40 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (11) y 49.51 [ton/ha] de biomasa aérea y 85.31 [ton/ha] de fijación de carbono para la ecuación (12).

No se encontró literatura que se asemeje al presente estudio para el cálculo de biomasa aérea por UAV, los estudios revisados se basan en la estimación de la altura de las palmas como el de Fawcett et al. (2019) y parámetros biofísicos de las palmas a partir de la generación del modelo de altura del dosel como el de Avtar et al. (2020). De los tres diferentes modelos de

altura del dosel generados en este proyecto, el modelo obtenido de las imágenes RGB de la cámara Parrot Sequoia es el que más cerca de la realidad (alometría) se encontró, esto se confirmó al realizar la prueba estadística.

Como resultado del análisis de varianza bajo la prueba de Welch, los cuatro métodos de obtención de biomasa aérea demostraron significancia estadística (p -valor < 0.05) al 95% de confianza, por lo que, en primera instancia se rechazó la hipótesis nula: “ H_0 : La cantidad de biomasa cuantificada con datos de campo es igual a la cantidad de biomasa cuantificada con los modelos de altura del dosel obtenidos del UAV”.

Con los resultados de la prueba de comparaciones múltiples **Tabla 25** se pudo observar que, entre los métodos de campo y Parrot Sequoia RGB, no existió diferencia estadísticamente significativa ya que el p -valor fue mayor que 0.05, por lo que se aceptó la hipótesis nula planteada; todo esto para las dos ecuaciones utilizadas. Este resultado se contrastó mediante el cálculo del coeficiente de concordancia y correlación de Lin dando un valor de 0.136 con la ecuación (11) y 0.154 con la ecuación (12) que, si bien no es un valor muy alto cercano a 1, es el mejor de los tres métodos de UAV.

Adicionalmente, se calculó la raíz del error cuadrático medio ya que según Camarillo-Peñaranda et al. (2013) es un índice muy utilizado para la validación y el resultado se encuentra en las unidades reales, se obtuvo para este método un error de 101 [kg/planta] representando el 17.44% del promedio general de biomasa aérea para la ecuación (11) y 71 [kg/planta] representando el 15.57% del promedio general de biomasa aérea para la ecuación (12).

El almacenamiento o fijación de carbono obtenida por los cultivos analizados en este estudio fueron superiores en comparación con el estudio de Ramos Escalante et al. (2018) que estima un valor de 76 [ton/ha] de carbono en plantas de 12 años, de igual manera, el estudio de

Leblanc et al. (2006) estima un valor de 23 [ton/ha] de carbono en plantas de 7 años. Como se mencionó, ninguno de estos estudios utiliza tecnologías geoespaciales.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se utilizaron dos tecnologías geoespaciales en el estudio, el espectroradiómetro de mano y los sensores RGB y multiespectrales montados en vehículos aéreos no tripulados UAV, mediante el uso del espectroradiómetro de mano no se pudo diferenciar a las plantas de palma que se encuentran en etapa de antesis de aquellas que no se encuentran en esta etapa, sin embargo, el uso de los sensores montados en los UAV permitió diferenciar las etapas de antesis y no antesis.

Se obtuvieron ortofotomosaicos de dos zonas que abarcaron las tres especies de palma estudiadas a partir de la cámara RGB del UAV DJI Mavic Pro y de la cámara multiespectral Parrot Sequoia montada en el UAV DJI Phantom IV con la finalidad de calcular índices de vegetación para diferenciar plantas en etapa de antesis y no antesis; por otro lado, se obtuvieron modelos digitales de elevación y modelos digitales de superficie para generar los modelos de altura del dosel, de los que se extrajo los valores de altura de las plantas. Estos modelos fueron utilizados como variable para el cálculo de biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas y posteriormente el cálculo de la fijación de carbono del cultivo.

