

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

UTILIZACIÓN DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS
(VANT's) EN LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE
DESARROLLO DE PLANTACIONES FORESTALES DE *Gmelina*
arborea, *Tectona grandis* Y MIXTAS.

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN CIENCIAS FORESTALES
CON EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA

ING. JAVIER HERNÁNDEZ COLE

CARTAGO, COSTA RICA

2022



UTILIZACIÓN DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT's) EN LA
EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO DE PLANTACIONES FORESTALES
DE *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* Y MIXTAS.

Javier Hernández Cole¹

Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT's) tienen un gran potencial para el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica, pero su uso requiere una adecuada planificación. Se realizaron pruebas para determinar el mejor software; opciones de procesamiento y parámetros de vuelo para obtener los datos requeridos en el manejo de plantaciones forestales. Para complementar estos resultados también se prepararon modelos alométricos para estimar el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de la copa (dc). Se obtuvo que el procesamiento de las imágenes con el software *Pix4D mapper*® demanda menos tiempo de procesamiento que el requerido con el software *WebODM*®, especialmente cuando el ordenador utilizado tiene al menos 15 GB de memoria RAM, y cuando se tiene menor número de imágenes a procesar por unidad de área, esto es, cuando la distancia del muestreo del suelo (GSD) de las imágenes es baja (menos de 3,27 cm/píxel), y los vuelos se hacen con un diseño de trazado 2D. Por otro lado, los ortomosaicos tienen menos áreas con vacíos de información cuando las imágenes se procesan con *WebODM*, particularmente si las imágenes procesadas tienen una resolución espacial baja (3,27 y 3,32 cm/píxel), un trazado 2D o 3D y tienen una combinación de traslape de al menos 70 y 80% (lateral y frontal). El mayor número de fallos de procesamiento se produjo cuando el software utilizado es *WebODM*, y cuando aumenta el número de imágenes a procesar, esto cuando las imágenes tienen una resolución espacial alta (2,22 y 2,49 cm/píxel), los vuelos se hacen con diseño de trazado 3D y una combinación de traslapes de 80x80%. Los modelos desarrollados para estimar el "d" a partir del diámetro de copa (dc) para árboles de *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Schizolobium parahyba*, entre otros, alcanzaron un R^2 superior a 0,40 y superaron con éxito las pruebas de validación realizadas. Este trabajo permitió el desarrollo de un protocolo estandarizado para la recolección y procesamiento de datos desde vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica.

¹ Hernández Cole, J. (2021). Utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT's) en la evaluación del estado de desarrollo de plantaciones forestales de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas. (Tesis de maestría). Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Palabras claves: Vehículos aéreos no tripulados, VANT's, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, Monitoreo de plantaciones forestales, Plantación mixta.

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have great potential for monitoring forest plantations in Costa Rica, but its use requires adequate planning. Tests to determine the best software; processing options and flight parameters were made to obtain the data required in forest plantation management. To complement these findings allometric models to estimate diameter at breast height (d) as a function of crown diameter (dc) were also prepared. It was obtained that processing the images with the *Pix4D mapper*® software requires less processing time than the required with the software *WebODM*®, especially when the computer used has at least 15 GB of RAM memory, and the number of images to process per hectare decreases, such as when the ground surface distance (GSD) of the images is low (less than 3.27 cm/pixel), and the flight of the drone is a single grid (2D). On the other hand, ortho-rectified mosaics have less information gaps when the images are processed with *WebODM* particularly if the images processed have low spatial resolution (3.27 and 3.32 cm/pixel), and have an overlap combination of at least 70x80% (side and frontal). The highest number of processing failures occurred when the software used is *WebODM*, and number of images to process increases, that is, when images have high spatial resolution (2.22 and 2.49 cm/pixel), and drone flight is double grid (3D) with a combination of overlaps of 80x80%. The models developed to estimate “d” using crown diameter (dc) for trees of *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Schizolobium parahyba*, among others, achieved an R^2 greater than 0.40 and successfully passed the validation tests performed. This work allowed the development of a standardized protocol to collect and process data from unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring forest plantations in Costa Rica.

Key words: Unmanned Aerial Vehicles, UAVs, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, Forest plantation monitoring, Mixed plantation.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por PhD. Edgar Ortiz Malavasi, M.Sc Mario Guevara Bonilla, y M.Sc Andrea Tapia Arenas como requisito parcial para optar por el grado de Magister en Ciencias Forestales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Edgar Ortiz Malavasi, PhD.

Director de tesis

Mario Guevara Bonilla, M.Sc.

Profesor lector

Andrea Tapia Arenas, M.Sc.

Lectora

Alexander Berrocal Jiménez, PhD.

Coordinador Maestría de Ciencias
Forestales

Javier Hernández Cole, Lic.

Estudiante

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre y padre, por ser los pilares más importantes y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar la situación. Espero que la vida me permita retribuirles todo lo que han dado para que yo pueda alcanzar hoy esta meta tan importante en mi vida.

A mis hermanos, tíos, prima, abuelitos y amigos cercanos quienes siempre han estado brindándome todo el cariño, amor y enseñanzas que me han permitido ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A todos mis compañeros de maestría, profesores y administrativos de la Escuela de Ingeniería Forestal. Estos años han sido de mucho aprendizaje y siempre estaré sumamente agradecido por eso.

Al PhD. Edgar Ortiz Malavasi, gracias por todas las oportunidades brindadas durante estos últimos años, pero sobre todo por las enseñanzas, apoyo y consejos.

Al M.Sc. Mario Guevara Bonilla por todo el apoyo y consejos brindados durante todos estos años, en especial para la realización de este proyecto.

A la Máster Verónica Villalobos Barquero y Andrea Tapia Arenas (M.Sc) por toda la ayuda brindada para la realización de esta investigación.

Índice General

Resumen	ii
Abstract.....	iii
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN	iv
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
Índice General.....	v
Índice de cuadros.....	viii
Índice de figuras	ix
Índice Anexos	x
1. Introducción.....	12
2. Objetivo general.....	17
3. Objetivos específicos.....	17
4. Planteamiento del problema	18
5. Justificación	19
6. Revisión de literatura.....	20
6.1. Monitoreo de Plantaciones Forestales	20
6.2. Drones en el Monitoreo Forestal.....	20
6.3. Parámetros de planificación de vuelos	21
6.3.1. Altura de vuelo.....	21
6.3.2. Distancia de superficie en tierra (GSD)	21
6.3.3. Porcentajes de traslape (Lateral y Frontal)	21
6.3.4. Diseño de trazado.....	21
6.3.5. Época del año	22
6.3.6. Otras variables	22
6.4. Software de procesamiento de datos	22
6.4.1. Software <i>Pix4D mapper</i>	22
6.4.2. Software <i>WebODM</i>	23
6.5. Modelos de estimación del diámetro a 1,3 m de altura (d)	23

7.	Materiales y métodos.....	24
7.1.	Descripción del sitio	24
7.2.	Descripción de las plantaciones	26
7.3.	Determinación de software y opciones de procesamiento óptimas	27
7.3.1.	Diseño experimental.....	27
7.3.2.	Procesamiento y análisis estadístico de la información	28
7.4.	Determinación de condiciones óptimas para la captura de datos	30
7.4.1.	Planificación de los vuelos del VANT	30
7.4.2.	Desarrollo del vuelo del VANT e imágenes obtenidas	30
7.4.3.	Diseño experimental.....	31
7.4.4.	Procesamiento y análisis estadístico de la información	31
7.4.5.	Influencia de la época del año en labores de monitoreo	32
7.5.	Elaboración de modelos de predicción de diámetro a 1,3 m de altura a partir del diámetro de copa.....	32
7.5.1.	Plantaciones y muestreo utilizado	32
7.5.2.	Variables a medir en plantación.....	33
7.5.3.	Procesamiento información	33
7.5.4.	Análisis estadístico	37
7.5.5.	Modelos elaborados y validación.....	37
8.	Resultados.....	38
8.1.	Variable de respuesta tiempo de procesamiento	38
8.2.	Variable de respuesta porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico 42	
8.3.	Variable de respuesta fallos en el procesamiento	46
8.4.	Influencia de la época del año en labores de monitoreo.....	51
8.5.	Modelos de predicción del diámetro a 1,3 m de altura (cm)	52
8.5.1.	Modelo de predicción del diámetro en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Abangares.....	52
8.5.2.	Modelo de predicción del diámetro en una plantación de <i>Gmelina arborea</i> ubicada en Santa Rita	55

8.5.3.	Modelo de predicción del diámetro en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en San Pedro de Hojanca	57
8.5.4.	Modelo de predicción del diámetro en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Punta Morales	59
8.5.5.	Modelo de predicción del diámetro en una plantación mixta ubicada en Pocora	61
9.	Discusión	64
9.1.	Variable de respuesta tiempo de procesamiento	64
9.2.	Variable de respuesta porcentaje de área con vacío de información	65
9.3.	Variable de respuesta fallos en el procesamiento	66
9.4.	Influencia de la época del año en labores de Monitoreo	68
9.5.	Relación entre el diámetro a 1,3 m de altura y diámetro de copa	68
9.6.	Escogencia del mejor modelo de predicción del diámetro a 1,3 m del suelo	68
9.7.	Validación de los modelos	69
9.8.	Limitantes del proyecto y futuras investigaciones	69
10.	Conclusiones	71
11.	Referencias bibliográficas	72
12.	Anexos	90

Índice de cuadros

Cuadro 1. Ubicación, especie, tamaño y edad de las plantaciones evaluadas.	27
Cuadro 2. Opciones de procesamiento utilizadas en cada software para el procesamiento de las imágenes.	27
Cuadro 3. Parámetros de planificación de vuelos utilizados y número de visitas realizadas a las diferentes plantaciones.	30
Cuadro 4. Características del VANT Phantom 4 Pro.	31
Cuadro 5. P- value obtenidos para el software, opción de procesamiento, GSD (cm/píxel), combinación de traslape y cantidad de imágenes en la regresión logística.	46
Cuadro 6. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Abangares, Guanacaste, Costa Rica.	53
Cuadro 7. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de <i>Gmelina arborea</i> ubicada en Santa Rita, Alajuela, Costa Rica.	56
Cuadro 8. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en San Pedro, Guanacaste, Costa Rica.	58
Cuadro 9. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Punta Morales, Puntarenas, Costa Rica.	60
Cuadro 10. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación mixta ubicada en Pocora, Limón, Costa Rica.	62

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las plantaciones en Costa Rica.....	26
Figura 2. Diferencias en el tiempo de procesamiento según el tipo de software, opciones de procesamiento y GSD (cm/píxel). <i>Nota:</i> las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.....	39
Figura 3. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores. <i>Nota:</i> las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.....	40
Figura 4. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores. <i>Nota:</i> las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.....	41
Figura 5. Relación entre el tiempo de procesamiento (hrs/ha) y la cantidad de imágenes/hectárea de cada vuelo según el tipo de software y opción de procesamiento utilizado.	42
Figura 6. Porcentaje de área con vacío de información según el software de procesamiento y combinación de traslape utilizada en el vuelo del VANT. <i>Nota:</i> las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.	43
Figura 7. Porcentaje de área con vacío de información según diferentes interacciones de factores. <i>Nota:</i> las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.....	44
Figura 8. Relación entre la cantidad de imágenes por hectárea y el porcentaje de área con vacío de información.	45
Figura 9. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el tipo de software y opción de procesamiento.	47
Figura 10. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el GSD, software y opción de procesamiento.	48
Figura 11. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la combinación de porcentajes de traslape, software y opción de procesamiento.	49
Figura 12. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la cantidad de imágenes, software y opción de procesamiento.	50

Figura 13. Diferencias en el ortomosaico según la época del año (Lluviosa (A) y Seca (B)) en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Abangares, Guanacaste, Costa Rica.	51
Figura 14. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) para dos rodales de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Abangares. Costa Rica, 2021.....	52
Figura 15. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) para una plantación de <i>Gmelina arborea</i> ubicada en Santa Rita. Costa Rica, 2021.....	55
Figura 16. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en San Pedro de Hojancha. Costa Rica, 2021.	57
Figura 17. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Punta Morales. Costa Rica, 2021.....	59
Figura 18. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación mixta ubicada en Pocora. Costa Rica, 2021.	61

Índice Anexos

Anexo 1. Resumen del modelo de regresión logística binaria para evaluar los fallos en el procesamiento tomando en cuenta los factores software, GSD (cm/píxel), combinación de traslape y cantidad de imágenes.....	90
Anexo 2. Resumen del modelo de regresión logística binaria para evaluar los fallos en el procesamiento tomando en cuenta los factores opción de procesamiento, GSD (cm/píxel), combinación de traslape y cantidad de imágenes.	91
Anexo 3. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Abangares.....	92
Anexo 4. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.....	93

Anexo 5. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de <i>Gmelina arborea</i> ubicada en Santa Rita.	93
Anexo 6. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.....	94
Anexo 7. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en San Pedro de Hojancha.	95
Anexo 8. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.....	96
Anexo 9. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de <i>Tectona grandis</i> ubicada en Punta Morales.	96
Anexo 10. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.....	97
Anexo 11. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación Mixta ubicada en Pocora.	98
Anexo 12. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.....	99

1. Introducción

Las tecnologías presentes en la revolución industrial 4.0 se pueden separar en dos grandes grupos: digitales y físicas (Bai et al., 2020). Las tecnologías digitales se refiere a tecnologías modernas de información y comunicación mientras que las tecnologías físicas hacen alusión principalmente a procesos de manufactura (Bai et al., 2020). Algunas de las tecnologías presentes en estos dos grupos son: *internet of things* (IoT) (Kang et al., 2016; Liao et al., 2017; Oláh et al., 2020), *big data* (Bai et al., 2020; Dalenogare et al., 2018), sensores remotos (Bai et al., 2020; Dalenogare et al., 2018; Kang et al., 2016) y Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's) (Bai et al., 2020; Mehta et al., 2020; Wan et al., 2015).

La innovación y tecnología de la revolución industrial 4.0 traerá impactos en diferentes áreas (Pereira & Romero, 2017). Por ejemplo, Erol et al. (2016) menciona que uno de los sectores que va a sufrir más cambios es la industria, ya que los procesos de manufactura están siendo cada vez más automatizados gracias a la tecnología. Por su parte Glova et al. (2014) menciona que se ha cambiado la forma en que se venden los servicios y productos, afectando a las empresas tradicionales y brindando nuevas oportunidades y modelos de negocios. Por último, Albach et al. (2015) menciona que habrá un amplio impacto en todos los sectores de la economía debido a la unión entre el mundo físico y virtual.

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's) también conocidos como drones presentan numerosas ventajas (Tiberiu Paul Banu et al., 2016; Um, 2019). Por ejemplo han sido identificados como plataformas seguras, ligeras, flexibles y automatizadas, capaces de obtener datos de imágenes para muchas aplicaciones, son plataformas de bajo costo y presentan una alta eficiencia (Nex & Remondino, 2014; Shahbazi et al., 2014; Wang et al., 2019).

Los VANT's son utilizados en diversos campos (Li et al., 2019) algunos de estos son: militar (Stehr, 2015), manejo y ambiente urbano (Yao et al., 2019), desastres naturales y rescates (Dawdi et al., 2020; Demiane et al., 2020), tráfico urbano (Alioua et al., 2020), tecnologías de

la información (Li et al., 2019), construcción (Rizo-Maestre et al., 2020), agricultura (Hogan et al., 2017) y forestal (Giannetti et al., 2020).

Um (2019) menciona que actualmente no existe un método estandarizado para clasificar los drones y se puede encontrar variaciones entre países. Sin embargo, sugiere que existen dos grandes grupos de drones: uno que poseen alas fijas y un segundo grupo que poseen alas giratorias. Pero por otra parte Gupta et al. (2019) menciona que existen cuatro grandes clasificaciones: drones de ala fija, ala giratoria, *blimps* y de ala de aleteo. Por otra parte, Nex y Remondino (2014) hacen otra clasificación en lo que indican que existen tres tipos principales de drones: tácticos, estratégicos y de tareas especiales.

Se espera que los VANT's jueguen un papel muy importante en los próximos retos de la agricultura moderna gracias a la cantidad de aplicaciones que pueden brindar (Ju & Son, 2018; Puri et al., 2017; Rogachev & Melikhova, 2019). Por ejemplo los drones ahora son muy utilizados en aplicaciones de teledetección debido a que ofrecen grandes posibilidades de adquirir datos de campo de una manera fácil, rápida y económica en comparación con otros métodos (Tsouros et al., 2019). Por su parte Norasma et al. (2019) menciona que las cámaras equipadas en los drones permiten obtener información sobre el rendimiento del cultivo, calidad del suelo, detección de malezas en cualquier campo de la agricultura. Diversos autores mencionan que los VANT's tienen gran capacidad y su uso se ha ampliado a diversas ramas de la agricultura, incluyendo la aplicación de fertilizantes, siembra de semillas y mapeo de los cultivos (Christiansen et al., 2017; Faïçal et al., 2014; Kim et al., 2019; Muhammad et al., 2019; Torres-Sánchez et al., 2015). Guo et al. (2020) e Ivushkin et al. (2019) mencionan que ayudan a la estimación de parámetros del suelo. Por último, Radoglou-Grammatikis (2020) mencionan que ayudan a la identificación de malezas en el campo, entre otras características. Todos estos campos de aplicación permiten a los productores disminuir las horas de trabajos y requerimientos de las labores, así como mejorar la productividad (Ju & Son, 2018).

En el ámbito forestal diversos estudios aseguran que los VANT's tienen un gran potencial para evaluar los recursos naturales, debido a que ofrecen la posibilidad de hacer una medición no destructiva y precisa de muchos atributos de los árboles (Berie & Burud, 2018). Este potencial

también se debe a la poca utilización de materiales, alta intensidad de recolección de datos (Tang & Shao, 2015) y bajo costo (Colomina & Molina, 2014; Puliti et al., 2015).

A nivel mundial se han realizado diversas investigaciones de la aplicación de drones en el campo forestal (Torresan et al., 2017). Entre las cuales se encuentran: clasificación de especies arbóreas (Michez et al., 2016), estimación del diámetro de copa (Santos et al., 2020; X. Wu et al., 2019), evaluación y detección de incendios forestales (Dang-Ngoc & Nguyen-Trung, 2019; Kinaneva et al., 2019), cuantificación de aperturas del dosel (Getzin et al., 2014) y labores de monitoreo forestal (A. Khan et al., 2020; W. Wu et al., 2020).

Según el último Censo Agropecuario realizado en Costa Rica en el año 2014 y en el cual por primera vez se incluyeron especies forestales dedicadas al cultivo de madera, en el país las dos especies más sembradas fueron *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* con más de cinco mil fincas y una extensión total de aproximadamente 65 mil hectáreas (73% del área total plantada con especies forestales), (INEC, 2015). Este dato es congruente con lo que menciona González (2018) quien indica que en el programa de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) durante el período comprendido entre 1998-2013 las especies más utilizadas fueron precisamente *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*.

En los proyectos de reforestación luego de un estudio para conocer la viabilidad del uso de los VANT's en el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica realizada por Ortiz et al. (2020) se encontró que la mayoría de las empresas forestales del país tienen un sistema de monitoreo de las condiciones de plantación por medio de Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPM). Esto porque las empresas, a raíz de los contratos de PSA-reforestación, deben incluir dentro de su información de monitoreo: 1-Estimados de área por rodal (ha), especie, edad o fecha de la plantación, número de árboles por hectárea, y porcentaje de mortalidad. 2-Cumplimiento de labores mínimas de manejo (rondas, cercado, rotulación). 3-Información de las PPM: especie, rodal, área (ha), porcentaje de mortalidad, altura promedio, coeficiente de variación de la altura (FONAFIFO, 2009).

Por otra parte, en este mismo proyecto se identificó que los departamentos de silvicultura de cada empresa tienen como objetivo el cuidado de sus plantaciones, por lo tanto, los

requerimientos de información para el monitoreo son similares a los que se mencionan por (FONAFIFO, 2009). Sin embargo, se identificaron algunas otras variables de interés como: problemas de sanidad, daños por fuegos, identificación de áreas de menor desarrollo, etc. (Ortiz et al. 2020).

Como se ha mencionado anteriormente, los drones poseen muchos campos de aplicación y en Costa Rica no ha sido la excepción. Por ejemplo se han realizado investigaciones para monitorear el comportamiento de algunos volcanes costarricenses (de Moor et al., 2019; Diaz et al., 2015), para estudios de la erosión en el suelo (Arriola-Valverde et al., 2017), la prevención de desastres en zonas de alto riesgo (Ruiz, 2018), detección de cambios sucesionales en la estructura de los bosques tropicales (de Almeida et al., 2020), análisis de la reforestación histórica en algunos bosques (Marx et al., 2017), caracterización de la variación espacial del índice de superficie efectiva de la planta (PAI_{eff}) en un bosque tropical (Rudic et al., 2020) y mapeo de los patrones espaciales de la actividad fotosintética en las plantaciones de banano en Costa Rica (Machovina et al., 2016).

Existen diversos parámetros para la planificación de los vuelos que son importantes debido a que la mayoría de investigaciones que utilizan VANT's comienzan definiendo estos parámetros (Frey et al., 2018; Hugenholtz et al., 2013). Algunos de ellos son: altura de vuelo, traslape frontal y lateral, velocidad de vuelo, patrón de vuelo, orientación del dron, *Ground sampling distance* (GSD), entre otras (Nevalainen et al., 2017; Whitehead et al., 2014). En los últimos años se han desarrollado pocas investigaciones que proporcionen información confiable sobre cómo planificar las misiones de los drones lo que ha generado un interés significativo en su determinación (Dandois et al., 2015; Goodbody et al., 2019; Seifert et al., 2019). Otra razón importante es porque estos parámetros influyen en los productos que se desean obtener (Goodbody et al., 2019; Nurminen et al., 2013; Puliti et al., 2017).

Dandois et al. (2015) determinaron que los parámetros de vuelos óptimos para obtener variables de la estructura de un bosque son: realizar el vuelo durante el día (con luminosidad clara) y con porcentajes de traslapes mayores al 80%. Por otra parte, Gómez et al. (2014) encontraron que al utilizar un traslape lateral de 30%, traslape frontal de 60% y diferentes alturas (30-100 metros) fue suficiente para obtener ortomosaicos con una alta resolución espacial (0,74 a 2,74 cm/píxel)

para mapear las malezas en trigo a una edad muy corta. Torres-Sánchez et al. (2018) encontraron que para generar el mejor modelo de superficie en un cultivo era necesario volar el dron a una altura de 100 metros, utilizando un porcentaje de traslape lateral de 60% y frontal de 95%. Por último, Lisein et al. (2013) menciona que utilizaron una altura de 225 m y porcentajes de traslape de 75% para generar un modelo de elevación de superficie (DSM) en un bosque ubicado en Bélgica y los resultados fueron alentadores para poder estimar la altura de los árboles.

Las aplicaciones de software con licencia más utilizadas son *Agisoft-PhotoScan*, *Pix4D* y *Ensomosaic*, así como el software libre *OpenDroneMap*, *Mic Mac* y *VisualSFM* (Aguilar et al., 2017). Todos estos softwares han sido utilizados para procesar imágenes obtenidas de un VANT y así obtener diferentes productos (ortomosaicos, modelos de elevación, nubes de puntos, entre otros) acordes a los objetivos planteados en la investigación (Comba et al., 2018; Duarte et al., 2018; Elarab, 2016; Jaud et al., 2016; Lee et al., 2020; Lu et al., 2019; Psirofonia et al., 2017; Ribeiro-Gomes et al., 2017)

En la actualidad, estas herramientas y software comerciales (de código abierto) están disponibles para manejar todos los pasos de un marco de modelado 3D basado en imágenes (Alidoost & Arefi, 2017), desde el preprocesamiento de imágenes hasta la generación de productos geoespaciales 3D como nubes de puntos, DSM, ortofotos, entre otros (Barbasiewicz et al., 2018; Basurto-Lozada et al., 2020; Groos et al., 2019; Vacca et al., 2017).

