

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Vicerrectoría de Investigación y Extensión  
Dirección de Proyectos  
Informe final de proyectos de investigación y extensión**

**DOCUMENTO 1**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Forestal  
Centro de Investigación e Innovación Forestal (CIF)  
Proyecto:**

**Utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) en la evaluación de la calidad y  
estado de desarrollo de plantaciones forestales**

**28 de febrero del 2022**

## **1. CÓDIGO Y TÍTULO DEL PROYECTO**

**1.1 Código del proyecto:** 1401-1046

**1.2 Nombre del proyecto:**

Utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) en la evaluación de la calidad y estado de desarrollo de plantaciones forestales

**1.3 Departamento académico responsable:**

Escuela de Ingeniería Forestal

**1.4 Otras escuelas participantes:** Ninguna

**1.5 Instituciones participantes externas:** FONAFIFO

**1.6 Investigador coordinador:**

Dr. Edgar Ortiz Malavasi

**1.7 Investigadores colaboradores:**

Ing. Andrea Tapia Arenas

Ing. Verónica Villalobos

Ing. Mario Guevara Bonilla

**1.8 Período de ejecución:** enero-2020 a diciembre 2021

## 2. RESUMEN

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) 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), edad y altura de los árboles. Así mismo se desarrolló un procedimiento para zonificar plantaciones forestales según índices de vegetación y estado de desarrollo. Se obtuvo que el procesamiento de las imágenes con el software *Pix4Dmappermapper*® 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 orto-mosaicos 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 diámetro a partir del diámetro de copa (dc), edad y altura para árboles de *Tectona grandis*, y *Gmelina arborea*, alcanzaron un  $R^2$  superior a 80% 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 tomados con vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica.

**Palabras clave:** Drones, SAPD, *Pix4Dmappermapper*®, *WebODM*®, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*

### 3. INTRODUCCIÓN

Al igual que muchas otras actividades productivas la actividad forestal necesita adaptarse a los cambios que vienen con la Revolución Industrial 4. La revolución industrial 4.0 se caracteriza por el uso intensivo de sistemas ciber-físicos para llevar a cabo labores que actualmente son realizadas mediante uso intensivo de mano de obra. Una de estas nuevas herramientas son los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), y las actividades de monitoreo y evaluación de plantaciones forestales son una de las actividades en las que los VANTs pueden tener múltiples aplicaciones.

El monitoreo de la actividad forestal requiere del establecimiento y medición de parcelas de monitoreo, con el fin de conocer las características dasométricas básicas de calidad y estado de desarrollo de las plantaciones forestales (sanidad, número de árboles/ha, diámetro y altura de los árboles), así como del volumen comercial y la cantidad de CO<sup>2</sup> acumulado. Este monitoreo es caro, los productores con contratos de PSA<sup>1</sup> deben reportarlo al FONAFIFO, y también usarlos para mejorar la productividad de las plantaciones.

Los VANTs han demostrado tener gran versatilidad para realizar múltiples funciones, además con el uso de sensores de fácil adaptación y cámaras de mediana resolución se puede derivar información de la calidad y estado de desarrollo tanto de cultivos como plantaciones forestales. Sin embargo, para esto se requiere calibrar modelos que relacionen los datos tomados con los VANTs, con información de campo, así como validar su exactitud y costo.

El seguimiento de las plantaciones forestales es un esfuerzo continuo fundamental para lograr aumentar la productividad. Para los productores forestales la observación de sus plantaciones ha sido un esfuerzo problemático debido a la necesidad de recorrer vastas franjas de árboles a pie. Los VANTs ofrecen a los productores una manera fácil y rápida de monitorear la salud y estado de desarrollo de sus árboles, e identificar cualquier área problemática o que requiera mejoras.

El proyecto permitió desarrollar protocolos para el monitoreo de plantaciones forestales que reducirán los costos de las actividades de seguimiento y evaluación de estas, y en segunda instancia dará paso a obtener información más precisa y detallada de la salud general de los árboles, su tamaño, y productividad. Lo anterior permitirá el desarrollo de una silvicultura de precisión orientada a incrementar la productividad de las plantaciones y la reducción de costos de producción

---

<sup>1</sup> PSA: Pago por servicios ambientales-Reforestación

#### 4. Marco Teórico

El uso eficiente de los VANTs en monitoreo de plantaciones forestales se logra cuando se tiene procedimientos estandarizados para recolectar y analizar datos de campo para conocer el estado fitosanitario, el estado de desarrollo (diámetro y altura), y la productividad (número de árboles por hectárea y biomasa viva) de las plantaciones. Dado que hay muchos tipos de drones hay que escoger un VANT que permita recolectar los datos deseamos, pero que su costo sea accesible.

Estos procedimientos dependen, sin embargo, de múltiples factores, tales como: tipo de VANT disponible, sensor o cámara a bordo del VANT, hora del día en que se hace el vuelo, la altura de vuelo, y porcentaje de traslape entre imágenes tomadas, factores que a su vez interactúan con las características de la plantación, tal como área total, especie, pendiente del terreno, y porcentaje de cobertura de copas.

Por otro lado, los datos recolectados por el VANT tienen que procesarse para generar la información que se requiere en el monitoreo forestal. El procesamiento de los datos de campo a su vez depende del software disponible, las características de la computadora, la magnitud de los archivos de datos. Con respecto a este último factor, se conoce que cuando se tienen archivos de datos muy voluminosos (medido en megabytes) se obtiene mejor información, pero el procesamiento es mucho más lento, y se consume mucho tiempo y memoria RAM de la computadora, por lo que debe existir un adecuado balance entre el volumen de datos recopilados en el campo, con respecto a la información que se requiere generar en el monitoreo de plantaciones. Así mismo, se puede intuir que el volumen de datos que se recopilan con el VANT está relacionado con el área cubierta por el VANT, su altura de vuelo, y el porcentaje de traslape entre imágenes.

El procedimiento para el uso de VANTs para la recolecta de datos se puede dividir en tres etapas: a) Definición de objetivos, b) Planificación del vuelo, y c) Procedimientos de procesamiento de datos.

##### 4.1 Definición de objetivos del monitoreo.

El producto básico que se obtiene con un VANT son fotos aéreas<sup>2</sup> si posee una cámara (RGB, o Infrarroja), y puntos con distancia de la superficie al VANT si posee un sensor lidar. Estos datos se pueden procesar para obtener productos como ortofotos del terreno, un modelo digital de superficie del terreno (MDS), un modelo digital de elevación del terreno (MDT), y de la diferencia de ambos la altura de la vegetación sobre la superficie.

---

<sup>2</sup> Por convención se usa la palabra fotos-aéreas o fotos para los productos obtenidos con cámaras en VANTs y aviones, e imágenes para productos obtenidos por satélites.

La calidad de estos productos depende del traslape entre fotos (frontal y lateral), y la resolución espacial lograda con el vuelo, la cual a su vez depende de la altura de vuelo (Lillesand, et al., 2008). Con el uso de cámaras RGB y multispectrales específicas para vegetación, con canales de radiación infrarroja (0,7 a 0,8  $\mu\text{m}$ ) se puede obtener información sobre el estado de salud de los bosques y cualquier cobertura vegetal. De este modo y con ayuda de algoritmos de clasificación vegetación se pueden identificar y medir afectaciones que no sería posible mediante otros métodos.

En la evaluación de plantaciones forestales, los objetivos de los vuelos de los VANTs pueden ser:

**Estimación del diámetro de copa y conteo de árboles en imágenes de alta resolución:** esto puede lograrse mediante el procesamiento de un orto-mosaico del área sobrevolada. Se puede recurrir a hacer un muestreo sobre las fotos, y contar mediante interpretación visual el número de árboles por unidad de área en esas áreas de muestreo, así como calcular el diámetro promedio de copa<sup>3</sup>. Así mismo, se puede utilizar procesamiento digital, por ejemplo, usando un algoritmo de segmentación de la imagen, para luego hacer el conteo de polígonos segmentados y medir sus diagonales, tanto en toda la imagen o en áreas de muestreo sobre el orto-mosaico (Prodan, et al. 1997; Panagiotidis, et al.; 2017)

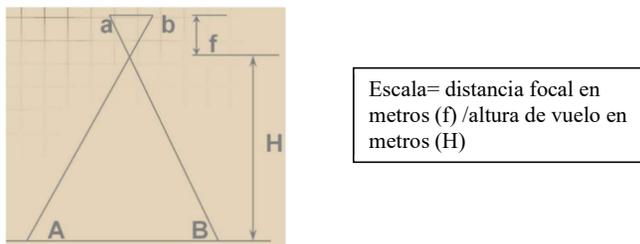
- a) **Estimación de altura de los árboles:** Para estimar la altura promedio de los árboles usando fotos tomadas por el VANT se debe preparar un modelo de elevación de superficies y un modelo de elevación del terreno a partir del orto-mosaico del área. Usando un programa SIG se puede calcular la diferencia entre ambos, que representa la altura de la cobertura vegetal, es decir de los árboles si se sobrevoló un bosque o plantación forestal, procedimiento que se puede hacer sobre áreas o parcelas de muestreo o sobre todo el orto-mosaico (Panagiotidis, et al.; 2017).
- b) **Diámetro de los árboles a la altura del pecho:** Esta variable se puede estimar a partir de la altura de los árboles y su diámetro de copa. Una vez estimado el diámetro del fuste se puede calcular también volumen (en  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) o biomasa seca ( $\text{t}/\text{ha}$ ) para plantaciones forestales, y bosque nativo. Sin embargo, estas relaciones son específicas para diferentes especies, y dependen esencialmente de la forma de la copa de los árboles de cada especie, y por lo tanto es un tema de investigación a desarrollar (Prodan, et al. 1997). Las mediciones de diámetro de copa en foto aéreas son probablemente una mejor medida de la espacio de crecimiento de los árboles, y están mejor correlacionadas con volumen de árboles y rodales (Husch, et. al., 1982).
- c) **Fertilidad de suelos y estado fitosanitario de los árboles:** es observable por cambios de coloración de los árboles en la plantación, y se pueden observar mejor aún si el VAN posee una cámara infrarroja. La actividad fotosintética de la vegetación está relacionada con el porcentaje de reflexión de ondas de radiación infrarroja (0,8  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$  o NIR), mayor reflectancia indica la presencia de una cobertura fotosintética mayor, y por lo tanto mejor estado fitosanitario de la vegetación y/o mayor fertilidad del suelo. La interpretación de los cambios en la reflectancia de radiación infrarroja (NIR) se puede hacer mediante interpretación visual, o mediante clasificación digital usando programas SIG tal como QGIS. (Lillesand, et al. 2008).

---

<sup>3</sup> Existen diferentes definiciones de esta variable: diámetro total de copa, ancho efectivo de copa, y diámetro de copa. Para efectos del proyecto se usará la medición que corresponde a ancho total de la copa.



La altura de vuelo del VANT junto con la distancia focal de la cámara, define la escala de las imágenes verticales, su resolución espacial (GSD), y el área de cobertura de las fotos aéreas. La legislación nacional limita la altura de vuelo de los VANTs a no más de 120 m sobre la superficie. La escala de las fotos que se pueden tomar con el VANT entonces oscila de 1:892 a 1:3429 para los VANTs que se incluyen en el cuadro 1.



Escala= distancia focal en metros (f) /altura de vuelo en metros (H)

Figura 2. Estimación de la escala de una foto en función de distancia focal y altura de vuelo. Fuente: Abdullah, 2019.

#### 4.2.3 Tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo está definido por las características de la batería del VANT. Según la tabla 1, el fabricante establece un tiempo de vuelo de 30 minutos, en realidad la experiencia indica que, por seguridad, esta no debe ser más de 20 a 25 minutos, para dar tiempo a que el VANT retorne al sitio de salida. Esto indica que el VANT podría recorrer una distancia que oscila entre 16 km y 30 km con una batería recién cargada.

Lamentablemente los drones actuales, incluso los profesionales, no ofrecen una autonomía de vuelo que nos deje satisfechos. Dependiendo del modelo podremos movernos entre 10 y 30 minutos, pero cuenta con **una media efectiva de 20 minutos**. Por ello es muy importante contar con baterías de repuesto y un cargador de calidad que permita una carga segura a la vez que lo más rápida posible.

#### 4.2.4 Distancia máxima de operación controlada del VANT

Esta variable depende del modelo del VANT. Para el caso de los VANT presentados en el cuadro 1, esta distancia es de 3000 metros, y por razones de seguridad debiera reducirse a 500 a 1000 m, ya que se recomienda que el operador siempre mantenga contacto visual con el VANT (aspecto que también contempla la legislación nacional) lo que indica que se podría usar el VANT para cubrir áreas que oscilan entre 20 y 77 ha.

#### 4.2.5 Efecto de tamaño de la plantación

El tamaño de la plantación, junto con la altura de vuelo, es el factor limitante que determina el tiempo de vuelo, y la magnitud de los archivos de datos que se recolectan con los VANTs. Dado que el tiempo de vuelo efectivo oscila entre 20 a 25 minutos, y la altura máxima posible es 120 metros, es necesario establecer cuál es el tamaño óptimo de tamaño de finca, para la cual el uso los VANTs es eficiente.

Cuadro 1. Características de Drones (UAV o VANT) **semiprofesionales** recomendados para monitoreo de actividades silviculturales.

VANT	Velocidad y tiempo de vuelo	Lente	Sensor	Tamaño de 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 - ∞	20 Mp	3:2 Aspect Ratio: 5472 × 3648 4:3 Aspect Ratio: 4864 × 3648 16:9 Aspect Ratio: 5472 × 3078
Mavic 2 PRO	50 a 72 km/hora 20-30 minutos Distancia de operación: 3 km.	FOV: about 77° 35 mm Format Equivalent: 28 mm Aperture: f/2.8–f/11 Shooting Range: 1 m to	20 Mp	5472×3648
Walkera Vogager 4	50 a 72 km/hora 20-30 minutos Distancia de operación: 3 km	6.7-134.5mm	8,3 Mp	3840X2160

Fuente. Elaboración propia.

#### 4.2.6 Porcentaje de traslape entre imágenes

El porcentaje de traslape entre fotos sucesivas (frontal) y entre fotos adyacentes (lateral), afecta la densidad de puntos para desarrollar el MDT, y el MDS. Entre mayor traslape entre fotos, se tiene más densidad de puntos, se mejoran los modelos, es decir no quedan áreas sin información, pero también esto hace que se incremente el tamaño de los archivos, el tiempo requerido para procesar los datos, y principalmente el tiempo de vuelo, el cual como ya se estableció anteriormente oscila entre 20 y 25 minutos.

Se requiere entonces, para un área dada, incrementar la altura de vuelo, sin que esto vaya a disminuir la precisión deseada o recomendada que oscila entre 2 y 6 cm para levantamientos topográficos (Figura 3). Sin embargo, habría que establecer un estándar para el caso de monitoreo de plantaciones forestales, comparando con datos de campo (Abdullah, 2019).

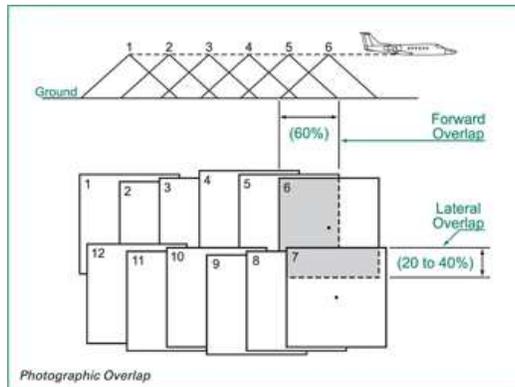


Figura 3. Definición gráfica de traslape entre fotos sucesivas (frontal) y entre fotos adyacentes (lateral). Fuente: Abdullah, 2019.

Cuando se requiere cobertura estereoscópica el porcentaje de traslape entre fotos continuas debe ser 50%, sin embargo, para prevenir que existan huecos de información debido a movimientos no deseados del VANT (crab, tilt, o cambios de altura) el traslape debe ser superior. Si se requiere además, tener puntos de control fotogramétricos, un mismo punto debe aparecer en tres fotos sucesivas, y se requiere un traslape de más del 50%. Por estas razones, las fotografías áreas normalmente son tomadas con un traslape de cerca de 60%  $\pm$  5%. El traslape lateral de las fotos también debe programarse para evitar huecos de información, y se recomienda al menos un 30% de traslape entre líneas de vuelo. Estos porcentajes de traslape hace posible que en la construcción de orto-mosaicos, y modelos de elevación en los no se usen puntos extremos en los bordes de las fotos, en donde la distorsión de las fotos es mayor (Abdullah, 2019).

