

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Carrera de Agronomía

Evaluación de la técnica Structure from Motion para estimar parámetros de arquitectura arbórea


Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Agrónomo

Autor:

Byron Vinicio Sigua Vizhco

Director:

Juan Pablo Ñamagua Uyaguari

ORCID:  0000-0001-9975-2138

Cuenca, Ecuador

2025-08-05

Resumen

La fotogrametría basada en la técnica Structure from Motion (SfM) se presenta como una alternativa viable y accesible frente a métodos como el LiDAR para inventarios forestales, al permitir la reconstrucción tridimensional mediante cámaras comunes con menor costo y mayor flexibilidad. Este estudio evaluó la aplicabilidad de la fotogrametría aérea y terrestre, utilizando drones y teléfonos móviles, además de desarrollar un flujo de trabajo sencillo y funcional. Se aplicaron cinco tratamientos: T0 (medición directa en campo mediante métodos no destructivos), T1 (captura con sensor LiDAR de iPhone), T2 (fotografías aéreas con dron RGB), T3 (fotografías terrestres con teléfono móvil) y T4 (fotografías aéreas con distintas configuraciones). Las variables analizadas incluyeron altura total, altura de copa, volumen de fuste, volumen de copa, área de copa, diámetro a la altura del pecho (DAP) y biomasa aérea. En ambos tipos de fotogrametría, los resultados evidenciaron que no existe un modelo óptimo único para todas las variables, por lo que la selección del modelo más adecuado depende del parámetro específico a estimar. En fotogrametría aérea, el Modelo 1 mostró mejor desempeño en volumen de fuste, DAP y biomasa aérea; el Modelo 2 fue más preciso en altura total, altura de copa y volumen de copa; mientras que el Modelo 3 destacó en el cálculo del área de copa. En fotogrametría terrestre, el Modelo 3 se caracterizó por una mayor densidad de puntos y precisión en altura de copa y DAP; el Modelo 4 sobresalió en altura total; el Modelo 1 en volumen y área de copa, así como en volumen de fuste; y el Modelo 2 en biomasa aérea. El flujo de trabajo desarrollado permitió realizar las estimaciones de manera eficaz, y se observaron diferencias estadísticamente significativas únicamente en biomasa aérea entre los tratamientos. En conclusión, la técnica SfM constituye una alternativa precisa, viable y metodológicamente robusta frente a los métodos tradicionales para inventarios forestales, especialmente en contextos donde se busca optimizar recursos sin comprometer la calidad de los resultados.

Palabras clave del autor: arquitectura arbórea, inventario forestal, estructura del movimiento



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Photogrammetry based on the Structure from Motion (SfM) technique presents itself as a viable and accessible alternative to methods such as LiDAR for forest inventories, allowing three-dimensional reconstruction using common cameras at lower cost and with greater flexibility. This study evaluated the applicability of aerial and terrestrial photogrammetry, using drones and mobile phones, as well as developing a simple and functional workflow. Five treatments were applied: T0 (direct field measurement using non-destructive methods), T1 (capture with iPhone LiDAR sensor), T2 (aerial photographs with an RGB drone), T3 (terrestrial photographs with a mobile phone), and T4 (aerial photographs with different configurations). The variables analyzed included total height, crown height, stem volume, crown volume, crown area, diameter at breast height (DBH), and aboveground biomass. In both types of photogrammetry, results showed that there is no single optimal model for all variables; thus, the selection of the most appropriate model depends on the specific parameter to be estimated. In aerial photogrammetry, Model 1 showed the best performance in stem volume, DBH, and aboveground biomass; Model 2 was more accurate for total height, crown height, and crown volume; while Model 3 stood out in calculating crown area. In terrestrial photogrammetry, Model 3 was characterized by higher point density and precision in crown height and DBH; Model 4 excelled in total height; Model 1 in crown volume, crown area, and stem volume; and Model 2 in aboveground biomass. The developed workflow allowed effective estimation, with statistically significant differences observed only in aboveground biomass among treatments. In conclusion, the SfM technique constitutes a precise, viable, and methodologically robust alternative to traditional methods for forest inventories, especially in contexts where optimizing resources without compromising result quality is a priority.