2. Objetivo general

Desarrollar un protocolo estandarizado para la utilización eficiente de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's) para el monitoreo, reporte y verificación del estado de desarrollo de las plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas ubicadas en Costa Rica.

3. Objetivos específicos

- 1- Evaluar dos softwares (*Pix4D mapper* y *WebODM*) utilizando diferentes opciones de procesamiento para imágenes obtenidas con VANT's de plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas.
- 2- Determinar las condiciones climáticas, GSD (cm/píxel), diseño de trazado y combinaciones de traslape óptimos para la planificación de vuelos de VANT's en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas.
- 3- Desarrollar modelos para estimar el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) medidos con la información derivada de parcelas de monitoreo establecidas en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas.

4. Planteamiento del problema

En Costa Rica, no se han desarrollado procedimientos estandarizados para la captura y procesamiento de datos provenientes de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT's) para el monitoreo de la calidad y estado de desarrollo (diámetro y altura) de plantaciones de las especies *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas.

El desarrollo de los procedimientos de captura y procesamiento de estos datos deben ser planteados considerando múltiples factores, tales como: tipo de VANT disponible, sensor o cámara a bordo del VANT, hora del día en que se hace el vuelo, altura de vuelo, porcentaje de traslape entre imágenes tomadas, patrones de vuelo y software de procesamiento que a su vez interactúan con las características de la plantación (área total, especie, pendiente del terreno, y porcentaje de cobertura de copas).

La falta de procedimientos estandarizados para la captura y procesamiento de los datos de un VANT adecuados y ajustados a las condiciones de las especies incurriría en problemas para la ejecución eficiente del monitoreo forestal en estas plantaciones forestales, específicamente acerca del estado fitosanitario, el estado de desarrollo (diámetro y altura) y de la productividad (número de árboles por hectárea y biomasa viva).

Por lo tanto, la elaboración de estos procedimientos requiere un análisis experimental para probar las siguientes variables: patrones de vuelo, alturas de vuelo, traslapes entre imágenes (frontal y lateral) y software de procesamiento en cada plantación. Lo anterior permitirá determinar cuáles son las variables que mejor se ajustan a la especie en estudio, tamaño de la plantación, edad de la plantación y condiciones topográficas del sitio (pendiente del terreno).

5. Justificación

Los VANT's son una tecnología emergente en el campo forestal en Costa Rica y tanto empresas, productores, así como FONAFIFO han venido utilizando. Sin embargo, actualmente no existe un criterio estandarizado de cómo volar los drones para obtener información homogénea y comparable, específicamente para plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas, las cuales son especies importantes en el país.

Estos VANT's en la actualidad han sido incorporados en el monitoreo de plantaciones forestales, gracias a que ofrecen varias ventajas, entre ellas: se logra una manera fácil y rápida de monitorear la salud y estado de desarrollo de los árboles, permite identificar cualquier área de la plantación que requiera mejorías, se evitan grandes recorridos en plantaciones extensas y se logra una disminución del tiempo en el que se realiza el monitoreo ya que el dron puede realizar el recorrido de la plantación en menor tiempo, y ubicar las áreas con problemas con mayor exactitud.

Específicamente con el desarrollo de este estudio, el establecimiento de procedimientos estandarizados para la captura y procesamiento de datos provenientes aplicados a plantaciones de *G. arborea*, *T. grandis* y mixtas permitió conocer cuáles parámetros de las variables a estudiar (altura de vuelo, software de procesamiento, porcentaje de traslapes y diseño de trazado) son los más recomendables para cada una de las especies considerando aspecto de tamaño, edad, pendiente del terreno y así poder elaborar protocolos y procedimientos que permitan una recolección y procesamiento eficiente de la información.

Por último, el proyecto permitió desarrollar un protocolo para el monitoreo de plantaciones forestales que dará el paso al desarrollo de una silvicultura de precisión orientada a incrementar la productividad de las plantaciones y la reducción de costos de producción. Esto ayuda a la obtención de información más precisa y detallada de los árboles, su tamaño y productividad.

6. Revisión de literatura

6.1. Monitoreo de Plantaciones Forestales

El monitoreo de plantaciones es considerado como un esfuerzo continuo e indispensable para aumentar la producción y rentabilidad de dicha actividad (Ortiz et al., 2020). Este monitoreo conlleva la estimación de diferentes variables que conforman el inventario forestal (Guerra-Hernández et al., 2019). Algunas de las variables que forman parte de él son altura del árbol (Sibona et al., 2017) y diámetro a 1,3 m de altura (Liu et al., 2018).

Estas dimensiones por lo general se miden a mano después de un intenso trabajo de campo (inventario forestal) y a partir de esta información se puede obtener datos del desarrollo de las plantaciones forestales (Torres-Sánchez et al., 2015). Estas mediciones pueden consumir tiempo, recursos, dinero y pueden estar asociadas a errores altos por lo que se deben buscar métodos alternativos que puedan superar los inconvenientes de la adquisición de datos en campo (Corte et al., 2020; Panagiotidis et al., 2017; Williams et al., 1994).

6.2. Drones en el Monitoreo Forestal

En los últimos años han tomado mayor importancia los vehículos aéreos no tripulados (VANT's). En diferentes investigaciones se ha demostrado las grandes ventajas que presenta este tipo de tecnología con respecto a otras como misiones aerotransportadas o por satélite debido a su bajo costo y mayor flexibilidad en la programación de vuelos. Otra de las ventajas de los VANT's es que pueden volar automáticamente a bajas altitudes y con grandes superposiciones, lo que permite la adquisición de imágenes de altísima resolución espacial que se derivan en información de alta calidad (Humble et al., 2014; Nex & Remondino, 2014; Torres-Sánchez et al., 2015; Zhang & Kovacs, 2012).

Los drones pueden ofrecer a los productores forestales una manera fácil y rápida de monitorear la salud y el estado de desarrollo de sus árboles, e identificar áreas con problemas que requieran algún tipo de mejora (Ortiz et al., 2020). Este tipo de tecnología ha sido muy utilizada en el campo forestal para diversas aplicaciones (Dash et al., 2016), y las labores de monitoreo forestal no ha sido una excepción (A. Khan et al., 2020; W. Wu et al., 2020).

6.3. Parámetros de planificación de vuelos

Existen diversas variables de planificación de vuelos, las cuales han sido utilizadas en una gran cantidad de investigaciones. Normalmente la mayoría de estos trabajos comienza con la definición de estos (Frey et al., 2018; Hugenholtz et al., 2013).

6.3.1. Altura de vuelo

La altura de vuelo es de gran importancia debido a que es una de las variables más importantes en el cálculo de la resolución espacial (GSD), la cual depende también de la distancia focal de la cámara en el VANT. Una mayor altura de vuelo deriva en un GSD mayor, lo que genera resultados menos detallados. En cambio, una altura menor de vuelo, genera resultados más detallados (Manconi et al., 2019; Pix4D, 2019). En Costa Rica, la altura máxima de vuelo permitida por la Dirección General de Aviación Civil es de 120 metros.

6.3.2. Distancia de superficie en tierra (GSD)

El GSD es la distancia medida entre dos centros de píxeles consecutivos medida sobre el terreno. Como se mencionó anteriormente depende de la altura de vuelo (relación lineal) y también de las especificaciones de la cámara (Pix4D, 2021a). Cuanto mayor sea el GSD de la imagen, menor será la resolución espacial de la misma y los detalles serán menos visibles (Pix4D, 2019).

6.3.3. Porcentajes de traslape (Lateral y Frontal)

El porcentaje de traslape afecta la densidad de puntos que generan los diferentes productos generados por el VANT. Sin embargo, se sabe que un mayor porcentaje de traslape deriva en un mayor tiempo de vuelo, tamaño de los archivos y tiempo de procesamiento. Los porcentajes de traslape recomendados son de $60 \% \pm 5\%$, esto para evitar que haya vacíos de información a la hora de generar los ortomosaicos y modelos de elevación (Abdullah, 2019).

6.3.4. Diseño de trazado

A la hora de realizar el vuelo con un VANT, existen dos diseños de trazado que en la investigación se definieron como (2D y 3D). El primero hace referencia al modo de vuelo *Grid* en el cual se realiza una pasada sobre el área de trabajo. Por otra parte, el segundo hace referencia al modo *Double grid*, en el cual se hacen dos pasadas sobre el área de trabajo y se escoge cuando se desea obtener mejores productos 3D (Pix4D, 2021b). Ambos diseños de trazado pueden

presentar diferentes afectaciones en la etapa de planificación de vuelos (Liang & Jia, 2016). Por ejemplo, Raja, (2012) menciona que pueden tener restricciones de tiempo, distancia y consumo de energía lo que hace importante su investigación para poder optimizar dichos recursos.

6.3.5. Época del año

En Costa Rica, existen dos épocas bien definidas (seca y lluviosa) (Sánchez Porras et al., 2020). Es importante recordar que algunas especies pierden las hojas durante la época seca, tal es el caso de *Tectona grandis* (Alcívar, 2020) lo cual podría influenciar a la hora de hacer cálculos sobre los diferentes productos generados por el VANT.

6.3.6. Otras variables

Existen muchas otras variables que deben ser consideradas a la hora de realizar los vuelos con el VANT, por ejemplo, en diferentes investigaciones se ha tomado en cuenta: el ángulo de la cámara (Nesbit & Hugenholtz, 2019; Park et al., 2019), la velocidad del vuelo (Lv et al., 2019) y configuración de la cámara (Zhou et al., 2020).

6.4. Software de procesamiento de datos

A la hora de procesar datos derivados de un VANT, es de gran importancia evaluar el rendimiento de las diferentes opciones de software que existen (Casella et al., 2020). Tal como lo realizó Sona et al. (2014), en esta investigación se evaluaron diferentes softwares para el procesamiento de datos provenientes de drones, en los cuales dentro de los más importantes y conocidos se encontraba *Pix4D* y *Agisoft Photoscan*. En otra investigación realizada por Jaud et al. (2016) evaluaron los modelos de elevación digital obtenidos con diferentes softwares: *Agisoft Photoscan* y *MicMac*.

6.4.1. Software *Pix4D mapper*

Es un software fotogramétrico de pago para el mapeo profesional con drones. Permite capturar imágenes RGB, térmicas o multiespectrales con cualquier cámara. Los precios van de los 291 dólares al mes y 1900 dólares por un pago único. Dentro de los productos que entrega el programa se encuentran: ortomosaicos, modelo de elevación de superficie y terreno, mapas térmicos, líneas de contorno, mapas de índices vegetación y reflectancia, entre otros (*Pix4D*, 2021c).

6.4.2. Software WebODM

Es un software fotogramétrico de pago que permite el procesamiento de datos de un VANT y que recibe ayuda de diferentes organizaciones o miembros de la comunidad. El precio ronda los 57 dólares y consiste en un pago único. Los productos que se pueden obtener con este software son: ortomosaicos, modelos de elevación, nube de puntos, modelos 3D, índices de vegetación, entre otros (OpenDroneMap, 2021a).

6.5. Modelos de estimación del diámetro a 1,3 m de altura (d)

En los últimos años han surgido diferentes investigaciones que estudian la relación entre el diámetro a 1,3 m de altura (d) y el diámetro de copa (dc). Por ejemplo, Malleux, (1970) realizó un estudio de la relación entre el d y el dc en especies de un Bosque Húmedo sub tropical. En un estudio realizado en Argentina con la especie *Schinopsis balansae* para ver su crecimiento, se encontró una correlación entre el d y el dc. En esta investigación se creó un modelo de regresión logarítmico en el cual se obtuvo un R^2 de 0,71 (Barkl et al., 1999). En Tailandia, se realizó un modelo para predecir el diámetro a 1,3 m de altura en función del diámetro de copa y se obtuvo un valor de R^2 de 0,51 (Hardjana, 2013). Por último, en un estudio realizado en Brasil con diferentes especies, se obtuvieron modelos con valores de R^2 entre 0,46 a 0,79 (Sanquetta et al., 2013).

7. Materiales y métodos

7.1. Descripción del sitio

El estudio se realizó en Costa Rica en las provincias de Alajuela, Guanacaste, Limón, Heredia y Puntarenas. A continuación, se describen cada una de ellas.

Alajuela se encuentra ubicada entre las coordenadas 10°34' latitud Norte y 84°36' longitud Oeste. Presenta varias zonas de vida según la clasificación de Holdridge (Holdridge, 1967), entre ellas se encuentran: Bosque Muy Húmedo Tropical transición a Premontano, Bosque Muy Húmedo Premontano, el Bosque Húmedo Tropical transición a Premontano, el Bosque Pluvial Premontano, el Bosque Húmedo Tropical transición a per-húmedo y el Bosque Pluvial Montano Bajo, otras transiciones de Bosque Húmedo Tropical completan el resto. Esta zona presenta dos estaciones definidas, seca y lluviosa, la primera comprende los meses de diciembre-abril mientras que la segunda de mayo-noviembre. La temperatura promedio anual es de 22,3 °C y la precipitación anual de 2069 mm (Dávila, 2011a; Climate-data. Org s.f.a; INA, s.f.).

La provincia de Guanacaste se encuentra ubicada entre las coordenadas 10°26' latitud Norte y 85°24', longitud Oeste. Se caracteriza por tener varias zonas de vida, entre ellas se encuentran: Bosque Húmedo Premontano, Bosque Muy Húmedo Tropical transición a Premontano, Bosque Húmedo Tropical transición a seco, Bosque Seco Tropical, Bosque Muy Húmedo Premontano, Bosque Seco Tropical transición per-húmedo y el resto entre Bosque Muy Húmedo y transiciones. Esta zona presenta dos estaciones definidas, seca y lluviosa, la primera comprende los meses de diciembre a abril mientras que la segunda de mayo a noviembre. La temperatura y precipitación promedio anual de la zona es de 27, 1° C y 1500-2000 mm respectivamente (Dávila, 2011b & INA s.f.).

Limón se encuentra ubicada entre las coordenadas 10°29' latitud Norte y 83°15', longitud Oeste. Se caracteriza por tener varias zonas de vida entre ellas se destacan: Bosque Muy Húmedo Subtropical, Bosque Muy Húmedo Montano Bajo y Bosque Húmedo Tropical. Esta zona presenta dos estaciones definidas, época seca y lluviosa, la primera comprende los meses de diciembre a abril mientras que la segunda de mayo a noviembre. La temperatura y precipitación

promedio de anual de la zona es de 24, 6° C y 3226 mm respectivamente (Dávila, 2011c; Climate-data. Org s.fb; Solano & Villalobos, s.f.).

La provincia de Heredia se encuentra ubicada entre las coordenadas 10°25' latitud Norte y 84°00', longitud Oeste. Se caracteriza por tener varias zonas de vida entre ellas: Bosque Muy Húmedo Tropical, Bosque Húmedo Tropical, Bosque Húmedo Subtropical y Bosque Muy Húmedo Subtropical. Esta zona presenta dos estaciones definidas, época seca y lluviosa, la primera comprende los meses de diciembre a abril mientras que la segunda de mayo a noviembre. La temperatura y precipitación promedio de anual de la zona es de 19,8° C y 1500-2000 mm respectivamente (Dávila, 2011d; Solano & Villalobos, s.f.).

Puntarenas se encuentra ubicada entre las coordenadas 09°58' latitud Norte y 84°50', longitud Oeste. Se caracteriza por tener varias zonas de vida entre ellas: Bosque Húmedo Tropical, Bosque Húmedo Subtropical, Bosque Muy Húmedo Subtropical, Bosque Muy Húmedo Bajo y Bosque Muy Húmedo Montano. Esta zona presenta dos estaciones definidas, época seca y lluviosa, la primera comprende los meses de diciembre a abril mientras que la segunda de mayo a noviembre. La temperatura y precipitación promedio de anual de la zona es de 27° C y 1500-2100 mm respectivamente (Dávila, 2011e; Solano & Villalobos, s.f.).

7.2. Descripción de las plantaciones

Se utilizaron un total de seis plantaciones (figura 1) las cuales se encuentran distribuidas de la siguiente forma: una de *Gmelina arborea*, cuatro de *Tectona grandis* y una plantación mixta. Cabe resaltar que para la presente investigación se visitaron dos o tres veces algunos de los sitios (Abangares, Pocora y Santa Rita). Todas estas son pertenecientes a empresas forestales que se encontraban dentro del programa de Pago de Servicios Ambientales (PSA) del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) o son propietarios/empresas que no cumplieran esta condición pero que están ubicados en las zonas descritas anteriormente.

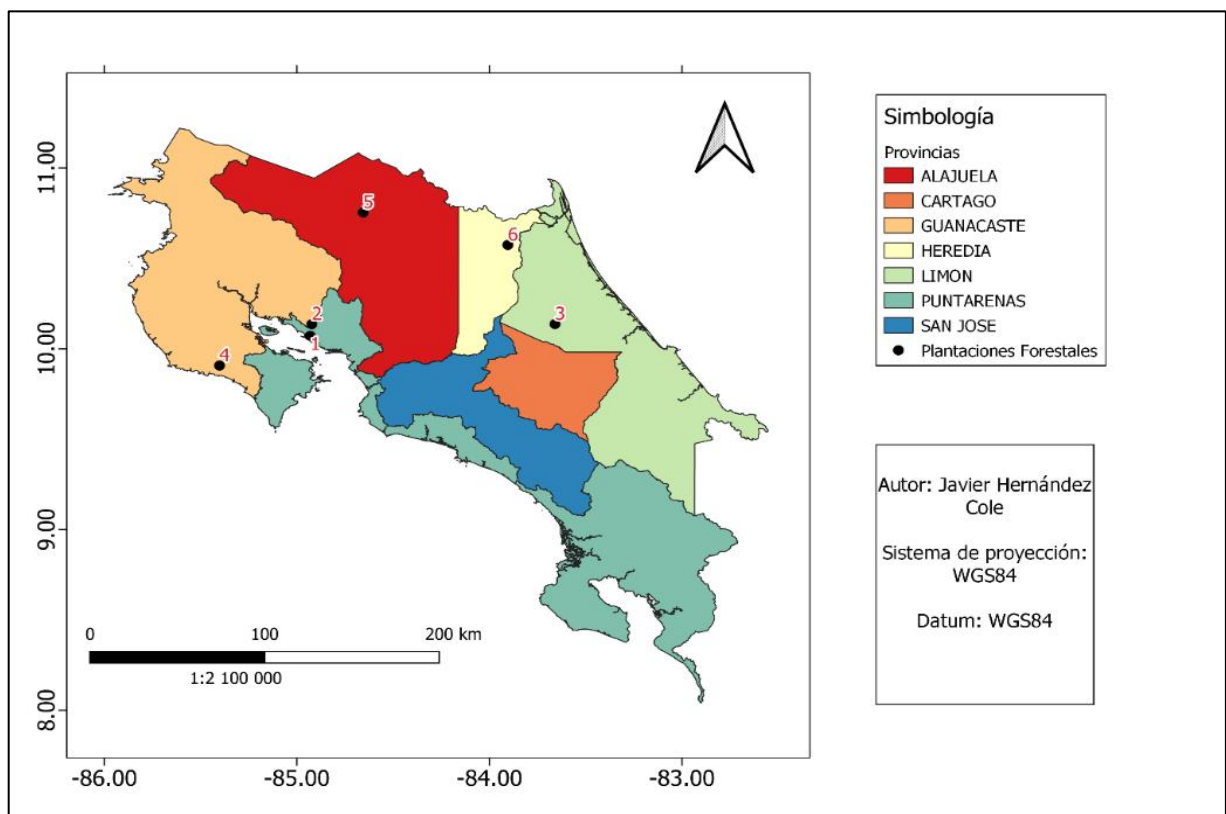


Figura 1. Ubicación de las plantaciones en Costa Rica.

En cuanto a las características de cada una de las plantaciones, se encuentran descritas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Ubicación, especie, tamaño y edad de las plantaciones evaluadas.

Número	Provincia	Sitio	Especie	Edad (años)
1	Puntarenas	Punta Morales	<i>Tectona grandis</i>	3,3
2	Guanacaste	Abangares	<i>Tectona grandis</i>	4,7
3	Limón	Pocora	Plantación Mixta	2,1
4	Guanacaste	Hojancha	<i>Tectona grandis</i>	3,7
5	Alajuela	Santa Rita	<i>Gmelina arborea</i>	2,5
6	Heredia	Sarapiquí	<i>Tectona grandis</i>	5,2

7.3. Determinación de software y opciones de procesamiento óptimas

7.3.1. Diseño experimental

El diseño del experimento fue un diseño factorial (4x2) en el cual los factores fueron las opciones de procesamiento con cuatro niveles (cuadro 2) y los tipos de software con dos niveles: *Pix4D mapper*® y *WebODM*® (versión standard).

Cuadro 2. Opciones de procesamiento utilizadas en cada software para el procesamiento de las imágenes.

Opción	Tipo de procesamiento	Computadora	RAM utilizado	Unidad central de procesamiento (cantidad de núcleos)	Memoria swap (GB)	Tamaño del disco (bytes)	Procesador	Tarjeta gráfica (modelo)
1	A	Asus X556UQK	8 Gb	3	2.5	64	Icore 5 7th Gen	NVIDIA GEFORCE 940 Mx.
2	B	Asus X556UQK	8 Gb	3	2.5	64	Icore 5 7th Gen	NVIDIA GEFORCE 940 Mx.
3	C	Asus VivoBook 15 X512F	8 Gb	8	ND	ND	Icore 5 8th Gen	NVIDIA GEFORCE 240 Mx.

4	C	Lenovo 82B5	15 Gb	12	ND	ND	Icore 5 8th Gen	NVIDIA GTX 1650 Ti
---	---	-------------	-------	----	----	----	--------------------	--------------------------

Dónde: A: DSM+DTM + algoritmo sift, B: DSM+DTM + algoritmo hahog, C: Template 3D maps + habilitación DTM, ND: no disponible para cambiar en el software. Con la opción 1 se procesaron 10 sitios y 60 vuelos. Con la opción 2 se procesaron 10 sitios y 60 vuelos. Con la opción 3 se procesaron 4 sitios y 28 vuelos. Con la opción 4 se procesaron 6 sitios y 32 vuelos.

Para determinar las mejores opciones de procesamiento y software se evaluaron las siguientes variables de respuesta: tiempo de procesamiento (horas/hectárea), porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico (área con vacío de información se refiere a huecos o parches negros dentro del ortomosaico) y fallo en el procesamiento.

7.3.2. Procesamiento y análisis estadístico de la información

El procesamiento de la información obtenida se realizó con ayuda de los softwares *Pix4D mapper*® y *WebODM*®, utilizando tres computadoras distintas y las opciones de procesamiento descritas anteriormente (cuadro 2). Se utilizó el procedimiento descrito en el manual desarrollado por Tapia, et al. (2019), el cual especifica la forma en que se realiza el procesamiento de datos provenientes de un VANT para los dos softwares a utilizar. Al finalizar el procesamiento de los datos, se evaluó el tiempo de procesamiento (horas/ha) el cual fue posible obtener gracias al reporte brindado por el software y el área total del ortomosaico sin vacíos de información obtenido en el programa *Qgis* ®. Por otra parte, el porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico se calculó con ayuda de herramientas presentes en *Qgis* ®. Por último, el fallo en el procesamiento, se evaluó de la siguiente forma: se asignó 0 si el procesamiento falló y 1 si este se pudo ejecutar.