#### 4.2.7 Trazado del vuelo

Las aplicaciones para la programación de vuelos permiten configurar los vuelos del VANT siguiendo trazados simples de captura de datos volando el área una única vez siguiendo un patrón de rejilla simple (2D o single grid), o de captura de datos volando el área de trabajo dos veces siguiendo un patrón de rejilla doble (3D), en ambos casos las líneas de vuelo son perpendiculares entre sí, o con ángulo a escoger. Las imágenes que se obtienen con ambos trazados permiten preparar orto-mosaicos del terreno, modelos digitales de superficie (MDS), y de elevación del terreno (MDT). Se ha recomendado usar trazados de vuelos 3D para obtener mejores productos, tal como ortofotos, MDS y MDT (Pix4Dmapper, 2021).

#### 4.2.8 Efecto de la estación del año y hora del día

La estación del año es importante al planificar los vuelos. Por ejemplo, en época seca los árboles pueden perder sus hojas, para un forestal es importante que estos tengan hojas para conocer el estado de salud del bosque, y además poder establecer modelos que relacionen diámetro, con altura total, y diámetro de copas de los árboles. Pero si se desea, conocer características de suelo, o derivar un modelo de elevación del terreno de mayor exactitud es preferible que los árboles no tengan hojas. En resumen, la estación del año se debe escoger con cuidado en función del objetivo del vuelo o información que se espera obtener del VANT. La hora de día es también importante, y en general se recomienda hacer vuelos cuando la elevación del sol está entre los 30 y 60 grados para eliminar sombras muy largas, pero en suelos planos podría ser hasta de 20 grados. Es decir, en general, se debe

programar vuelos entre 1,5 y 3 horas después del amanecer o antes de la puesta del sol. En terrenos con pendiente, sin embargo, lo recomendable es programar el vuelo a medio día.

#### **4.2.9 Tamaño de archivos y densidad de puntos de procesamiento**

Como se indicó anteriormente, la mayor densidad de puntos iguales en diferentes fotos permite desarrollar MDTs y MDSs, sin vacíos de información. Esto se logra aumentando el traslape entre fotos (frontal y lateral), lo que requiere mayor tiempo de vuelo, e incrementa el tamaño de los archivos a procesar, y el tiempo de procesamiento. Para terrenos planos, el traslape puede reducirse, pero para terrenos con pendiente este debe aumentarse.

#### **4.3 Procedimientos de procesamiento de datos**

El procesamiento de datos depende del objetivo que se busca con el uso de VANTS. De lo planteado en las secciones anteriores, se evidencia que el producto básico a obtener en vuelos con un VANT en monitoreo de plantaciones es un orto-mosaico del área de trabajo, o de secciones predefinidas de la misma. Con este orto-mosaico, se obtiene las variables que se requieren para el monitoreo de las plantaciones, esto es: área total plantada, número de árboles por hectárea, altura promedio de los árboles, y diámetro de copa promedio de los árboles. Usando estas variables, y relaciones alométricas específicas por especies se calcula: diámetro promedio del fuste, estado fitosanitario de los árboles, y volumen o biomasa seca por unidad de área. La planificación del vuelo del VANT, debe orientarse entonces a obtener un orto-mosaico de buena resolución espacial para las variables que se requieren, y libre de “huecos”, ajustando las variables de vuelo: GSD, altura de vuelo, y porcentaje de traslape entre fotos.

Existe software para procesamiento de imágenes como Agisoft PhotoScan®, PIX4DMAPPERMapper®, PrecisionMapper®, o con licencia libre, tal como: OpenDroneMap (WebODM) que tienen funciones y procedimientos para preparar orto-mosaicos, MDS y MDT. La información así preparada puede procesarse usando software SIG, para derivar datos de segundo nivel (número de árboles por hectárea, diámetro promedio de copa, altura de los árboles, y áreas con problemas fitosanitarios o deficiencias de suelo (Tapia, et al. 2019), la cual luego es utilizada con modelos alométricos para estimar diámetro promedio de los árboles a 1,3 metros de altura, volumen total o biomasa seca hectárea.

## 5. METODOLOGÍA

La metodología seguida en el proyecto se puede dividir en tres secciones, cada una de las cuales estuvo orientada a cumplir con cada uno de los objetivos específicos del proyecto. La metodología seguida se presenta a continuación.

### **5.1 Definir el tipo de datos que requiere el sector forestal para el monitoreo, reporte y verificación (MRV) del estado de desarrollo y calidad de plantaciones forestales, así como para el desarrollo de una silvicultura de precisión**

Se procedió a realizar entrevistas a administradores e ingenieros forestales encargados de los sistemas de monitoreo de 7 empresas forestales ubicadas en la Región Huetar Norte y la Región Chorotega de Costa Rica. Todas las empresas consultadas tienen un sistema de monitoreo de sus plantaciones, que incluyen procedimientos para cálculos de áreas totales y efectivas, así como una red de parcelas permanentes de muestreo (PPM). Así mismo, estas empresas han incursionado en diferente forma, y frecuencia en el uso de VANTs para el monitoreo de sus plantaciones forestales.

Los resultados de las entrevistas fueron tabulados en un cuadro de efectos en donde se identifican las necesidades de datos que requieren las empresas, y cómo están actualmente cumpliendo con sus requerimientos. Posteriormente se valora la viabilidad de obtener dichos datos o información con el uso de VANTs, identificando además qué datos deben recolectarse con el VANT, y se define para cada variable el procedimiento para generarla usando VANTs.

### **5.2 Preparar protocolos para la planificación de vuelos de VANTs que permitan recolectar eficientemente datos de campo para generar la información requerida en un sistema de MRV del estado de desarrollo y calidad de plantaciones forestales, así como para el desarrollo de una silvicultura de precisión**

Se probaron diferentes procedimientos de vuelo de los VANTs, con el fin de optimizar la recolección de información para preparar orto-mosaicos del área a monitorear, para luego preparar el protocolo para la planificación de vuelos que fue el producto principal del objetivo específico 2 (EO2). Para planificar los vuelos se usó PIX4DMAPPERcapture, el cual es una aplicación de uso libre, con versión tanto para teléfonos móviles Android y IOS.

Se conoce que los orto-mosaicos preparados con un VANT son la base para derivar la mayoría de las variables necesarias en un MRV para plantaciones forestales (altura, diámetro y diámetro de copa), por lo que se probaron diferentes opciones de vuelo que se evaluaron usando tres variables: a) tiempo de procesamiento, b) calidad del orto-mosaico, y c) fallos en el procesamiento. Dado que la calidad de los orto-mosaicos depende de varios factores se realizaron varios experimentos con un arreglo factorial utilizando un mismo modelo de VANT, esto es: Phantom 4 Pro<sup>5</sup>. La metodología utilizada para analizar los resultados está descrita en documento de tesis de maestría del Ing. Javier Hernández Coles (ver Anexo 2).

---

<sup>5</sup> Se escoge este modelo dado que es un VANT semiprofesional de bajo costo, y es el más utilizado en las empresas forestales. Tanto FONAFIFO como Forestal Río Grande, y le EIFO. Al recoger este tipo de VANT se fijan automáticamente distancia focal de la cámara (35mm), velocidad de desplazamiento (50 a 72 km/hora), y tiempo de vuelo (20-25 minutos), radio de acción del VANT (3 km).

### **5.3 Preparar protocolos para el procesamiento de datos tomados con VANTs y su integración con modelos alométricos para generar información requerida por el MRV de plantaciones forestales**

Estos protocolos se prepararon a partir de los procedimientos propuestos por (Tapia, et al, 2019). El protocolo para el monitoreo de plantaciones forestales se ajustó a casos específicos de las características de las plantaciones forestales evaluadas, y según los resultados que se obtienen de los experimentos realizados para cumplir con el objetivo específico 2 de esta propuesta. El cumplimiento de este objetivo incluyó los siguientes aspectos:

- A. Preparación de un procedimiento para preparar orto-mosaicos de las plantaciones forestales.
- B. Preparación de un procedimiento para generar modelos digitales de elevación de la superficie (MDS), del terreno (MDT), y de altura de la vegetación (MDC).
- C. Preparación de un procedimiento para estimación del número de árboles por hectárea a partir de orto-mosaicos.
- D. Preparación de un procedimiento para estimación de la altura de los árboles usando el MDC.
- E. Preparación de un procedimiento para estimar diámetro de copa en orto-mosaicos.
- F. Preparación de modelos alométricos para estimar diámetro de los árboles a 1,3 metros de altura, y finalmente
- G. Preparación de protocolo para estimar, volumen, y biomasa promedio por hectárea.
- H. Preparar un protocolo para la zonificación de plantaciones según estado de desarrollo e índices de vegetación.

#### **5.3.1 Preparación de modelos alométricos**

En las plantaciones seleccionadas y sobrevoladas con el VANT se establecerán parcelas circulares geo-referenciadas de 500 metros cuadrados con 12,62 metros de radio. A los árboles ubicados dentro de estas parcelas de medición se le midió el diámetro a 1,3 m de altura (en cm), la altura total (en m), el diámetro de copa (en m). Estas mediciones fueron usadas para comparar las mediciones de diámetro de copa (dc) y alturas estimadas con el VANT, así como para preparar modelos alométricos para estimar diámetro promedio a 1,3 m de altura (dap) de los árboles, en función del del diámetro de copa (dc), edad y altura de los árboles. Teniendo estas dos variables, y densidad de copas es posible estimar tanto volumen como biomasa de la plantación por unidad de área. Los modelos alométricos fueron desarrollados siguiendo la metodología propuesta por Ortiz-Malavasi (2021), la cual incluye los siguientes pasos:

- A. Medición de las dimensiones básicas de la muestra de árboles (dap y dc).
- B. Detección de errores en los datos y “outliers” mediante gráficos de dispersión.
- C. Selección de una muestra del 10 a 15% para la validación de los modelos.
- D. Análisis de regresión y cálculo de estadísticos de precisión.
- E. Escogencia del mejor modelo de regresión.
- F. Validación del modelo utilizando la muestra independiente
- G. Presentación del modelo desarrollo incluyendo información necesaria para su adecuado uso.

### **6.3.2 Procesamiento digital de imágenes**

Se probaron alternativas para preparar mapas de zonificación de plantaciones mediante procesamiento digital con el software Qgis. Se incluyó el uso de segmentación digital de imágenes de orto-mosaicos, índices de vegetación RGB, y del MDC, y pos-procesamiento para definir zonas homogéneas según desarrollo de la plantación.

### **5.3.3 Preparación de protocolo para estimar, volumen, y biomasa promedio por hectárea usando información generada por un VANT (dos especies principales).**

El volumen total y biomasa seca se calculó usando ecuaciones de volumen y biomasa seca existentes para ambas especies. Las ecuaciones para volumen y biomasa para árboles requieren como variables de entrada diámetro a 1,3 m, y altura total. Las ecuaciones de volumen y biomasa para teca y melina para Costa Rica fueron preparadas por Pérez y Kanninen (2003), y Rodríguez, M. et al. (2018).

## **6. RESULTADOS**

### **6.1 EO1: Tipo de datos que requiere el sector forestal para el monitoreo, reporte y verificación (MRV) del estado de desarrollo y calidad de plantaciones forestales, así como para el desarrollo de una silvicultura de precisión.**

Se preparó un boletín técnico con los resultados de los talleres realizados con FONAFIFO, e ingenieros forestales de empresas con proyectos de reforestación y organizaciones forestales (ver Anexo 1). Se identificaron 18 necesidades de información y se clasificaron según tres niveles de viabilidad de obtenerse con el uso de VANTs en: alto, medio, y bajo, valores que se relacionan con la complejidad, y número de productos intermedios requeridos para su obtención.

Se identifica que, en el monitoreo de plantaciones forestales, el principal producto a obtener con los VANTs es un orto-mosaico de alta calidad que permita estimar áreas efectivas plantadas, así como sanidad y estado general de desarrollo de estas. Un programa de monitoreo usando VANTs debe enfocarse en identificar como obtener orto-mosaicos de alta calidad según diferentes condiciones de las plantaciones forestales, tal como tamaño del lote o rodal evaluado, la pendiente del terreno, época del año, y edad o estado de desarrollo de los árboles.

La calidad de un orto-mosaico se mide por la resolución espacial del mismo o distancia de superficie (GSD en cm/píxel), y si el mismo está completo, es decir, sin faltantes en de información del polígono o área sobrevolada. Por otro lado, la GSD depende de la distancia focal de la cámara y la altura de vuelo, adicionalmente la obtención de un orto-mosaico completo depende tanto de la GSD como de los traslapes entre fotos (frontal y lateral) (Lillesand, et al., 2008, Abdullah, 2019).

De esta forma, se pudo deducir que el primer objetivo del proyecto era identificar las variables a establecer para el vuelo programado (altura y traslapes entre fotos) de los VANTs para diferentes condiciones de las plantaciones.

La segunda prioridad en el desarrollo del proyecto fue procedimientos o algoritmos para el conteo de árboles individuales y estimar diámetro de copa. La posibilidad de estimar ambas variables depende también de la calidad del orto-mosaico, y posiblemente sea más factible hacer estas mediciones en plantaciones jóvenes, y de especies como teca, botarrama, y laurel. El tener procedimientos para el cálculo de diámetro de copa es especialmente importante para usarlo como variable independiente para estimar diámetro del fuste a 1,3 m de altura, así como volumen total usando la fórmula de factor de forma constante, o volúmenes comerciales de cualquier tipo.

#### **6.1.1 Necesidades de información de los departamentos de silvicultura**

Los departamentos de silvicultura de las empresas tienen como responsabilidad el establecimiento y cuidado de las plantaciones, por lo que sus requerimientos de información son iguales a los que se solicitan en los reportes de PSA, pero no solo durante los primeros cinco años de establecimiento de las plantaciones. Adicionalmente, se identificó la necesidad de tener información de distribución espacial del estado de las plantaciones, específicamente: a) problemas de sanidad, esto es plagas, enfermedades, o daños por fuego o viento, y b) áreas de menor desarrollo por problemas de calidad de sitio que requieren de la aplicación de algún tipo de enmienda, sea por drenaje, encalado, o fertilización. Se identificó que este tipo de información se requiere tanto al establecimiento de la plantación, como durante el periodo de desarrollo de esta.

#### **6.1.2 Necesidades de información para la industrialización, y comercialización de productos**

Los departamentos de industrialización y ventas de las empresas requieren de información de volumen comercial, y no de volumen total como el que se calcula con la fórmula de coeficiente de forma constante. La definición de volumen comercial es diferente en la mayoría de las empresas, y requieren datos de altura o largo de trozas a un diámetro mínimo dado, o de número de trozas clasificadas por diferentes tamaños de diámetro. En algunas ocasiones se requiere conocer además la ubicación de individuos que cumplan con ciertas características para la venta a ciertos clientes. Para tener esta información tienen sus propios modelos o ecuaciones que utilizan factores de conicidad propios de cada empresa, que posiblemente tengan como variables independientes diámetro a 1,3 m de altura, y altura total o hasta un diámetro mínimo. Por otro lado, se pudo identificar que las empresas no miden la altura total en todos los árboles, sino que solo en una proporción de los individuos. A partir de estos datos se obtienen modelos de estimación de altura que utilizan el diámetro a 1,3 m de altura, práctica que permite reducir los costos de monitoreo y recomendados por varios autores (CR-MINAE-SINAC-IFN, 2014).

### 6.1.3 Viabilidad del uso de los VANTs en el monitoreo de plantaciones forestales

Una vez identificadas las necesidades de datos o información de las empresas de reforestación, se procedió a analizar si cada una de estas necesidades podría solventarse con el uso de VANTS. Se identificaron otras variables adicionales, que actualmente no son registradas en los sistemas de monitoreo de las empresas, pero que sería ideales para un manejo forestal intensivo, tal como ubicación de coordenadas geográficas de los árboles, y áreas con necesidades especiales de aplicación de enmiendas en el suelo. Las necesidades de información fueron categorizadas como variables con: a) alta, b) mediana, y c) baja viabilidad de obtenerse con el uso de VANTs (ver figura 4)

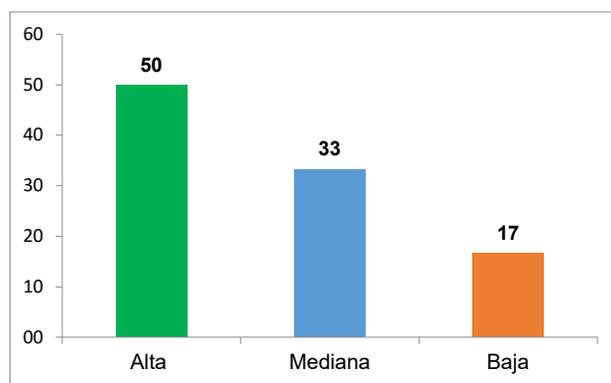


Figura 4. Distribución porcentual del total de variables identificadas en los sistemas de monitoreo de plantaciones forestales según su viabilidad de obtención con el uso de VANTS.