Author Keywords: Tree architecture, Forest inventory, Structure from Motion (SfM)



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Introducción.....	7
1. Objetivos	8
1.1 Objetivo General.....	8
1.2 Objetivos Específicos	8
2. Revisión bibliográfica	8
2.1 Contexto histórico	8
2.2 Inventarios forestales	8
2.3 Definición de arquitectura arbórea	9
2.4 Importancia en estudios ecológicos, forestales, agronómicos.....	10
2.5 Métodos de medición	10
2.6 Limitaciones de la medición tradicional.....	11
2.7 Altimetría láser.....	11
2.8 Fotogrametría	12
2.9 Fotogrametría aérea con drones (UAV).....	12
2.10 Fotogrametría terrestre con smartphones.....	13
2.11 Estructura a partir del Movimiento (<i>Structure from Motion, SfM</i>).....	13
2.12 Principios del SfM: detección de puntos clave, emparejamiento, nube de puntos, reconstrucción 3D.....	14
2.13 Software.....	15
3. Materiales y métodos	16
3.1 Área de estudio	16
3.2 Materiales	18
3.3 Metodología	20
3.3.2 Parámetros de Captura	22
3.3.3 Procedimiento de captura de imágenes	23
3.3.4 Mediciones dasométricas convencionales	25
3.3.5 Procesamiento de datos	27
3.4 Análisis estadístico	28
3.5 Facilidad de uso	30

4.	Resultados	30
4.1	Objetivo específico 1: Fotogrametría aérea	30
4.2	Resultados generales de la adquisición de imágenes	30
4.2.1	Diferencias en los parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría aérea 31	
4.3.1	Resultados generales de la adquisición de imágenes	39
4.3.2	Diferencias en los parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría terrestre 40	
4.3.3	Fotogrametría terrestre 2.....	49
4.4	Objetivo 3: Flujo de trabajo	50
4.4.1	Tiempo de captura y procesamiento	51
4.4.2	Facilidad de uso.....	52
4.5	Costos	53
4.6	Aplicabilidad	53
5.	Discusiones.....	54
6.	Conclusión	59
7.	Recomendaciones	60
8.	Referencias	61

Índice de figuras

Figura 1. Imágenes superpuestas.....	14
Figura 2. Distribución de árboles en el área de estudio (A-E).....	16
Figura 3. Representación visual de los árboles de estudio.....	17
Figura 4. Representación del diseño experimental.....	22
Figura 5. Nube de puntos generada a partir de fotografías de UAV.....	33
Figura 6. Nube de puntos generada a partir de fotografías de Celular.....	42
Figura 7. Flujo de trabajo para la estimación de parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría terrestre y aérea.....	51
Figura 8. Puntaje SUS por método.....	52

Introducción

La biodiversidad es crucial para la supervivencia humana por los servicios ecosistémicos esenciales que proporciona (Rawat & Agarwal, 2015; Prieto & Bahillo, 2015; Coker, 2017). Ecuador, uno de los países más biodiversos, destaca por su biodiversidad en plantas vasculares (Yang et al., 2020; Roy et al., 2018; Cuesta et al., 2017). Sus bosques tropicales andinos, con alta biodiversidad y endemismo, forman parte de los centros más ricos en plantas del mundo (Barthlott et al., 2005) y "hotspots" con numerosos microhábitats y diversas comunidades de plantas gracias a la accidentada topografía que posee (Homeier et al., 2010).

Sin embargo, la biodiversidad disminuye globalmente debido al cambio climático y las perturbaciones antropogénicas, especialmente en Ecuador, que posee el segundo mayor número de especies amenazadas a nivel global, con 1,954 especies de plantas en peligro (Gatiso et al., 2022; Santos et al., 2020; Farooqi et al., 2022; Kleemann et al., 2022). Detener esta pérdida se ha convertido en una prioridad y para ello se requiere comprender la complejidad de los ecosistemas y esfuerzos coordinados para la conservación en Ecuador (Caldwell et al., 2024; Meffe et al., 2012; Kleemann et al., 2022).