A partir de los índices de vegetación NDVI, VARI, GRVI, MSRRE, MCARI2, MTVI, RECI, RESAVI, REDVI y RERDVI calculados mediante los datos espectrales del espectroradiómetro de mano, ninguno fue útil para la diferenciación de plantas en etapa de antesis y no antesis en ningún tipo de análisis, ya sea en general o por especies, se considera que el rango de longitudes de onda tomados para promediar las bandas espectrales azul, verde, roja, borde rojo e infrarrojo cercano influyeron en el resultado.

A partir de los índices de vegetación NDVI, VARI, GRVI, MSRRE, MCARI2, MTVI, RECI, RESAVI, REDVI y RERDVI calculados mediante los ortofotomosaicos, los índices RESAVI, REDVI y RERDVI son eficientes para diferenciar las plantas en etapa de antesis y no antesis. Para identificar a una planta de palma en etapa de antesis el valor del índice de vegetación REDVI debe encontrarse entre [0.2156 – 0.2284], cualquier otro valor representa a una planta en etapa de no antesis al 95% de confianza.

El análisis de los resultados arrojados de biomasa aérea tanto en campo como con UAV con las dos ecuaciones, nos indica que los resultados obtenidos con la ecuación (12) son los más realistas ya que esta ecuación incluye aparte de la altura, a la edad como variable independiente, esto es un factor muy importante ya que una palma de mayor edad proporcionará mayor cantidad de biomasa.

La cantidad de biomasa aérea calculada mediante el sensor RGB de la cámara Parrot Sequoia fue semejante al resultado obtenido con datos de campo, teniendo un margen de error de aproximadamente el 15.6% de biomasa aérea, es decir, 71 [kg/planta] para una planta que en promedio posee 456 [kg] de biomasa aérea. Mediante el uso de los vehículos aéreos no tripulados, se demostró que puede llegar ser un método confiable y de sencilla aplicación, así, el investigador descartaría el arduo trabajo que representa estimar biomasa directamente en campo y a su vez, se evitaría la aplicación del método destructivo que representa pérdida de plantas.

Se encontró que un problema a la hora de generar el modelo de altura del dosel fue la generación del modelo digital de elevación ya que se necesitan puntos a nivel del suelo y al trabajar en cultivos densos que no permiten la visualización de este se puede generar un

modelo erróneo, por lo que contar o generar el MDE mediante otra metodología como LIDAR o el uso de equipos topográficos o geodésicos podría generar resultados más certeros.

En este estudio, las plantaciones de palma aceitera de la finca San Guido, específicamente las especies Amazon, Taisha y Coari, con una densidad de 114 plantas por hectárea, tienen el potencial de almacenamiento de carbono promedio de 89 toneladas por hectárea.

Recomendaciones

Se recomienda ampliar el tamaño de la muestra por planta al utilizar el espectroradiómetro de mano, es decir, tomar datos espectrales no solamente de una hoja, si no de varias alrededor de toda la planta, a fin de tener un conjunto de datos más robusto.

Se recomienda ampliar el tamaño de muestra para plantas en etapa de antesis y no antesis y evaluar otros índices de vegetación diferentes a los del presente estudio, en especial, estudiar índices de vegetación que utilicen la banda del borde rojo o red edge, con la finalidad de ratificar los resultados encontrados en este estudio.

Se recomienda realizar el vuelo fotogramétrico aumentando el traslapo longitudinal y transversal, a fin de obtener mayor cantidad de imágenes y que se pueda generar un óptimo modelo digital de elevación y modelo digital de superficie, esto podría mejorar la estimación de las alturas a partir del modelo de altura de dosel y por ende mejorar la estimación de biomasa aérea y fijación de carbono.

Replicar el proyecto, en especial de biomasa en plantaciones de mayor edad brindaría mayor y mejor información sobre el tema, se recomienda analizar la parte económica de la biomasa y la fijación de carbono para este cultivo a fin de tener un conocimiento teórico de una posible contribución económica para los pequeños y grandes palmicultores.