Las variables del primer grupo corresponden a datos que se obtienen directamente del procesamiento de las fotografías tomadas por el VANT (ver cuadro 3 Anexo 1), sea en un vuelo libre o programado para generar mosaicos simples en dos dimensiones, u orto-fotos con tres dimensiones (3D). En este último caso, además del mosaico fotográfico georreferenciado se puede obtener un modelo de elevación del terreno (MDT), y el modelo de elevación de la superficie (MDS), que permiten estimar la altura de la vegetación en el terreno (MDC).

Para estimar la altura promedio de los árboles se podría utilizar un programa SIG que calcule la diferencia entre estos dos modelos (MDT y MDS), el cual representa la altura de la cobertura vegetal, es decir la de los árboles si se sobrevoló un bosque o plantación forestal. Este procedimiento que puede hacerse sobre áreas o parcelas de muestreo, o sobre todo el orto-mosaico (Panagiotidis, et al.; 2017). En este grupo, además de la altura de la vegetación, se han identificado variables principalmente relacionadas con el cálculo e identificación de áreas con problemas de sanidad, bajo crecimiento en altura, afectadas por quema, con daños por vientos, etc.

En el grupo de mediana viabilidad (ver cuadro 4 Anexo 1), se incluyen variables o información que para su generación requieren de procesamiento, modelos o ecuaciones adicionales sencillas, pero que exigen un trabajo adicional. Por ejemplo, el número de árboles por área efectiva, o el diámetro promedio de los árboles a 1,3 m de altura. Esta última variable se puede estimar a partir de la altura de los árboles y su diámetro de copa. Sin embargo, estas relaciones son específicas para diferentes

especies, y dependen esencialmente de la forma de la copa de los árboles de cada especie (Prodan, et al. 1997).

Para el **conteo de árboles** se puede recurrir a hacer un muestreo sobre las fotos, y contar mediante interpretación visual el número de árboles por unidad de área en esas áreas de muestreo, así como calcular el diámetro promedio de copa<sup>6</sup>. Así mismo, se puede utilizar procesamiento digital, por ejemplo, usando un algoritmo de segmentación de la imagen, para luego hacer el conteo de polígonos segmentados y medir sus diagonales, tanto en toda la imagen o en áreas de muestreo sobre el orto-mosaico (Prodan, et al. 1997; Panagiotidis, et al.; 2017).

En el grupo de mediana viabilidad también se ha incluido la variable estado nutricional y estado fitosanitario de los árboles, ya que, aunque en los orto-mosaicos pueden observarse cambios de coloración del follaje de los árboles atribuibles a estos factores, es mejor evaluarlos con índices de vegetación con datos de una cámara infrarroja, pero existe posibilidad de construir índices de vegetación con cámaras RGB. La actividad fotosintética de la vegetación está relacionada con el porcentaje de reflexión de ondas de radiación infrarroja (0,8 a 2,5  $\mu\text{m}$  o NIR), una alta reflectancia indica la presencia de una cobertura fotosintética mayor, y por lo tanto un mejor estado fitosanitario de la vegetación y mayor fertilidad del suelo. La interpretación de los cambios en la reflectancia de radiación infrarroja (NIR) se puede hacer mediante interpretación visual, o mediante clasificación digital usando programas SIG tal como QGIS (Lillesand, et al. 2008).

En el último conjunto se han agrupado las tres variables de mayor complejidad, y también de menor precisión y exactitud al querer obtenerse mediante un VANT (ver cuadro 5 Anexo 1). Por ejemplo, una vez estimado el diámetro del fuste a 1,3 m, para lo cual fue necesario previamente calcular altura o diámetro de copa promedio de los árboles, se puede calcular también volumen (en  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) o biomasa seca (t/ha) para plantaciones forestales, y bosque nativo. Por otro lado, las mediciones de diámetro de copa en fotografías aéreas son probablemente una mejor medida del espacio de crecimiento de los árboles, y están mejor correlacionadas con volumen de árboles y rodales (Husch, et. al., 1982).

## **6.2 Protocolos para la planificación de vuelos de VANTs que permitan recolectar eficientemente datos de campo para generar la información requerida en un sistema de MRV del estado de desarrollo y calidad de plantaciones forestales, así como para el desarrollo de una silvicultura de precisión.**

Se desarrollaron vuelos en plantaciones forestales en tres regiones del país, Zona Chorotega, Zona Huetar Caribe, y Zona Huetar Norte. Los resultados de los vuelos fueron analizados en la tesis de maestría del Ing. Javier Hernández Cole. En el Anexo 2 se incluye el resumen de la tesis presentada y aprobada. Los principales resultados se describen en esta sección, y estos permitieron la elaboración de un protocolo para la planificación de vuelos de VANTs que se presenta en el ver Anexo 3.

### **6.2.1 Descripción de las plantaciones**

Se realizaron vuelos en un total de 13 plantaciones, 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. En cuanto a las

---

<sup>6</sup> Existen diferentes definiciones de esta variable: diámetro total de copa, ancho efectivo de copa, y diámetro de copa. Para efectos del proyecto se usará la medición que corresponde a ancho total de la copa.

características de las seis empresas cuyos datos fueron analizados se encuentran descritas en el cuadro 2.

Cuadro 2. Ubicación, especie, tamaño y edad de las plantaciones evaluadas.

Número	Provincia, Cantón	Sitio	Especie	Edad (años)
1	Puntarenas, Puntarenas	Punta Morales	<i>Tectona grandis</i>	3,3
2	Guanacaste, Abangares	Finca El Laberinto	<i>Tectona grandis</i>	4,7
3	Limón, Guácimo	Las Delicias	Plantación Mixta	2,1
4	Guanacaste, Hojancha	San Pedro	<i>Tectona grandis</i>	3,7
5	Alajuela, San Carlos	Santa Rita	<i>Gmelina arborea</i>	2,5
6	Heredia, Sarapiquí	Los Lirios	<i>Tectona grandis</i>	5,2

Fuente: Adaptado de Hernández, J. (2022)

### 6.2.2 Resultados del análisis de la variable tiempo de procesamiento

El tiempo de procesamiento (horas/hectárea) presentó evidencia de diferencias estadísticas significativas según el tipo de software utilizado ( $p < 0,05$ ), siendo el software Pix4Dmapper<sup>®</sup> en el que requiere menor tiempo de procesamiento con respecto a WebODM<sup>®</sup> (figura 5A). Se analizó además la configuración de la computadora usada en el procesamiento de las imágenes resultando mejor la configuración que tiene un CPU con 16 Gb de memoria RAM y procesadores Icore 5 de 8va Generación (figura 5B).

Los vuelos con un diseño de trazado 2D, a 120 metros de altura que corresponde a un GSD de 3,27 cm/píxel, fueron con los que se obtuvo un menor tiempo de procesamiento ( $p < 0,05$ ), seguido por el vuelo realizado a 120 metros de altura utilizando un trazado 3D (en este caso el GSD es de 3,32 cm/píxel debido a que el ángulo del lente de la cámara con respecto al terreno es de  $80^\circ$ ). Según se muestra en la figura 5C, las configuraciones de vuelo a 80 y 90 metros de altura utilizando un trazado 3D (2,22 y 2,49 cm/píxel respectivamente) fueron las que requirieron mayor tiempo de procesamiento (Hernández, 2021). Con respecto a la evaluación de la variable porcentajes de traslape lateral y frontal no se encontraron diferencias significativas entre las tres opciones probadas, esto es: 70x80, 70x70, y 80x80 ( $p > 0,05$ ) (figura 6).

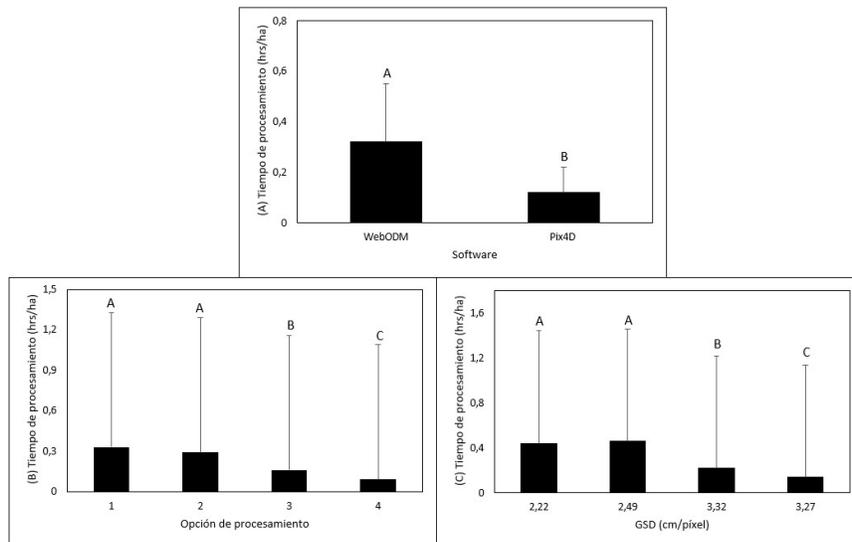


Figura 5. Diferencias en el tiempo de procesamiento según el tipo de software, opciones de procesamiento y GSD (cm/píxel). Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar. Fuente: Hernández-Cole (2021).

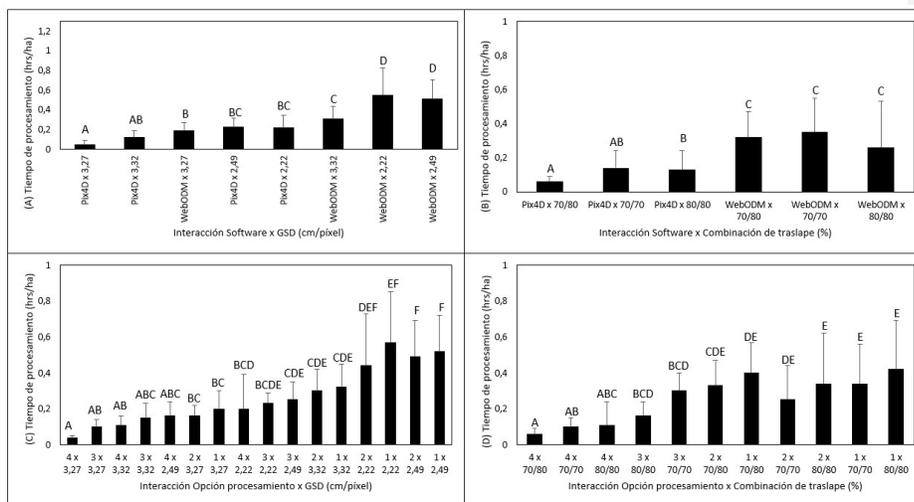


Figura 6. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores. Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar. Fuente: Hernández-Cole (2021).

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 (figura 7).

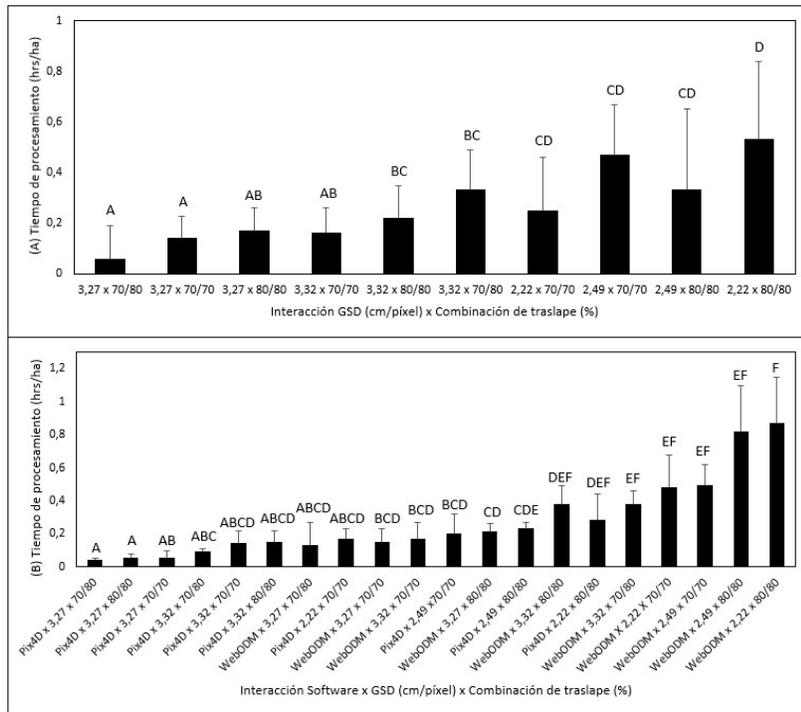


Figura 7. Diferencias en el tiempo de procesamiento según diferentes interacciones de factores. Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar. Fuente: Hernández-Cole (2021)

Los resultados con respecto al tiempo de procesamiento están estrechamente relacionados con la cantidad de imágenes a procesar. En la figura 8 se muestra que conforme aumenta la cantidad de imágenes también aumenta el tiempo requerido en el procesamiento. Por otro lado, esta figura confirma que el uso del software Pix4Dmapper® y la opción de procesamiento 4, es la que requieren menor tiempo de procesamiento por unidad de área (Hernández-Cole, 2021).

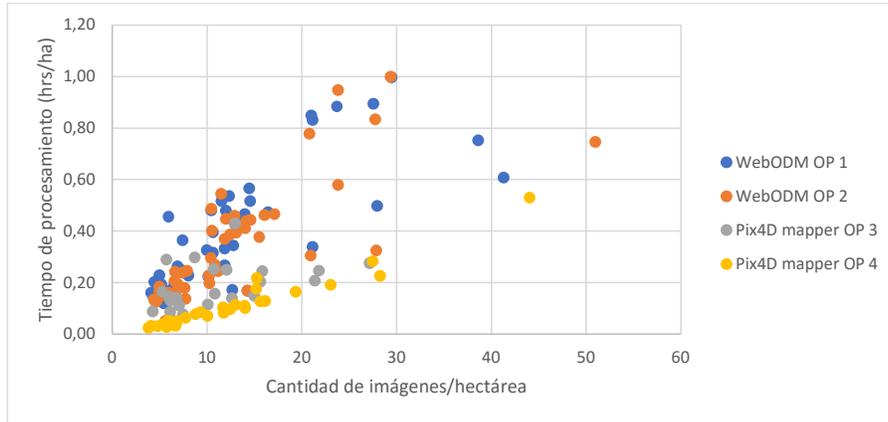


Figura 8. Relación entre el tiempo de procesamiento (hrs/ha) y la cantidad de imágenes/hectárea de cada vuelo según el tipo de software y opción de procesamiento utilizado. Fuente: Hernández-Cole (2021).

### 6.2.3 Resultados del análisis de la variable porcentaje de área con vacío de información en los orto-mosaicos

Hubo evidencia de diferencias estadísticas significativas en el área con vacío de información dentro del orto-mosaico según el tipo de software utilizado ( $p < 0,05$ ), siendo el software Pix4Dmapper el que obtuvo mayor porcentaje de área con vacío de información (figura 9A). 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 ( $p = 0,06$ ).

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 orto-mosaico ( $p < 0,05$ ). Es posible notar que la combinación de traslape (lateral: 70% y frontal: 80%) posee un porcentaje menor que las demás (figura 9B). Asimismo, a la hora de evaluar el GSD (cm/píxel) no fue posible encontrar diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ).

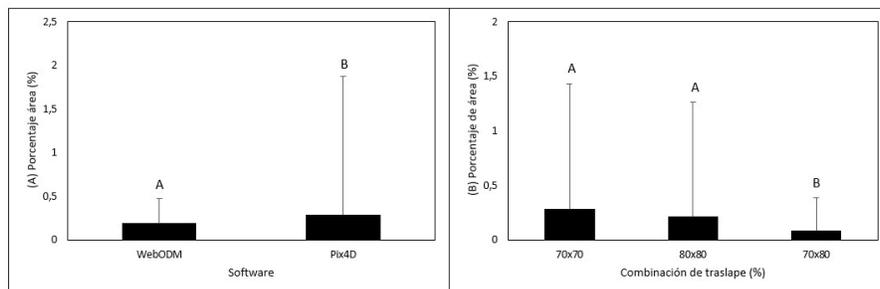


Figura 9. Porcentaje de área con vacío de información según el software de procesamiento y combinación de traslape utilizada en el vuelo del VANT. Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar. Fuente: Hernández-Cole (2021).