Dentro de este contexto, los bosques, que cubren aproximadamente un tercio de la superficie terrestre global (FAO, 2020), desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad (Heym et al., 2021). En Ecuador, la gestión forestal es una estrategia clave que incluye actividades para la conservación y uso ordenado de los recursos forestales, satisfaciendo las necesidades actuales y futuras de la sociedad (Homeier et al., 2010; Jadán et al., 2017).

Los inventarios forestales, esenciales para la gestión forestal, son herramientas significativas para obtener información sobre la extensión, estado y condición de las superficies forestales en una región (Chirici et al., 2011). No obstante, la disponibilidad de datos en los inventarios forestales sigue siendo un problema debido a limitaciones espaciales, temporales y costos elevados asociados con las técnicas de recolección de datos (Heym et al., 2021).

En este marco, la implementación de métodos alternativos para la obtención de datos tiene aplicaciones importantes en el inventario forestal y la gestión urbana (Fan et al., 2020). Las tecnologías de detección remota, como la fotogrametría, ofrecen una oportunidad para obtener datos de los árboles, como su forma y tamaño, así como diferentes componentes de los árboles. Aunque se perciben como alternativas más económicas a métodos actuales como

el LiDAR, aún hay cuestionamientos sobre su precisión y fiabilidad en contextos específicos (Burt et al., 2021).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluación de la técnica *Structure from Motion* para estimar parámetros de arquitectura arbórea.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la aplicabilidad de la fotogrametría terrestre para estimar variables dasométricas en árboles.
- Evaluar la aplicabilidad de la fotogrametría aérea para estimar variables dasométricas en árboles.
- Desarrollar un flujo de trabajo para la estimación de variables dasométricas con smartphones y drones.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Contexto histórico

El estudio de la morfología y estructura de los árboles se remonta a los estudios de Leonardo da Vinci quien mencionó que el área transversal de las ramas se mantenía constante a lo largo de los distintos niveles de ramificación (Dorji et al., 2021). De igual manera se profundizó en la noción de arquitectura arbórea, subrayando su relevancia en la ecología y en las estrategias adaptativas de los árboles. La arquitectura vegetal ha sido reconocida desde tiempos tempranos como un objeto de indagación científica de notable importancia (Hallé & Oldeman, 1970; Halle et al., 1998; Dorji et al., 2021).

2.2 Inventarios forestales

Un inventario forestal se conceptualiza como un proceso estructurado y metódico orientado a la recopilación de información tanto cuantitativa como cualitativa sobre los recursos forestales presentes en una región específica. Este procedimiento constituye una herramienta esencial para diagnosticar las condiciones actuales del ecosistema, al tiempo que suministra los datos fundamentales que sustentan los procesos de análisis y planificación necesarios

para promover una gestión forestal sostenible. La importancia de esta práctica radica en que la toma de decisiones fundamentadas exige la disponibilidad de datos confiables, consistentes y validados, lo que implica la necesidad de instaurar un ciclo permanente de recolección de información, formulación de estrategias y evaluación sistemática de los resultados alcanzados (Morales & Piazza, 2025).

Los inventarios forestales constituyen instrumentos fundamentales para describir la composición específica, las dimensiones morfométricas, el estado de desarrollo y la distribución espacial de los individuos arbóreos, consolidándose como herramientas indispensables tanto para el avance del conocimiento en ecología teórica como para respaldar los procesos de toma de decisiones en la gestión forestal (Hubbell et al., 1999; Whittaker, 1956; Wright et al., 2010; Lasky et al., 2014; Young et al., 2020, 2022; North et al., 2021). Tradicionalmente, la ejecución de estos inventarios se ha llevado a cabo mediante brigadas de muestreo terrestre, un enfoque que implica elevadas demandas de tiempo, esfuerzo humano y recursos económicos (Gray et al., 2012; Young et al., 2022).