Una vez procesada la información, se realizaron análisis para verificar la normalidad de los datos obtenidos, sin embargo, estos resultados indicaron que no había un comportamiento normal en algunas de las muestras, por lo que había que optar por la realización de una prueba no paramétrica.

Para las variables de respuesta tiempo de procesamiento (horas/hectárea) y porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico) se ejecutó una prueba no paramétrica Kruskal Wallis y una comparación de medianas, adicionalmente se hicieron pruebas paramétricas (análisis de varianza) con la finalidad de comparar los resultados entre la prueba paramétrica y no paramétrica así como análisis gráficos para visualizar el comportamiento de estas variables de respuesta con respecto a la cantidad de imágenes. En cuanto a la variable de respuesta: fallo de procesamiento (0 y 1) se propuso realizar una regresión logística, en la cual se propusieron dos modelos (el primero considerando los factores software, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes mientras que el segundo consideró los factores opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes). Por último, también se realizó un análisis gráfico para visualizar la cantidad de fallos presentes por software, opción de procesamiento y cantidad de imágenes. Todos los análisis se realizaron con ayuda del programa estadístico *Infostat®*, *Minitab®* y *Excel®*.

7.4. Determinación de condiciones óptimas para la captura de datos

7.4.1. Planificación de los vuelos del VANT

La programación de los vuelos del VANT se realizó con base en el procedimiento para la realización de vuelos planificados utilizando la aplicación *Pix4Dcapture®* descrito por Tapia et al. (2019) considerando los factores: combinación de traslape (lateral y frontal, por ejemplo: 70 y 80%), y altura de vuelo (en m), el cual define el GSD de las imágenes (2,22; 2,49; 3,27 y 3,32 cm/píxel), así como otros parámetros (cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros de planificación de vuelos utilizados y número de visitas realizadas a las diferentes plantaciones.

Plantación	Sitio	Especie	Época del año	Diseño de trazado	GSD (cm/píxel)	Altura de vuelo (m)	Combinación de traslape lateral y frontal (%)	Número de visitas
1	Punta Morales	<i>Tectona grandis</i>	Seca	2D, 3D	3.27 y 3.32	120	70-80%	1
2	Abangares	<i>Tectona grandis</i>	Seca y lluviosa	2D, 3D	2.22, 2.49, 3.27, 3.32	80, 90, 120	70-70% 80-80% 70-80%	3
3	Pocora	Mixta	Seca y lluviosa	2D, 3D	2.22, 2.49, 3.27, 3.32	80, 90, 120	70-70% 80-80% 70-80%	2
4	Hojancha	<i>Tectona grandis</i>	Lluviosa	2D, 3D	2.22, 2.49, 3.27, 3.32	80, 90, 120	70-70% 80-80% 70-80%	1
5	Santa Rita	<i>Gmelina arborea</i>	Seca y lluviosa	2D, 3D	2.22, 2.49, 3.27, 3.32	80, 90, 120	70-70% 80-80% 70-80%	2
6	Sarapiquí	<i>Tectona grandis</i>	Seca	2D, 3D	2.22, 2.49, 3.27, 3.32	80, 90, 120	70-70% 80-80% 70-80%	1

Nota: Seca: más de 5 meses sin precipitación y lluviosa: menos de 5 meses sin precipitación. Número de visitas: cantidad de veces que se visitó la plantación.

7.4.2. Desarrollo del vuelo del VANT e imágenes obtenidas

Se utilizó un dron DJI WAV Phantom 4 Pro model (DJI, China) (cuadro 4) para realizar los vuelos en cada una de las plantaciones. Para esta etapa se posicionó al dron en el punto de partida (dentro de la plantación) definido en la etapa de planificación de los vuelos y se procedió a iniciar el vuelo del mismo con ayuda de la aplicación de *Pix4Dcapture®* y un celular.

Es importante mencionar que el dron siguió el camino diseñado en la etapa de planificación de vuelos, por lo que solo se debió esperar a que este realizara el recorrido dentro de la plantación. No se utilizaron puntos de control debido a que no era necesario por los objetivos del proyecto y fue una decisión que se tomó con antelación. Por último, con respecto a las imágenes obtenidas, estas variaron según el tamaño de cada plantación y vuelo realizado (aproximadamente 30-350 imágenes).

Cuadro 4. Características del VANT Phantom 4 Pro.

VANT	Velocidad y tiempo de vuelo	Lente	Sensor cámara	Tamaño Fotografía
Phanton 4 Pro V2.0	50 a 72 km/hora 20-30 minutos Distancia de operación: 3 km	FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 - f/11 auto focus at 1 m - ∞	1'' CMOS Píxeles efectivos: 20M	3:2 Aspect Ratio: 5472 × 3648 4:3 Aspect Ratio: 4864 × 3648 16:9 Aspect Ratio: 5472 × 3078

7.4.3. Diseño experimental

El diseño del experimento consistió en un diseño factorial considerando los siguientes factores de tres y cuatro niveles: combinación de traslape (lateral y frontal, por ejemplo: 70 y 80%) y altura de vuelo (en m), el cual define el GSD de las imágenes (2,22; 2,49; 3,27 y 3,32 cm/píxel). Para determinar los mejores parámetros de configuración de vuelo se evaluaron las siguientes variables de respuesta: tiempo de procesamiento por hectárea, porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico (área con vacío de información se refiere a huecos o parches negros dentro del ortomosaico) y fallo en el procesamiento.

7.4.4. Procesamiento y análisis estadístico de la información

El procesamiento de la información obtenida se realizó con base en ambos softwares (*WebODM* y *Pix4D mapper*). Se utilizó el procedimiento descrito en el manual desarrollado por (Tapia, et al. 2019). En este manual viene descrita la forma en que se realiza el procesamiento de datos provenientes de un VANT para el software seleccionado.

Una vez procesada la información, se realizaron análisis para verificar la normalidad de los datos obtenidos, sin embargo, estos resultados indicaron que no había un comportamiento normal en los datos, por lo que había que optar por la realización de una prueba no paramétrica.

Para las variables de respuesta tiempo de procesamiento (horas/ha) y porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico se ejecutó una prueba no paramétrica Kruskal Wallis y una comparación de medianas, adicionalmente se hicieron pruebas paramétricas (análisis de varianza) con la finalidad de comparar resultados entre la prueba paramétrica y no paramétrica. Para finalizar, para evaluar la variable de respuesta: fallo de procesamiento (0 y 1) se propuso realizar una regresión logística, en la cual se propusieron dos modelos (el primero considerando los factores software, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes, mientras que el segundo consideró los factores opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes). Por otra parte, se realizó un análisis gráfico para ver la cantidad de fallos en el procesamiento por GSD, porcentajes de traslape y cantidad de imágenes. Todos los análisis se realizaron con ayuda del programa estadístico *Infostat*®, *Minitab*® y *Excel*®.

7.4.5. Influencia de la época del año en labores de monitoreo

A la hora de realizar labores de monitoreo de plantaciones forestales con información proveniente de un VANT (ortomosaicos) es importante tomar en cuenta la época del año en la que se realiza el vuelo. Por esta razón se incluyó en los resultados una comparación entre un ortomosaico realizado en época seca y otro en época lluviosa, con la finalidad de observar las diferencias entre ambos.

7.5. Elaboración de modelos de predicción de diámetro a 1,3 m de altura a partir del diámetro de copa

7.5.1. Plantaciones y muestreo utilizado

En la presente investigación, se elaboraron modelos de predicción del diámetro a 1,30 m de altura debido a la dificultad de poder estimar esta variable de manera directa utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). Se utilizaron un total de cinco sitios: Santa Rita, San Pedro de Hojancha, Abangares, Punta Morales y Pocora, los cuales abarcaban las especies de *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus sp*, *Schizolobium parahyba*, *Terminalia*

amazonia, Hyeronima alchorneoides, Acacia sp, Tabebuia rosea, Lauraceae, Tabebuia ochracea, Vochysia ferruginea, Swietenia macrophylla, Carapa guianensis, Cordia alliodora.

Se establecieron de forma aleatoria cuatro parcelas circulares en campo con un radio de 12,61 metros. Cada parcela fue georreferenciada y se aseguró que estuvieran dentro del área del vuelo.

7.5.2. Variables a medir en plantación

Las variables medidas en campo fueron diámetro a 1,3 m de altura (d) con ayuda de una cinta diamétrica, altura total mediante el uso de un hipsómetro y diámetro de copa de los árboles de la plantación con ayuda de la cinta métrica, se tomaron dos mediciones del diámetro de copa (sentido Norte-Sur y Este-Oeste). Se escogió predecir la variable diámetro debido a que es la más utilizada para conocer el estado de desarrollo de la plantación, de la cual se puede derivar otra información de importancia. La variable diámetro de copa fue seleccionada como predictora de los modelos debido a que presenta una alta correlación con el diámetro medido a la altura de pecho según literatura consultada en línea y opinión de expertos en el tema.

7.5.3. Procesamiento información

Para la elaboración de los modelos se siguieron los pasos propuestos por (Ortiz, 2020):

1. Se midió las dimensiones básicas de la muestra (d y dc).
2. Se graficó la variable independiente y dependiente con la finalidad de: corregir errores, identificar *outliers* y proponer al menos cuatro modelos alternativos.
3. Se separó un 10-15% de los datos para validación del modelo.
4. Se realizó un análisis de regresión de cada modelo propuesto y se calcularon los siguientes estadísticos de precisión:

Coeficiente de determinación (R^2): Indica la proporción de variación total observada en la variable dependiente, que es explicada por el modelo utilizado (Ortiz, 2016). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_{obs} - y_{est})^2}{\Sigma(y_{obs} - y_{med})^2} \quad (1)$$

Dónde:

y_{obs} : es cada uno de los valores observados de la variable dependiente.

y_{est} : es cada uno de los valores de la variable dependiente estimados a través del modelo de regresión desarrollado.

y_{med} : es la media aritmética de la variable dependiente.

Error estándar de la medición (Sy_x): Este es el segundo estadístico más utilizado para comparar modelos de regresión (Ortiz, 2016). Se determinó de la siguiente manera:

$$Sy_x = \left[\frac{\Sigma(y_{obs} - y_{est})^2}{n - p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Dónde:

n : número de observaciones incluidas en el análisis.

p : número de coeficientes en el modelo de regresión.

Índice de ajuste (FI): Se utilizó para comparar la exactitud de los modelos en los que su variable dependiente requirió ser transformada, mientras los demás modelos se encontraran en unidades reales. Para los modelos sin transformar $FI = R^2$ (Ortiz, 2016). Se determinó de la siguiente manera:

$$FI = 1 - \frac{\Sigma(y_{obs} - y_{e.u.r})^2}{\Sigma(y_{obs} - y_{med})^2} \quad (3)$$

Dónde:

y_{obs} : son cada uno de los valores observados de la variable dependiente, expresados en unidades reales, es decir, sin transformar.

$y_{e.u.r}$: son los valores de la variable dependiente, estimados a partir del modelo de regresión pero en unidades reales.

y_{med} : es la media aritmética de los valores observados de la variable dependiente, calculada a partir de los valores sin transformar.

Error estándar en unidades reales (Se): Fue útil para comparar los modelos que necesitaron ser transformados contra los modelos sin transformar. Para el caso de los modelos sin transformar el $Sy_x = Se$ (Ortiz, 2016).

$$Se = \left[\frac{\sum (y_{obs} - y_{e.u.r})^2}{n - p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Dónde:

n: número de observaciones incluidas en el análisis.

p: número de coeficientes en el modelo de regresión.

Coefficiente de variación expresado en unidades reales (CV %): Permite realizar comparaciones entre modelos.

$$CV \% = \left[\frac{Se}{Y_{med}} \right] * 100 \quad (5)$$

Análisis de residuos: Se definió como residuo (resd) a la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente (Y_{obs}) y el valor estimado o predicho por el modelo de regresión (Y_{est}) (Ortiz, 2016).

$$Resd = Y_{obs} - Y_{est} \quad (6)$$

5. Se escogió el mejor modelo con base en los estadísticos de precisión.
6. Se validó el modelo utilizando la base separada en el punto 3 y los siguientes criterios:
 - a) Sesgo: Se calculó de la siguiente manera:

$$S\% = \frac{\Sigma(y_{obs} - y_{est})}{\Sigma(y_{obs})} * 100$$

- b) Prueba de Wilcoxon: Se realizó con base en lo mencionado en el libro de Crecimiento y Rendimiento Forestal elaborado por (Ortiz, 2016). La fórmula empleada fue la siguiente:

$$Zc = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\left(\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}\right)}}$$

Dónde:

T: Corresponde al menor valor absoluto de la suma de ranking (+/-).

n: Corresponde al número de observaciones utilizadas en la validación.

Las hipótesis revisadas fueron:

- Hipótesis nula (H_0): la suma de los valores positivos del ranking es igual a la suma de valores negativos del ranking.
- Hipótesis alternativa: la suma de valores positivos del ranking es diferente a la suma de valores negativos del ranking.

7. Se presentó el modelo desarrollado con la información necesaria para su adecuado uso mediante una tabla de presentación.

7.5.4. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de regresión para los modelos propuestos con ayuda del programa Excel y R. Mientras que para el cálculo del porcentaje de sesgo se utilizó el programa Excel y para la prueba de Wilcoxon se empleó el programa PAST®.

7.5.5. Modelos elaborados y validación

Para cada una de las plantaciones se elaboró un total de cuatro modelos, los cuales son presentados en la sección de anexos (1, 3, 5, 7 y 9). Además, las pruebas de validación elaboradas para cada uno de los modelos seleccionados en cada plantación también se presentan en los anexos de este documento (2, 4, 6, 8 y 10).

8. Resultados

8.1. Variable de respuesta tiempo de procesamiento

El tiempo de procesamiento (horas/hectárea) presentó evidencia de diferencias estadísticas significativas según el tipo de software utilizado ($p < 0,05$). En la figura 2A, se puede observar que el software *Pix4D mapper* fue el que obtuvo una menor cantidad de tiempo con respecto a *WebODM*. En cuanto a las opciones de procesamiento (figura 2B), se observan diferencias estadísticas significativas entre algunas opciones ($p < 0,05$), siendo la #4 la que obtuvo un menor tiempo de procesamiento por hectárea, seguido de la opción 3 y posteriormente las opciones 1-2.

Al evaluar el tiempo de procesamiento (hrs/ha) según el GSD utilizado, se puede observar que hay evidencia de diferencias estadísticas significativas según la prueba de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). El vuelo empleado con un diseño de trazado 2D, a 120 metros de altura (3,27 cm/píxel) fue el que obtuvo un menor tiempo de procesamiento, seguido por el vuelo realizado a 120 metros de altura utilizando un trazado 3D (3,32 cm/píxel). De último quedaron los vuelos realizados a 80 y 90 utilizando un trazado 3D (2,22 y 2,49 cm/píxel respectivamente). Para finalizar, otro factor evaluado fueron los porcentajes de traslape, sin embargo, no hubo evidencias de diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) (figura 2C).

Los resultados obtenidos para el factor software y GSD (cm/píxel) fueron idénticos a los obtenidos en la prueba paramétrica. Con respecto al factor opciones de procesamiento, los resultados fueron similares, con la discrepancia de que la opción 3 y 4 no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí. Por último, en la prueba paramétrica si se encontraron diferencias significativas en al menos una combinación de traslape con respecto al tiempo de procesamiento/ha ($p>0,05$).

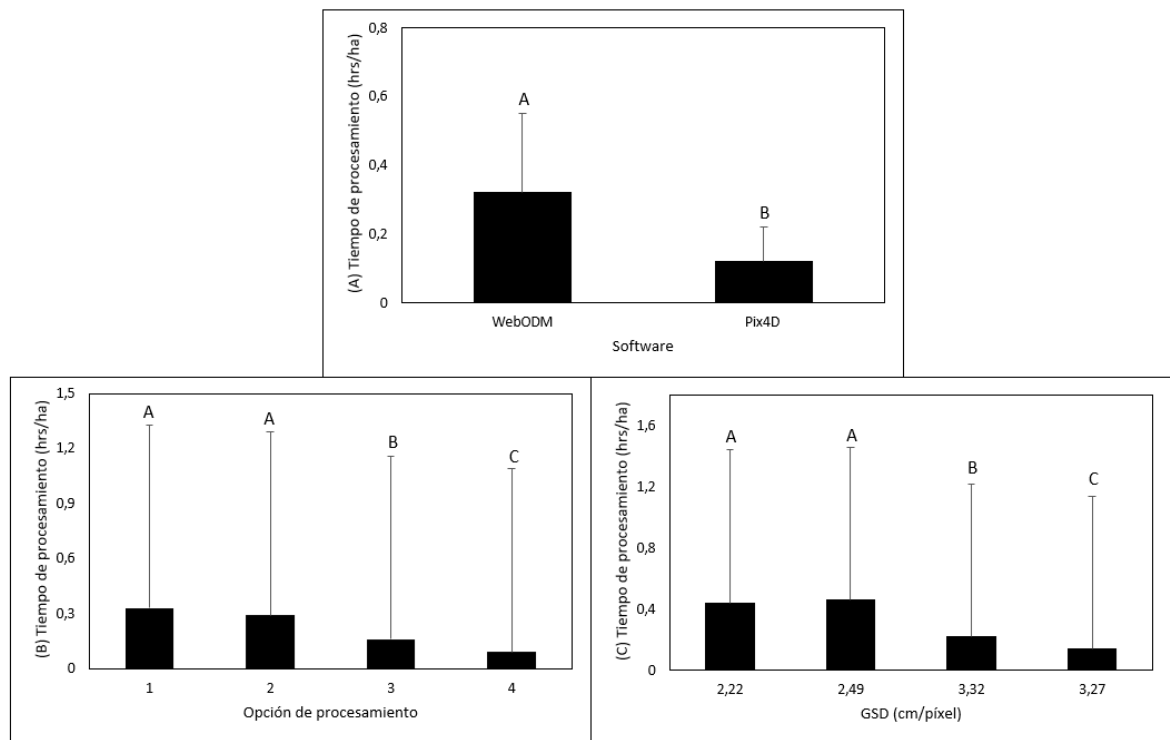


Figura 2. Diferencias en el tiempo de procesamiento según el tipo de software, opciones de procesamiento y GSD (cm/píxel). *Nota:* las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

Al examinar la interacción software x GSD es posible observar que se requiere un menor tiempo de procesamiento con el software *Pix4D mapper*, el GSD (3,27 cm/píxel) (figura 3A). Por otro lado, es posible visualizar que al procesar las imágenes con el software *Pix4D mapper* y cualquier combinación de traslape se obtienen los tiempos más bajos (figura 3B). En la figura

3C, se muestra que al realizar el procesamiento con la opción 4 y una menor resolución se obtienen mejores rendimientos (hrs/ha). Mientras que al utilizar la opción de procesamiento 4 y la mayoría de combinaciones de traslape el tiempo necesario para llevar a cabo el procesamiento disminuye (figura 3D). Para finalizar, los resultados obtenidos para estas interacciones (figura 3) son congruentes con los obtenidos en la prueba paramétrica.

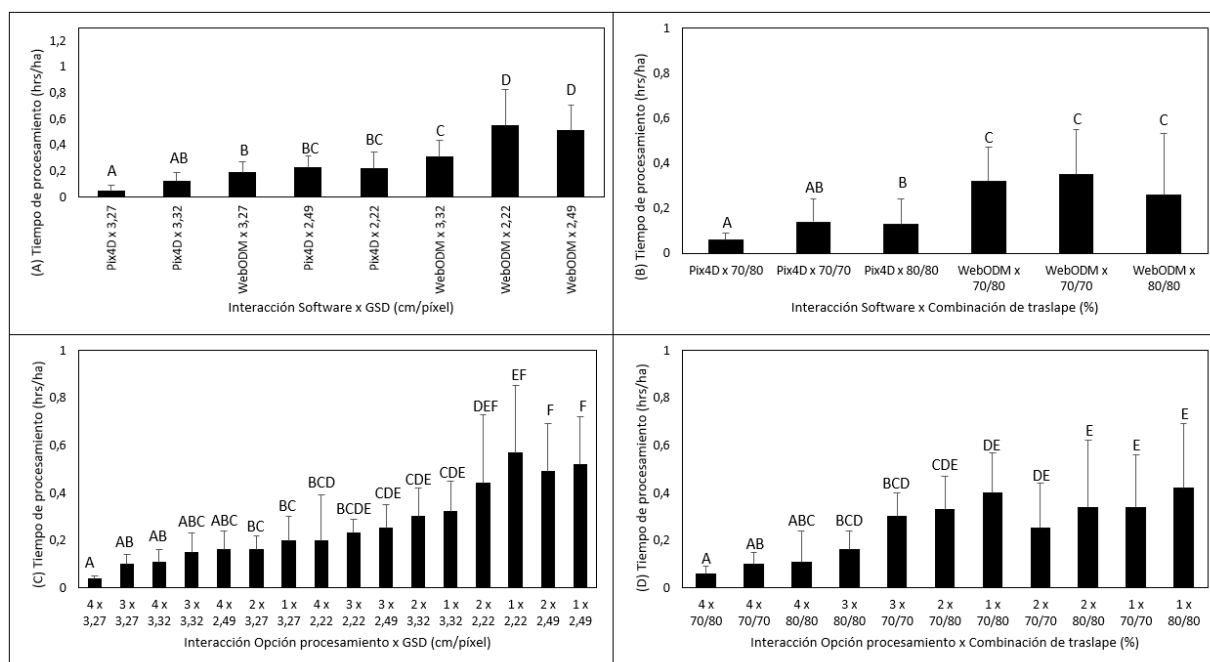


Figura 3. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores.

Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

La prueba Kruskal-Wallis muestra que al procesar imágenes con una baja resolución (3,27 cm/píxel), un trazado 2D, sumado a cualquiera de las combinaciones de traslape, se obtienen los valores más bajos de tiempo de procesamiento (hrs/ha) (figura 4A).

Por otra parte, al analizar la interacción software x GSD (cm/píxel) x combinaciones de traslapes se confirma lo que se ha presentado anteriormente, para poder obtener un menor tiempo de procesamiento es necesario procesar con el software *Pix4D mapper*, una baja resolución espacial (cm/píxel) y cualquier combinación de traslape. Finalmente, estos resultados coinciden con los obtenidos en la prueba paramétrica.