La figura 10A muestra que para obtener menor porcentaje de área con vacíos de información es necesario volar a una altura de 120, que corresponden a un GSD de 3,27 y 3,32 cm/píxel los cuales se obtuvieron usando trazados de vuelo 2D y 3D respectivamente, y la combinación de traslapes lateral: 70%, frontal: 80%. 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 lateral 70% y frontal: 80% (figura 10C).

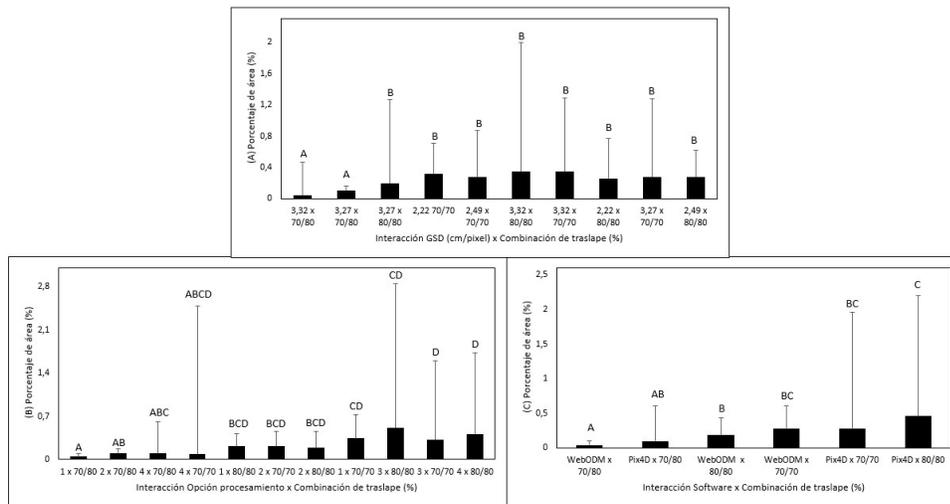


Figura 10. Porcentaje de área con vacío de información según diferentes interacciones de factores. Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar. Fuente: Hernández-Cole (2021).

Los resultados obtenidos muestran que el porcentaje de área con vacío de información según la cantidad de imágenes/ha no están correlacionados, y por tanto el promedio de porcentaje de área con vacío de información entre vuelos con trazado 2D y 3D no presenta diferencias (figura 11).

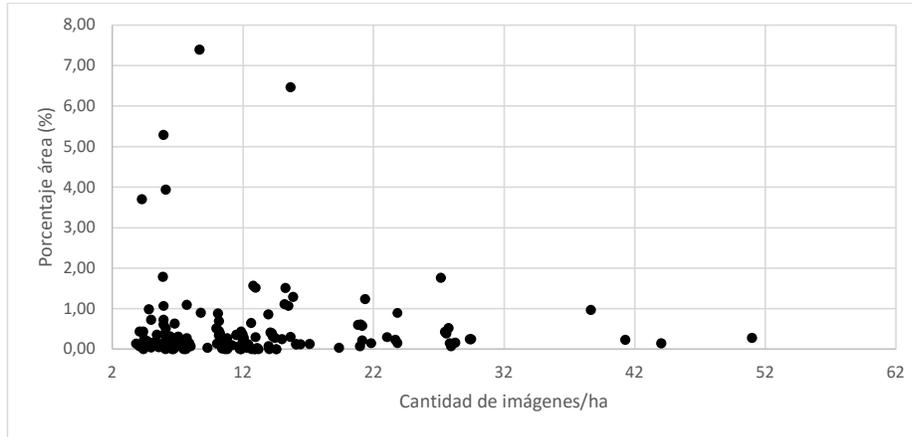


Figura 11. Relación entre la cantidad de imágenes por hectárea y el porcentaje de área con vacío de información. Fuente: Hernández-Cole (2021).

#### 6.2.4 Resultados del análisis de la variable fallo en el procesamiento

Los resultados más importantes obtenidos en la regresión logística del modelo 1 (ver Cuadro 3) para ocurrencia de fallos en el procesamiento, fue que el factor software y cantidad de imágenes son los estadísticamente significativas, mientras que en el modelo 2 el único factor que obtuvo una relación significativa fue número de imágenes a procesar ( $p > 0,05$ ).

Cuadro 3. Valor de significancia obtenidos en la regresión logística para predecir fallos (0,1) en el procesamiento de imágenes. Fuente: Hernández-Cole (2021).

Modelo	Factores considerados en el modelo	Factor	P valor
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:* los vuelos se agruparon según la variable número de imágenes en las siguientes clases: Grupo 1: 0-125 imágenes, Grupo 2: 126-251 imágenes, Grupo 3: 252-377 imágenes.

Por otra parte, en la figura 12, se puede apreciar que el software *WebODM*<sup>®</sup> presentó mayor cantidad de porcentaje de fallos que *Pix4Dmappermapper*<sup>®</sup>, siendo estos un poco más del doble. Con respecto a las opciones de procesamiento, solo 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%).

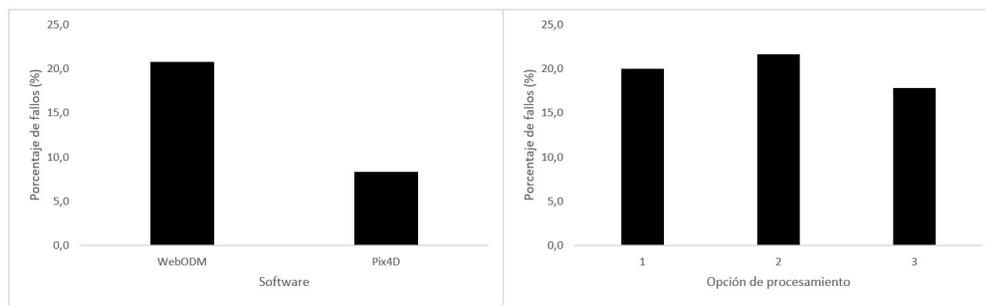


Figura 12. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el tipo de software y opción de procesamiento. Fuente: Hernández-Cole (2021).

En la figura 13, se observa una tendencia lineal en los datos procesados con el software *WebODM*<sup>®</sup> y *Pix4Dmappermapper*<sup>®</sup>, 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.

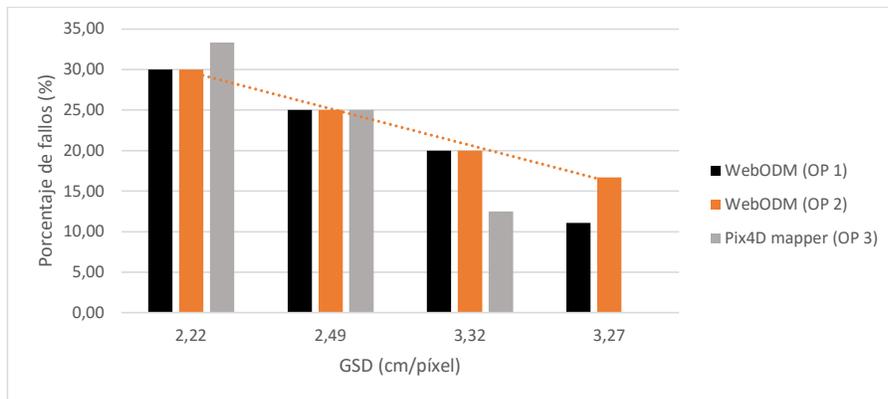


Figura 1. Porcentaje de fallos en el procesamiento según el GSD, software y opción de procesamiento. Fuente: Hernández-Cole (2021).

Al analizar la cantidad de fallos en el procesamiento por combinación de traslape, es posible visualizar que el porcentaje (lateral: 70% y frontal: 80%) fue el que obtuvo una menor cantidad. Finalmente, donde se presentaron una mayor cantidad de fallos fue con los traslapes lateral: 80% y frontal: 80%, combinación que tiende a aumentar la cantidad de imágenes (figura 14).

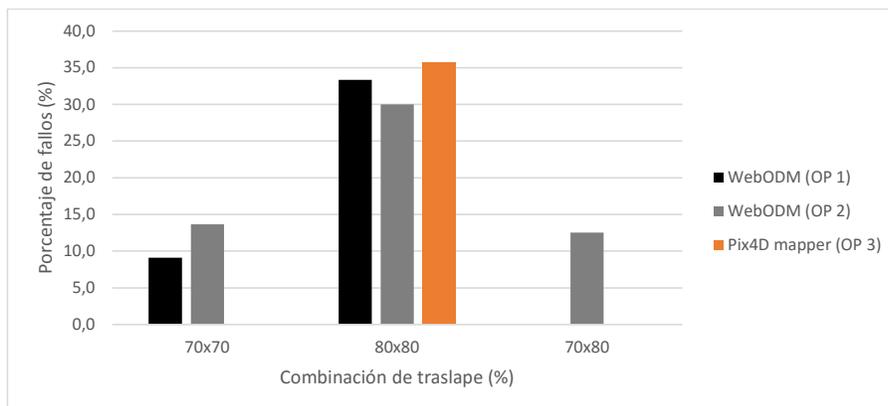


Figura 24. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la combinación de porcentajes de traslape, software y opción de procesamiento. Fuente: Hernández-Cole (2021).

La figura 15 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%.

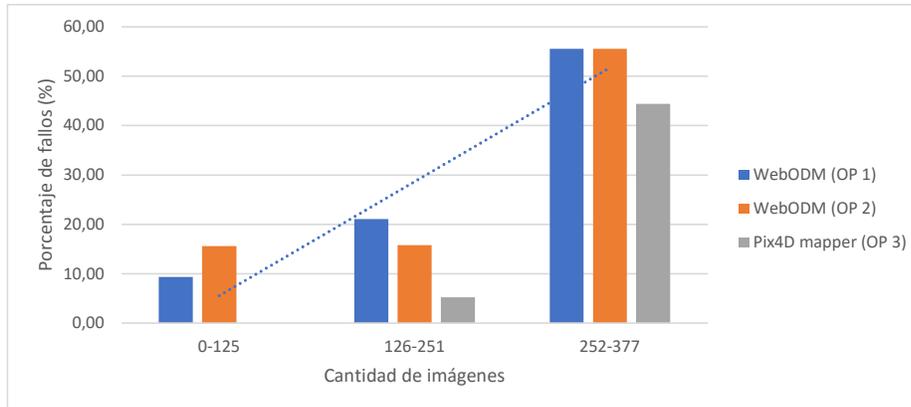


Figura 3. Porcentaje de fallos en el procesamiento según la cantidad de imágenes, software y opción de procesamiento. Fuente: Hernández-Cole (2021).

### 6.3 Protocolos para el procesamiento de datos tomados con VANTs, y su integración con modelos alométricos para generar información requerida por el MRV de plantaciones forestales.

**Comentado [A1]:** Depende de sensor, no puede generalizar.

#### 6.3.1 Protocolos para el procesamiento de datos tomados con VANTs

Los resultados de la sección 5.1 anterior, junto con la experiencia desarrollada en el desarrollo del curso de: “Uso de VANTs en el monitoreo forestal: planificación de vuelos y procesamiento de imágenes” (ver Anexo 6 Documento 2) permitieron la preparación de un protocolo para el procesamiento de datos tomados con un VANT en el monitoreo de plantaciones forestales, el cual se presenta en el Anexo 3. En lo referente al procesamiento de imágenes el protocolo incluye protocolos para:

- Selección de software y equipo de computación.
- Procesamiento de imágenes y creación de orto-mosaicos
- Creación del modelo digital del terreno (MDT), modelo digital de superficie (MDS) y modelo digital de altura de la vegetación (MDC).
- Cálculo de área efectiva de la plantación.
- Cálculo de altura de los árboles.
- Cálculo de diámetro de los árboles.
- Cálculo de volumen.

- Cálculo de biomasa.
- Zonificación de plantaciones forestales según índices de vegetación RGB (ver figura 16).

Este protocolo incluye además de recomendaciones de procesamiento de imágenes aspectos como:

- Calibración del VANT.
- Permisos de vuelo.
- Reporte de la información obtenida en campo.
- Uso de aplicaciones en teléfonos celulares para la planificación de vuelos.

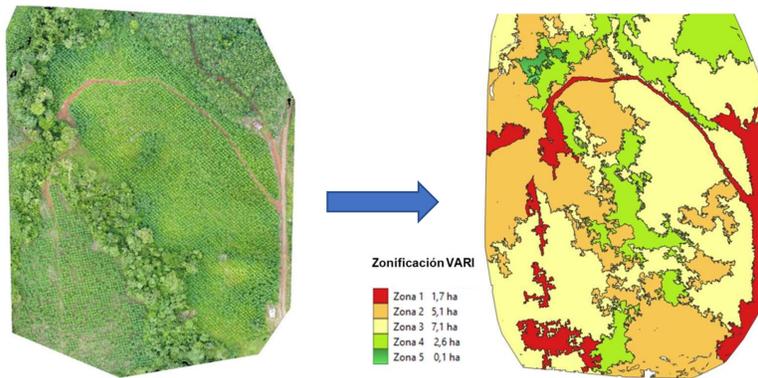


Figura 16. Ejemplo de resultados del protocolo de zonificación de plantaciones usando índices de vegetación RGB.

### 6.3.2 Resultados en la generación de modelos alométricos

#### A. Modelo de predicción del diámetro en una plantación de *Tectona grandis*

Se observó una alta relación entre la variable independiente (dc) y dependiente (d) ( $R^2=64,2\%$ ) considerando los datos obtenidos en cuatro diferentes sitios de muestreo. Por otra parte, cuando se considera otras variables independientes como edad de la plantación (en años), y altura de los árboles, el modelo de predicción del diámetro a 1,3 (d), llega a explicar un 83,7% de la variación observada en la variable diámetro a la altura de pecho. En la figura 17 también se observa que existe mayor variación en los datos en las plantaciones de mayor edad y diámetros, que en este caso corresponden a la Finca Don Joaquín, San Pedro de Hojancha, y Punta Morales respectivamente.

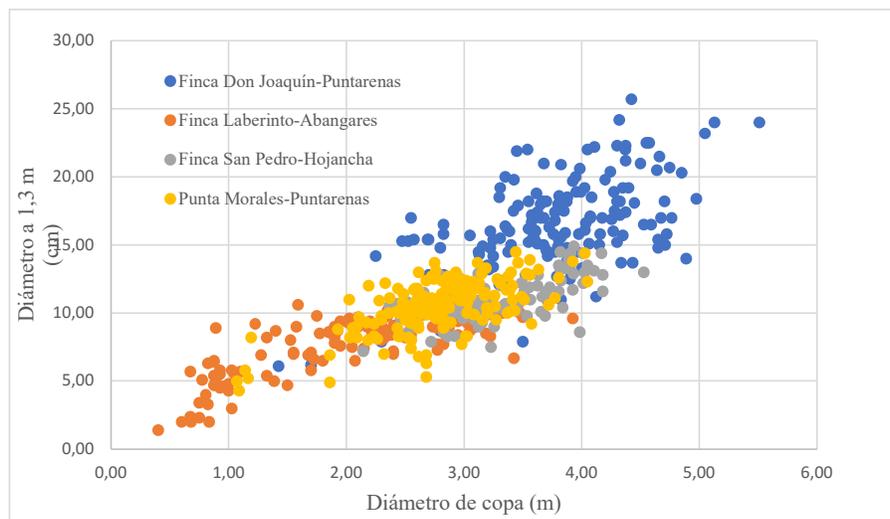


Figura 4. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc) para rodales de *Tectona grandis* en cuatro plantaciones en Costa Rica

Se desarrollaron tres modelos de regresión para estimar diámetro a la altura de pecho (d), en función de las tres variables identificadas, y que se podrían obtener con facilidad usando VANTS y los registros que normalmente se tienen en operaciones de monitoreo de plantaciones forestales. Las características de las ecuaciones se presentan en el cuadro 4, 5, y 6. Las pruebas de validación usando la prueba de Wilcoxon para observaciones pareadas indicaron las medianas de los valores observados y los estimados con los modelos eran iguales (valor-p  $>0,05$ ) por lo que los modelos no están sesgados, adicionalmente los coeficientes de sesgo calculados fueron inferiores al 1%. Los gráficos de residuos mostraron una distribución uniforme sin manifestar ninguna correlación con la variable dependiente según se muestra en la figura 18.