Referencias bibliográficas

- Aggarwal, S. (2004). Earth Resource Satellites. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, 39–65.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.119.1636&rep=rep1&type=pdf#page=44>
- Anaya, J. A., Chuvieco, E., & Palacios-Orueta, A. (2009). Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *Forest Ecology and Management*, 257(4), 1237–1246. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.016>
- ANCUPA. (2018). Censo Palmero 2017. *Palma La Voz Del Palmicultor*. <http://ancupa.com/wp-content/uploads/2018/06/PALMA-Abril-ANCUPA-.pdf>
- Aranda Arguello, R., Ley de Coss, A., Arce Espino, C., Pinto Ruiz, R., Guevera Hernández, F., & Raj Aryal, D. (2018). Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 629–637.
<https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32076>
- Araque, L., & Jiménez, A. (2009). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite. *Revista Palmas*, 30(3), 63–79. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1455>
- Asamblea Constituyente. (2008). Constitución de la República del Ecuador. In *Registro Oficial*.
<https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec030es.pdf>
- Asamblea Constituyente. (2016). *Ley de fomento y desarrollo agrario*.
<http://www.asambleanacional.gob.ec/es/contenido/ley-de-fomento-y-desarrollo-agrario>
- Asamblea Nacional. (2020). Ley para el Fortalecimiento y Desarrollo de la Producción,

Comercialización, Extracción e Industrialización de la Palma Aceitera y sus Derivados. In *Registro Oficial*. https://drive.google.com/file/d/1XYaFxe-_KHIweZR4jjoBp6KItN4YYLR/view

Asari, N., Suratman, M., Jaafar, J., & Khalid, M. (2013). Estimation of Above Ground Biomass for Oil Palm Plantations Using Allometric Equations Nazlin. *4th International Conference on Biology, Environment and Chemistry*, 58(22). <http://www.ipcbee.com/vol58/022-ICBEC2013-H3013.pdf>

Ashraf, M., Maah, M., & Yusoff, I. (2011). Introduction to Remote Sensing of Biomass. In *Biomass and Remote Sensing of Biomass*. <https://doi.org/10.5772/16462>

Avtar, R., Suab, S. A., Syukur, M. S., Korom, A., Umarhadi, D. A., & Yunus, A. P. (2020). Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. *Remote Sensing*, 12(18), 1–21. <https://doi.org/10.3390/RS12183030>

Banco Central del Ecuador. (2019). *Reporte de Coyuntura Sector Agropecuario*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Encuestas/Coyuntura/Integradas/etc201902.pdf>

Blackburn, G. A. (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 66(3), 273–285. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00059-5)

Bongiovanni, R., Chartuni, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable. In PROCISUR/IICA (Ed.), *Ciencia y Tecnología* (Vol. 10).

Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests*. FAO.

<https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=uv->

[ISEzvitwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Estimating+biomass+and+biomass+change+of+tropical+forests&ots=ODoaQl_WIF&sig=kgP_lxEcR8rYyRDj_QIHLN4NCzU&redir_esc=y#v=onepage&q=Estimating biomass and biomass change of tropical](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=uv-ISEzvitwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Estimating+biomass+and+biomass+change+of+tropical+forests&ots=ODoaQl_WIF&sig=kgP_lxEcR8rYyRDj_QIHLN4NCzU&redir_esc=y#v=onepage&q=Estimating+biodiversity+and+biomass+change+of+tropical)

Camacho-Sandoval, J. (2008). Coeficiente de concordancia para variables continuas. *Acta Médica Costarricense*, 50(4), 211–212.

Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013).

Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos. *Tecnológicas*, November, 109. <https://doi.org/10.22430/22565337.372>

Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (Fifth).