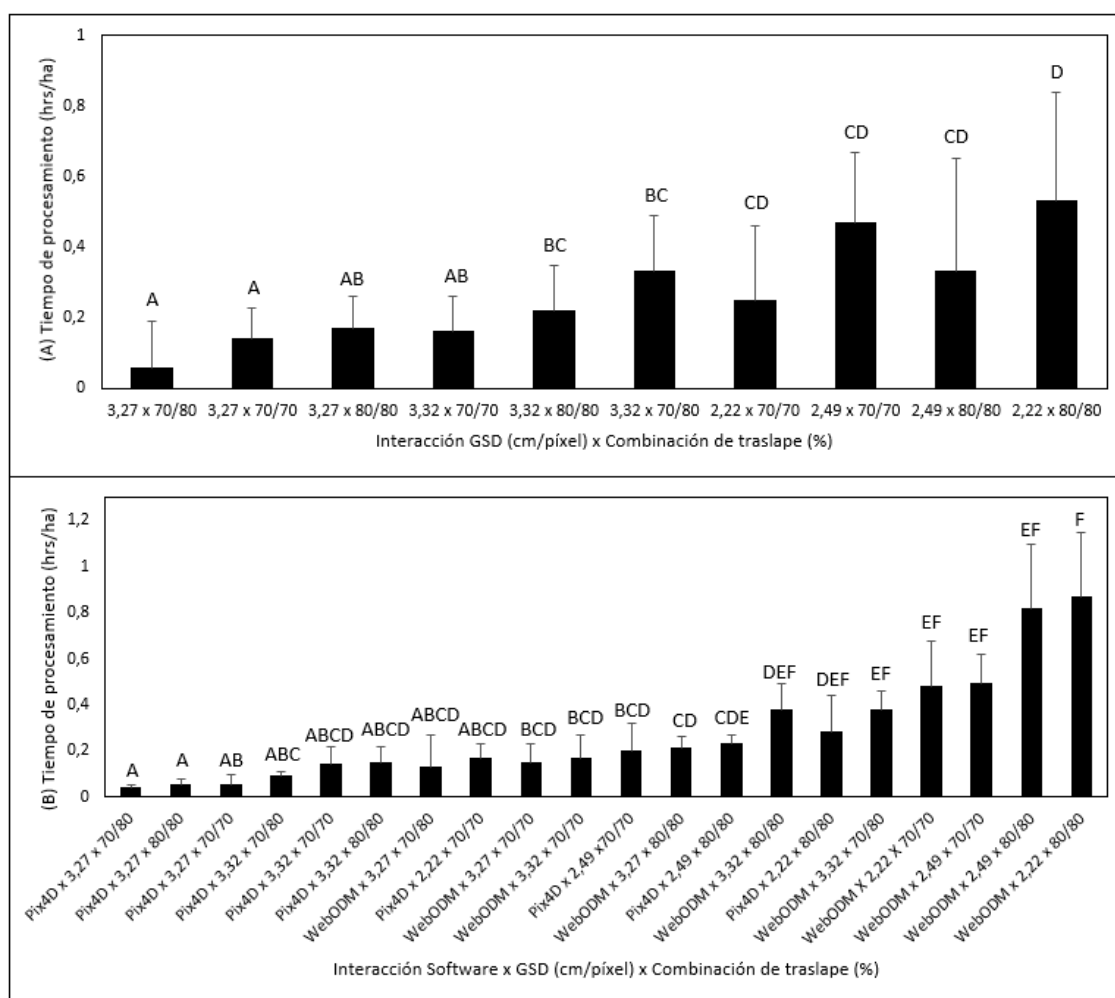


Figura 4. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores.

Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

En la figura 5, es posible apreciar la relación que existe entre el tiempo de procesamiento (hrs/ha) y la cantidad de imágenes. En la mayoría de los casos (especialmente con las opciones de procesamiento 1 y 2), conforme aumenta la cantidad de imágenes también aumenta el tiempo requerido en el procesamiento. Por otro lado, esta figura confirma los resultados que se han venido presentando con anterioridad. El software *Pix4D mapper* y la opción de procesamiento 4, alcanzaron un menor tiempo de procesamiento por hectárea (hrs/ha).

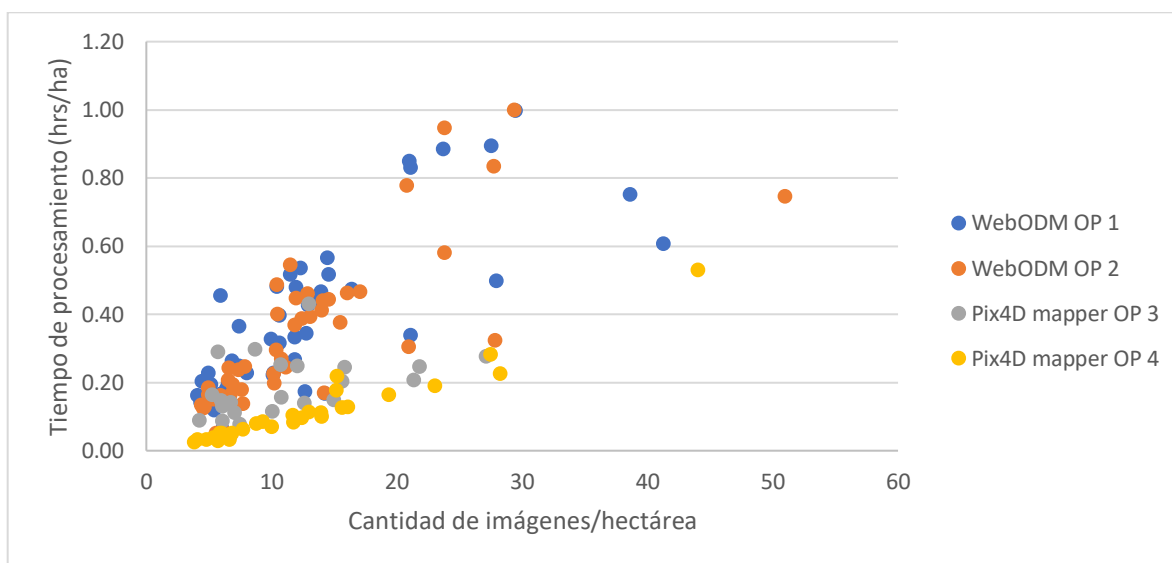


Figura 5. Relación entre el tiempo de procesamiento (hrs/ha) y la cantidad de imágenes/hectárea de cada vuelo según el tipo de software y opción de procesamiento utilizado.

8.2. Variable de respuesta porcentaje de área con vacío de información en el ortomosaico

Al analizar la figura 6A, hubo evidencia de diferencias estadísticas significativas en el área con vacío de información dentro del ortomosaico según el tipo de software utilizado ($p < 0,05$), siendo el software *Pix4D mapper* el que obtuvo mayor porcentaje de área con vacío de información. Por otra parte, las opciones de procesamiento no presentaron evidencias de diferencias estadísticas significativas al 95% de confiabilidad ($p > 0,05$) pero si a un 94% de confiabilidad ($p = 0,06$). A pesar de estos resultados, la opción de procesamiento que tuvo un mayor porcentaje de área afectada por zonas con vacío de información fue la 3 (1,06 %), seguidamente de la 4 (0,80%) y las opciones 1-2 (0,29 y 0,24% respectivamente). Estos resultados coinciden con los obtenidos en la prueba paramétrica.

La prueba de Kruskal-Wallis muestra evidencia de diferencias estadísticas significativas según el porcentaje de traslape al evaluar el área con vacío de información del ortomosaico ($p<0,05$). Es posible notar que la combinación de traslape (lateral: 70% y frontal: 80%) posee un porcentaje menor que las demás (figura 6B). Asimismo, a la hora de evaluar el GSD (cm/píxel) no fue posible encontrar diferencias estadísticas significativas ($p>0,05$). Por último, estos resultados coinciden con los alcanzados en la prueba paramétrica.

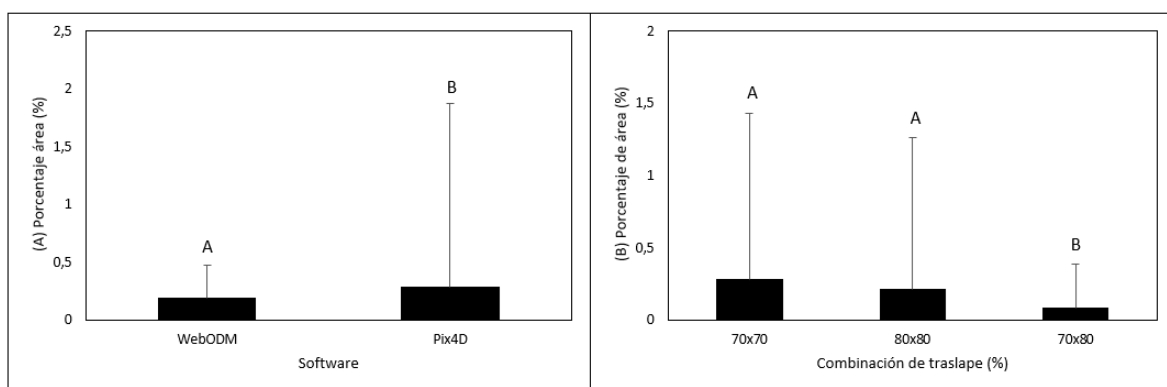


Figura 6. Porcentaje de área con vacío de información según el software de procesamiento y combinación de traslape utilizada en el vuelo del VANT. *Nota:* las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

La figura 7A muestra que para obtener menor porcentaje de área con vacíos de información es necesario volar con un GSD (3,27 y 3,32 cm/píxel); los cuales se hicieron con un diseño de trazado 2D y 3D respectivamente y utilizar la combinación de traslapes (lateral: 70%, frontal: 80%). Por otro lado, los resultados presentados en la figura 7B muestran que al procesar la información con las opciones 1 y 2 utilizando un porcentaje de traslape (70x80%) se obtiene una menor cantidad de áreas con vacíos de información. En cuanto a la interacción software x combinación de traslape, lo más recomendable para obtener menos afectación por áreas con vacíos de información es procesar con el software *WebODM* utilizando una combinación de traslape (70x80%) (figura 7C).

En cuanto a los resultados obtenidos en la prueba paramétrica estos coinciden con los obtenidos en la figura 7A, no así con los de la figura 7B y 7C donde no se obtuvo evidencias de diferencias estadísticas significativas.

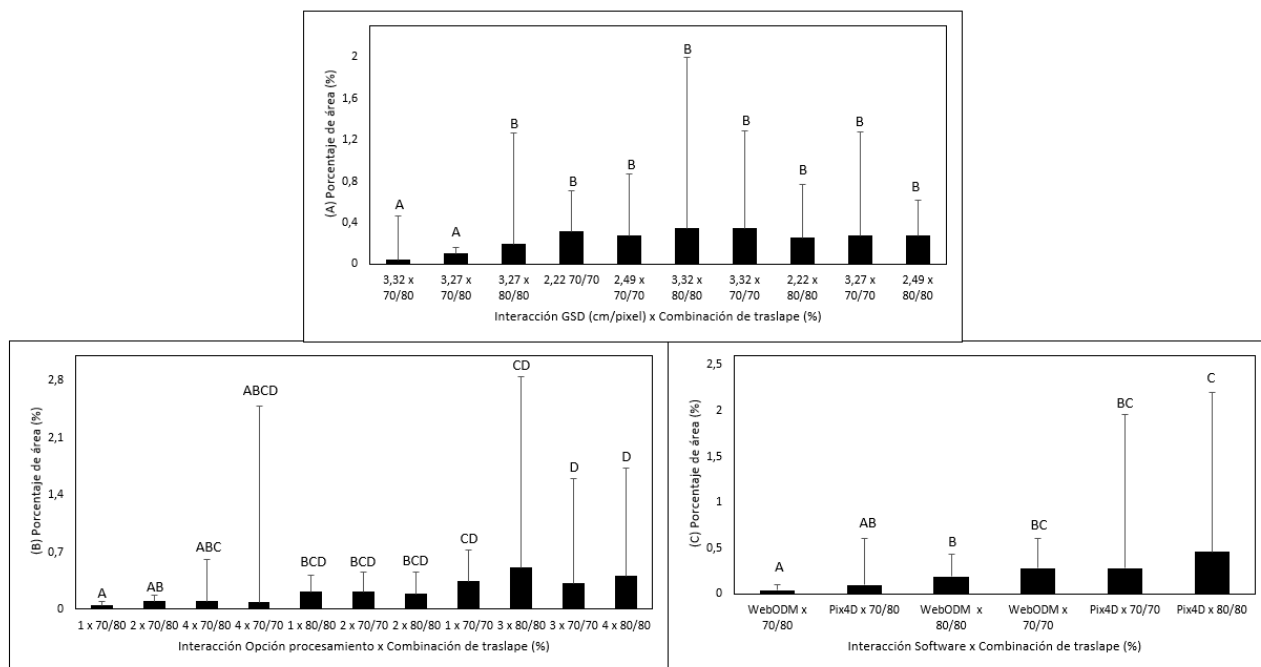


Figura 7. Porcentaje de área con vacío de información según diferentes interacciones de factores.

Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

En la figura 8 se puede observar el porcentaje de área con vacío de información según la cantidad de imágenes/ha. El R^2 obtenido muestra que no hay tendencia en los datos. Esto quiere decir que el promedio de porcentaje de área con vacío de información entre el trazado 2D y 3D no presenta diferencias.

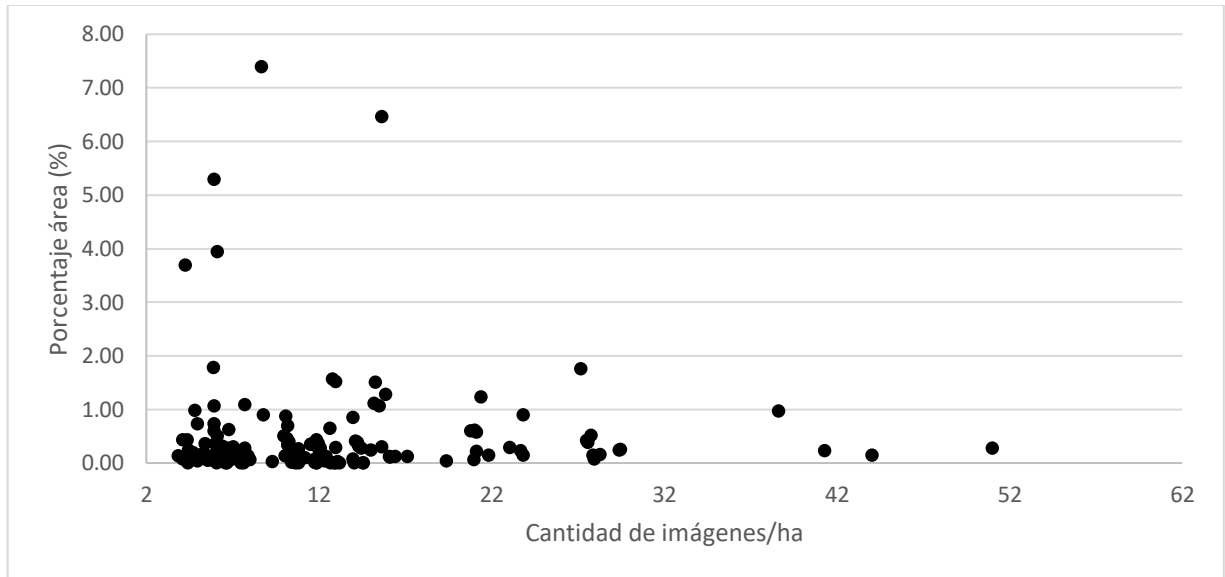


Figura 8. Relación entre la cantidad de imágenes por hectárea y el porcentaje de área con vacío de información.

8.3. Variable de respuesta fallos en el procesamiento

Los resultados más importantes obtenidos en la regresión logística, fue que el factor software y grupo de imágenes tienen una relación estadísticamente significativa con el fallo en el procesamiento para el modelo 1 ($p < 0,05$) mientras que en el modelo 2 el único factor que obtuvo una relación significativa fue el grupo de imágenes ($p > 0,05$). El resumen con la información completa de cada uno de los modelos se encuentra en los anexos 1 y 2.

Cuadro 5. P- value obtenidos para el software, opción de procesamiento, GSD (cm/píxel), combinación de traslape y cantidad de imágenes en la regresión logística.

Modelo	Factores considerados en el modelo	Factor	P value
1	Software, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes	Software	0,02
		GSD	0,39
		Combinación traslape	0,53
		Cantidad de imágenes	0,01
2	Opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes	Opción de procesamiento	0,95
		GSD	0,33
		Combinación Traslape	0,61
		Cantidad de imágenes	0,01

Nota: cantidad de imágenes se agrupó en 125 imágenes (grupo 1: 0-125 imágenes, grupo 2: 126-251 imágenes, grupo 3: 252-377 imágenes).

Por otra parte, en la figura 9, se puede apreciar que el software *WebODM* presentó una mayor cantidad de porcentaje de fallos que *Pix4D mapper* (un poco más del doble). Con respecto a las opciones de procesamiento sólo la 4 no presentó algún fallo en el procesamiento de las imágenes, mientras que las demás obtuvieron un porcentaje muy similar (entre 17 y 21%).

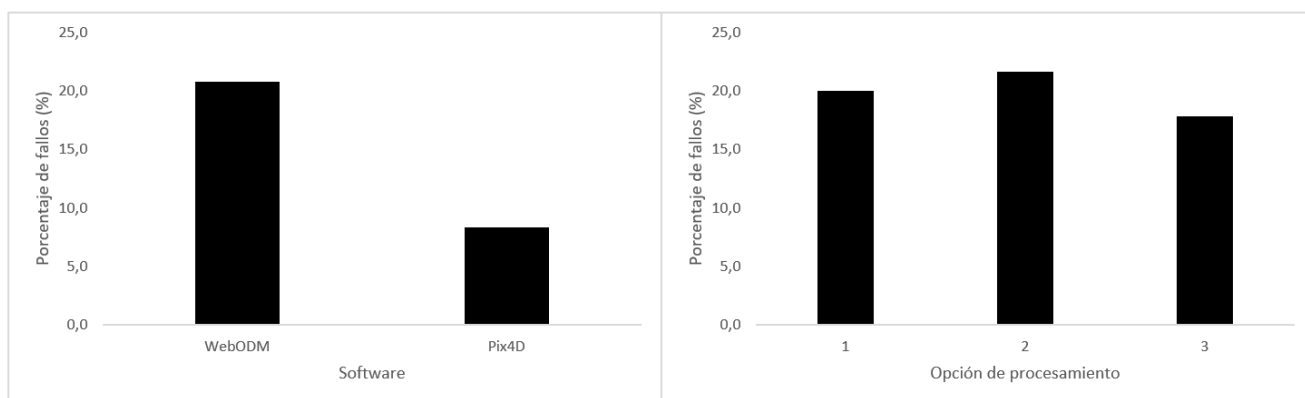


Figura 9. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el tipo de software y opción de procesamiento.

En la figura 10, se observa una tendencia lineal en los datos procesados con el software *WebODM* y *Pix4D mapper*, así como las opciones de procesamiento 1-2-3 debido a que se disminuye la cantidad de fallos cuando se disminuye la cantidad de imágenes presente en cada GSD. Por ejemplo, el GSD que presenta una mayor cantidad de imágenes (2,22 cm/píxel) fue el que obtuvo el mayor porcentaje de fallos en el procesamiento.

Mientras que el GSD (3,27 cm/píxel) el cual presenta la menor cantidad de imágenes en comparación con los demás, fue el que obtuvo un menor porcentaje de fallos en el procesamiento de las imágenes.

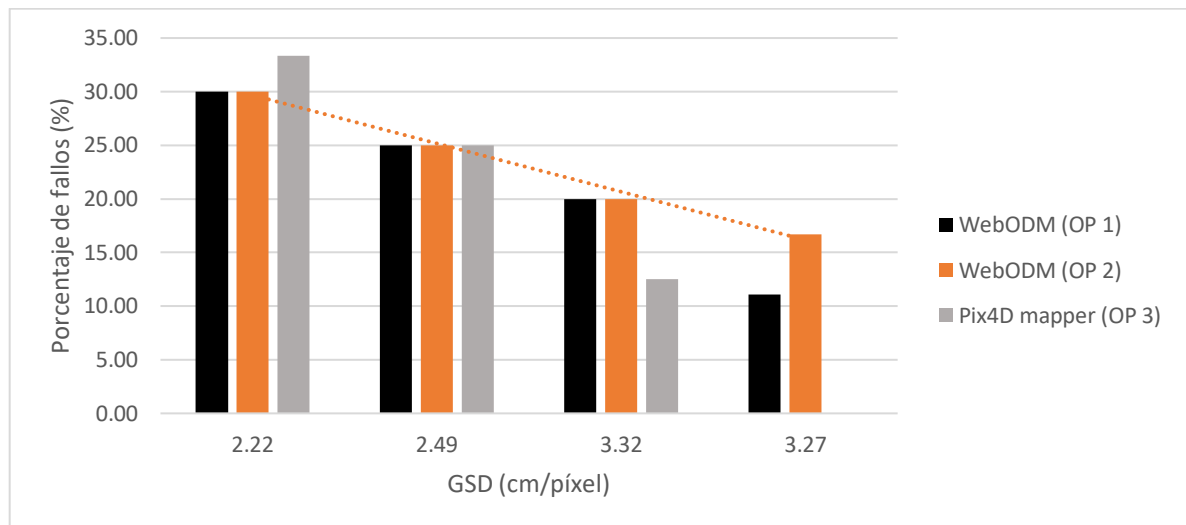


Figura 10. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el GSD, software y opción de procesamiento.

Al analizar la cantidad de fallos en el procesamiento por combinación de traslape, es posible visualizar que el porcentaje 70-80 fue el que obtuvo una menor cantidad. Finalmente, donde se presentaron una mayor cantidad de fallos fue en el porcentaje 80-80, el cual tiende a aumentar la cantidad de imágenes (figura 11).

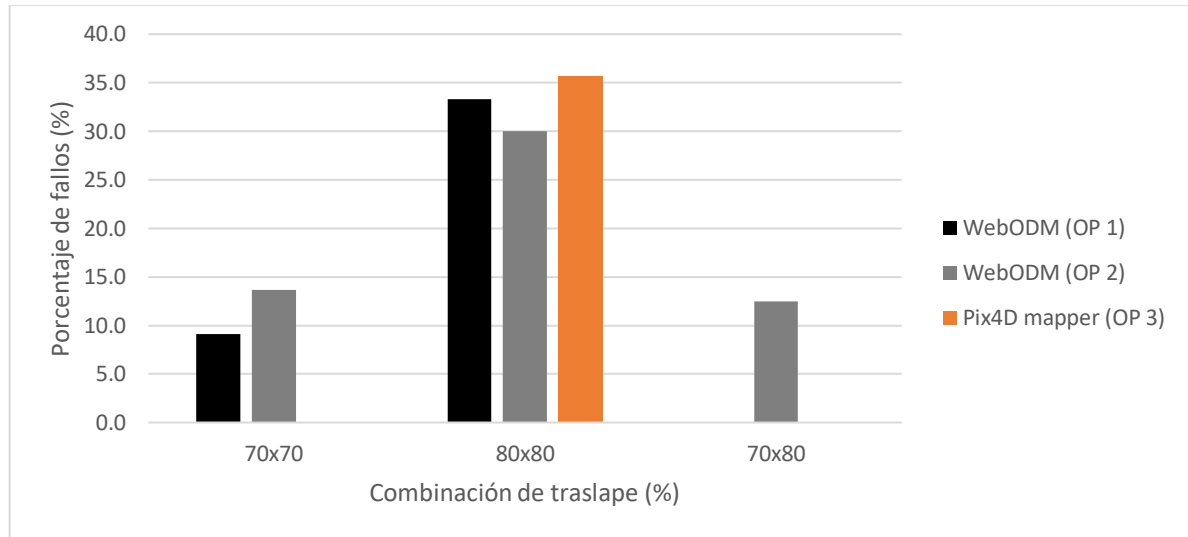


Figura 11. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la combinación de porcentajes de traslape, software y opción de procesamiento.

La figura 12 muestra una tendencia lineal la cual explica que, a mayor cantidad de imágenes, es más probable obtener una falla en el procesamiento de los datos. Por ejemplo, es posible observar que al procesar de 0 a 125 imágenes se obtuvo un porcentaje de fallos inferior al 20%, mientras que al aumentar la cantidad de imágenes a procesar (252 a 377) el porcentaje de fallos fue superior al 40%.