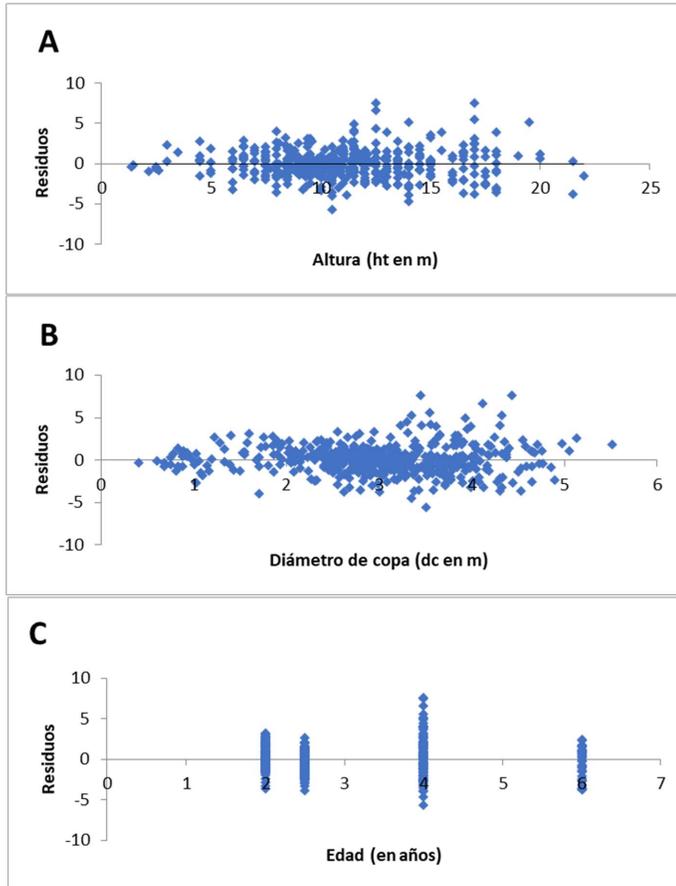


Figura 18. Análisis de residuos para los tres modelos de regresión desarrollados para estimar diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc), altura total, y edad para árboles de *Tectona grandis* en plantaciones en Costa Rica

Cuadro 4. Modelo para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc en m) para árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

---

**Modelo 1. Usando únicamente diámetro de copa (dc)**

**Ecuación:**

$$d = 0,70000 + 3,68483 * dc$$

Dónde:

d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm).

dc: Diámetro de copa (m).

---

**Número de observaciones que se utilizaron en la construcción: 486**

**Ámbito o rango de los datos:**

d entre 1,40 a 25,70 cm.

dc entre 0,40 a 5,51 m.

---

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

d con una cinta diamétrica.

dc con una cinta métrica promediando dos medidas perpendiculares entre sí.

---

**Estadísticos de precisión y exactitud:**

Media aritmética de la variable dependiente: 12,81 cm

Error estándar de la estimación (Syx): 2,53 cm

Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>): 0,642

Coefficiente de variación (CV%): 21,4%

Coefficiente de Sesgo (S%): 0,97%

---

**Ejemplos de uso del modelo desarrollado:**

Se desea estimar el d para la especie *Tectona grandis* con un dc de 3,2 metros, el diámetro estimado es de 12,5 cm

$$d = 0,70000 + 3,68483 * (3,2) = 12,5 \text{ cm}$$

---

**Nota adicional:** el modelo fue validado con una muestra independiente de 53 observaciones.

Cuadro 5. Modelo para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc en m) y edad (en años) para árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

---

**Modelo 2. Usando diámetro de copa (dc) y edad**

**Ecuación:**

$$d = -0,56899 + 2,43981 * dc + 1,72214 * \text{Edad}$$

Dónde:

d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm).

dc: Diámetro de copa (m).

Edad en años

---

**Número de observaciones que se utilizaron en la construcción: 486**

**Ámbito o rango de los datos:**

d entre 1,40 a 25,70 cm.

dc entre 0,40 a 5,51 m.

---

Edad: 2 a 6 años

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

d con una cinta diamétrica.

dc con una cinta métrica promediando dos medidas perpendiculares entre sí.

Edad según registros de programa de monitoreo

**Estadísticos de precisión y exactitud:**

Media aritmética de la variable dependiente: 12,81 cm

Error estándar de la estimación (Syx): 1,91 cm

Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>): 0,796

Coefficiente de variación (CV%): 16,28%

Coefficiente de Sesgo (S%): 1,00%

**Ejemplos de uso del modelo desarrollado:**

Se desea estimar el d para la especie *Tectona grandis* con un dc de 3,2 metros, y una edad de 4 años diámetro estimado es de 12,5 cm

$$d = -0.56899 + 2,43981 * (3,2) + 1,72214 * (4) = 14,1 \text{ cm}$$

**Nota adicional:** el modelo fue validado con una muestra independiente de 53 observaciones.

---

Cuadro 6. Modelo para predecir el diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc en m), edad (en años) y altura total (ht en m) para árboles de *Tectona grandis* en Costa Rica.

---

**Modelo 3. Usando diámetro de copa (dc), edad y altura total (ht)**

**Ecuación:**

$$d = -1.64742 + 1,87127 * dc + 1.03433 * \text{Edad} + 0,43310 * ht$$

Dónde:

d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm).

dc: Diámetro de copa (m).

Edad en años

Ht es altura total (m)

---

**Número de observaciones que se utilizaron en la construcción:** 486

**Ámbito o rango de los datos:**

d entre 1,40 a 25,70 cm.

dc entre 0,40 a 5,51 m.

Edad: 2 a 6 años

Ht: 1,35 a 22 m

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

d con una cinta diamétrica.

dc con una cinta métrica promediando dos medidas perpendiculares entre sí.

Edad según registros de programa de monitoreo

Altura medida con hipsómetro Suunto

**Estadísticos de precisión y exactitud:**

Media aritmética de la variable dependiente: 12,81 cm

Error estándar de la estimación (Syx): 1,71 cm

Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>): 0,837

Coefficiente de variación (CV%): 14,56%

---

---

Coefficiente de Sesgo (S%): 0,64%

---

**Ejemplos de uso del modelo desarrollado:**

Se desea estimar el *d* para la especie *Tectona grandis* con un *dc* de 3,2 metros, una edad de 4 años, y 15,5 metros de altura, el diámetro estimado es de 12,5 cm

$$d = -1.64742 + 1,87127*(3,2) + 1.03433*(4) + 0,43310*(15,5) = 15,19 \text{ cm}$$

---

**Nota adicional:** el modelo fue validado con una muestra independiente de 53 observaciones.

---

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

Para el caso de *Gmelina arborea* se tenía observaciones de campo de un solo sitio en Santa Rita, San Carlos. La correlación entre diámetro a 1,30 de altura (*d*), y diámetro de copa fue de 76,9% y entre *d* y altura total (*ht*) de 79,9% (ver figura 19). Sin embargo, el mejor modelo de regresión desarrollado fue un modelo lineal cuadrático usando *dc* como variable independiente (ver cuadro 7. Este modelo obtuvo un coeficiente de sesgo (S%) de 0,60%, y *p*-valor >0,05 en la prueba de observaciones pareadas de Wilcoxon (Hernández-Cole, 2021). Los gráficos de residuos mostraron una distribución uniforme sin mostrar ninguna correlación con la variable dependiente según se muestra en la figura 20.

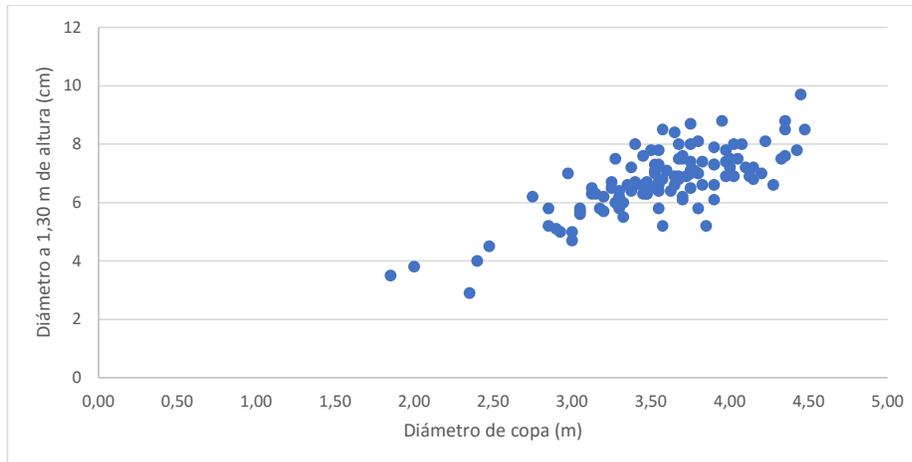


Figura 19. Relación entre diámetro a 1,3 m de altura (*d*) en función del diámetro de copa (*dc*) para una plantación de *Gmelina arborea* ubicada en Santa Rita. Costa Rica, 2021. Fuente: Hernández-Cole (2021).

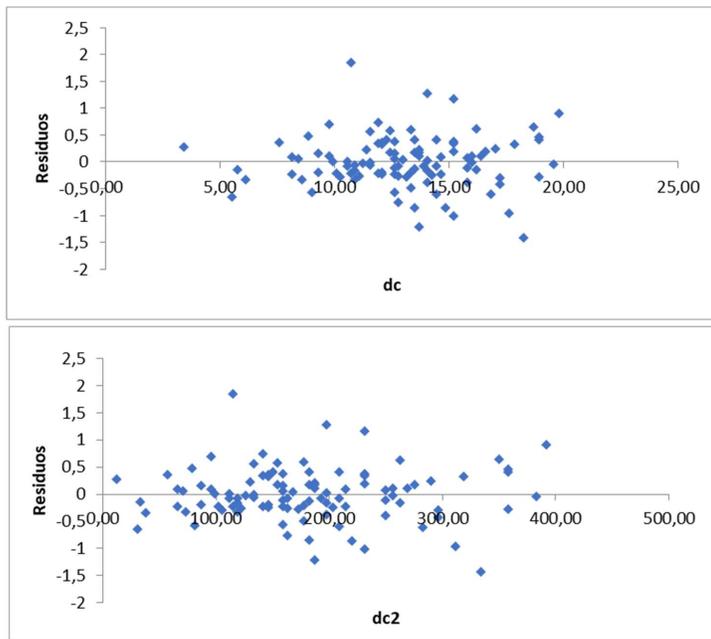


Figura 20. Análisis de residuos para los tres modelos de regresión desarrollados para estimar diámetro a 1,3 m de altura (d) en función del diámetro de copa (dc), altura total, y edad para árboles *Gmelina arborea* en plantaciones en Costa Rica. Fuente. Hernández-Cole (2021).

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

<p><b>Modelo 4. Estimación del diámetro a 1,3 m (d) en función del diámetro de copa (dc)</b>  <b>Ecuación:</b>  <math>d: -4,29+4,68*dc-0,43*dc^2</math>  Dónde:  d: Diámetro a 1,3 m de altura (cm).  dc: Diámetro de copa (m).</p>
<p><b>Número de observaciones que se utilizaron en la construcción:</b> 102</p>
<p><b>Ámbito o rango de los datos:</b>  d entre 2,9 a 9,7 cm.  dc entre 1,85 a 4,45 m.</p>
<p><b>Método utilizado para medir cada una de las variables en el modelo</b>  d con una cinta diamétrica.</p>

dc con una cinta métrica promediando dos medidas perpendiculares entre sí.

**Estadísticos de precisión y exactitud:**

Media aritmética de la variable dependiente: 6,77 cm  
 Error estándar de la estimación (Syx): 0,71  
 Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>): 0,57  
 Coeficiente de variación (CV%): 10,56  
 Coeficiente de Sesgo (S%): 0,64%

**Ejemplos de uso del modelo desarrollado para ambas variedades.**

Se desea estimar el d para la especie *Gmelina arborea* con un dc de 3,15.  
 d:  $-4,29 + 4,68 * 3,15 - 0,43 * 3,15^2$   
 d: 6,18 cm

**Nota adicional:** el modelo fue validado con una muestra independiente de 12 observaciones.

Fuente: Hernández-Cole (2022)

**6.3.3 Zonificación de plantaciones forestales según estado de desarrollo e índices de vegetación**

En el procesamiento de datos tomados con el VANT se identificó que usando las imágenes y orto-mosaicos se pueden calcular índices de vegetación RGB, es decir aquellos calculados con las bandas roja (R), verde (B), y azul (B) de las imágenes. A diferencia de los índices que utilizan datos de reflectancia del rango de radiación infrarroja (NIR), y borde rojo (RE), que requieren que el VANT posea un cámara multispectral, los índices RGB pueden calcularse con VANTs semiprofesionales de bajo costo. Dado que los drones con cámara multispectral son cerca de 6 y 8 veces más costosos que los drones con cámara RGB, se desarrolló un protocolo para zonificar plantaciones forestales según sanidad y estado de desarrollo usando índices RGB.

Se identificaron tres índices RGB con potencial para zonificar plantaciones forestales. Dos de los índices RBG más usados son VARI y TGI (ver cuadro 8), y se pueden generar directamente de los programas de procesamiento PIX4DMAPPERmapper® y WEBODM®, o se pueden generar usando los orto-mosaicos y la calculadora raster de un programa de sistemas de información geográfica (SIG) como ArcGis o QGis.

Cuadro 8. Índices de vegetación de mayor uso en agricultura de precisión, según tipos de cámara usada.

Tipo de cámara en el VANT	Índice	Descripción
Color (RBG)	$VARI = \min(1; \max(-1; \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}))$	VARI Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) se estima con cámaras RGB, y este detecta que tan verde es la vegetación, y ayuda a identificar algún tipo de estrés en las plantas.
	$TGI = \frac{GREEN - (0.39 * RED) - (0.61 * BLUE)}{\text{(normalizado por los valores máximos de las bandas RGB)}}$	TGI Triangular Greenness Index (TGI) - Busca medir la sensibilidad de la clorofila, indicando niveles de

		<p>nitrógeno en las hojas, lo que ayuda a dar información de cuándo y dónde aplicar fertilizantes a los cultivos.</p>
	<p>NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index)</p> $\text{NGRDI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED})$	<p>NGRD su rango va de 0 a 1, y mide la cantidad de clorofila en la vegetación. La pérdida de clorofila es un síntoma de deterioro de la salud de las plantas, y ayuda entonces a identificar problemas temprano. Se puede usar para medir biomasa, área foliar y productividad</p>
Multi-espectral	$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / ((\text{NIR} + \text{RED}))$	<p>NDVI Normalized Difference Vegetation Index. Es el índice de mayor uso, y se requiere de una cámara multi-espectral. Este hace una estimación de la cantidad de clorofila en la vegetación. La pérdida de clorofila es un síntoma de deterioro de la salud de las plantas, y ayuda entonces a identificar problemas temprano. Indica salud de las plantas al inicio y a la mitad del periodo de crecimiento. Se puede usar para medir biomasa, área foliar y productividad.</p>
	$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{RE}) / ((\text{NIR} + \text{RE}))$	<p>NDRE Normalized Difference Red Edge Index (NDRE). Se usa para medir las condiciones de las plantas a la mitad y al final del periodo de crecimiento. Es recomendado para cultivos de alta biomasa, y permanentes, y permite analizar el contenido de clorofila sin influencia del suelo.</p>
	$\text{GNDV} = (\text{NIR} - \text{G}) / ((\text{NIR} + \text{G}))$	<p>GNDV Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI). Es similar al NDVI, pero en lugar de usar la banda roja, utiliza la verde en su cálculo. Da información de la tasa de fotosíntesis por lo que muestra áreas bajo estrés o no.</p>

Se identificó además, que se puede zonificar plantaciones forestales usando el modelo digital de altura de la vegetación (MDC), el cual es una estimación de la altura de la vegetación, y por lo tanto,

calculado sobre una superficie de una plantación forestal estima la altura de los árboles en la plantación, variable que a su vez, no solo es una importante medida dasométrica, sino que también es un reflejo de la calidad de sitio y del estado de desarrollo de los árboles en la plantación, lográndose así identificar zonas de alto y bajo rendimiento. Para árboles de copa circular extendida, con el MDC se puede calcular la altura promedio de los árboles, mientras que para árboles de forma cónica, hay que seleccionar los píxeles del modelo correspondientes a puntos más altos de la copa. Al igual que un orto-mosaico, el MDC es una capa de información en formato de imagen raster, por lo que, usando un programa SIG, operaciones raster y filtros es posible entonces calcular altura dominante (Hd) de la plantación forestal<sup>7</sup>.