[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=NkLmDjSS8TsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=remote+sensing&ots=s1Npv4rU3E&sig=QyIKSdtWk9ZCyrpVbUpil_w5Po8&redir_esc=y#v=onepage&q=remote sensing&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=NkLmDjSS8TsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=remote+sensing&ots=s1Npv4rU3E&sig=QyIKSdtWk9ZCyrpVbUpil_w5Po8&redir_esc=y#v=onepage&q=remote+sensing&f=false)

Canada Centre for Remote Sensing. (n.d.). *Fundamentals of Remote Sensing*.

https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf

Cancino, J. (2012). *Dendrometría Básica*. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente.

http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/407/2/Dendrometria_Basica.pdf

Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating

multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026–4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>

- Cao, Q., Miao, Y., Wang, H., Huang, S., Cheng, S., Khosla, R., & Jiang, R. (2013). Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research*, *154*, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.005>
- Carrasco, J. L., & Jover, L. (2003). Estimating the Generalized Concordance Correlation Coefficient through Variance Components. *Biometrics*, *59*(4), 849–858. <https://doi.org/10.1111/j.0006-341X.2003.00099.x>
- Carrasco, J. L., & Jover, L. (2004). Métodos estadísticos para evaluar la concordancia. *Medicina Clínica*, *122*(SUPPL. 1), 28–34. <https://doi.org/10.1157/13057543>
- Castillo Gutiérrez, S., & Lozano, E. (2007). Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a La Investigación*, *0*(2). <https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/259/241>
- Castro, O., Álvarez, N., Álvarez, M., & Bernal, J. (2019). Avances para la vinculación de tecnología de sensoramiento remoto con UAV(Unmanned Aerial Vehicle) para el seguimiento sanitario de plantaciones de palma de aceite. *Revista de Topografía Azimut*, *11*(1), 1–6. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/15646>
- Chong, K. L., Kanniah, K. D., Pohl, C., & Tan, K. P. (2017). A review of remote sensing applications for oil palm studies. *Geo-Spatial Information Science*, *20*(2), 184–200. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1337317>
- Chuvieco, E. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing: An Environmental Approach. In *Fundamentals of Satellite Remote Sensing* (Second). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote

sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>

Cracknell, A., & Hayes, L. (2007). *Introduction to Remote Sensing*. CRC Press.

[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=oRPNBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=introduction+to+remote+sensing+&ots=EOxNch_4Fa&sig=AhACa2MjpOdvb7FI3p8xaa72yh0&redir_esc=y#v=onepage&q=introduction to remote sensing&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=oRPNBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=introduction+to+remote+sensing+&ots=EOxNch_4Fa&sig=AhACa2MjpOdvb7FI3p8xaa72yh0&redir_esc=y#v=onepage&q=introduction+to+remote+sensing&f=false)

Diéguez Aranda, U., Castedo dorado, F., Barrio Anta, M., Álvarez González, J. G., Rojo Alboreca, A., & Ruiz González, A. D. (2005). *Prácticas de Dasometría*.

<https://www.researchgate.net/publication/305640101>

Fawcett, D., Azlan, B., Hill, T. C., Kho, L. K., Bennie, J., & Anderson, K. (2019). Unmanned aerial vehicle (UAV) derived structure- from-motion photogrammetry point clouds for oil palm (*Elaeis guineensis*) canopy segmentation and height estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 40(19). <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1591651>

Flores, J., & Flores, R. (2018). La Enseñanza del Diagrama de Caja y Bigotes para Mejorar su Interpretación. *Revista Bases de La Ciencia*, 3(1), 69–75.

<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/1107/1102>

Fontanilla Díaz, C., Rincón Romero, V. O., Mesa Fuquen, E., Mariño, D., Barrera González, E., & Montoya, M. M. (2016). Estimación del rendimiento de la mano de obra en labores de cultivo de palma de aceite: caso polinización asistida. *Revista Palmas*, 37(2), 21–35.

<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11736>

Forero Hernández, D. C., Hormaza Martínez, P. A., Moreno Caicedo, L. P., & Ruiz Romero, R.

(2012). *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite* (H. M. Romero

Angulo (ed.)). Centro de Investigación en Palma de Aceite - CENIPALMA.

[https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/107644/Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite.pdf?sequence=1](https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/107644/Generalidades_sobre_la_morfologia_y_fenologia_de_la_palma_de_aceite.pdf?sequence=1)

Gayon, J. (2000). History of the concept of allometry. *American Zoologist*, 40(5), 748–758.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/icb/40.5.748>

Gitelson, A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165–173.

<https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>

Gitelson, A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87.