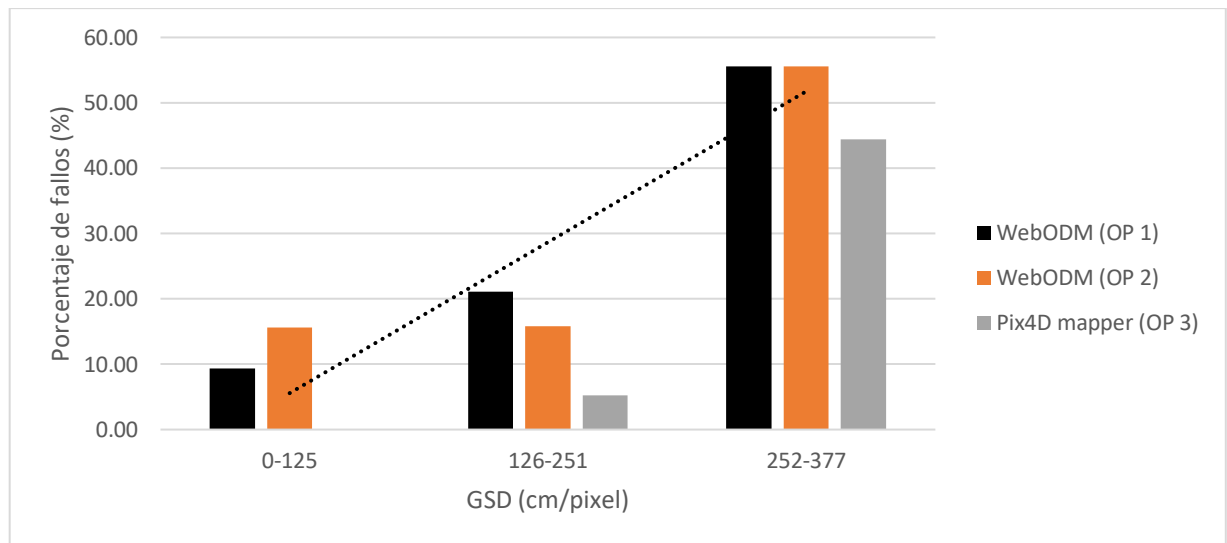


Figura 12. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la cantidad de imágenes, software y opción de procesamiento.

8.4. Influencia de la época del año en labores de monitoreo

La época del año es una variable de importancia a la hora de utilizar los VANT en el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica. En la figura 13 se observa que los árboles dentro de la plantación son más visibles en época lluviosa, que en la época seca. Por lo tanto, a la hora de calcular algunas variables de monitoreo forestal como: cantidad de árboles por hectárea, altura, diámetro a 1,3 m de altura, biomasa y volumen de los árboles, esto puede llegar a jugar un papel importante.

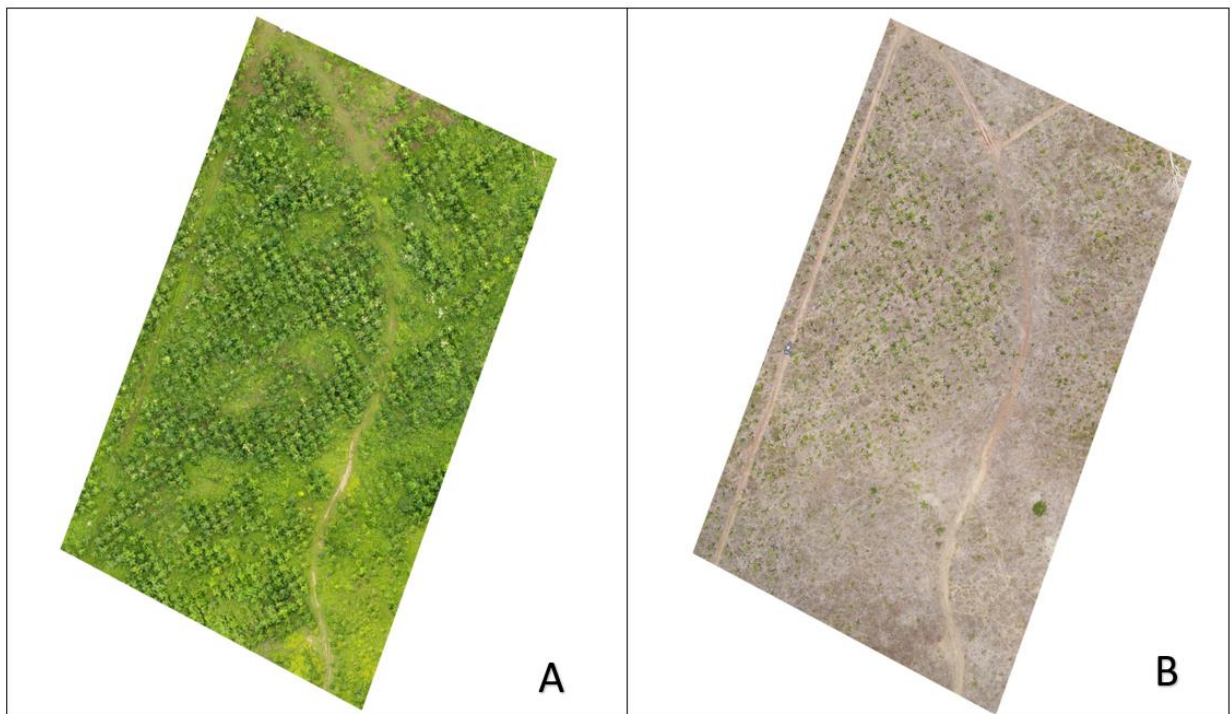


Figura 13. Diferencias en el ortomosaico según la época del año (Lluviosa (A) y Seca (B)) en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Abangares, Guanacaste, Costa Rica.

8.5. Modelos de predicción del diámetro a 1,3 m de altura (cm)

8.5.1. Modelo de predicción del diámetro en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Abangares

Se observó una alta relación entre la variable independiente (dc) y dependiente (d) ($R^2=0,80$). Por otra parte, también se pudo visualizar que los datos procedían de distintos rodales, lo que generaba que tuvieran un comportamiento diferenciado. Por esta razón, se utilizó la variable rodal como una *dummie* para la realización del modelo (ver figura 14).

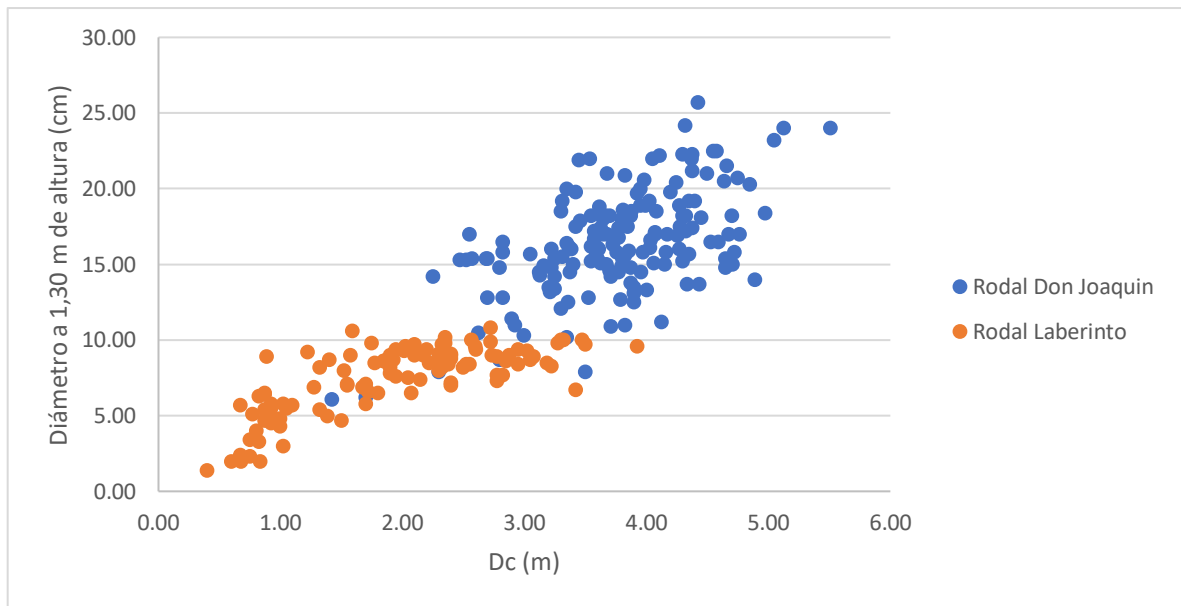


Figura 14. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) para dos rodales de *Tectona grandis* ubicada en Abangares. Costa Rica, 2021.

En cuanto a los modelos propuestos, el potencial + cambio en la intersección fue el que obtuvo los mejores estadísticos de precisión debido a que presentaba el R^2 más alto, así como el error estándar y coeficiente de variación más bajo en comparación con los demás (ver anexo 3). Según la prueba de porcentaje de sesgo se obtuvo que se está sobreestimando el valor del d en aproximadamente 1,60%. Por otra parte, el valor obtenido en la prueba de Wilcoxon muestra que existe evidencia estadística para afirmar que el modelo no se encuentra sesgado ($p>0,05$) (anexo 4).

Una vez finalizadas estas pruebas se realizó una presentación del modelo en donde viene información general, estadísticos de precisión y ejemplos de uso. Esta información es esencial para que el modelo pueda ser utilizado correctamente (cuadro 6).

Cuadro 6. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Abangares, Guanacaste, Costa Rica.

Presentación del modelo desarrollado:	$d: e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31 \times D1}$
Rodal Don Joaquín:	
d:	$e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31 \times D1}$
d:	$e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31}$
Rodal Laberinto:	
d:	$e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31 \times D1}$
d:	$e^{1,55} \times dc^{0,70}$
Dónde:	
d:	Diámetro a 1,3 m de altura (cm).
dc:	Diámetro de copa (m).
D1:	variable <i>dummie</i> (1= Don Joaquín; 0= Laberinto).
Definición de la variable dependiente y las unidades en que se expresa.	
d	es el diámetro a la altura de 1,3 m en cm.
Especie, grupo de especies o tipo de rodal al cual la ecuación se puede aplicar.	
	Árboles de <i>Tectona grandis</i> provenientes de plantaciones.
Definición de las variables independientes incluyendo las unidades en que se expresan.	
dc	es el diámetro promedio de copa en m y D1 es una variable <i>dummie</i> correspondiente al rodal.
Número de observaciones que se utilizaron en la construcción	
	Se utilizaron 244 observaciones.
Ámbito o rango de los datos (valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes que aparecen en la ecuación)	
d	entre 1,40 a 25,70 cm.
dc	entre 0,40 a 5,51 m.
D1	es 1 para el rodal Don Joaquín y 0 para el rodal Laberinto.
Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo	
d	con una cinta diamétrica.
dc	con una cinta métrica.

Estadísticos de exactitud de la ecuación:

Media aritmética de la variable dependiente: 12,81 cm

Error estándar de la estimación en unidades reales (Se) o Syx: 0,21

Índice de ajuste (FI) o R^2 : 0,84

Coefficiente de variación (CV%) en unidades reales: 1,65

Ejemplos de uso del modelo desarrollado para ambas variedades.

Rodal Don Joaquín

Se desea estimar el d para la especie *Tectona grandis* con un dc de 3,75.

$$d: e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31}$$

$$d: e^{1,55} \times 3,75^{0,70} \times e^{0,31}$$

$$d: 16,30 \text{ cm}$$

Rodal Laberinto

Se desea estimar el d para la especie *Tectona grandis* con un dc de 1,50.

$$d: e^{1,55} \times dc^{0,70}$$

$$d: e^{1,55} \times 1,50^{0,70}$$

$$d: 6,25 \text{ cm}$$

Nota adicional: Modelo está validado con una muestra independiente de 25 observaciones.

8.5.2. Modelo de predicción del diámetro en una plantación de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rita

Se visualizó una buena relación entre la variable dependiente e independiente del modelo de predicción del d a partir del dc ($R^2=0,57$), así como la no presencia de datos atípicos dentro de la muestra (ver figura 15). A la hora de realizar la comparación entre los modelos propuestos, se observó que el modelo polinómico grado 2 fue el que presentaba los mejores estadísticos de precisión y además era uno de los más sencillos de utilizar (ver anexo 5).

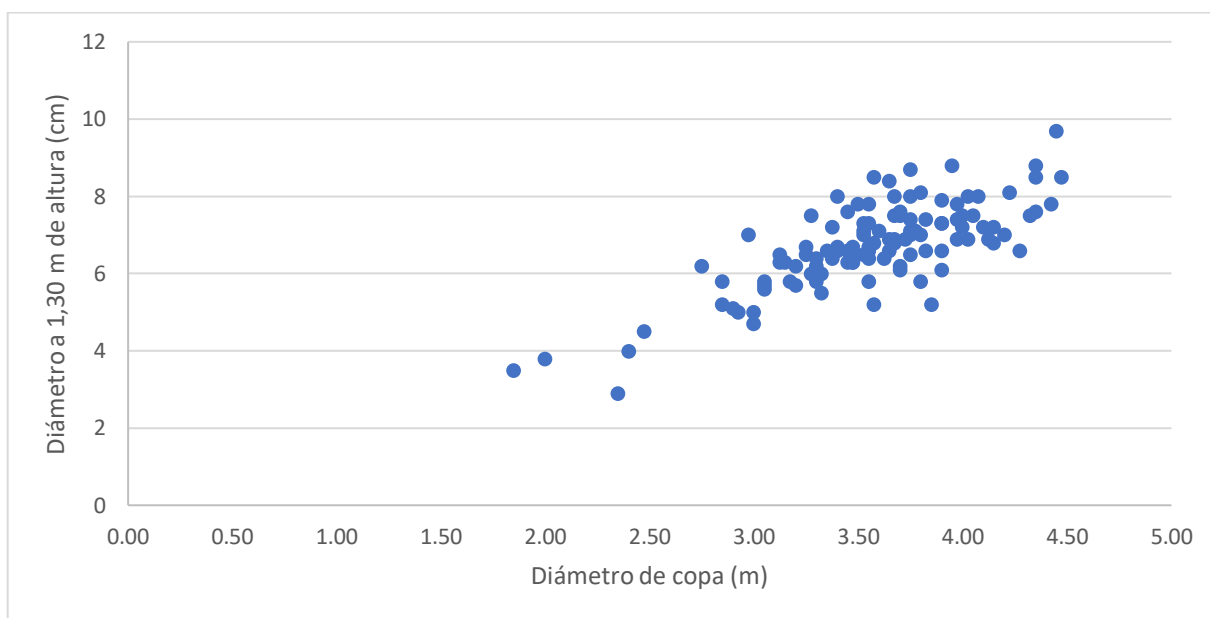


Figura 15. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) para una plantación de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rita. Costa Rica, 2021.

Por otra parte, los resultados obtenidos en la prueba de porcentaje de sesgo (0,59%) y la prueba de Wilcoxon ($p > 0,05$) permiten afirmar que el modelo no se encuentra sesgado (anexo 6). Por último, se presentó el modelo seleccionado en una tabla donde viene toda la información correspondiente para que se brinde un uso correcto (cuadro 7).

Cuadro 7. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rita, Alajuela, Costa Rica.

Presentación del modelo desarrollado:	$d = -4,29 + 4,68 \cdot dc - 0,43 \cdot dc^2$
Dónde:	
d:	Diámetro a 1,3 m de altura (cm).
dc:	Diámetro de copa (m).
Definición de la variable dependiente y las unidades en que se expresa.	
d es el diámetro a 1,3 m de altura en cm.	
Especie, grupo de especies o tipo de rodal al cual la ecuación se puede aplicar.	
Árboles de <i>Gmelina arborea</i> provenientes de plantaciones.	
Definición de las variables independientes incluyendo las unidades en que se expresan.	
dc es el diámetro promedio de copa en m.	
Número de observaciones que se utilizaron en la construcción	
Se utilizaron 102 observaciones.	
Ámbito o rango de los datos (valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes que aparecen en la ecuación)	
d entre 2,9 a 9,7 cm.	
dc entre 1,85 a 4,45 m.	
Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo	
d con una cinta diamétrica.	
dc con una cinta métrica.	
Estadísticos de exactitud de la ecuación:	
Media aritmética de la variable dependiente:	6,77 cm
Error estándar de la estimación en unidades reales (Se) o Syx:	0,71
Índice de ajuste (FI) o R^2 :	0,57
Coefficiente de variación (CV%) en unidades reales:	10,56
Ejemplos de uso del modelo desarrollado.	
Se desea estimar el d para la especie <i>Gmelina arborea</i> con un dc de 3,15.	
d:	$-4,29 + 4,68 \cdot dc - 0,43 \cdot dc^2$
d:	$-4,29 + 4,68 \cdot 3,15 - 0,43 \cdot 3,15^2$
d:	6,18 cm
Nota adicional:	Modelo está validado con una muestra independiente de 12 observaciones.

8.5.3. Modelo de predicción del diámetro en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en San Pedro de Hojancha

A la hora de graficar los datos no se visualizaron la presencia de *outliers* (ver figura 16). En cuanto a la comparación de los modelos propuestos, se escogió el modelo lineal debido a que presentaba los mejores estadísticos de precisión (anexo 7).

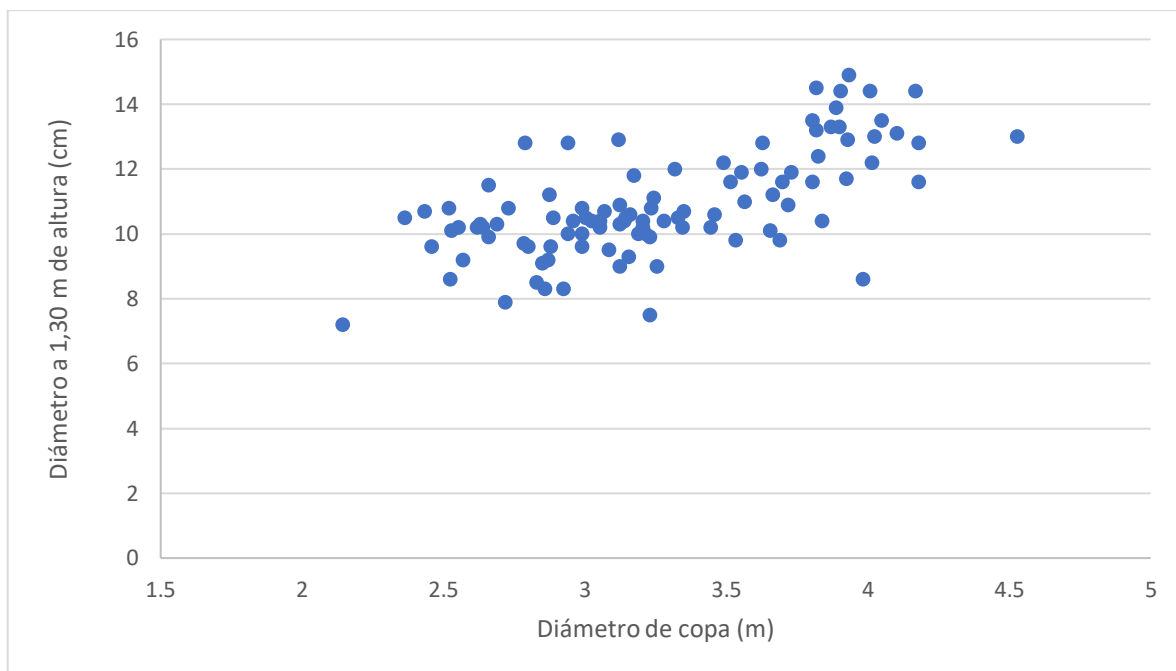


Figura 16. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en San Pedro de Hojancha. Costa Rica, 2021.

Además, se obtuvo que el modelo sobreestima los valores del diámetro a 1,3 m de altura en un 1,71% y estadísticamente existen evidencias de que no se encuentra sesgado ($p > 0,05$) (ver anexo 8). El último paso, fue la creación de un cuadro en donde se brinda toda la información necesaria para el buen uso del modelo (cuadro 8).

Cuadro 8. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en San Pedro, Guanacaste, Costa Rica.

Presentación del modelo desarrollado: $d: 4,32 + 2,02 \cdot dc$
Dónde: d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm). dc: Diámetro de copa (m).
Definición de la variable dependiente y las unidades en que se expresa. d es el diámetro a 1,3 m de altura en cm.
Especie, grupo de especies o tipo de rodal al cual la ecuación se puede aplicar. Árboles de <i>Tectona grandis</i> provenientes de plantaciones.
Definición de las variables independientes incluyendo las unidades en que se expresan. dc es el diámetro promedio de copa en m.
Número de observaciones que se utilizaron en la construcción Se utilizaron 91 observaciones.
Ámbito o rango de los datos (valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes que aparecen en la ecuación) d entre 7,2 a 14,9 cm. dc entre 2,14 a 4,53 m.
Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo d con una cinta diamétrica. dc con una cinta métrica.
Estadísticos de exactitud de la ecuación: Media aritmética de la variable dependiente: 10,92 cm Error estándar de la estimación en unidades reales (Se) o Syx: 1,24 Índice de ajuste (FI) o R^2 : 0,41 Coeficiente de variación (CV%) en unidades reales: 11,30
Ejemplos de uso del modelo desarrollado. Se desea estimar el d para la especie <i>Tectona grandis</i> con un dc de 4,20. d: $4,32 + 2,02 \cdot dc$ d: $4,32 + 2,02 \cdot 4,20$ d: 12,80 cm
Nota adicional: Modelo está validado con una muestra independiente de 10 observaciones.

8.5.4. Modelo de predicción del diámetro en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Punta Morales

Según el gráfico presente en la figura 17, se pudo comprobar que no existía la presencia de datos atípicos. Se compararon un total de 4 modelos: logarítmico, polinómico grado 2, potencial y lineal, de los cuáles el que presentó los mejores estadísticos de precisión fue el logarítmico (anexo 9).

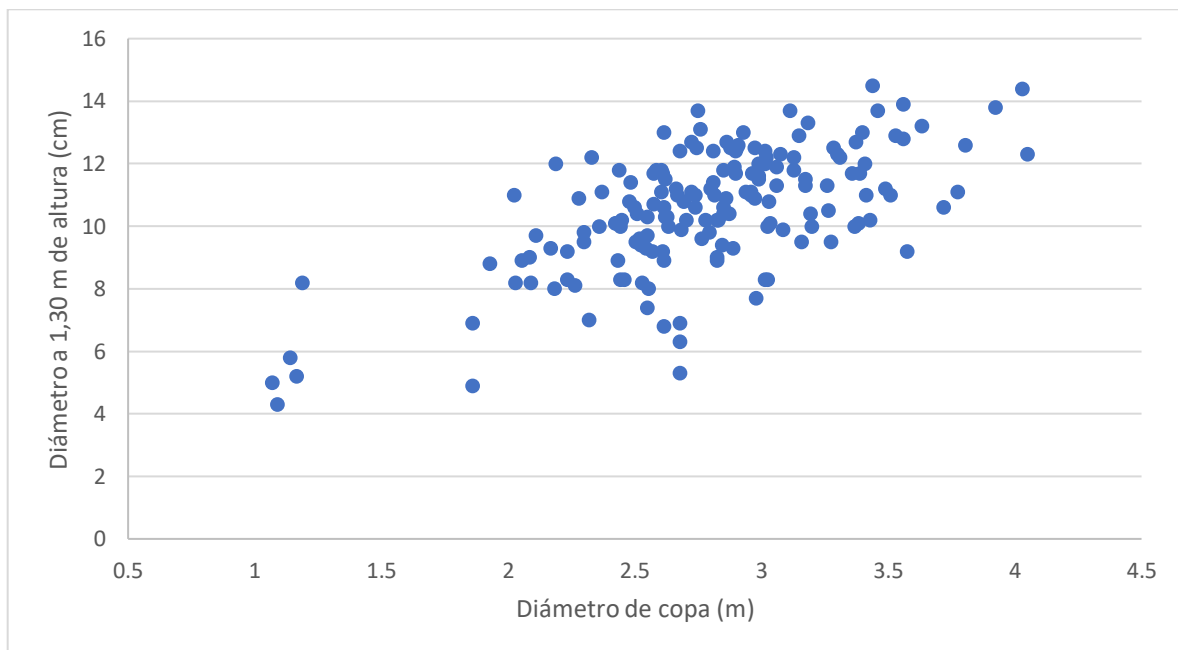


Figura 17. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Punta Morales. Costa Rica, 2021.