En este marco, la disponibilidad de información precisa y detallada sobre las características de los bosques se rige como un requisito esencial para garantizar una gestión forestal eficaz. Dicha información abarca no solo las variables dendrométricas básicas propias de los inventarios, como el diámetro a la altura del pecho, la altura total de los árboles y la composición específica, sino también parámetros estructurales más complejos del ecosistema forestal, tales como el volumen de copa, el área basal, los índices de rodal y el índice de área foliar (Díaz-Varela et al., 2015; Fernández et al., 2018; Nasiri et al., 2021).

2.3 Definición de arquitectura arbórea

La arquitectura arbórea se concibe como la configuración relativa y la organización espacial de las diversas estructuras que componen un individuo (Barthélémy & Caraglio, 2007; MacFarlane & Kane, 2017); en otras palabras, corresponde a la morfología general que caracteriza a un árbol (Basantés et al., 2019). Tradicionalmente, este concepto ha sido asociado con la representación de la forma o con el patrón de crecimiento adoptado por un espécimen de una especie determinada cuando se desarrolla bajo condiciones óptimas. Sin embargo, una perspectiva alternativa del término se enfoca en el estudio de los atributos geométricos y la disposición estructural del organismo (Gazda & Kędra, 2017; Sievänen et al., 2014).

2.4 Importancia en estudios ecológicos, forestales, agronómicos

La arquitectura arbórea representa un componente esencial para la interpretación de los rasgos vinculados a la historia de vida de las especies forestales, así como para la comprensión de las dinámicas que determinan las configuraciones estructurales y funcionales dentro de los ecosistemas boscosos (Valladares & Niinemets, 2008; MacFarlane & Kane, 2017). La heterogeneidad morfológica observada entre los árboles guarda una relación intrínseca con la diversidad funcional, dado que los atributos arquitectónicos proporcionan información crucial sobre las interacciones entre la estructura del árbol y procesos fundamentales como la conducción hidráulica (Smith et al., 2014), la captación de luz (MacFarlane & Kane, 2017) y la estabilidad biomecánica (Jackson et al., 2021).

La obtención precisa de la morfología arbórea permite realizar análisis detallados de estas relaciones estructura-función, constituyendo una herramienta valiosa para profundizar en el estudio de las funciones ecológicas y los mecanismos adaptativos de las especies en los ecosistemas forestales (Yang et al., 2024), lo que a su vez resulta útil para la estimación de la biomasa aérea (Forrester et al., 2017).

La caracterización de los patrones de crecimiento estructural de los árboles reviste una importancia considerable, ya que abarca implicaciones que van desde las respuestas individuales de los árboles frente a las presiones ambientales, hasta su papel en el funcionamiento integral de los bosques dentro de los procesos ecosistémicos terrestres (Wessels et al., 2019).

2.5 Métodos de medición

Los métodos empleados para la medición de rasgos arquitectónicos en árboles pueden agruparse en dos grandes categorías: destructivos y no destructivos, así como en enfoques directos o indirectos. Las técnicas destructivas, si bien ofrecen una precisión elevada al obtener las mediciones de forma directa, presentan la desventaja de que no permiten replicar las mediciones una vez realizado el muestreo. En contraste, en la actualidad se dispone de tres principales tipos de métodos no destructivos: las técnicas fundamentadas en la observación visual, la captura de imágenes mediante fotogrametría y el escaneo láser (Rodríguez, 2013).

Las técnicas visuales continúan siendo ampliamente utilizadas en los inventarios forestales, dado que permiten obtener mediciones básicas como la altura total del árbol (H), la longitud

de la copa (CL), los diámetros de la copa (DAP) y el ancho de la copa (CW), empleando instrumentos sencillos tales como cintas métricas e hipsómetros. Por su parte, los métodos basados en imágenes y en tecnología láser corresponden a técnicas de teledetección, cuyos orígenes se remontan a los siglos XIX y XX, asociados al desarrollo de la fotogrametría y del LiDAR (detección de luz y distancia), respectivamente (Jiménez et al., 2017).