El proceso global para la zonificación de las plantaciones usando índices de vegetación RGB o el MDC consta de ocho pasos, según se presenta el diagrama de flujo de la figura 21. Los pasos son los siguientes:

1. Usar la calculadora raster para calcular el índice de vegetación RGB a partir del orto-mosaico, o el MDC a partir de las capas MDT y MDS.
2. Modificar la resolución espacial del índice calculado o del MDC para reducirlo a un tamaño entre 15 y 20 cm/píxel. En este caso se usa un algoritmo de “resample”.
3. Segmentar la capa raster resultante usando un comando o algoritmo de segmentación de imágenes, por ejemplo, i.segment de GRASS.
4. Convertir la imagen resultante de la segmentación a formato de polígonos.
5. Realizar una operación de estadísticos de zona media o moda, usando como entradas la capa del índice RGB, y la imagen segmentada.
6. Reclasificar la imagen de estadísticos de zonas para definir zonas de igual índice de vegetación, o de igual altura en caso de que este trabajando con el MDC.
7. Disolver polígonos de igual índice de vegetación o igual altura, para así obtener una capa final de zonificación de la plantación simplificada.
8. Exportar la capa de zonificación final a una capa en formato .kml para visualizarla en Google Earth, una tablet o teléfono celular. Se puede también exportar la capa en formato .gpx, para visualizarla en un GPS.

---

<sup>7</sup> Altura dominante (Hd) se define como la altura promedio de los 100 árboles más altos por hectárea.

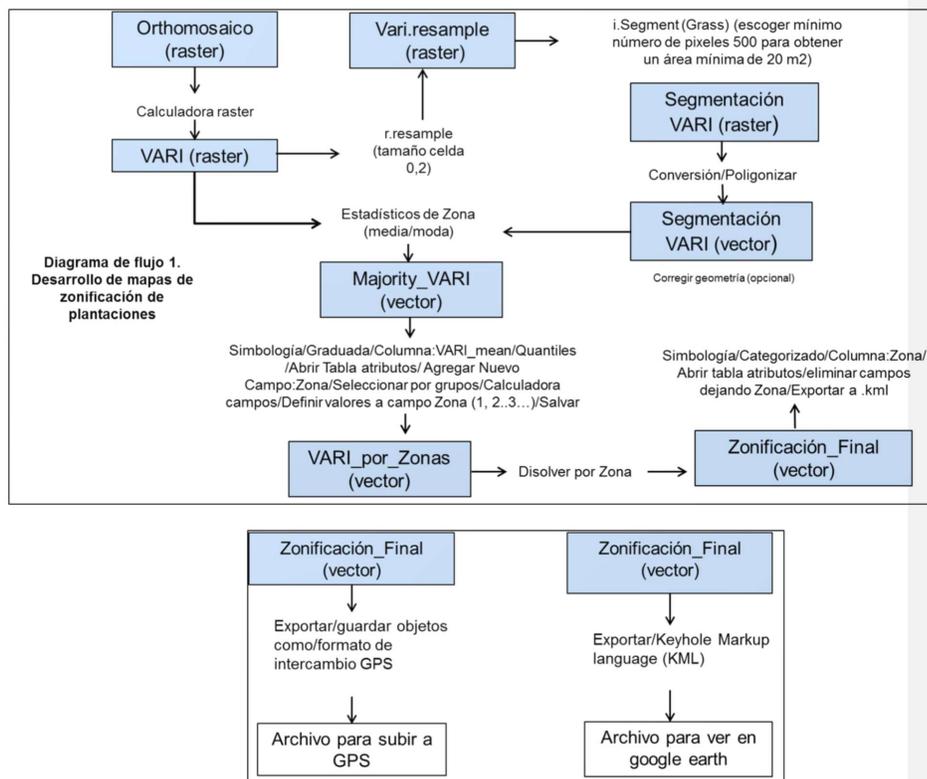


Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento para generar un mapa de zonificación de plantaciones forestales usando el índice de vegetación RGB VARI. Ejemplo usando comandos QGIS y GRASS. Fuente. Elaboración propia

## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Se identificaron 18 necesidades de información en el monitoreo de plantaciones forestales, y se clasificaron según tres niveles de viabilidad de obtenerse con el uso de VANTs en: alto, medio, y bajo, valores que se relacionan con la complejidad, y número de productos intermedios requeridos para su obtención.

Se identifica que, en el monitoreo de plantaciones forestales, el principal producto a obtener con los VANTs es un orto-mosaico que permita estimar áreas efectivas plantadas, así como sanidad y estado general de desarrollo de estas. Un programa de monitoreo usando VANTs debe enfocarse en identificar como obtener orto-mosaicos de alta calidad según diferentes condiciones de las plantaciones forestales, tal como tamaño del lote o rodal evaluado, la pendiente del terreno, época del año, y edad o estado de desarrollo de los árboles.

La segunda prioridad es establecer procedimientos y algoritmos para el conteo de árboles, la estimación de su altura total (ht), diámetro de copa (dc), y diámetro del fuste a la altura del pecho (d o dap). Con esta información se podría en última instancia estimar biomasa total, y volumen total, y comercial de las plantaciones. La posibilidad de estimar ambas variables depende también de la calidad del orto-mosaico, y posiblemente sea más factible hacer estas mediciones en plantaciones jóvenes, y de especies como teca, botarrama, y laurel.

El tener procedimientos para el cálculo de diámetro de copa (dc) es especialmente importante para usarlo como variable independiente para estimar diámetro del fuste a 1,3 m de altura, así como volumen total usando la fórmula de factor de forma constante, o volúmenes comerciales de cualquier tipo.

Los resultados obtenidos en los ensayos permitieron preparar protocolos para la toma de información con VANTS semi profesionales con cámaras RGB. así como del procesamiento de imágenes para obtener orto-mosaicos de calidad, y su posterior procesamiento para estimar las otras variables requeridas en el monitoreo de plantaciones forestales.

Aunque en este trabajo no se evaluó las mejores opciones de configuración de vuelos para obtener productos 3D (MDT, MDS y MDC), se identificó que el producto principal a obtener para el monitoreo de plantaciones forestales son los orto-mosaicos del área plantada, y se puede llegar a recomendar que las mejores opciones para realizar vuelos para el monitoreo son utilizar una combinación de traslape lateral: 70% y frontal: 80%, una altura de vuelo de 120 metros, haciendo una sola pasada sobre el área a evaluar (trazado 2D) que se realiza con un ángulo de la cámara de 90° con respecto al terreno, combinación de factores con la que se lograría imágenes con un GSD de 3,27 cm/píxel. La configuración permite no solo obtener orto-mosaicos de mayor calidad, con menor tiempo y probabilidad de fallas en el procesamiento, sino que además se requiere menor tiempo de vuelo del VANT.

Los resultados obtenidos indican que el mejor software para el procesamiento de las imágenes provenientes de un VANT fue *Pix4Dmapper*® debido a que procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo/ha y obtuvo menos fallos de procesamiento. Sin embargo, es el software *WebODM*®, con el que se obtuvo orto-mosaicos con mayor porcentaje de área sin defectos. Por otro lado, este último es más accesible para empresas forestales dado su bajo costo, y la velocidad de procesamiento puede mejorarse con computadoras con un mínimo de 16Gb de memoria RAM.

Se observan diferencias en el tiempo de procesamiento (hrs/ha) entre softwares, siendo Pix4Dmapper® el que obtuvo el valor más bajo de tiempo de procesamiento. 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. Todo esto coincide con varias investigaciones, en las cuales el tiempo de procesamiento varió según el tipo de software utilizado, así como que Pix4Dmapper® procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo (Hernández-Cole).

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 y los productos a obtener, tiempo de procesamiento, etc. 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, 2021).

Es posible observar que existen diferencias estadísticas significativas con respecto al tiempo de procesamiento/ha según el GSD utilizado. 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 de 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) se obtuvo que para el software Pix4Dmapper 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, y paralelamente menor tiempo de vuelo o lo que es lo mismo, cubrir mayores áreas de plantación (Hernández-Cole, 2021).

Estos resultados coinciden con los obtenidos en las diferentes interacciones donde es posible observar que para obtener una menor cantidad de tiempo de procesamiento es necesario procesar las imágenes con el software Pix4Dmapper®, 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%.

Los resultados indican que hubo diferencia en el porcentaje de área 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 (Hernández-Cole, 2021).

Se muestra que la combinación de traslape (70x80%) se vio menormente afectado por áreas con vacíos de información en los orto-mosaicos. 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 orto-mosaico son menores. Por otra parte, un bajo porcentaje de traslape resulta en una mayor cantidad de huecos en el orto-mosaico, 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 orto-mosaicos son las condiciones meteorológicas (especialmente viento e intensidad de la luz) (Panagiotidis et al., 2017; Zhang et al., 2019).

A la hora de analizar las interacciones 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, los resultados indican 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 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.

El software WebODM® así como las opciones de procesamiento 1 y 2, fueron las que obtuvieron un mayor porcentaje de fallos. Como se mencionó anteriormente este resultado se explica por la cantidad de imágenes presente en cada GSD. 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 (Pix4Dmapper, 2021; OpenDroneMap, 2021).

Al estudiar la cantidad de fallos en el procesamiento presente en cada porcentaje de traslape es evidente que en uno de los casos (lateral: 70% y frontal: 80%) el porcentaje de fallos es inferior en comparación con los demás. Por lo tanto, 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.

Al procesar una mayor cantidad de imágenes, es más probable obtener un fallo en el procesamiento. Estos resultados evidencian que la cantidad de imágenes es uno de los factores más importantes si se desea disminuir la cantidad de fallas en el procesamiento, por lo tanto, es recomendable seleccionar opciones de configuración de vuelo que permitan obtener una menor cantidad de imágenes.

Se puede apreciar que existen diferencias entre un orto mosaico 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 (Hernández-Cole; 2021).

Se desarrollaron modelos alométricos para estimar el diámetro de los árboles en función del diámetro de copa, edad, y altura total para árboles de *Tectona grandis*, los cuales dan un ajuste superior al 80,0%, y que están validados con una muestra independiente. Estos modelos son utilizables, y pueden mejorarse con mayor cantidad de mediciones en diferentes plantaciones en el país. Para el caso de árboles de *Gmelina arbórea* se desarrolló un modelo que utiliza únicamente datos de una plantación por lo que su uso es más limitado, y sujeto a muchas mejoras. No obstante, el modelo desarrollado posee un coeficiente de determinación del 71,0%, y fue validado igualmente con una muestra independiente.

## 8. RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

En esta investigación se concluye cuál es el mejor software para analizar datos obtenidos con un VANT semi-profesional, opciones de procesamiento, así como parámetros de planificación de vuelo para realizar el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica, sin embargo, los resultados obtenidos están sujetos a mejoras a través de futuras investigaciones orientadas a:

- 1) incorporar el uso de puntos de control de campo (GCP's) para mejorar los orto-mosaicos,
- 2) proseguir con la comparación de información derivada de campo y la de los VANT con la finalidad de mejorar la confiabilidad de los datos, tal como altura de los árboles y su respectivo diámetro (dap),
- 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), específicamente probar opciones de procesamiento con el software WEBODM®,
- 4) probar algoritmos de aprendizaje automático para el conteo de árboles utilizando los orto-mosaicos,
- 6) estudiar el uso de índices de vegetación RBG en comparación con índices que usan infrarrojo cercano (NIR) para zonificar plantaciones forestales y cultivos según la sanidad y vigor de crecimiento.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer la contribución y apertura de las empresas forestales de la Región Huetar Norte y Chorotega que nos permitieron probar las diferentes configuraciones de vuelo en sus plantaciones, especialmente a las empresas Forestales Río Grande, MTF Teca de Costa Rica, Bosques Selectos, y Reforest the Tropics (RTT), así como a CODEFORSA, ASIREA, FONAFIFO, y FUNDECOR organizaciones que nos ofrecieron la información y apoyo logístico para ubicar plantaciones forestales necesarias para los vuelos de prueba. Se agradece además el apoyo administrativo y financiero al proyecto por parte de la Dirección de Proyectos de la Vice-Rectoría de Investigación y Extensión del ITCR.

## 10. REFERENCIAS

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 29 junio-2019. <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/658>

CR-MINAE-SINAC-IFN, 2014. Manual de Campo para el inventario forestal nacional de Costa Rica: diseño de parcela, variables de sitio, y dasométricas. Vol. 2. Programa REDD-CCAD-GIZ. 78 p.

Hernández-Cole, J. 2021. Utilización de Vehículos aéreos no-tripulados (VANTs) en la evaluación del estado de desarrollo de plantaciones forestales de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y mixtas. Tesis de grado, Maestría en Ciencias Forestales. Cartago, Costa Rica.

Husch, B.; C. Miller and T. Beers. 1982. Forest Mensuration. Third Ed. Willey & Sons, New York).

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. 2008. Remote sensing and image interpretation (6th edn). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.

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>

Pix4Dmapper. (2021). Types of Mission/ Which type of mission to choose. Pix4Dmapper. <https://support.Pix4Dmapper.com/hc/en-us/articles/209960726-Types-of-mission-Which-type-of-mission-to-choose>.

OpenDroneMap. (2021). 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. Boletín Avance 1. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica.

Ortiz-Malavasi, E. (2021). Crecimiento y Rendimiento Forestal. Apoyo Académico No. 32. Sexta Edición. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, Cartago, Costa Rica.

Panagiotidis, D.; Abdollahnejad, A. and Surovy-Vasco-Chiteculo, P. 2017. Determining tree height and crown diameter from high resolution UAV imagery. *IJRS*, 38: 8-10, 2392-2410. DOI:10.1080/014311161.2016.1264028.

Pérez Cordero, L.D., Kanninen, M., 2003. Provisional equations for estimating total and merchantable volume of *Tectona grandis* trees in Costa Rica. *Forests, Trees and Livelihoods* 13, 345-359.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. GTZ-IICA. San José, Costa Rica. 586 p.

Rodríguez, M., Arias, D. Valverde, J., y Camacho, D. 2018. Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* L.f. en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Meso-americana Kurú*: 15 (Supply. 01) :61-68.

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 Effects of Flight Plan Parameters to the Quality and Useability of UAS Photogrammetry Data Products for Tree Crown Delineation. June, 0–13.

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.

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.

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>.

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>.

## 11. ANEXOS

### Anexo 1. Viabilidad del uso de los VANTs en el monitoreo de plantaciones forestales



Proyecto Uso de VANTs

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**Escuela de Ingeniería Forestal**  
**Proyecto: Utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) en la evaluación de la calidad y estado de desarrollo de plantaciones forestales**

#### **Boletín de Avance 1:**

### **Viabilidad del uso de los VANTs en el monitoreo de plantaciones forestales**

#### **Resumen**

Se realizaron entrevistas a 7 empresas forestales ubicadas en las regiones Huetar Norte y Chorotega de Costa Rica, con el fin identificar los requerimientos de información en el monitoreo de sus plantaciones, para luego evaluar la factibilidad de utilizar VANTs para obtenerla. Se identificaron 18 necesidades de información y se clasificaron según tres niveles de viabilidad de obtenerse con el uso de VANTs en: alto, medio, y bajo, valores que se relacionan con la complejidad, y número de productos intermedios requeridos para su obtención.

Se identifica que en el monitoreo de plantaciones forestales, el principal producto a obtener con los VANTs es un orto-mosaico de alta calidad que permita estimar áreas plantadas, así como sanidad y estado general de desarrollo de estas. Un programa de monitoreo usando VANTs debe enfocarse en identificar como obtener orto-mosaicos de alta calidad según diferentes condiciones de las plantaciones forestales, tal como tamaño del lote o rodal evaluado, la pendiente del terreno, época del año, y edad o estado de desarrollo de los árboles.

La segunda prioridad es establecer procedimientos y algoritmos para el conteo de árboles, la estimación de su altura total (Ht), diámetro de copa (Dc), y diámetro del fuste a la altura del pecho (Dap). Con esta información se podría en última instancia estimar biomasa total, y volumen total, y comercial de las plantaciones.

#### **Introducción**

El monitoreo de las plantaciones forestales constituye un esfuerzo continuo indispensable para aumentar la productividad y rentabilidad de la actividad. Esencialmente se requiere de dos tipos de información: área plantada y su estado de desarrollo.

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) podrían ofrecer a los productores forestales una manera fácil y rápida de monitorear la salud y estado desarrollo de sus árboles, e identificar cualquier área problemática o que requiera mejoras. Sin embargo, para esto se requiere calibrar modelos que relacionen los datos adquiridos a través de VANTs, con información de campo, así como validar su exactitud y costo.

El procedimiento para el uso de VANTs para la recolecta de datos se puede dividir en tres etapas interrelacionadas: a) Definición de objetivos, b) Planificación del vuelo, y c) Procedimientos de procesamiento de datos. Definir previamente el objetivo del vuelo del VANT es el primer paso, y según este objetivo se planifica el vuelo, y el procesamiento de datos. El objetivo de esta nota técnica es compartir los hallazgos encontrados en la primera etapa del proyecto: *Utilización de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) en la evaluación de la calidad y estado de desarrollo de plantaciones forestales*, la cual incluye definir el tipo de datos que requiere el sector forestal para el monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las plantaciones forestales y determinar la viabilidad de obtenerlos a través del uso de VANTs.