Se puede afirmar que el modelo seleccionado no se encuentra sesgado gracias a los valores obtenidos en la prueba de porcentaje de sesgo (-0,98%) y prueba de Wilcoxon ($p > 0,05$) (anexo 10). En el cuadro 9, viene toda la información necesaria sobre el modelo seleccionado (información general, especies de aplicación, ejemplos de uso, etc.).

Cuadro 9. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Punta Morales, Puntarenas, Costa Rica.

Presentación del modelo desarrollado: $d: 4,64 + 5,89 * \ln(dc)$
Dónde: d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm). dc: Diámetro de copa (m).
Definición de la variable dependiente y las unidades en que se expresa. d es el diámetro a 1,3 m de altura en cm.
Especie, grupo de especies o tipo de rodal al cual la ecuación se puede aplicar. Árboles de <i>Tectona grandis</i> provenientes de plantaciones.
Definición de las variables independientes incluyendo las unidades en que se expresan. dc es el diámetro promedio de copa en m.
Número de observaciones que se utilizaron en la construcción Se utilizaron 141 observaciones.
Ámbito o rango de los datos (valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes que aparecen en la ecuación) d entre 4,3 a 14,4 cm. dc entre 1,07 a 4,05 m.
Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo d con una cinta diamétrica. dc con una cinta métrica.
Estadísticos de exactitud de la ecuación: Media aritmética de la variable dependiente: 10,53 cm Error estándar de la estimación en unidades reales (Se) o Syx: 1,41 Índice de ajuste (FI) o R^2 : 0,43 Coeficiente de variación (CV%) en unidades reales: 13,46
Ejemplos de uso del modelo desarrollado. Se desea estimar el d para la especie <i>Tectona grandis</i> con un dc de 3,20. d: $4,64 + 5,89 * \ln(dc)$ d: $4,64 + 5,89 * \ln(3,20)$ d: 11,49 cm
Nota adicional: Modelo está validado con una muestra independiente de 28 observaciones.

8.5.5. Modelo de predicción del diámetro en una plantación mixta ubicada en Pocora

De acuerdo con el gráfico realizado, se determinó que no existía la presencia de datos atípicos dentro de la muestra. A la hora de realizar los modelos se decidió agrupar las especies en tres grandes grupos gracias a la estructura observada. Especies grupo 1: *Eucalyptus sp* y *Schizolobium parahyba* (dc: 2,27 a 4,69 m), especies grupo 2: *Terminalia amazonia* y *Hyeronima alchorneoides* (dc: 0,76 a 3,12 m) y especies grupo 3: *Acacia sp*, *Tabebuia rosea*, *Lauraceae*, *Tabebuia ochracea*, *Vochysia ferrugínea*, *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, *Cordia alliodora* (dc: 0,84 a 2,95 m). Esta agrupación realizada, se utilizó como variable *dummie* dentro de los modelos propuestos (ver figura 18).

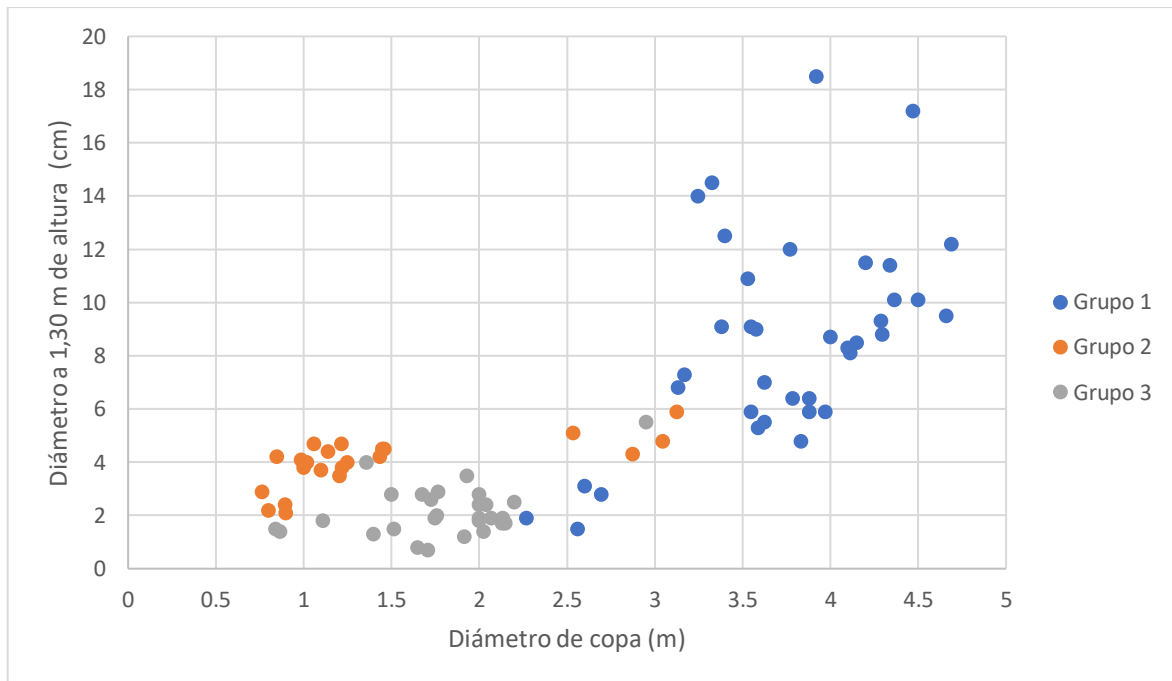


Figura 18. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) en una plantación mixta ubicada en Pocora. Costa Rica, 2021.

Se propuso un total de 4 modelos, de los cuáles el que obtuvo los mejores estadísticos de precisión fue el modelo exponencial + cambio en la intersección (anexo 11). En cuanto a la prueba de validación del modelo, se obtuvo un porcentaje de sesgo fuera del rango aceptado (-

14,47%), sin embargo, a la hora de realizar la prueba de Wilcoxon se puede afirmar estadísticamente que el modelo seleccionado no se encuentra sesgado ($p>0,05$) (anexo 12).

Por último, se realizó una presentación del modelo seleccionado. Aquí se puede observar información relevante como: los diferentes modelos para los grupos 1, 2 y 3, las especies que conforman cada grupo, rango de los datos y ejemplos de uso del modelo seleccionado (ver cuadro 10).

Cuadro 10. Presentación del modelo propuesto para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa en una plantación mixta ubicada en Pocora, Limón, Costa Rica.

Presentación del modelo desarrollado: $d = e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times D1} \times e^{0,87 \times D2}$

Especies grupo 1:

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times D1} \times e^{0,87 \times D2}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times D1}$

Especies grupo 2:

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times D1} \times e^{0,87 \times D2}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,87 \times D2}$

Especies grupo 3:

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times D1} \times e^{0,87 \times D2}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc}$

Dónde:

d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm).

dc: Diámetro de copa (m).

D1: 1 para especies grupo 1; 0 para especies grupo 2; 0 para especies grupo 3

D2: 0 para especies grupo 1; 1 para especies grupo 2; 0 para especies grupo 3

Especies grupo 1: *Eucalyptus sp* y *Schizolobium parahyba*

Especies grupo 2: *Terminalia amazonia* y *Hyeronima alchorneoides*

Especies grupo 3: *Acacia sp*, *Tabebuia rosea*, *Lauraceae*, *Tabebuia ochracea*, *Vochysia ferrugínea*, *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, *Cordia alliodora*

Definición de la variable dependiente y las unidades en que se expresa.

d es el diámetro a 1,3 m de altura en cm.

Especie, grupo de especies o tipo de rodal al cual la ecuación se puede aplicar.

Árboles de *Eucalyptus sp*, *Schizolobium parahyba*, *Terminalia amazonia*, *Hyeronima alchorneoides*, *Acacia sp*, *Tabebuia rosea*, *Lauraceae*, *Tabebuia ochracea*, *Vochysia ferrugínea*, *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, *Cordia alliodora* provenientes de una plantación mixta.

Definición de las variables independientes incluyendo las unidades en que se expresan.

dc es el diámetro promedio de copa en m, D1 y D2 son variables dummie correspondientes al grupo de especie.

Número de observaciones que se utilizaron en la construcción

Se utilizaron 79 observaciones.

Ámbito o rango de los datos (valores máximos y mínimos de cada una de las variables independientes que aparecen en la ecuación)

d entre 0,7 a 18,5 cm.

dc entre 0,76 a 4,69 m.

D1: 1 para especies grupo 1; 0 para especies grupo 2; 0 para especies grupo 3.

D2: 0 para especies grupo 1; 1 para especies grupo 2; 0 para especies grupo 3.

Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo

d con una cinta diamétrica.

dc con una cinta métrica.

Estadísticos de exactitud de la ecuación:

Media aritmética de la variable dependiente: 5,49 cm

Error estándar de la estimación en unidades reales (Se) o Syx: 0,39

Índice de ajuste (FI) o R2: 0,74

Coefficiente de variación (CV%) en unidades reales: 7,16

Ejemplos de uso del modelo desarrollado para los diferentes grupos de especies.

Especies grupo 1

Se desea estimar el d para la especie *Eucalyptus sp* con un dc de 4,15.

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times d1}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times 4,15} \times e^{0,58 \times 1}$

d: 9,13 cm

Especies grupo 2

Se desea estimar el d para la especie *Hyeronima alchorneoides* con un dc de 1,45.

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,87 \times d2}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times 1,45} \times e^{0,87 \times 1}$

d: 4,03 cm

Especies grupo 3

Se desea estimar el d para la especie *Carapa guianensis* con un dc de 1,35.

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc}$

d: $e^{-0,07} \times e^{0,41 \times 1,35}$

d: 1,62 cm

Nota adicional: Modelo está validado con una muestra independiente de 8 observaciones.

9. Discusión

9.1. Variable de respuesta tiempo de procesamiento

Según los resultados obtenidos, se observan diferencias en el tiempo de procesamiento (hrs/ha) entre softwares, siendo *Pix4D mapper* el que obtuvo el valor más bajo de tiempo de procesamiento (figura 2A). Por otra parte, si se desea realizar una comparación más equitativa entre ambos softwares, se podría tomar en cuenta el tiempo de procesamiento/ha entre las opciones de procesamiento similares (1, 2 y 3), esto nos muestra que todavía es posible observar diferencias significativas entre ambos softwares (figura 2A). Todo esto coincide con varias investigaciones, en las cuales el tiempo de procesamiento varió según el tipo de software utilizado, así como que *Pix4D mapper* procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo (Dandois et al., 2015; Flores & Diaz, 2020; Peña-Villasenín et al., 2020; Ulvi, 2021).

Por otra parte, existen diferencias entre las opciones de procesamiento evaluadas, siendo la opción 4 (Memoria RAM: 15 Gb, CPU:12, Procesador: Icore 5 8th Gen y Tarjeta gráfica: NVIDIA GEFORCE GTX 1650 Ti), la que procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo, seguido por la opción 3 y de último las opciones 1-2 (figura 2B). Esto concuerda con otras investigaciones donde se encontró que el tiempo de procesamiento fue influenciado por el tipo de computadora a utilizar y/o la opción de procesamiento del software (Tinkham & Swayze, 2021; Torres-Sánchez et al., 2018).

Estas diferencias pueden estar relacionadas a que cada software posee un funcionamiento distinto lo que puede llegar a influir en el procesamiento de las imágenes (productos a obtener, tiempo de procesamiento, etc.) (Kameyama & Sugiura, 2021). Por ejemplo, softwares como *WebODM* que son de código abierto, sufren constantes mejoras por diferentes miembros que forman parte de su comunidad, por lo tanto, futuras versiones podrían llegar a mejorar los tiempos de procesamiento (*OpenDroneMap*, 2021c). Para finalizar, a la hora de seleccionar un software fotogramétrico es recomendable considerar múltiples factores, como por ejemplo, opción de procesamiento en la nube, precios, entre

otras, ya que siempre existirán ventajas y desventajas distintas para cada tipo de software (Burns & Delparte, 2017; Kaimaris et al., 2017).

Es posible observar que existen diferencias estadísticas significativas con respecto al tiempo de procesamiento/ha según el GSD utilizado (figura 2C). El GSD que obtuvo menor tiempo de procesamiento fue 3,27 cm/píxel el cual presenta menor cantidad de imágenes que los demás. Seguido del GSD (3,32 cm/píxel) que es el segundo que posee menor cantidad de imágenes y de último quedaron los GSD con alta resolución espacial (2,22 y 2,49 cm/píxel) los cuales presentan gran cantidad de imágenes. En una investigación realizada por Uzaktan et al., (2021) obtuvo que para el software *Pix4D* el tiempo de procesamiento fue menor cuando se voló a una altura mayor (menor resolución espacial) y se tenía una menor cantidad de imágenes. Por otra parte, Nam-Bui et al., (2020) indica que el tiempo de procesamiento es inversamente proporcional a la altura de vuelo. Es decir, a mayor altura de vuelo (menor cantidad de imágenes) se obtendrá un menor tiempo de procesamiento.

Estos resultados explicados anteriormente coinciden con los obtenidos en las diferentes interacciones (figuras 3 y 4) donde es posible observar que para obtener una menor cantidad de tiempo de procesamiento es necesario procesar las imágenes con el software *Pix4D mapper*, opción de procesamiento 4, y configuraciones de vuelo que tiendan a disminuir el número de imágenes a procesar, tal como: un altura de vuelo de 120 m, una baja resolución (3,27 cm/píxel), un trazado 2D, y combinaciones de traslape lateral 70 o 80%, y frontal: 70 o 80%.

9.2. Variable de respuesta porcentaje de área con vacío de información

La figura 6A indica que hubo diferencia en el porcentaje de área con zonas con vacíos de información según el software utilizado, no así con las opciones de procesamiento. Esto puede ser explicado por las diferencias que se pueden presentar entre softwares en cuanto a calidad y productos a obtener (Kameyama & Sugiura, 2021). Sin embargo, en diversas investigaciones se menciona que la calidad del ortomosaico (presencia de áreas con vacíos de información) puede estar más afectado por los parámetros de vuelo que se vayan a utilizar (Fraser & Congalton, 2018; Santillan et al., 2021).

Al analizar la figura 6B, se muestra que la combinación de traslape (70x80%) se vio menormente afectado por áreas con vacíos de información. Este resultado contrasta con lo obtenido en la investigación de Santillan et al. (2021), donde menciona que a mayor porcentaje de traslape, las zonas con vacío de información en el ortomosaico son menores. Por otra parte, Fraser & Congalton, (2018) indican que un bajo porcentaje de traslape resulta en una mayor cantidad de huecos en el ortomosaico, tendencia que solo se cumple entre las combinaciones (70/70% y 70/80%). Por último, uno de los factores que no fue tomado en cuenta en la presente investigación y que está relacionado a errores en el procesamiento que afectan la calidad de los ortomosaicos son las condiciones meteorológicas (especialmente viento e intensidad de la luz) (Panagiotidis et al., 2017; Tmušić et al., 2020; Zhang et al., 2019).

A la hora de analizar las interacciones (figura 7), es posible observar que un factor en común que se muestra en cada uno de los resultados, es la combinación de traslape utilizada. Esto sugiere que este factor es determinante a la hora de obtener o no zonas con vacíos de información. También es posible apreciar que los resultados son congruentes con lo presentado anteriormente, para obtener una menor cantidad de porcentaje de afectación de zonas con vacío de información es necesario realizar el procesamiento con el software *WebODM*, las opciones de procesamiento 1 o 2, una baja resolución (3,27 cm/píxel), un diseño de trazado 2D y la combinación de traslape (lateral:70% y frontal:80%).

Por último, la figura 8 indica que no existe una relación entre el porcentaje de área con vacío de información y la cantidad de imágenes por hectárea. Sin embargo, en los resultados presentados en la figura 5 y 12 es posible observar que el tiempo y el porcentaje de fallos en el procesamiento es afectado por la cantidad de imágenes por lo que, es preferible utilizar un trazado 2D el cual me permite obtener una menor cantidad de imágenes.

9.3. Variable de respuesta fallos en el procesamiento

Analizando la figura 9 con mayor profundidad, es posible notar que el software *WebODM* así como las opciones de procesamiento 1 y 2, fueron las que obtuvieron un mayor porcentaje de fallos. A la hora de procesar de 100 a 500 imágenes (rango de esta investigación), utilizando un equipo *Windows* es recomendable poseer los siguientes

componentes: versión Windows 10 (64 bits), una CPU (quad core o 67exa core Intel i9/ Threadripper/ Ryzen 9), una tarjeta gráfica GeForce GTX, un disco duro en estado sólido (SSD), una memoria RAM de 16 GB y un espacio de almacenamiento libre de 30 a 100 GB (Pix4D, 2021d & OpenDroneMap, 2021b). La mayoría de estos requerimientos recomendados, fueron alcanzados por una de las opciones (número 4), la cual no presentó fallas en el procesamiento de las imágenes.

Como se mencionó anteriormente la relación observada en la figura 10 puede ser explicada por la cantidad de imágenes presente en cada GSD. En la presente investigación, las opciones de procesamiento que presentaron fallos fueron las que no poseían la mayoría de requisitos recomendados (opciones 1, 2 y 3), por esta razón, al procesar más imágenes es más probable que no puedan llevar a cabo el procesamiento de los datos. Por lo tanto, es recomendable seleccionar un GSD que permita minimizar la cantidad de imágenes (3,27 cm/píxel), el cual se obtiene al volar a una altura de 120 metros y utilizando un diseño de trazado 2D (Pix4D, 2021b, Pix4D, 2021d; Pix4D, 2021e; Pix4D, 2021f; OpenDroneMap, 2021b).

Al estudiar la cantidad de fallos en el procesamiento presente en cada porcentaje de traslape (figura 11), es evidente que en uno de los casos (lateral: 70% y frontal: 80%) el porcentaje de fallos es inferior en comparación con los demás. Seifert et al., (2019) menciona que el porcentaje de traslape es uno de los factores más importantes a la hora de tener éxito en el procesamiento de imágenes provenientes de un VANT. Consecuentemente, si el usuario está utilizando una computadora con pocos de los requisitos recomendados, es mejor utilizar una combinación de traslape (70x80%) debido a que esto permitirá que se tenga una probabilidad más baja de obtener un fallo en el procesamiento.

En la figura 12 es posible observar que, al procesar una mayor cantidad de imágenes, es más probable obtener un fallo en el procesamiento. Esto coincide con los resultados de la regresión logística (cuadro 5) en el cuál es posible observar que el grupo de imágenes influye en esta variable de respuesta. Por esta razón, si se desea disminuir la cantidad de fallas en el procesamiento (al utilizar una computadora que cumple con pocos de los requisitos recomendados) es recomendable seleccionar opciones de configuración de vuelo que me

permitan obtener una menor cantidad de imágenes, sin embargo, esto podría llegar a afectar la precisión de productos 3D.

9.4. Influencia de la época del año en labores de Monitoreo

Según la figura 13, se puede apreciar que existen diferencias entre un ortomosaico generado en época lluviosa y otro en época seca. La razón principal de lo expuesto anteriormente es que en Costa Rica, zonas como Guanacaste (que presentan bosques secos tropicales) (Valverde-Rodríguez et al., 2019), existe una pérdida de follaje mayor en época seca que en época lluviosa debido a que la mayoría de árboles son caducifolios y pierden sus hojas para reducir la evaporación (Alejandra et al., 2020; Freiberg & Freiberg, 1999). Esto puede llegar a influir en las variables de monitoreo que se desean evaluar, puesto que, si se desea evaluar el número de árboles por hectárea, es mucho más fácil visualizar y realizar el conteo de los árboles en una época que en otra.

9.5. Relación entre el diámetro a 1,3 m de altura y diámetro de copa

En la presente investigación se obtuvieron diferentes relaciones entre el diámetro a 1,3 m de altura y el diámetro de copa de los árboles. En los modelos realizados, los valores más bajos se obtuvieron en Santa Rita (0,57), Punta Morales (0,43) y San Pedro de Hojancha (0,41) mientras que los valores más altos estuvieron presentes en Abangares (0,84) y Pocora (0,74) (Ver cuadros 6, 7, 8, 9 y 10). Para los modelos realizados en esta investigación de la especie *Tectona grandis*, estos valores son similares al reportado por Hernández-Cole et al. (2021) en donde se reportó un R^2 de 0,51 en un sistema silvopastoril de *Tectona grandis* ubicado en la zona norte. Por otra parte, en una investigación sobre la relación entre el d y dc en diferentes especies en Brasil, se encontró que este valor rondaba entre 0,46 y 0,79 (Sanquetta et al., 2013).

9.6. Escogencia del mejor modelo de predicción del diámetro a 1,3 m del suelo

Según Ortiz, (2016) aquellos modelos que tengan un valor de R^2 y FI alto, es decir, cercano a 1 serán considerados como mejores. Mientras que aquellos que posean un valor de Syx, Se y % CV más bajo serán considerados como mejores modelos. En los modelos de predicción del d propuestos para cada sitio (Abangares, Santa Rita, San Pedro de Hojancha,

Punta Morales y Pocora) se seleccionaron aquellos que obtuvieron un R^2 o FI cercano a 1 y un Syx, Se y % Cv más bajo (ver anexos 3, 5, 7, 9, 11).

Estos resultados coinciden con los presentes en la investigación de Hernández-Cole et al. (2021) en dónde se seleccionó el modelo de predicción de d en función del diámetro de copa para la especie *Tectona grandis* siguiendo las recomendaciones mencionadas anteriormente. En otro estudio para predecir el diámetro de copa en función del diámetro a 1,3 m de altura, se llegó a la conclusión de que el modelo seleccionado, fue el que obtuvo un mayor R^2 y un menor valor de Syx (Parcial et al., 2014). Por último, en una investigación donde se realizaron modelos de regresión para la predicción de alturas en individuos de *Tectona grandis*, se encontró que el mejor modelo fue uno lineal debido a que obtuvo el R^2 más alto y el Syx más bajo en comparación con los demás (De Almeida, 2020).

9.7. Validación de los modelos

Los resultados de porcentajes de sesgo obtenidos (ver anexos 4, 6, 8, 10, 12) indican que todos los modelos elaborados (a excepción del elaborado en Pocora) no se encuentran sesgados debido a que obtuvieron un valor entre -2% y 2% (Villalobos-Barquero & Meza-Montoya, 2017). Estos mismos autores mencionan que, al obtener un porcentaje de sesgo negativo este tiende a sobreestimar el resultado, pero si el porcentaje es positivo tendería a subestimar los resultados.

En cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas de Wilcoxon de los modelos seleccionados ($p > 0,05$) (ver anexos 4, 6, 8, 10, 12) indican que no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula (H_0 =la suma de ranking positivo es igual a la suma del ranking negativo). Esto quiere decir que los modelos elaborados en la presente investigación no se encuentran sesgados. Esto, coincide con otras investigaciones en las cuales se obtuvo un p mayor a 0,05 lo que indicaba que los modelos no se encontraban sesgados (Jiménez, 2020; Quirós, 2015; Villalobos-Barquero & Meza-Montoya, 2017).