2.6 Limitaciones de la medición tradicional

Las metodologías convencionales de medición en campo han demostrado ser altamente precisas para la validación científica (Päivinen et al., 2009). No obstante, los elevados costos operativos, tanto en términos de recolección de datos como de recursos financieros, limitan considerablemente su aplicabilidad a gran escala (Kang et al., 2017). De manera tradicional, ciertas variables deben registrarse de forma manual, lo que implica procesos arduos, prolongados y susceptibles a errores, especialmente dada la gran cantidad de individuos arbóreos que suelen requerir medición (Sangjan & Sankaran, 2021).

En contextos de bosques densos, el observador enfrenta frecuentes dificultades para visualizar con claridad la copa o el ápice del árbol. En estas circunstancias, es necesario desplazarse alrededor del ejemplar y ajustar la distancia de observación para lograr una visibilidad adecuada de la parte superior. Estas complicaciones se intensifican cuando hay presencia de viento que mueve las copas. De hecho, en jornadas con vientos intensos, la realización de mediciones de altura resulta prácticamente inviable (West, 2015).

2.7 Altimetría láser

La altimetría láser, comúnmente denominada Light Detection And Ranging (LiDAR), constituye una técnica de teledetección activa que permite calcular distancias a partir del producto entre la velocidad de la luz y el tiempo que demora un pulso láser en alcanzar un objeto y regresar al sensor. Actualmente, la mayoría de los sistemas LiDAR operan bajo el principio de medición por pulso. Según Wehr y Lohr (1999), solo se ha reportado un único escáner láser aerotransportado de onda continua (CW) disponible de manera comercial. En consecuencia, los láseres de onda continua no son utilizados en aplicaciones de LiDAR para el ámbito forestal, y, por tanto, todas las referencias posteriores a sistemas LiDAR deben entenderse en el contexto de tecnologías basadas en pulsos. Esta tecnología ha sido ampliamente aplicada en ecosistemas forestales para la obtención de nubes de puntos de alta densidad, a partir de las cuales es posible derivar Modelos Digitales de Elevación (DEM) de alta resolución (Balzter et al., 2007; Lindberg & Hollaus, 2012; Nasiri et al., 2021).

2.8 Fotogrametría

La fotogrametría se define como la disciplina que combina arte, ciencia y tecnología para obtener información precisa y confiable sobre objetos físicos y su entorno, a través de la captura, medición e interpretación de imágenes fotográficas. Permite medir objetos tridimensionales y elementos del terreno a partir de imágenes bidimensionales, aplicándose en la obtención de coordenadas, cálculo de distancias, alturas, áreas, volúmenes, y en la elaboración de mapas topográficos, modelos digitales de elevación y ortofotografías. Se distinguen dos categorías principales: la fotogrametría aérea, que utiliza cámaras en plataformas voladoras, y la terrestre, que emplea cámaras en trípodes o de forma manual (Ebert, 2015).

2.9 Fotogrametría aérea con drones (UAV)

Uso de drones en estudios de arquitectura arbórea

Una de las principales aplicaciones de los UAVs es la estimación de la altura de las plantas, utilizando modelos digitales de superficie (DSM) generados a partir de técnicas fotogramétricas basadas en la estructura desde el movimiento (SfM), que emplean fotografías superpuestas tomadas desde diversos ángulos (Zarco-Tejada et al., 2014; Jiménez et al., 2017). Además, se ha demostrado su efectividad en el análisis de la estructura forestal a diferentes escalas, incluyendo la expansión espacial de parcelas de inventario forestal mediante datos de campo. Los UAV fotogramétricos ofrecen una solución accesible y económica para el análisis estructural de los árboles, aunque con una resolución espectral y estructural más limitada (Fakhri & Latifi, 2021).