### **Materiales y Métodos**

Se procedió a realizar entrevistas a administradores e ingenieros forestales encargados de los sistemas de monitoreo de 7 empresas forestales ubicadas en la Región Huetar Norte y la Región Chorotega de Costa Rica. Todas las empresas consultadas tienen un sistema de monitoreo de sus plantaciones, que incluyen procedimientos para cálculos de áreas totales y efectivas, así como una red de parcelas permanentes de muestreo (PPM). Así mismo, estas empresas han incursionado en diferente forma, y frecuencia en el uso de VANTs para el monitoreo de sus plantaciones forestales.

Los resultados de las entrevistas fueron tabulados en un cuadro de resultados en donde se identifican las necesidades de datos que requieren las empresas, y cómo están actualmente cumpliendo con sus requerimientos. Posteriormente se valora la viabilidad de obtener dichos datos o información con el uso de VANTs, identificando además qué datos deben recolectarse con el VANT, y se define para cada variable el procedimiento para generarla usando VANTs.

### **Resultados y discusión**

En total se entrevistaron 7 empresas u organizaciones forestales, 3 en la Región Huetar Norte y 4 en el Región Chorotega. Todas ellas tienen un sistema de monitoreo bien establecido que responde básicamente a las siguientes necesidades: a) reportes que solicita FONAFIFO para los contratos de PSA-Reforestación, 2) información que requieren los departamentos de silvicultura, industrialización y comercialización de la empresa, 3) información para los dueños y socios de la empresa.

### **Necesidades de información para los reportes en proyectos de PSA Reforestación**

Los regentes forestales deben certificar el estado de las plantaciones bajo PSA-Reforestación, al momento de establecer la plantación, y para tramitar los pagos por PSA (FONAFIFO. 2009). Manual de Procedimientos para el pago de Servicios Ambientales. La Gaceta No. 46-Viernes & de marzo del 2009. La información requerida para cada año tiene tres componentes.

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), % de mortalidad, altura promedio, coeficiente de variación de la altura.

Por otro lado, en la Resolución 167-2019 publicado en la Gaceta 138 del martes 23 de julio del 2019, se establecen valores de referencia de calidad de plantaciones para tramitar los pagos de PSA-reforestación. Esta resolución define los valores de referencia en función de diámetro promedio (DAP en cm) y altura total (Ht en m) mínimos, y no en función de volumen promedio por hectárea como se había dispuesto en la Resolución N° 010-2019 MINAE, publicada en el Alcance 40 de La Gaceta del 20 de febrero del 2019. Se establecen valores tanto para especies de rápido crecimiento (*Gmelina arborea*, *Vochysia guatemalensis*, *Acacia mangium*, etc), como para especies de mediano crecimiento (*Tectona grandis*, *Pinus*, *Cordia alliodora*, etc.) (ver cuadros 1 y 2). Así mismo, se ratifica que para el cálculo del volumen medio por hectárea debe usarse la fórmula de volumen de factor de forma volumétrico constante con un coeficiente de forma de 0,5 (FONAFIFO 2019), la cual permite calcular volúmenes promedios por parcela, para todo el rodal, y para toda una plantación. Se conoce que esta ecuación no estima correctamente el volumen promedio total de un rodal, pero el uso general de la misma tiene la ventaja de que permitirá comparar los reportes que hace cada regente cada año, y los diferentes regentes y empresas forestales. La fórmula es:

$$V_{tot} = \pi/4 * (DAP)^2 * H_{tot} * Ff * N$$

Donde:  $V_{tot}$  = Volumen total promedio por hectárea expresado en metros cúbicos.  
 $\pi$  = (pi) es la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro en geometría euclidiana.  
DAP = Diámetro promedio de los árboles a la altura de 1,3m expresado en metros.  
H<sub>tot</sub> = Altura total promedio expresada en metros.  
Ff = Factor de forma igual que 0,5.  
N = Número de árboles por hectárea.

Cuadro 1. Valores de referencia mínimos (VRM) para el diámetro promedio (DAP) y la altura total promedio (H<sub>tot</sub>), esperados por año para plantaciones de especies de rápido crecimiento (*Gmelina arborea*, *Vochysia guatemalensis*, *Acacia mangium*, otras).

Edad (años)	VRM DAP (cm)*	VRM H <sub>tot</sub> (m)*
1 -	No aplica	3,69
2	8,14	6,85
3	12,08	10,26
4	14,28	12,39
5	17,69	15,08
6	19,08	16,74
7	21,11	17,42
8	22,12	18,02
9	23,02	18,54
10	23,83	19,01

Fuente. FONAFIFO (2019b)

Cuadro 2. Valores de referencia mínimos (VRM) para el diámetro promedio (DAP) y la altura total promedio (Htot) esperados por año para plantaciones de especies de mediano crecimiento (*Tectona grandis*, *Pinus sp*, *Cordia alliodora*, *Vochysia ferruginea*, *Eucalyptus sp*, *Cedrela odorata*, otras).

Edad (años)	VRM DAP (cm)*	VRM Htot (m)*
1	No aplica	1,65
2	4,78	3,24
3	7,57	5,06
4	9,08	6,24
5	10,72	7,49
6	12,47	8,78
7	14,26	10,10
8	16,04	11,42
9	17,76	12,71
10	19,37	13,94
11	20,83	15,09
12	21,52	15,86
13	22,60	16,83
14	23,52	17,71
15	24,28	18,52
16	24,91	19,25

Fuente. FONAFIFO-MINAE (2019b)

#### **Necesidades de información de los departamentos de silvicultura**

Los departamentos de silvicultura de las empresas tienen como responsabilidad el establecimiento y cuidado de las plantaciones, por lo que sus requerimientos de información son iguales a los que solicitan en los reportes de PSA, pero no solo durante los primeros cinco años de establecimiento de las plantaciones. Adicionalmente, se identificó la necesidad de tener información de distribución espacial del estado de las plantaciones, específicamente: a) problemas de sanidad, esto es plagas, enfermedades, o daños por fuego o viento, y b) áreas de menor desarrollo por problemas de calidad de sitio que requieren de la aplicación de algún tipo de enmienda, sea por drenaje, encalado, o

fertilización. Se identificó que este tipo de información se requiere tanto al establecimiento de la plantación, como durante el periodo de desarrollo de esta.

### **Necesidades de información para la industrialización, y comercialización de productos**

Los departamentos de industrialización y ventas de las empresas requieren de información de volumen comercial, y no de volumen total como el que se calcula con la fórmula de coeficiente de forma constante. La definición de volumen comercial es diferente en la mayoría de las empresas, y requieren datos de altura o largo de trozas a un diámetro mínimo dado, o de número de trozas clasificadas por diferentes tamaños de diámetro. En algunas ocasiones se requiere conocer además la ubicación de individuos que cumplan con ciertas características para la venta a ciertos clientes. Para tener esta información tienen sus propios modelos o ecuaciones que utilizan factores de conicidad propios de cada empresa, que posiblemente tengan como variables independientes diámetro a 1,3 m de altura, y altura total o hasta un diámetro mínimo. Por otro lado, se pudo identificar que las empresas no miden la altura total en todos los árboles, sino que solo en una proporción de los individuos. A partir de estos datos se obtienen modelos de estimación de altura que utilizan el diámetro a 1,3 m de altura, práctica que permite reducir los costos de monitoreo y recomendados por varios autores (Ortiz 2019, INF-SINAC-MINAE 2013, INTECO 2016).

### **Viabilidad del uso de los VANTs en el monitoreo de plantaciones forestales**

Una vez identificadas las necesidades de datos o información de las empresas de reforestación, se procedió a analizar si cada una de estas necesidades podría solventarse con el uso de VANTS. Se identificaron otras variables adicionales, que actualmente no son registradas en los sistemas de monitoreo de las empresas, pero que sería ideales para un manejo forestal intensivo, tal como ubicación de coordenadas geográficas de los árboles, y áreas con necesidades especiales de aplicación de enmiendas en el suelo. Las necesidades de información fueron categorizadas como variables con: a) alta, b) mediana, y c) baja viabilidad de obtenerse con el uso de VANTs (ver figura 1)

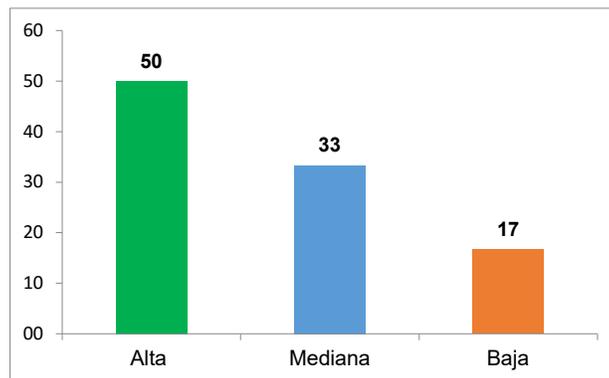


Figura 1. Distribución porcentual del total de variables identificadas en los sistemas de monitoreo de plantaciones forestales según su viabilidad de obtención con el uso de VANTS.

Las variables del primer grupo corresponden a datos que se obtiene directamente del procesamiento de las fotografías tomadas por el VANT (ver cuadro 3), sea en un vuelo libre o programado para

generar mosaicos simples en dos dimensiones (2D), u ortofotos con tres dimensiones (3D). En este último caso, además del mosaico fotográfico georreferenciado se puede obtener un modelo de elevación del terreno (DEM), y el modelo de elevación de la superficie (DSM), que permiten estimar la altura de la vegetación en el terreno.

Para estimar la altura promedio de los árboles se utiliza un programa SIG que calcule la diferencia entre estos dos modelos, el cual representa la altura de la cobertura vegetal, es decir la de los árboles si se sobrevoló un bosque o plantación forestal. Este procedimiento que puede hacerse sobre áreas o parcelas de muestreo, o sobre todo el orto-mosaico (Panagiotidis, et al.; 2017). En este grupo, además de la altura de la vegetación, se han identificado variables principalmente relacionadas con el cálculo e identificación de áreas con problemas de sanidad, bajo crecimiento en altura, afectadas por quema, con daños por vientos, etc.

En el grupo de mediana viabilidad (ver cuadro 4), se incluyen variables o información que para su generación requieren de procesamiento, modelos o ecuaciones adicionales sencillas, pero que exigen un trabajo adicional. Por ejemplo, el número de árboles por área efectiva, o el diámetro promedio de los árboles a 1,3 m de altura. Esta última variable se puede estimar a partir de la altura de los árboles y su diámetro de copa. Sin embargo, estas relaciones son específicas para diferentes especies, y dependen esencialmente de la forma de la copa de los árboles de cada especie, y por lo tanto es un tema de investigación a desarrollar (Prodan, et al. 1997).

Para el **conteo de árboles** se puede recurrir a hacer un muestreo sobre las fotos, y contar mediante interpretación visual el número de árboles por unidad de área en esas áreas de muestreo, así como calcular el diámetro promedio de copa<sup>8</sup>. Así mismo, se puede utilizar procesamiento digital, por ejemplo, usando un algoritmo de segmentación de la imagen, para luego hacer el conteo de polígonos segmentados y medir sus diagonales, tanto en toda la imagen o en áreas de muestreo sobre el orto-mosaico (Prodan, et al. 1997; Panagiotidis, et al.; 2017).

En el grupo de media viabilidad también se ha incluido la variable estado nutricional y estado fitosanitario de los árboles, ya que aunque en los orto-mosaicos pueden observarse cambios de coloración del follaje de los árboles atribuibles a estos factores, es mejor evaluarlos con índices de vegetación con datos de una cámara infrarroja. La actividad fotosintética de la vegetación está relacionada con el porcentaje de reflexión de ondas de radiación infrarroja (0,8 um a 2,5 um o NIR), una alta reflectancia indica la presencia de una cobertura fotosintética mayor, y por lo tanto un mejor estado fitosanitario de la vegetación y mayor fertilidad del suelo. La interpretación de los cambios en la reflectancia de radiación infrarroja (NIR) se puede hacer mediante interpretación visual, o mediante clasificación digital usando programas SIG tal como QGis. (Lillesand, et al. 2008).

En el último conjunto se han agrupado las tres variables de mayor complejidad, y también de menor precisión y exactitud al querer obtenerse mediante un VANT (ver cuadro 5). Por ejemplo, una vez estimado el diámetro del fuste a 1,3 m, para lo cual fue necesario previamente calcular altura o diámetro de copa promedio de los árboles, se puede calcular también volumen (en m<sup>3</sup>/ha) o biomasa seca (t/ha) para plantaciones forestales, y bosque nativo. Por otro lado, las mediciones de diámetro de copa en fotografías aéreas son problemáticamente una mejor medida del espacio de crecimiento de los árboles, y están mejor correlacionadas con volumen de árboles y rodales (Husch, et. al., 1982).

---

<sup>8</sup> Existen diferentes definiciones de esta variable: diámetro total de copa, ancho efectivo de copa, y diámetro de copa. Para efectos del proyecto se usará la medición que corresponde a ancho total de la copa.

## Conclusiones y recomendaciones

El producto principal por obtener con el uso de VANTs en el monitoreo de plantaciones es el orto-mosaico, ya que de su calidad dependen la mayor parte de variables identificadas en este estudio. La calidad de un orto-mosaico se mide por la resolución espacial del mismo o distancia de superficie (GSD en cm/píxel), y si el mismo está completo, es decir sin faltantes en de información del polígono o área sobrevolada.

Por otro lado, la GSD depende de la distancia focal de la cámara y la altura de vuelo, adicionalmente la obtención de un orto-mosaico completo depende tanto de la GSD como de los traslapes entre fotos (frontal y lateral) (Lillesand, et al., 2008, Abdullah, 2019). De esta forma, se puede deducir que el primer objetivo del proyecto es identificar las variables a establecer para el vuelo programado (altura y traslapes entre fotos) de los VANTs para diferentes condiciones de las plantaciones, tal como: área total a cubrir, pendiente, hora del día, época del año, así como estado de desarrollo de las plantaciones (principalmente porcentaje de cobertura de copas, y altura). Así mismo, es importante hacer evaluaciones en Guanacaste cuando los árboles, principalmente de teca, hayan perdido sus hojas, ya que bajo este estado es posible que se tengan orto-mosaicos de mayor calidad con vuelos con menor porcentaje de traslapes, y también mejores DTM y DSM.

La segunda prioridad en el desarrollo del proyecto es tener procedimientos o algoritmos para el conteo de árboles individuales y estimar diámetro de copa. La posibilidad de estimar ambas variables depende también de la calidad del orto-mosaico, y posiblemente sea más factible hacer estas mediciones en plantaciones jóvenes, y de especies como teca, botarrama, y laurel. El tener procedimientos para el cálculo de diámetro de copa es especialmente importante para usarlo como variable independiente para estimar diámetro del fuste a 1,3 m de altura, así como volumen total usando la fórmula de factor de forma constante, o volúmenes comerciales de cualquier tipo.