[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)

Gitelson, A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8).

<https://doi.org/10.1029/2005GL022688>

Glass, G. V. (1966). Testing Homogeneity of Variances. *American Educational Research Journal*, 3(3), 187–190. <https://doi.org/10.3102/00028312003003187>

Guataquira, S., Mesa, E., Ruiz, R., & Romero, H. (2019). Evaluación de la viabilidad y germinabilidad del polen durante la labor de polinización asistida en campo. *Revista Palmas*, 40(1), 13–20.

<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12788>

Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies:

- Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- Hajji, Y., & Leyrat, C. (2018). ANOVA , Welch correction , Satterthwaite correction and Kruskal-Wallis test : comparison of type I error rate and power. April. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31647.66724>
- Hawkins, D. M. (1980). Identification of Outliers. In *Biometrics* (Vol. 37, Issue 4). Chapman and Hall. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-3994-4>
- Hollas, M. (2004). Modern Spectroscopy. In *British Library* (Fourth).
- Hunt, E. R., & Daughtry, C. S. T. (2018). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5345–5376. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>
- Izzuddin, M. A., Nisfariza, M. N., Ezzati, B., Idris, A. S., Steven, M. D., & Boyd, D. (2018). Analysis of airborne hyperspectral image using vegetation indices, red edge position and continuum removal for detection of Ganoderma disease in oil palm. *Journal of Oil Palm Research*, 30(3), 416–428. <https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0037>
- Khalid, H., Zin, Z., & Anderson, J. M. (1999). Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. I. Above-ground biomass. *Journal of Oil Palm Research*, 11(1), 23–32. <http://palmoilis.mpob.gov.my/publications/jopr11n1-p3.pdf>
- Leblanc, H., Russo, R., Cueva, J. J., & Subía, E. (2006). Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de costa rica. *Tierra Tropical*, 2(2), 197–202. https://www.researchgate.net/profile/Ricardo_Russo/publication/234834456_FIJACION_D E_CARBONO_EN_PALMA_ACEITERA_EN_LA_REGION_TROPICAL_HUMEDA_DE_COSTA_RIC

A/links/0fcfd5101322925bad000000/FIJACION-DE-CARBONO-EN-PALMA-ACEITERA-EN-LA-REGION-TROPICAL-HUMEDA-DE-

Levin, R., & Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía* (Séptima). Pearson.

Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2016). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, *67*, 637–648.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.036>

Light and the electromagnetic spectrum. (2012). Light and the electromagnetic spectrum. In *The Feynman Lectures on Physics*.

http://samples.jbpub.com/9781449687755/47940_CH04_0096.pdf

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Seventh, Vol. 81, Issue 8). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.14358/pers.81.8.615>

Lind, D. A., Marchal, W. G., & Wathen, S. A. (2012). *Estadística Aplicada a los Negocios y la Economía* (McGRAW-HILL (ed.)).

Linder, W. (2003). Digital Photogrammetry: Theory and Applications. In *Springer*.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-06725-3>

Liu, H. (2015). Comparing Welch's ANOVA, a Kruskal-Wallis test and traditional ANOVA in case of heterogeneity of variance ANOVA. In *Theses and Dissertations*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.25772/BWFP-YE95>

Luque, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta*, 17–31.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5738106>

- Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152–164.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
- Manrique De Lara, M., & Ronald, P. (2014). Carbono almacenado en la biomasa aérea en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Shambillo-Aguaytia. *Investigación y Amazonía*, 4(1 y 2), 8–17.
- Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y Muestreo* (Décima ter). ECOE Ediciones.
- Meléndez, M. R., & Ponce, W. P. (2016). Pollination in the oil palms *Elaeis guineensis*, *E. oleifera* and their hybrids (OxG), in tropical America. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(1), 102–110. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4638196>
- Migolet, P., Goïta, K., Ngomanda, A., & Mekui Biyogo, A. P. (2020). Estimation of aboveground oil palm biomass in a mature plantation in the Congo Basin. *Forests*, 11(5), 1–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f11050544>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2019). *Panorama Agroestadístico*.
http://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/panorama_agroestadistico/2019/panorama_agroestadistico_2019.pdf
- Ministerio de Producción. (2017). *Informe sobre el sector palmicultor ecuatoriano*.
<https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/informe-palma-español.pdf>
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., & Muñoz, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles* (INIA-Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. (ed.)).

- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Naciones Unidas/CEPAL. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. In *Revista de Derecho Ambiental* (Issue 10). Publicación de las Naciones Unidas. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2018.52077>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Osorio Flórez, C. E. (2013). Uso integral de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, 34(Especial), 315–323.
<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/viewFile/10730/10716>
- Pasqualotto, N., Delegido, J., Pezzola, A., Winschel, C., & Moreno, J. (2019). Estimación del contenido de clorofila a nivel de cubierta (CCC) en cultivos: Comparativa de índices de vegetación y el producto de nivel 2A de Sentinel-2. *Proceedings of the XVIII Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 24–27.
https://www.researchgate.net/publication/336103446_Estimacion_del_contenido_de_clorofila_a_nivel_de_cubierta_CCC_en_cultivos_Comparativa_de_indices_de_vegetacion_y_el_producto_de_nivel_2A_de_Sentinel-2
- Pavia, D., Lampman, G., Kriz, G., & Vyvyan, J. (2013). Introduction to Spectroscopy. In *CENGAGE Learning* (Fifth).
- Pérez, C. (2010). *Técnicas de muestreo estadístico* (Primera). IBERGARCETA PUBLICACIONES S.L.
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones*

alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles.

<http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)

PROPALMA. (2020). *La Palma en Cifras*. <https://propalmaec.com/>

Pulhin, F., Lasco, R., & Urquiola, J. (2014). Carbon Sequestration Potential of Oil Palm in Bohol, Philippines. *Ecosystems & Development Journal*, 4(2), 14–19.

<https://ovcre.uplb.edu.ph/journals-uplb/index.php/EDJ/article/view/192>

Putra, B. T. W., Indarto, & Askin. (2019). The Biophysics Characteristic of palm oil plantation using ground-based and low-altitude Remote Sensing. *Proceedings - 2019 International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering, ICOMITEE 2019*, 1, 65–68. <https://doi.org/10.1109/ICOMITEE.2019.8921094>

Ramos Escalante, G., Ley de Coss, A., Arce Espino, C., Escobar España, J. C., Raj Aryal, D., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., & Guerra Medina, C. E. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52(5), 671–683.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000500671

Roujean, J. L., & Breon, F. M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51(3), 375–384.

[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA special publication.

[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=bn_xAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA309&dq=Monitoring+of+vegetation+systems+in+the+Great+Plains+with+ERTS&ots=YTKsQAzQJN&sig=3oAWgdY2fPQDDwsU6rpJH5Dqgf8&redir_esc=y#v=onepage&q=Monitoring of vegetation systems in the Gr](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=bn_xAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA309&dq=Monitoring+of+vegetation+systems+in+the+Great+Plains+with+ERTS&ots=YTKsQAzQJN&sig=3oAWgdY2fPQDDwsU6rpJH5Dqgf8&redir_esc=y#v=onepage&q=Monitoring+of+vegetation+systems+in+the+Gr)

Sanquetta, C. R., Péllico Netto, S., Dalla Corte, A. P., Lourenço Rodrigues, A., Behling, A., &

Sanquetta, M. N. I. (2015). Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Northeastern Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, *10*(43), 4067–4075. <https://doi.org/10.5897/ajar2015.9582>

Satterwhite, M. B., & Henley, J. P. (1990). *Hyperspectral Signatures (400 to 2500 nm) of*

Vegetation, Minerals, Soils, Rocks, and Cultural Features: Laboratory and Field Measurements (Issue ETL-0573). <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a239496.pdf>

Sawyer, S. F. (2009). Analysis of Variance: The Fundamental Concepts. *Journal of Manual &*

Manipulative Therapy, *17*(2), 27E-38E. <https://doi.org/10.1179/jmt.2009.17.2.27E>

Scheffé, H. (1999). *The Analysis of Variance*. John Wiley & Sons.