9.8. Limitantes del proyecto y futuras investigaciones

El primer punto identificado como una posible limitante fue con respecto a las opciones de procesamiento 3 y 4 (ambas procesaron datos con el software *Pix4D mapper*) debido a que

cada una no procesó la totalidad de los vuelos como si los hicieron las opciones 1 y 2. Por lo tanto, se presentó una afectación en la repetibilidad del experimento.

Otra posible limitante identificada, fue la no utilización de *Ground Control Points* (GCP's), como si lo hacen la mayoría de investigaciones que utiliza un VANT (Ludwig et al., 2020; Błaszczyk et al., 2022; Žabota & Kobal, 2021). El uso de GCP's se relaciona únicamente con la mitigación del error de referenciación global de la imagen, sin embargo, también podría improvisar el tiempo de procesamiento de las imágenes (Garcia & Oliveira, 2020; Khan & Miklavcic, 2019).

Con respecto a los modelos de predicción del diámetro a 1,3 m de altura a partir del diámetro de copa, la gran limitante que estos poseen son su aplicabilidad. Es importante que el lector (a) haga una minuciosa revisión de los diferentes cuadros de presentación de los modelos con la finalidad de brindarle un adecuado uso, así como tomar en cuenta diferentes características de la plantación que se utilizó para la creación del modelo (por ejemplo, condiciones climáticas, manejos silviculturales brindados, entre otras).

Para finalizar, esta investigación concluye cuál es el mejor software, opciones de procesamiento, así como parámetros de planificación de vuelo para realizar el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica. Por lo tanto, las futuras investigaciones pueden ir orientadas a: 1) incorporar el uso de GCP's para comprobar si mejora las variables estudiadas en esta investigación, 2) trabajar en la comparación de información derivada de campo y VANT con la finalidad de mejorar la confiabilidad de los datos, 3) evaluar opciones de procesamiento de imágenes y de configuración de vuelo que permitan obtener mejores productos 3D (modelo digital de terreno, modelo digital de superficie y modelo digital de elevación), 4) evaluar opciones de procesamiento que permitan mejorar los resultados con el software *WebODM* (debido a su bajo costo), 5) incorporar algoritmos de aprendizaje automático para el conteo de árboles, 6) el estudio de índices de vegetación para visualizar la sanidad de la plantación, 7) estudiar la relación entre los *tie points* y los fallos en el procesamiento de las imágenes, entre otras.

10. Conclusiones

Se concluye que el mejor software para el procesamiento de las imágenes provenientes de un VANT es *Pix4D mapper* debido a que procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo/ha y obtuvo menos fallos de procesamiento.

Es posible utilizar un software económicamente más accesible (*WebODM*) si se desea obtener menos áreas con vacíos de información o si se va a realizar el monitoreo de las variables del grupo 1 (cuadro 11).

La mejor opción de procesamiento identificada fue la 4 (Memoria RAM: 15 Gb, CPU:12, Procesador: Icore 5 8th Gen y Tarjeta gráfica: NVIDIA GEFORCE GTX 1650 Ti) debido a que procesó la información en una menor cantidad de tiempo/ha y no obtuvo fallos en el procesamiento.

Aunque en este trabajo no se evaluó las mejores opciones de configuración de vuelos para obtener productos 3D (TDM, SDM y CDM), las siguientes configuraciones de vuelos son las recomendadas para el monitoreo de las variables generales (área efectiva de la plantación, número de árboles por hectárea, mortalidad y mantenimiento de la plantación) y dasométricas (diámetro a 1,3 m de altura, altura, volumen y biomasa de los árboles) de la plantación: realizar el vuelo en la época lluviosa, utilizando una altura de vuelo de 120 metros con un GSD (3,27 cm/píxel), un diseño de trazado 2D y una combinación de traslape lateral: 70% y frontal: 80%. Estos parámetros permiten obtener ortomosaicos de mayor calidad, con menor tiempo y probabilidad de fallas en el procesamiento.

Existe una alta correlación entre el diámetro a 1,3 m de altura y el diámetro de copa, esto quedó demostrado con los modelos desarrollados debido a que presentaron un alto R^2 , un porcentaje de sesgo permitido y pasaron con éxito la prueba de Wilcoxon.

La presente investigación permitió generar un protocolo estandarizado para la recolección y procesamiento de datos provenientes de vehículos aéreos no tripulados (VANT) para el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica. Esto permitirá poder obtener información homogénea y comparable dentro del sector forestal costarricense.

11. Referencias bibliográficas

- Abdullah, Q. (2019). Designing a Flight Route. GEOG 892: Geospatial Applications for Unmanned Aerial System (UAS). John A. Dutton e-Education Institute, Pennsylvania State University. Consultado el 13 julio-2021. <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/658>
- Aerial System (UAS). John A. Dutton e-Education Institute, Pennsylvania State University. Consultado el 13 julio-2021. <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/658>
- Aguilar, J., Valdiviezo, P., Cordero, J., Riofrio, G., & Encalada, E. (2017). Technologies and Innovation. *Communications in Computer and Information Science*, 749(September). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67283-0>
- Albach, H., Meffert, H., Pinkwart, A., & Ralf, R. (2015). Management of permanent change—new challenges and opportunities for change management. In *Management of Permanent Change*. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_1
- Alcívar, F. A. (2020). Aporte de nutrientes por caída de hojarasca en plantaciones de *Tectona grandis* (Teca) en períodos de sequía. *Novasinergia Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 3(1), 17–26. <https://doi.org/10.37135/ns.01.05.02>
- Alejandra, M., Vásquez, C., & Panamericana, E. A. (2020). *Evaluación de cuatro años de monitoreo de mariposas en la finca agroecológica de Zamorano, Honduras*.
- Alidoost, F., & Arefi, H. (2017). COMPARISON of UAS-BASED PHOTOGRAMMETRY SOFTWARE for 3D POINT CLOUD GENERATION: A SURVEY over A HISTORICAL SITE. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(4W4), 55–61. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017>
- Alioua, A., Djeghri, H. eddine, Cherif, M. E. T., Senouci, S. M., & Sedjelmaci, H. (2020). UAVs for traffic monitoring: A sequential game-based computation offloading/sharing approach. *Computer Networks*, 177(February). <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107273>
- Almeida, M. P. De. (2020). *Predição da altura de Tectona grandis Linn F . por meio de modelos genéricos e redes neurais artificiais*.

- Arriola-Valverde, S., Barahona-Contreras, A., Miller-Granados, C., & Rimolo-Donadio, R. (2017). Diseño de un sistema de adquisición de datos para fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista Tecnología En Marcha*, 29(4), 92. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i4.3040>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Barbasiewicz, A., Widerski, T., & Daliga, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web of Conferences*, 26. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600012>
- Barkl, S., Ríos, N. A., & Schlecht, S. (1999). Crecimiento de Schinopsis quebracho-colorado. *Madera y Bosques*, 5(2), 35–51.
- Basurto-Lozada, D., Hillier, A., Medina, D., Pulido, D., Karaman, S., & Salas, J. (2020). Dynamics of soil surface temperature with unmanned aerial systems. *Pattern Recognition Letters*, 138, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.07.003>
- Berie, H. T., & Burud, I. (2018). Application of unmanned aerial vehicles in earth resources monitoring: Focus on evaluating potentials for forest monitoring in Ethiopia. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 326–335. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1432993>
- Burns, J. H. R., & Delparte, D. (2017). Comparison of commercial structure-from-motion photogrammetry software used for underwater three-dimensional modeling of coral reef environments. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2W3), 127–131. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-127-2017>
- Casella, V., Chiabrando, F., Franzini, M., & Manzino, A. M. (2020). Accuracy assessment of a UAV block by different software packages, processing schemes and validation strategies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi9030164>
- Christiansen, M. P., Laursen, M. S., Jørgensen, R. N., Skovsen, S., & Gislum, R. (2017). Designing and testing a UAV mapping system for agricultural field surveying. *Sensors (Switzerland)*, 17(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s17122703>

- Climate-Data.Org. (sfa). Alajuela clima. Consultado el 4 de agosto del 2020. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/alajuela/alajuela-28494/>
- Climate-Data.Org. (sfb). Limón clima. Consultado el 6 de abril del 2021. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/limon-1018/>
- 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/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. (2018). Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155(December 2017), 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.005>
- Corte, A. P. D., Rex, F. E., de Almeida, D. R. A., Sanquetta, C. R., Silva, C. A., Moura, M. M., Wilkinson, B., Zambrano, A. M. A., da Cunha Neto, E. M., Veras, H. F. P., de Moraes, A., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., & Broadbent, E. N. (2020). Measuring individual tree diameter and height using gatereye high-density UAV-lidar in an integrated crop-livestock-forest system. *Remote Sensing*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/rs12050863>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204(July), 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision uav estimates of forest structure. *Remote Sensing*, 7(10), 13895–13920. <https://doi.org/10.3390/rs71013895>
- Dang-Ngoc, H., & Nguyen-Trung, H. (2019). Aerial Forest Fire Surveillance-Evaluation of Forest Fire Detection Model using Aerial Videos. *International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2019-October*, 142–148. <https://doi.org/10.1109/ATC.2019.8924547>
- Dash, J., Pont, D., Watt, M. S., Dash, J., Pont, D., Brownlie, R., Dunningham, A., Watt, M., & Pearse, G. (2016). Remote sensing for precision forestry. *NZ Journal of Forestry*, June, 15–24.
- Dávila, A. (2011^a). Alajuela, Costa Rica. Consultado el 4 de agosto del 2020. <https://www.costarica21.com/Alajuela-s.html>

- Dávila, A. (2011b). Guanacaste, Costa Rica. Consultado el 4 de agosto del 2020.
<https://www.costarica21.com/Guanacaste-s.html>
- Dávila, A. (2011c). Limón, Costa Rica. Consultado el 7 de abril del 2021.
<https://www.costarica21.com/Limon-s.html>
- Dávila, A. (2011d). Heredia, Costa Rica. Consultado el 7 de abril del 2021.
<https://www.costarica21.com/Heredia-s.html>
- Dávila, A. (2011e). Puntarenas, Costa Rica. Consultado el 7 de abril del 2021.
<https://www.costarica21.com/Puntarenas-s.html>
- Dawdi, T. M., Abdalla, N., Elkalyoubi, Y. M., & Soudan, B. (2020). Locating victims in hot environments using combined thermal and optical imaging. *Computers and Electrical Engineering*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106697>
- de Almeida, D. R. A., Almeyda Zambrano, A. M., Broadbent, E. N., Wendt, A. L., Foster, P., Wilkinson, B. E., Salk, C., Papa, D. de A., Stark, S. C., Valbuena, R., Gorgens, E. B., Silva, C. A., Brancalion, P. H. S., Fagan, M., Meli, P., & Chazdon, R. (2020). Detecting successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar. *Biotropica*, April, 1–13. <https://doi.org/10.1111/btp.12814>
- de Moor, J. M., Stix, J., Avard, G., Muller, C., Corrales, E., Diaz, J. A., Alan, A., Brenes, J., Pacheco, J., Aiuppa, A., & Fischer, T. P. (2019). Insights on Hydrothermal-Magmatic Interactions and Eruptive Processes at Poás Volcano (Costa Rica) From High-Frequency Gas Monitoring and Drone Measurements. *Geophysical Research Letters*, 46(3), 1293–1302. <https://doi.org/10.1029/2018GL080301>
- Demiane, F., Sharafeddine, S., & Farhat, O. (2020). An optimized UAV trajectory planning for localization in disaster scenarios. *Computer Networks*, 179, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107378>
- Diaz, J. A., Pieri, D., Wright, K., Sorensen, P., Kline-Shoder, R., Arkin, C. R., Fladeland, M., Bland, G., Buongiorno, M. F., Ramirez, C., Corrales, E., Alan, A., Alegria, O., Diaz, D., & Linick, J. (2015). Unmanned aerial mass spectrometer systems for in-situ volcanic plume analysis. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 26(2), 292–304. <https://doi.org/10.1007/s13361-014-1058-x>

- Duarte, L., Silva, P., & Teodoro, A. C. (2018). Development of a QGIS plugin to obtain parameters and elements of plantation trees and vineyards with aerial photographs. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 14–19. <https://doi.org/10.3390/ijgi7030109>
- Elarab, M. (2016). *The Application of Unmanned Aerial Vehicle to Precision Agriculture: Chlorophyll, Nitrogen, and Evapotranspiration Estimation*. 148.
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP*, 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Faiçal, B. S., Costa, F. G., Pessin, G., Ueyama, J., Freitas, H., Colombo, A., Fini, P. H., Villas, L., Osório, F. S., Vargas, P. A., & Braun, T. (2014). The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides. *Journal of Systems Architecture*, 60(4), 393–404. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2014.01.004>
- Flores, Y., & Diaz, H. (2020). *Comparación de postproceso entre el software Pix4D y Agisoft Metashape de un levantamiento topográfico con RPAS*.
- Fraser, B. T., & Congalton, R. G. (2018). Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) data collection of complex forest environments. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060908>
- Freiberg, E., & Freiberg, M. (1999). Ritmo de crecimiento y longevidad de follaje del estrato arbustivo en la reserva biológica A. Brenes, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 47(3), 339–349. <https://doi.org/10.15517/rbt.v47i3.19082>
- Frey, J., Kovach, K., Stemmler, S., & Koch, B. (2018). UAV photogrammetry of forests as a vulnerable process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060912>
- Garcia, M. V. Y., & Oliveira, H. C. (2020). The Influence of Ground Control Points Configuration and Camera Calibration for Dtm and Orthomosaic Generation Using Imagery Obtained from A Low-Cost Uav. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(1), 239–244. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-239-2020>
- Getzin, S., Nuske, R. S., & Wiegand, K. (2014). Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 6(8), 6988–7004. <https://doi.org/10.3390/rs6086988>

- Giannetti, F., Puletti, N., Puliti, S., Travaglini, D., & Chirici, G. (2020). Assessment of UAV photogrammetric DTM-independent variables for modelling and mapping forest structural indices in mixed temperate forests. *Ecological Indicators*, 117(April), 106513. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106513>
- Glova, J., Sabol, T., & Vajda, V. (2014). Business Models for the Internet of Things Environment. *Procedia Economics and Finance*, 15(14), 1122–1129. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)00566-8](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)00566-8)
- Gómez-Candón, D., De Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, 15(1), 44–56. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>
- González J., E. (2018). Especies forestales nativas para la reforestación comercial en las principales biorregiones de Costa Rica. *Ambientico*, 267, 17–22.
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*, 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- Groos, A. R., Bertschinger, T. J., Kummer, C. M., Erlwein, S., Munz, L., & Philipp, A. (2019). The potential of low-cost UAVs and open-source photogrammetry software for high-resolution monitoring of alpine glaciers: A case study from the kanderfirn (Swiss Alps). *Geosciences (Switzerland)*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/geosciences9080356>
- Guerra-Hernández, J., Cosenza, D. N., Cardil, A., Silva, C. A., Botequim, B., Soares, P., Silva, M., González-Ferreiro, E., & Díaz-Varela, R. A. (2019). Predicting growing stock volume of eucalyptus plantations using 3-D point clouds derived from UAV imagery and ALS data. *Forests*, 10(10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10100905>
- Guo, L., Fu, P., Shi, T., Chen, Y., Zhang, H., Meng, R., & Wang, S. (2020). Mapping field-scale soil organic carbon with unmanned aircraft system-acquired time series multispectral images. *Soil and Tillage Research*, 196(October 2019), 104477. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104477>
- Gupta, S. G., Ghonge, M., & Jawandhiya, P. M. (2019). Review of Unmanned Aircraft System (UAS). *SSRN Electronic Journal*, 2(4), 1646–1658. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3451039>
- Hardjana, A. K. (2013). MODEL HUBUNGAN TINGGI DAN DIAMETER TAJUK DENGAN

DIAMETER SETINGGI DADA PADA TEGAKAN TENKAWANG TUNGKUL PUTIH (*Shorea macrophylla* (de Vriese) P.S. Ashton) DAN TUNGKUL MERAH (*Shorea stenoptera* Burck.) DI SEMBOJA, KABUPATEN SANGGAU. *Jurnal Penelitian Dipterokarpa*, 7(1), 7–18. <https://doi.org/10.20886/jped.2013.7.1.7-18>

Hernández-Cole, J., Ortiz-Malavassi, E., Moya, R., & Murillo, O. (2021). Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of *tectona grandis* in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica. *Drones*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/drones5020047>

Hogan, S. D., Kelly, M., Stark, B., & Chen, Y. Q. (2017). Unmanned aerial systems for agriculture and natural resources. *California Agriculture*, 71(1), 5–14. <https://doi.org/10.3733/ca.2017a0002>

Hughenoltz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., Riddell, K., & Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (Suas): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.023>

INA. (s.f.). CAPÍTULO 4: VEGETACIÓN DE COSTA RICA: BIODIVERSIDAD Y RIQUEZA. Consultado el 8 de agosto de 2020. https://www.ina-pidte.ac.cr/pluginfile.php/19801/mod_resource/content/1/Vegetacion%20de%20Costa%20Rica%20%28v-asec%29.pdf

INEC. (2015). VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales. In *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. <https://doi.org/978-9968-683-96-3>

Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Franceschini, M. H. D., Kramer, H., van Loo, E. N., Jaramillo Roman, V., & Finkers, R. (2019). UAV based soil salinity assessment of cropland. *Geoderma*, 338(May), 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.046>

Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P., & Le Dantec, N. (2016). Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by PhotoScan® and MicMac® in sub-optimal survey conditions. *Remote Sensing*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/rs8060465>

Jiménez, J. (2020). Funciones alométricas, de volumen y rendimiento de aserrío para cebo (*Vochysia guatemalensis* Donn. Sm.) en plantaciones mixtas, Zona Norte, Costa Rica. In *Instituto*

- Ju, C., & Son, H. Il. (2018). Multiple UAV systems for agricultural applications: Control, implementation, and evaluation. *Electronics (Switzerland)*, 7(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/electronics7090162>
- Kaimaris, D., Patias, P., & Sifnaiou, M. (2017). UAV and the comparison of image processing software. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 5(1), 18–27. <https://doi.org/10.1108/IJIUS-12-2016-0009>
- Kameyama, S., & Sugiura, K. (2021). Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing*, 13(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13040626>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., & Noh, S. Do. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Khan, A., Gupta, S., & Gupta, S. K. (2020). Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47(April), 101642. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101642>
- Khan, Z., & Miklavcic, S. J. (2019). An automatic field plot extraction method from aerial orthomosaic images. *Frontiers in Plant Science*, 10(May), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00683>
- Kim, J., Kim, S., Ju, C., & Son, H. Il. (2019). Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*, 7, 105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>
- Kinaneva, Di., Hristov, G., Raychev, J., & Zahariev, P. (2019). Application of Artificial Intelligence in UAV platforms for Early Forest Fire Detection. *27th National Conference with International Participation: The Ways to Connect the Future, TELECOM 2019 - Proceedings*, 50–53. <https://doi.org/10.1109/TELECOM48729.2019.8994888>
- Lee, H., Wang, J., & Leblon, B. (2020). Using linear regression, random forests, and support vector

- machine with unmanned aerial vehicle multispectral images to predict canopy nitrogen weight in corn. *Remote Sensing*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/rs12132071>
- Li, B., Fei, Z., & Zhang, Y. (2019). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2241–2263. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>
- Liang, Y., & Jia, Y. (2016). Combined Vector Field Approach for 2D and 3D Arbitrary Twice Differentiable Curved Path Following with Constrained UAVs. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 83(1), 133–160. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0308-x>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), 922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>
- Liu, G., Wang, J., Dong, P., Chen, Y., & Liu, Z. (2018). Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests*, 8(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/f9070398>
- Lu, K., Xie, J., Wan, Y., & Fu, S. (2019). Toward UAV-Based Airborne Computing. *IEEE Wireless Communications*, 26(6), 172–179. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1900025>
- Ludwig, M., Runge, C. M., Friess, N., Koch, T. L., Richter, S., Seyfried, S., Wraase, L., Lobo, A., Sebastià, M. T., Reudenbach, C., & Nauss, T. (2020). Quality assessment of photogrammetric methods— a workflow for reproducible UAS orthomosaics. *Remote Sensing*, 12(22), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs12223831>
- Lv, M., Xiao, S., Tang, Y., & He, Y. (2019). Influence of UAV flight speed on droplet deposition characteristics with the application of infrared thermal imaging. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 10–17. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4868>
- Machovina, B. L., Feeley, K. J., & Machovina, B. J. (2016). UAV remote sensing of spatial variation

- in banana production. *Crop and Pasture Science*, 67(12), 1281–1287. <https://doi.org/10.1071/CP16135>
- Małgorzata Błaszczyk, Michał Laska, Agnar Sivertsen, S. D. J. (2022). Combined Use of Aerial Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Detecting Geomorphological Changes in Hornsund, Svalbard. *Remote Sensing*.
- Malleux, J. (1970). Estudio de la Relación D.A.P. con el Diámetro de Copa en un Bosque Húmedo Sub Tropical. *Revista Forestal Del Perú, Lima, Perú*, 4(1–2), 1–5.
- Manconi, A., Ziegler, M., Blöchliger, T., & Wolter, A. (2019). Technical note: optimization of unmanned aerial vehicles flight planning in steep terrains. *International Journal of Remote Sensing*, 00(00), 1–10. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1573334>
- Marx, A., McFarlane, D., & Alzahrani, A. (2017). UAV data for multi-temporal Landsat analysis of historic reforestation: a case study in Costa Rica. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2331–2348. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1280637>
- Mehta, P., Gupta, R., & Tanwar, S. (2020). Blockchain envisioned UAV networks: Challenges, solutions, and comparisons. *Computer Communications*, 151(January), 518–538. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.023>
- Michez, A., Piégay, H., Lisein, J., Claessens, H., & Lejeune, P. (2016). Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4996-2>
- Muhammad, M. N., Wayayok, A., Mohamed Shariff, A. R., Abdullah, A. F., & Husin, E. M. (2019). Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167(October). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105045>
- Nam-Bui, X., Quoc Long, N., Thi Thu Ha, L., Ngoc Quy, B., Goyal, R., Trong Hung, V., van Chung, P., Xuan Cuong, C., van Canh, L., & Hong Viet, L. (2020). Flight Height of UAV and Its Influence on the Precise Digital Elevation Model of Complex Terrain. *Inzynieria Mineralna*, 2020(1), 179–186. <https://doi.org/10.29227/IM-2020-01-27>
- Nesbit, P. R., & Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV-SfM 3D model accuracy in high-relief

- landscapes by incorporating oblique images. *Remote Sensing*, 11(3), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11030239>
- Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., Hyyppä, J., Saari, H., Pölönen, I., Imai, N. N., & Tommaselli, A. M. G. (2017). Individual tree detection and classification with UAV-Based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sensing*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/rs9030185>
- 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>
- Norasma, C. Y. N., Fadzilah, M. A., Roslin, N. A., Zanariah, Z. W. N., Tarmidi, Z., & Candra, F. S. (2019). Unmanned Aerial Vehicle Applications in Agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 506, Issue 1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/506/1/012063>
- Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyyppä, J., & Honkavaara, E. (2013). Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.06.005>
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su12114674>
- OpenDroneMap. (2021a). WebODM. OpenDroneMap. <https://www.opendronemap.org/webodm/>
- OpenDroneMap. (2021b). Frequently Asked Questions. OpenDroneMap. <https://www.opendronemap.org/webodm/download/>
- OpenDroneMap. (2021c). An Open Feature. OpenDroneMap. <https://www.opendronemap.org/>
- Ortiz-Malavassi, Edgar; Arena-Tapia, Andrea; Bonilla, Guevara Mario, Hernández Cole, J. (2020). *VIABILIDAD DEL USO DE LOS VANTS EN EL MONITOREO DE PLANTACIONES FORESTALES*.
- Ortiz, E. (2016). *Crecimiento y Rendimiento Forestal*.
- P. Raja. (2012). Optimal path planning of mobile robots: A review. *International Journal of the*