## Cuadros Anexos

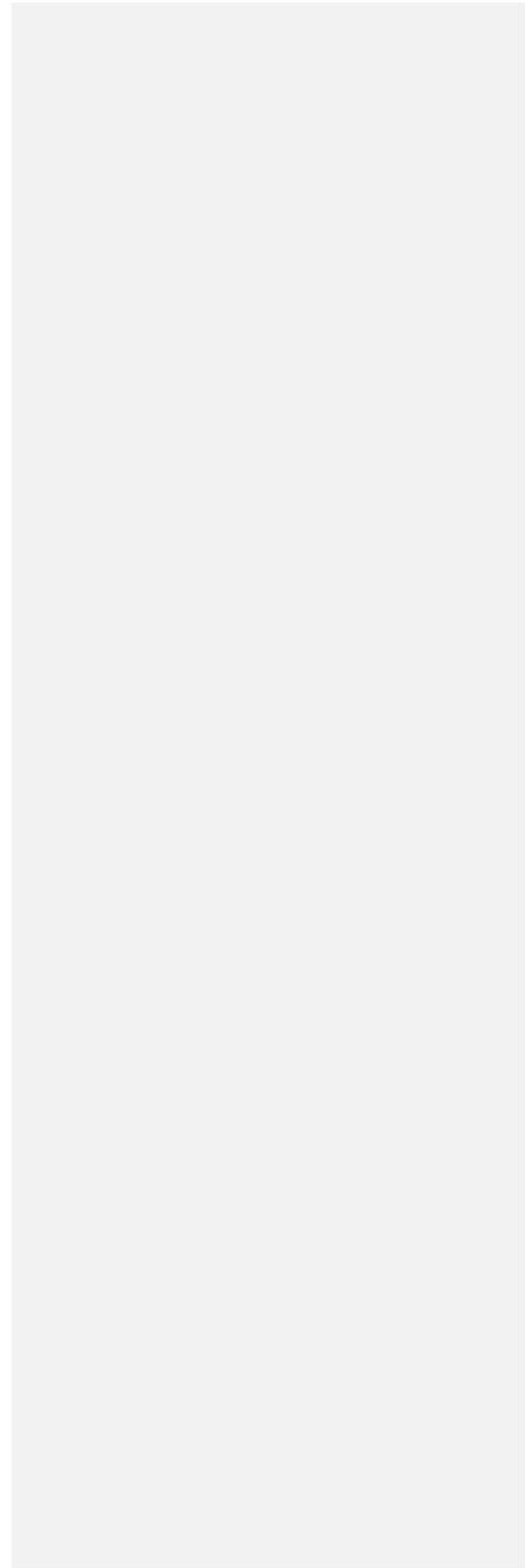
Cuadro 3. Necesidades de datos o información de las empresas forestales de reforestación entrevistadas y viabilidad del uso de VANTs para su obtención. **Caso de variables de con alta viabilidad de uso de VANTs**

Uso/Variable	Descripción	Requerimiento con uso de VANT	
		Datos de campo	Procesamiento

Videos de reporte o promoción	Un video de las plantaciones para enviar a dueños y socios de la empresa, promocional, o reporte para certificadoras	Vuelo no programado, el piloto define las áreas a volar según necesidades. Requiere piloto con experiencia y habilidades	Se requiere software de edición de video y audio, tal como kdenlive (software libre de video)
Modelo elevación terreno previo a siembra	DEM del terreno para luego poder evaluar fincas antes de comprar, o antes de la siembra para generar mapa de pendientes y estimar mejor las alturas de árboles a posteriori.	Vuelo programado, 3D, resolución o GSD a optimizar variando altura de vuelo y traslapes entre fotos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper®, WebODM®, Agisoft®), nubes de puntos, y DEM. Luego las curvas de nivel se generan con otro software como Qgis, o ArcGIS.
Área total por lote	Área en ha de lote total	Vuelo programado 3D en terrenos con pendiente, con una GSD definida según necesidad de precisión, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper®, WebODM®, Agisoft®), nubes de puntos, y DEM. Luego cálculo de áreas con otro software como Qgis, o ArcGIS.
Área efectiva de siembra por lote	Área efectiva de siembra, zonas de protección, e improductivas representadas en mapa.	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper®, WebODM®, Agisoft®), nubes de puntos, y DEM. Luego el cálculo de áreas con otro software como Qgis, o ArcGIS. Debe usar este software para digitalizar áreas o usar un segmentador de imágenes.

Mantenimiento inicial de lotes	Determinar áreas con o sin problemas de mantenimiento chapias, o rodajeas.	Vuelo programado, 2D, con una GSD "mediano" no se requiere de alta precisión. Puede hacerse integrado con otros vuelos si es necesario, caso contrario hacer en 2D para cubrir más área.	Se requiere software de procesamiento para generar un mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft). En el mosaico identificar las áreas con problemas de mantenimiento y puede calcular áreas digitalizando en Qgis o ArcGIS.
Áreas dañadas por vientos, fuego, y rayos	Identificar zonas con daños en un mapa y datos en cuadros	Vuelo programado, 2D, con una GSD "mediana" no se requiere de alta precisión. Puede hacerse integrado con otros vuelos si es necesario, caso contrario hacer en 2D para cubrir más área.	Se requiere software de procesamiento para generar un mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft). En el mosaico identificar las áreas con problemas de mantenimiento y puede calcular áreas delimitadas sobre el mosaico usando Qgis o ArcGIS.
Estado desarrollo	Identificar en mapas zonas de calidad baja y alta para la especie con diferencias de crecimiento, medido en altura de los árboles debido a calidad de sitio o deficiencias nutricionales, especialmente en los primeros años de la plantación (1 a 3).	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. Se requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego procesar en Qgis o ArcGIS para calcular las alturas de los árboles.
Control de ejecución de podas	Verificar que se haya hecho las podas en los lotes de plantación	Vuelo programado, 2D, con una GSD "mediana" no se requiere de alta precisión. Puede hacerse integrado con otros vuelos si es necesario, caso contrario hacer en 2D para cubrir más área.	Se requiere software de procesamiento para generar un mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft). En el mosaico identificar las áreas con problemas de mantenimiento y puede calcular áreas delimitadas sobre el mosaico usando Qgis o ArcGIS.

<p>Altura promedio de los árboles en el lote</p>		<p>Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. Se requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles.</p>	<p>Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego calcular las alturas de los árboles en Qgis o ArcGIS. Se puede mejorar la estimación usando datos de altura total medida en campo con las parcelas de muestreo que tiene cada empresa, y/o validar las estimaciones de altura calculada con drones.</p>
--	--	--	--



Cuadro 4. Necesidades de datos o información de las empresas forestales de reforestación entrevistadas y viabilidad del uso de VANTs para su obtención. **Caso de variables de mediana viabilidad de uso de VANTs**

Uso/Variable	Descripción	Requerimiento con uso de VANT	
		Datos de campo	Procesamiento
Números de árboles por área efectiva	Especialmente en proyectos de reforestación en los primeros años (1 a 4)	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft), nubes de puntos, y DEM. Luego identificar todos los árboles vivos y muertos, sobre el mosaico o con un algoritmo de procesamiento (a desarrollar). También se puede hacer parcelas de medición o muestreo sobre el orto-mosaico, y luego extrapolar a todo el lote. Así se obtiene el dato, pero se pierde la distribución espacial.
Mortalidad por área efectiva	Datos en cuadros y mapas de zonas de mortalidad, especialmente en los primeros años de la plantación (años 1 a 4)	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft), nubes de puntos, y DEM. Luego identificar todos los árboles vivos y muertos a "pie" o con un algoritmo de procesamiento en Qgis que identifique vacíos en la plantación comparando el DEM con el DSM y ubicar "huecos". También se puede hacer con parcelas de muestreo, sobre el orto-mosaico, esto genera el dato, pero no la distribución espacial.

Estado sanitario	Problema de sanidad identificando manchas o zonas con plagas o enfermedades en un mapa	Vuelo programado, 2D, con una GSD "mediana" no se requiere de alta precisión. Puede hacer integrado con otros vuelos si es necesario, caso contrario hacer en 2D para cubrir más área.	Se requiere software de procesamiento para generar un mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft). En el mosaico identificar las áreas con problemas de sanidad y puede calcular áreas delimitadas a "pie" en Qgis o ArcGIS. También se podría calcular índices con juegos de bandas RGB, o cambiar VANT o cámara para tener NIR, y calcular índices de vegetación.
Altura comercial de los árboles	Altura hasta un diámetro o altura definida por la empresa	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. SE requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego procesar en Qgis o ArcGIS para calcular alturas de los árboles. Con altura de los árboles se puede estimar altura comercial ya que están muy correlacionadas, pero se requiere un modelo de regresión de altura comercial (Hc) con altura total (Ht) con datos de campo que tiene la empresa.

Diámetro promedio de los árboles en el lote		Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. Se requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles.	Se requiere de software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego procesar en Qgis o ArcGIS para el cálculo de alturas de los árboles (Ht). Se requiere además de calcular diámetro de copa (Dc) en el orto-mosaico y con la Ht estimar el DAP, ya que está muy correlacionados. El modelo de regresión debe validarse con datos de campo que tiene la empresa, y con mediciones adicionales del proyecto.
Planificación y control de ejecución de raleos	Dar información para raleos y vuelos de verificación de raleos	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. Se requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles, y diámetros de copa, y hasta número de árboles	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego procesar en Qgis o ArcGIS para calcular alturas de los árboles, diámetros de copa, y conteo de árboles. Con altura de los árboles se puede estimar índice de espaciamiento u otro que permita determinar la necesidad de raleos.

Cuadro 5. Necesidades de datos o información de las empresas forestales de reforestación entrevistadas y viabilidad del uso de VANTs para su obtención. **Caso de variables de con baja viabilidad de uso de VANTs**

Uso/Variable	Descripción	Requerimiento con uso de VANT	
		Datos de campo	Procesamiento

Árboles vivos y productivos	Especialmente en proyectos SAF (años 1 a 3)	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft), nubes de puntos, y DEM. Luego identificar todos los árboles vivos y muertos, sobre el mosaico, o con un algoritmo de procesamiento (a desarrollar). También se puede hacer parcelas de medición o muestreo sobre el orto-mosaico, y luego extrapolar a todo el lote, pero no se tiene distribución espacial solo el dato.
Posición X y Y de los árboles en el lote	Tener las coordenadas de árboles, especialmente para proyectos de reforestación enfocados a una silvicultura con pocos árboles/ha, en donde se concentra el esfuerzo en los árboles individuales	Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos.	Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft), nubes de puntos, y DEM. Luego identificar todos los árboles, en el orto-mosaico o con un algoritmo que identifique copas (un segmentador), y polígonos por copa, luego calcular el centroide, y después calcular X y Y de cada centroide.

<p>Volumen comercial de aprovechamiento según trozas de un largo y mínimo diámetro requerido</p>		<p>Vuelo programado 3D, con una GSD definida según necesidad de precisión, para generar un orto-mosaico de calidad, y buenos traslapes que no dejen huecos. Se requiere el DEM y el DSM, para calcular alturas de los árboles, y diámetros de copa, y hasta número de árboles</p>	<p>Se requiere software de procesamiento para generar un orto-mosaico (Pix4Dmapper, WebODM, Agisoft) y los modelos DEM y DSM, para luego procesar en Qgis o ArcGIS el cálculo de alturas (Ht) de los árboles, diámetros de copa (Dc), y conteo de árboles. Con estos datos estimar DAP, y volumen comercial a diferentes especificaciones: Se requiere de un modelo de regresión dinámico en el que se pueda variar, largo de trozas, y diámetros comerciales. Con el proyecto habrá que desarrollar estos modelos usando datos de las empresas.</p>
--	--	---	--

## Referencias

- 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 29 junio-2019. <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/658>
- IFN-SINAC-MINAE. 2014. Manual de Campo para el inventario forestal nacional de Costa Rica: diseño de parcela, variables de sitio, y dasométricas. Vol. 2. Programa REDD-CCAD-GIZ. 78 p.
- FONAFIFO-MINAE. 2009. Manual de procedimientos para el pago de servicios ambientales. La Gaceta N°46 – Viernes 6 de marzo del 2009
- FONAFIFO-MINAE. 2019a. Resolución N° 010-2019 MINAE Alcance 40. La Gaceta del 20 de febrero del 2019.
- FONAFIFO-MINAE. 2019b. Resolución 167-2019. La Gaceta 138 del martes 23 de julio del 2019.
- INTECO . 2016. Metodología para la cuantificación y reporte de remociones de gases de efecto invernadero producto de actividades forestales. INTE/DN 03: 2016. San José, Costa Rica.
- Husch, B.; C. Miller and T. Beers. 1982. Forest Mensuration. Third Ed. Willey & Sons, New York).
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. 2008. Remote sensing and image interpretation (6th edn). Hoboken, NJ, John Wiley & Sons. 749 p.
- Ortiz-Malavasi, E. 2010. Crecimiento y Rendimiento Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 94 p.
- Panagiotidis, D.; Abdollahnejad, A. and Surovy-Vasco-Chiteculo, P. 2017. Determining tree height and crown diameter from high resolution UAV imagery. IJRS, 38: 8-10, 2392-2410. DOI:10.1080/014311161.2016.1264028.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., Real, P. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. GTZ-IICA. San José, Costa Rica. 586 p.

Anexo 2. Tesis de Maestría del Ing. Javier Hernández Cole. Resumen

UTILIZACIÓN DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN LA  
EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO DE PLANTACIONES  
FORESTALES DE *GMELINA ARBOREA*, *TECTONA GRANDIS* Y MIXTAS.

Javier Hernández Cole<sup>9</sup>

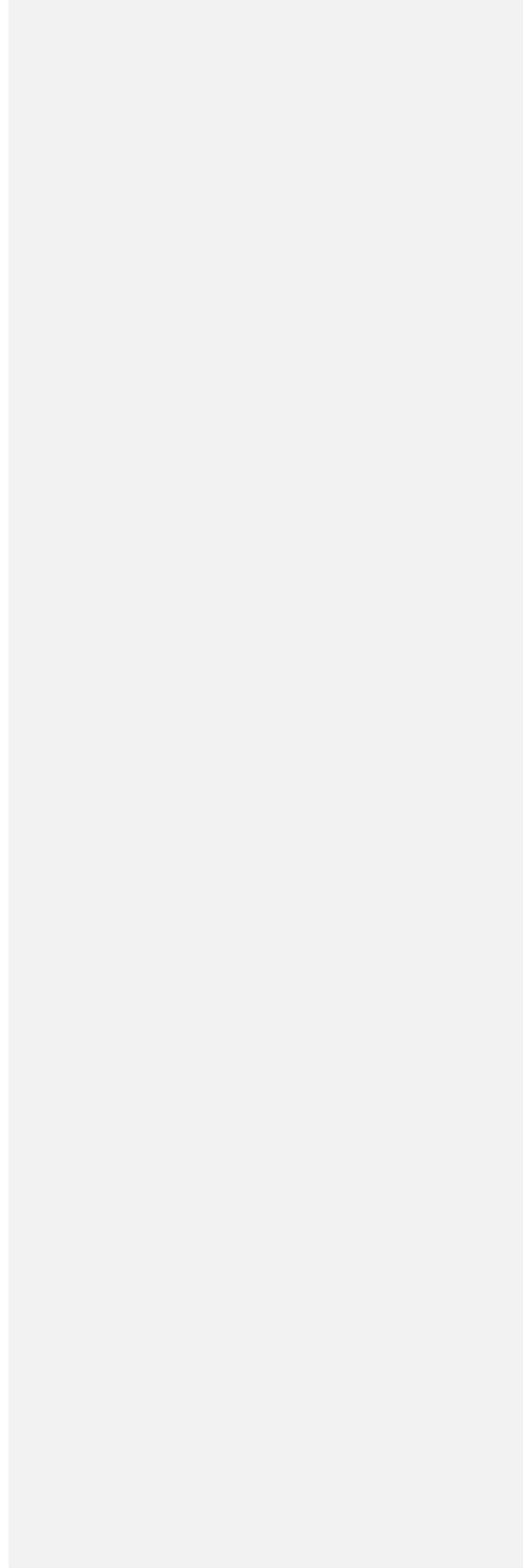
RESUMEN

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) 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 *Pix4Dmapper*® 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 orto-mosaicos 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 es, 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 (VANT) para el monitoreo de plantaciones forestales en Costa Rica.

---

<sup>9</sup> Hernández Cole, J. (2021). Utilización de vehículos aéreos no tripulados (VANT) 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.

**Anexo 3. 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.**





**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**

Javier Hernández Cole  
Mario Guevara Bonilla  
Andrea Tapia Arenas  
Verónica Villalobos Barquero  
Edgar Ortiz Malavasi

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Generalidades .....	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Introducción y objetivos del protocolo .....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Definiciones.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3. Calibración del equipo.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4. Revisión de condiciones atmosféricas .....	¡Error! Marcador no definido.
1.5. Permisos de vuelo .....	¡Error! Marcador no definido.
1.6. Reporte de la información obtenida en campo .....	¡Error! Marcador no definido.
2. Utilización de VANT para el monitoreo de variables generales de la plantación forestal. ¡Error!	¡Error! Marcador no definido.
2.1. Planificación de vuelo.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1. Planificación de vuelo programado.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2. Combinación de parámetros de planificación de vuelos¡Error!	Marcador no definido.
2.2. Procesamiento de la información .....	¡Error! Marcador no definido.
2.3. Análisis de la información .....	¡Error! Marcador no definido.
3. Utilización de VANT para el monitoreo de variables dasométricas de la plantación. ....	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Planificación de vuelo.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1.1. Planificación de vuelo programado.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1.2. Combinaciones óptimas de parámetros de planificación de vuelos¡Error!	Marcador no definido.
3.2. Captura de la información y procesamiento de la información¡Error!	Marcador no definido.
3.2.1. Creación del modelo digital del terreno, modelo digital de superficie y modelo de elevación digital. ....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2. Recomendaciones .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3. Análisis de la información .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1. Altura de los árboles.....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.2. Diámetro de los árboles .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.3. Volumen .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.4. Biomasa .....	¡Error! Marcador no definido.
3.3.5. Zonificación de plantaciones forestales .....	¡Error! Marcador no definido.

4. Referencias bibliográficas ..... ¡Error! Marcador no definido.