[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=h7NuoPIXh9UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=analysis+of+variance+&ots=02L0iHwnNR&sig=h51OCPC8m_z9C59hUhwivX1tVcc&redir_esc=y#v=onepage&q=analysis of variance&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=h7NuoPIXh9UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=analysis+of+variance+&ots=02L0iHwnNR&sig=h51OCPC8m_z9C59hUhwivX1tVcc&redir_esc=y#v=onepage&q=analysis+of+variance&f=false)

Seelan, S. K., Laguetta, S., Casady, G. M., & Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications

for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, *88*(1–2), 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.007>

Shafri, H. Z. M., & Hamdan, N. (2009). Hyperspectral imagery for mapping disease infection in oil

palm plantation using vegetation indices and red edge techniques. *American Journal of*

- Applied Sciences*, 6(6). <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.1031.1035>
- Sharma, B. (2007). *Spectroscopy* (M. Sharma (ed.)). <https://books.google.co.in/books?id=qYEw-OKqNCwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Shaw, G. A., & Burke, H. K. (2003). Spectral Imaging for Remote Sensing. *Lincoln Laboratory Journal*, 14(1).
<https://courses.cs.washington.edu/courses/cse591n/07sp/papers/Shaw2003.pdf>
- Shingala, M. C., & Rajyaguru, A. (2015). Comparison of post hoc tests for unequal variance. *International Journal of New Technologies in Science and Engineering*, 2(5), 22–33.
- Sobrino, J., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliso, A., López-García, M., Belaid, A., El Kharraz, M., Cuenca, J., & Dempere, L. (2001). *Teledetección* (J. Sobrino (ed.)). Universidad de Valencia.
https://books.google.com.ec/books?id=Yb6xIldfoTOC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Sripada, R. P., Heiniger, R. W., White, J. G., & Meijer, A. D. (2006). Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 98(4), 968–977. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0200>
- Swain, K. C., Thomson, S. J., & Jayasuriya, H. P. W. (2010). Adoption of an Unmanned Helicopter for Low-Altitude Remote Sensing to Estimate Yield and Total Biomass of a Rice Crop. *Transactions of the ASABE*, 53(1), 21–27. <https://doi.org/10.13031/2013.29493>
- Thenkabail, P. S., Stucky, N., Griscom, B. W., Ashton, M. S., Diels, J., Van der Meer, B., & Enclona, E. (2004). Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5447–5472. <https://doi.org/10.1080/01431160412331291279>

Torres Alarcón, E. (2013). Avances en el desarrollo industrial del híbrido oxg en Palmeras del Ecuador. *Revista Palmas*, 34(Especial), 294–304.

<http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10688>

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Viera Torres, M., Sinde González, I., Gil Docampo, M., Bravo Yandún, V., & Toulkeridis, T. (2020). Generating the baseline in the early detection of bud rot and red ring disease in oil palms by geospatial technologies. *Remote Sensing*, 12(19), 1–21.

<https://doi.org/10.3390/rs12193229>

Welch, B. L. (1951). ON THE COMPARISON OF SEVERAL MEAN VALUES: AN ALTERNATIVE APPROACH. *Biometrika*, 38(3/4), 330–336.

<https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2332579>

Wu, C., Niu, Z., Tang, Q., & Huang, W. (2008). Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1230–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.005>

Xie, Q., Dash, J., Huang, W., Peng, D., Qin, Q., Mortimer, H., Casa, R., Pignatti, S., Laneve, G., Pascucci, S., Dong, Y., & Ye, H. (2018). Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1482–1492.

<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2813281>

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision

agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.

<https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>

Zúñiga López, J. M. (2018). *APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS PARA ANALISIS DEL ESTADO VEGETATIVO DEL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE POR MEDIO DEL ÍNDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) Y FIRMAS ESPECTRALES MEDIANTE FOTOGRAFÍAS AÉREAS*. Universidad Militar Nueva Granada.

Anexos