- Physical Sciences*, 7(9), 1314–1320. <https://doi.org/10.5897/ijps11.1745>
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>
- Parcial, A. L. D. N., Rios, E. D. S., Silva, T. H. T. da, & Almeida, J. R. de. (2014). Adhesion Models for Analysis of the Tropical Ecosystem Diametric Structure. *Revista Sustinere*, 2(1). <https://doi.org/10.12957/sustinere.2014.11804>
- Park, J., Kim, P., Cho, Y. K., & Kang, J. (2019). Framework for automated registration of UAV and UGV point clouds using local features in images. *Automation in Construction*, 98(August 2018), 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.024>
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2020). Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: The monastery of San Martín Pinario. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106984>
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206–1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Pix4D. (2019). *What is accuracy in an aerial mapping project* (Issue April). <https://www.pix4d.com/blog/accuracy-aerial-mapping%0Ahttps://www.pix4d.com/es/blog/mapeo-aereo-de-precision>
- Pix4D. (2021a). Ground sample distance (GSD) in photogrammetry. Pix4D. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry>
- Pix4D. (2021b). Types of Mission/ Which type of mission to choose. Pix4D. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/209960726-Types-of-mission-Which-type-of-mission-to-choose>
- Pix4D. (2021c). Pix4Dmapper. Pix4D. <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software>

- Pix4D. (2021d). System requirements: Minimum and recommended computer specifications. Pix4D. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557289-System-requirements-Minimum-and-recommended-computer-specifications#gsctab=0>
- Pix4D. (2021e). How to process images taken at different flight height. Pix4D. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558979-How-to-process-images-taken-at-different-Flight-Heights-GSD>
- Pix4D. (2021f). Processing speed. Pix4D. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204191535-Processing-speed>
- Psirofonía, P., Samaritakis, V., Eliopoulos, P., & Potamitis, I. (2017). Use of Unmanned Aerial Vehicles for Agricultural Applications with Emphasis on Crop Protection: Three Novel Case - studies. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 5(1), 30–39. <https://doi.org/10.12783/ijast.2017.0501.03>
- Puliti, S., Gobakken, T., Ørka, H. O., & Næsset, E. (2017). Assessing 3D point clouds from aerial photographs for species-specific forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32(1), 68–79. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1186727>
- Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7(8), 9632–9654. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>
- Puri, V., Nayyar, A., & Raja, L. (2017). Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics and Management Systems*, 20(4), 507–518. <https://doi.org/10.1080/09720510.2017.1395171>
- Quirós, S. (2015). *Modelos de volumen comercial , perfil de fuste y crecimiento para plantaciones clonales de Gmelina arborea Roxb . ex Sm . en Costa Rica.*
- Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, 172(January), 107148. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>
- Ribeiro-Gomes, K., Hernández-López, D., Ortega, J. F., Ballesteros, R., Poblete, T., & Moreno, M. A. (2017). Uncooled thermal camera calibration and optimization of the photogrammetry process for UAV applications in agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 17(10), 9–11. <https://doi.org/10.3390/s17102173>

- Rizo-Maestre, C., González-Avilés, Á., Galiano-Garrigós, A., Andújar-Montoya, M. D., & Puchol-García, J. A. (2020). UAV + BIM: Incorporation of photogrammetric techniques in architectural projects with building information modeling versus classical work processes. *Remote Sensing*, 12(14), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs12142329>
- Rogachev, A., & Melikhova, E. (2019). Monitoring of agricultural land productivity using unmanned aerial vehicles and artificial neural networks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 403(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012175>
- Rudic, T. E., McCulloch, L. A., & Cushman, K. C. (2020). Comparison of smartphone and drone lidar methods for characterizing spatial variation in PAI in a tropical forest. *Remote Sensing*, 12(11), 1–13. <https://doi.org/10.3390/rs12111765>
- Sánchez Porras, R., Cambronero Brenes, L., Esquivel Chavarría, K., & Vásquez Mejías, Y. (2020). Diversidad y patrones de actividad de mamíferos medianos y grandes, en el sendero La Fila, Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, Alajuela, Costa Rica. *Pensamiento Actual*, 19(33), 175–189.
- Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., Roglin, A., & Pimentel, A. (2013). Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. *Iheringia - Serie Botanica*, 68(1), 103–114.
- Santillan, J. R., Gesta, J. L. E., & Marcial, M. C. N. (2021). *Effects of Flight Plan Parameters to the Quality and Useability of UAS Photogrammetry Data Products for Tree Crown Delineation*. June, 0–13.
- Santos, I. C. de L., dos Santos, A., Costa, J. G., Rosa, A. M., Zanuncio, A. J. V., Zanetti, R., Oumar, Z., & Zanuncio, J. C. (2020). Tectona grandis canopy cover predicted by remote sensing. *Precision Agriculture*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09748-w>
- Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt, J., Kunneke, A., & Seifert, T. (2019). Influence of drone altitude, image overlap, and optical sensor resolution on multi-view reconstruction of forest images. *Remote Sensing*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/rs11101252>
- Shahbazi, M., Théau, J., & Ménard, P. (2014). Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *GIScience and Remote Sensing*, 51(4), 339–365.

<https://doi.org/10.1080/15481603.2014.926650>

- Sibona, E., Vitali, A., Meloni, F., Caffo, L., Dotta, A., Lingua, E., Motta, R., & Garbarino, M. (2017). Direct measurement of tree height provides different results on the assessment of LiDAR accuracy. *Forests*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/f8010007>
- Solano, J & Villalobos, R. (s.f.). REGIONES Y SUBREGIONES CLIMATICAS DE COSTA RICA. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>
- Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics*, 7(2), 97–107. <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0142-2>
- Stehr, N. J. (2015). Drones: The Newest Technology for Precision Agriculture. *Natural Sciences Education*, 44(1), 89–91. <https://doi.org/10.4195/nse2015.04.0772>
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
- Tapia, A., Guevara, M., y Segura, E. (2019). Procesamiento de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados usando software libre. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, Cartago, Costa Rica.
- Tiberiu Paul Banu, Gheorghe Florian Borlea, & Constantin Banu. (2016). The Use of Drones in Forestry. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 5(11), 557–562. <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007>
- Tinkham, W. T., & Swayze, N. C. (2021). Influence of agisoft metashape parameters on uas structure from motion individual tree detection from canopy height models. *Forests*, 12(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f12020250>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., Brook, A., Polinova, M., Arranz, J. J., Mészáros, J., Zhuang, R., Johansen, K., Malbeteau, Y., de Lima, I. P., Davids, C., Herban, S., & McCabe, M. F. (2020). Current practices in UAS-based environmental monitoring. *Remote Sensing*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Manuel Peña, J. (2018). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model

- accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, 19(1), 115–133. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9502-0>
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. M. (2015). High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology. *PLoS ONE*, 10(6), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L. (2017). Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- Ulvi, A. (2021). Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 42(6), 1994–2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1834164>
- Um, J.-S. (2019). Drones as Cyber-Physical Systems. In *Drones as Cyber-Physical Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3741-3>
- Uzaktan, T., Dergisi, C. B. S., Zeybek, M., & Biçici, S. (2021). *3D Dense Reconstruction of Road Surface from UAV Images and Comparison of SfM Based Software Performance*. 2(September), 96–105.
- Vacca, G., Dessì, A., & Sacco, A. (2017). The use of nadir and oblique UAV images for building knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12). <https://doi.org/10.3390/ijgi6120393>
- Valverde-Rodríguez, K., Morales, C.-O., & García, E.-G. (2019). Fenología de *Crescentia alata* (Bignoniaceae) en Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 67(2SUPL), S112–S119. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i2supl.37210>
- Villalobos-Barquero, V., & Meza-Montoya, A. (2017). Estimación de la producción de madera obtenida durante la operación de arrastre utilizando búfalos de agua (*Bubalus bubalis*), en plantaciones de *Gmelina arborea* roxb, Limón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana*

- Kurú, 15(36), 37. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i36.3422>
- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: Enabling technologies. *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things, ICIT 2015*, 135–140. <https://doi.org/10.1109/ICAOT.2015.7111555>
- Wang, Y., Bai, P., Liang, X., Wang, W., Zhang, J., & Fu, Q. (2019). Reconnaissance Mission Conducted by UAV Swarms Based on Distributed PSO Path Planning Algorithms. *IEEE Access*, 7(July), 105086–105099. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2932008>
- Whitehead, K., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga, A., Barchyn, T. E., Moorman, B., & Eaton, B. (2014). Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 02(03), 86–102. <https://doi.org/10.1139/juvs-2014-0007>
- Williams, M. S., Bechtold, W. A., & LaBau, V. J. (1994). Five Instruments for Measuring Tree Height: An Evaluation. *Southern Journal of Applied Forestry*, 18(2), 76–82. <https://doi.org/10.1093/sjaf/18.2.76>
- Wu, W., Zhang, Z., Zheng, L., Han, C., Wang, X., Xu, J., & Wang, X. (2020). Research progress on the early monitoring of pine wilt disease using hyperspectral techniques. *Sensors (Switzerland)*, 20(13), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s20133729>
- Wu, X., Shen, X., Cao, L., Wang, G., & Cao, F. (2019). Assessment of individual tree detection and canopy cover estimation using unmanned aerial vehicle based light detection and ranging (UAV-LiDAR) data in planted forests. *Remote Sensing*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/rs11080975>
- Yao, H., Qin, R., & Chen, X. (2019). Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review. *Remote Sensing*, 11(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs11121443>
- Žabota, B., & Kobal, M. (2021). Accuracy assessment of uav-photogrammetric-derived products using ppk and gcps in challenging terrains: In search of optimized rockfall mapping. *Remote Sensing*, 13(19), 1–31. <https://doi.org/10.3390/rs13193812>
- Zhang, Y., Wu, H., & Yang, W. (2019). Forests growth monitoring based on tree canopy 3D reconstruction using UAV aerial photogrammetry. *Forests*, 10(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/F10121052>

Zhou, Y., Rupnik, E., Meynard, C., Thom, C., & Pierrot-Deseilligny, M. (2020). Simulation and analysis of photogrammetric UAV image blocks-influence of camera calibration error. *Remote Sensing*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/RS12010022>

12. Anexos

Anexo 1. Resumen del modelo de regresión logística binaria para evaluar los fallos en el procesamiento tomando en cuenta los factores software, GSD (cm/píxel), combinación de traslape y cantidad de imágenes.

Regresión logística binaria: Fallo vs. Software; GSD; Traslapes; Grupo_Imágenes

Método

Función de enlace
Codificación de predictores categóricos (1; 0)
Filas utilizadas
180

Logit

Información de respuesta

Variable

Valor

Conteo

Fallo
1
0
Total
180

150 (Evento)
30
180

Ecuación de regresión

$$B(1) = \frac{\exp(Y)}{1 + \exp(Y)}$$
$$Y = 4.57 + 0.0 \text{ Software_Pix4D} - 1.305 \text{ Software_WebODM} + 0.0 \text{ GSD_2,22} + 0.467 \text{ GSD_2,49} - 1.42 \text{ GSD_3,27} - 1.39 \text{ GSD_3,32} + 0.0 \text{ Traslapes_70x70} + 1.18 \text{ Traslapes_70x80} - 0.073 \text{ Traslapes_80x80} + 0.0 \text{ Grupo_Imágenes_1} - 1.037 \text{ Grupo_Imágenes_2} - 3.96 \text{ Grupo_Imágenes_3}$$

Coefficientes

EE del

Término

Coef

conf.

FIV

Constante
Software
WebODM
GSD
2.49
3.27
3.32
Traslapes
70x80
80x80
Grupo_Imágenes
2
3
3

4.57
-1.305
0.575
1.04
0.467
0.715
1.71
-1.42
1.38
6.44
-1.39
1.05
4.91
1.18
1.18
1.26
-0.073
0.767
2.29
-1.037
0.893
3.34
-3.96
1.50
9.43

Relaciones de probabilidades para predictores categóricos

Relación de probabilidades

Nivel A

Nivel B

IC de 95%

Software
WebODM
GSD
2.49
3.27
3.32
3.27
3.32
3.32
Traslapes
70x80
80x80
80x80
Grupo_Imágenes
2
3
3

Pix4D
2.22
2.22
2.22
2.49
2.49
3.27
70x70
70x70
70x80
70x80
1
1
2

(0.0880; 0.8365)
(0.3929; 6.4779)
(0.0162; 3.5957)
(0.0319; 1.9597)
(0.0095; 2.4002)
(0.0189; 1.2993)
(0.2093; 5.1254)
(0.3175; 33.0424)
(0.2067; 4.1780)
(0.0321; 2.5618)
(0.0615; 0.20414)
(0.0010; 0.3641)
(0.0073; 0.3988)

Resumen del modelo

R-cuad. de desviación

R-cuad. (ajust) de desviación

AIC

AICc

BIC

22.10%, 17.17%, 144.35, 145.41, 173.09

Pruebas de bondad del ajuste

Prueba

GL

Chi-cuadrada

Valor p

Desviación
Pearson
Hosmer Lemeshow

171
171
7

126.35
174.06
6.90

0.996
0.421
0.440

Análisis de Varianza

Prueba de Wald

Fuente

GL

Chi-cuadrada

Valor p

Regresión
Software
GSD
Traslapes
Grupo_Imágenes

8
1
3
2
2

27.34
5.16
2.96
1.29
8.44

0.001
0.023
0.397
0.526
0.015

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs

Probabilidad observada

Ajuste

Resid

Resid est.

25
32
34
37
45
53
91
97
174

0.0000
0.0000
0.0000
0.0000
0.0000
0.0000
0.0067
0.0067
0.0000

0.8549
0.8678
0.8549
0.8885
0.9633
0.9633
0.8637
0.8637
0.9536

-1.9648
-2.0118
-1.9648
-2.0948
-2.5712
-2.5712
-1.9966
-1.9966
-2.4777

-2.00 R
-2.07 R
-2.00 R
-2.14 R
-2.63 R
-2.63 R
-2.06 R
-2.06 R
-2.55 R

Regresión logística binaria: Fallo vs. OP; GSD; Traslapes; Grupo_Imágenes				Relaciones de probabilidades para predictores categóricos				Análisis de Varianza			
Método				Relación de probabilidades				Prueba de Wald			
Función de enlace				Nivel A	Nivel B	IC de 95%		Fuente	GL	Chi-cuadrada	Valor p
Codificación de predictores categóricos (1: 0)				OP				Regresión	10	25.20	0.005
Filas utilizadas				2	1	0.8765	(0.3202; 2.3995)	OP	3	0.34	0.953
Información de respuesta				3	1	1.2929	(0.3427; 4.8784)	GSD	3	3.39	0.335
				4	1	1,67142E+06	(0.0000; 1.84590E+203)	Traslapes	2	0.97	0.616
				3	2	1.4751	(0.3941; 5.5315)	Grupo_Imágenes	2	9.07	0.011
				4	2	1.90696E+06	(0.0000; 2.10601E+203)	Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes			
				4	3	1,29274E+06	(0.0000; 1,42875E+203)	Probabilidad observada			
				GSD							
				2.49	2.22	1.7944	(0.4061; 7.9282)	Obs		Ajuste	Resid
				3.27	2.22	0.2246	(0.0153; 3.2977)	25	0.0000	0.8619	-1.2899
				3.32	2.22	0.2420	(0.0313; 1.8730)	32	0.0000	0.8700	-2.0200
				3.32	2.49	0.1252	(0.0078; 2.0025)	45	0.0000	0.9693	-2.6393
Ecuación de regresión				3.32	2.49	0.1349	(0.0160; 1.1387)	53	0.0000	0.9651	-2.5905
				3.32	3.27	1.0774	(0.2178; 5.3297)	62	1.0000	1.0000	0.0016
				Traslapes				91	0.0000	0.8763	-2.0446
				70x80	70x70	2.6681	(0.2565; 27.7573)	97	0.0000	0.8613	-1.2897
				80x80	70x70	0.8806	(0.1982; 3.9133)	128	1.0000	1.0000	0.0016
				80x80	70x80	0.3300	(0.0361; 3.0196)	174	0.0000	0.9431	-2.3943
				Grupo_Imágenes				Residuo grande R			
				2	1	0.3335	(0.0572; 1.9444)				
				3	1	0.0164	(0.0009; 0.3106)	X ₁ poco común X			
				3	2	0.0490	(0.0066; 0.3622)				
Término				Relación de probabilidades para Nivel A relativo a Nivel B				Residuo grande R			
				R-cuad. de (ajust) de							
				R-cuad. De desviación desviación				X ₁ poco común X			
				AIC AICc BIC							
				27.27%				Pruebas de bondad del ajuste			
				21.11%							
				139.96				Prueba			

•

Anexo 3. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Abangares.

Criterios de decisión				
	Modelos			
	1 (Potencial)	2 (Potencial + cambio en intersección)	3 (Potencial + cambio en pendiente)	4 (Potencial + cambio en intersección y pendiente)
Modelo	$d= e^{1,52} \times dc^{0,92}$	$d= e^{1,55} \times dc^{0,70} \times e^{0,31 \times D1}$	$d= e^{1,57} \times dc^{0,67} \times e^{0,25 \times d1 \times dc}$	$d= e^{1,56} \times e^{0,22 \times d1 \times Don}$ Joaquín $\times dc^{0,68} \times$ $e^{0,07 \times d1 \times dc}$
R ²	0,80	0,84	0,84	0,84
Syx	0,23	0,21	0,21	0,21
FI	0,80	0,84	0,84	0,84
Se	0,23	0,21	0,21	0,21
Cv%	1,84	1,65	1,66	1,65
Análisis de residuos*				
Resid vrs ln(dc)	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo
Resid vrs D1*ln(dc)	No aplica	No aplica	(-/+) Los residuos se distribuyen de manera normal en el eje x cuando la variable D1 es igual a 1	(-/+) Los residuos se distribuyen de manera normal en el eje x cuando la variable D1 es igual a 1

Recomendación		Se recomienda utilizar el modelo 2 ya que posee el coeficiente de variación y los p-value más bajos con respecto a los otros modelos, además posee menos variables y es más fácil de utilizar.		
---------------	--	--	--	--

Anexo 4. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.

Estadístico	Valor
Porcentaje de sesgo	-1,60 %
Prueba de Wilcoxon	0,78

Anexo 5. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rita.

Criterios de decisión				
	Modelos			
	1 (Potencial)	2 (Polinómico grado 2)	3 (Logarítmico)	4 (Lineal)
Modelo	$d= e^{0,65} + dc^{0,98}$	$d= -4,29+4,68*dc-0,43*dc^2$	$d=-0,45+5,70*\ln(d\ c)$	$d=0,64+1,71*dc$
R ²	0,61	0,57	0,57	0,55
Syx	0,11	0,71	0,71	0,73
FI	0,54	0,57	0,57	0,55
Se	0,73	0,71	0,71	0,73
Cv%	10,81	10,56	10,55	10,76

Análisis de residuos*				
Resid vrs dc	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo
Recomendación		Se recomienda utilizar este modelo, posee los mejores estadísticos de precisión, el intercepto es significativo, pero por muy poco.		

Anexo 6. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.

Estadístico	Valor
Porcentaje de sesgo	0,59 %
Prueba de Wilcoxon	0,92

Anexo 7. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en San Pedro de Hojancha.

Criterios de decisión				
	Modelos			
	1 (Lineal)	2 (Logarítmico)	3 (Potencial)	4 (Polinómico 2)
Modelo	d= 4,32 + 2,02*dc	d=3,38 + 6,44*ln(dc)	d=e ^{1,70} + dc ^{0,58}	d= 11,02 -2,12*dc + 0,62*dc ²
R ²	0,41	0,39	0,38	0,42
Syx	1,24	1,26	0,12	1,24
FI	0,41	0,39	0,40	0,42
Se	1,24	1,26	1,25	1,24
Cv%	11,30	11,55	11,48	11,34
Análisis de residuos*				
Resid vrs dc	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo
Recomendación	Se recomienda utilizar este modelo, debido a que es uno de los que posee los mejores estadísticos de precisión y además es el más sencillo de utilizar			

Anexo 8. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.

Estadístico	Valor
Porcentaje de sesgo	-1,71 %
Prueba de Wilcoxon	0,50

Anexo 9. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación de *Tectona grandis* ubicada en Punta Morales.

Criterios de decisión				
	Modelos			
	1 (Logarítmico)	2 (Polinómico grado 2)	3 (Potencial)	4 (Lineal)
Modelo	d= 4,64 + 5,89*ln(dc)	d= -0,56 + 5,92*dc – 0,67*dc ²	d= e ^{1,65} + dc ^{0,68}	d= 3,89 + 2,40*dc
R ²	0,43	0,44	0,49	0,41
Syx	1,41	1,42	0,15	1,45
FI	0,43	0,44	0,42	0,41
Se	1,41	1,42	1,44	1,45
Cv%	13,46	13,46	13,69	13,77
Análisis de residuos*				
Resid vrs dc	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo

Recomendación	Se recomienda utilizar este modelo ya que es uno de los que posee los mejores estadísticos de precisión.			
---------------	--	--	--	--

Anexo 10. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.

Estadístico	Valor
Porcentaje de sesgo	-0,98 %
Prueba de Wilcoxon	0,84

Anexo 11. Estadísticos de precisión para cuatro modelos propuestos para predecir el d en función del dc en una plantación Mixta ubicada en Pocora.

Criterios de decisión				
	Modelos			
	1 (Exponencial)	2 (Exponencial + cambio intersección)	3 (Exponencial + cambio pendiente)	4 (Exponencial + cambio intersección y pendiente)
Modelo	$d= e^{0,27} \times e^{0,46 \times dc}$	$d=e^{-0,07} \times e^{0,41 \times dc} \times e^{0,58 \times d1} \times e^{0,87 \times d2}$	$d= e^{0,65} \times e^{0,027 \times dc} \times e^{0,35 \times (d1 \times dc)} \times e^{0,43 \times (d2 \times dc)}$	$d= e^{0,006} \times e^{0,37 \times dc} \times e^{-0,13 \times d1} \times e^{1,05 \times d2} \times e^{0,21 \times (d1 \times dc)} \times e^{-0,15 \times (d2 \times dc)}$
R ²	0,55	0,74	0,72	0,76
Syx	0,52	0,39	0,41	0,39
FI	0,55	0,74	0,72	0,76
Se	0,52	0,39	0,41	0,39
Cv%	9,40	7,16	7,47	7,04
Análisis de residuos*				
Resid vrs dc	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo	(-/+) Los residuos se distribuyen de una forma normal debido a que se distribuyen arriba y abajo

Resid vrs D1xdc y D2xdc	No aplica	No aplica	(-/+) Los residuos se distribuyen de manera normal en el eje x cuando la variable D1 es igual a 1	(-/+) Los residuos se distribuyen de manera normal en el eje x cuando la variable D1 es igual a 1
Recomendación		Se recomienda utilizar este modelo ya que es uno de los que posee los mejores estadísticos de precisión y además las variables de presentes en el modelo son significativas.		

Anexo 12. Porcentaje de sesgo y valor de p value obtenido en la prueba Wilcoxon para la validación del modelo.

Estadístico	Valor
Porcentaje de sesgo	-14,47 %
Prueba de Wilcoxon	0,26