En este ámbito, también se han utilizado UAVs para describir la morfología arbórea (Lisein et al., 2013; Wallace et al., 2014), aunque la precisión de los resultados depende de factores como el diseño del plan de vuelo, la calidad de los sensores, los parámetros de procesamiento, las características de la superficie forestal y el tipo de plataforma (Zgaren et al., 2023). Tanto la detección remota como la fotogrametría, cuando se integran con técnicas SfM, muestran beneficios claros, evidenciados en estudios previos. Aunque los UAV comerciales vuelan a baja altitud, lo que mejora la resolución de los modelos SfM al capturar más detalles topográficos, esto reduce la cobertura espacial en comparación con tecnologías como el LiDAR aerotransportado (Smith et al., 2016).

2.10 Fotogrametría terrestre con smartphones

La fotogrametría terrestre implica la captura de imágenes de alta calidad de árboles, las cuales pueden ser utilizadas para realizar mediciones precisas (Tommaselli & Reiss, 2005; Gazda & Kędra, 2017). Las imágenes empleadas en este tipo de procesamiento pueden ser obtenidas con una variedad de sistemas de cámaras, lo que introduce una considerable variabilidad en la calidad de las imágenes resultantes (Thoeni et al., 2014).

Sin embargo, estudios comparativos entre cámaras económicas y básicas, como las de teléfonos inteligentes o cámaras compactas, y cámaras réflex digitales (DSLR) de gama alta, no han mostrado diferencias significativas en la calidad de las nubes de puntos obtenidas a distancias cortas (Micheletti et al., 2015). La determinación de los parámetros intrínsecos de la cámara es más sencilla cuando se emplean lentes gran angulares (aproximadamente equivalentes a 35 mm en cámaras SLR tradicionales), mientras que lentes con distancias focales mayores (>55 mm) o los de tipo ojo de pez requieren modelos de calibración específicos (Micusik & Pajdla, 2006; Smith et al., 2016).

2.11 Estructura a partir del Movimiento (*Structure from Motion, SfM*)

La técnica de Estructura a partir del Movimiento (SfM) surgió de la combinación de la fotogrametría y la visión por computadora, lo que permitió integrar precisión y automatización, creando una herramienta versátil con una amplia gama de aplicaciones (Pierrot & Clery, 2011). Un análisis realizado en la base de datos Web of Science (WoS) mostró más de 3000 publicaciones desde 1980, destacando su aplicabilidad en más de 125 áreas del conocimiento, incluida la teledetección (Bolles et al., 1987; Zhu et al., 2018).

SfM es un método fotogramétrico innovador que facilita la reconstrucción automatizada de modelos tridimensionales (3D) a partir de imágenes bidimensionales (2D) (Westoby et al., 2012). Su creciente adopción se debe a cuatro factores clave: (1) alta precisión espacial y capacidad para capturar datos en diferentes momentos, (2) reducción de costos y rapidez, (3) facilidad de implementación y (4) la posibilidad de incluir a la ciudadanía en la recolección de datos (Carrivick et al., 2016). Esta técnica permite generar nubes de puntos con una densidad y precisión similares a las de los escáneres láser, pero a un costo mucho más bajo (Westoby et al., 2012).

El uso de dispositivos accesibles, como cámaras convencionales o teléfonos móviles, ha contribuido significativamente a la reducción de los costos operativos (Micheletti et al., 2015; Prosdociami et al., 2017). No obstante, factores como el diseño del levantamiento y la cantidad

de puntos de control empleados pueden influir considerablemente en el presupuesto total del proyecto (Cook, 2017; James et al., 2017).

2.12 Principios del SfM: detección de puntos clave, emparejamiento, nube de puntos, reconstrucción 3D.

El principio de funcionamiento de SfM se basa en fundamentos similares a los de la fotogrametría estereoscópica: la estructura tridimensional se reconstruye a partir de una secuencia de imágenes que se superponen y se capturan desde distintas posiciones (Figura 1) (Westoby et al., 2012).

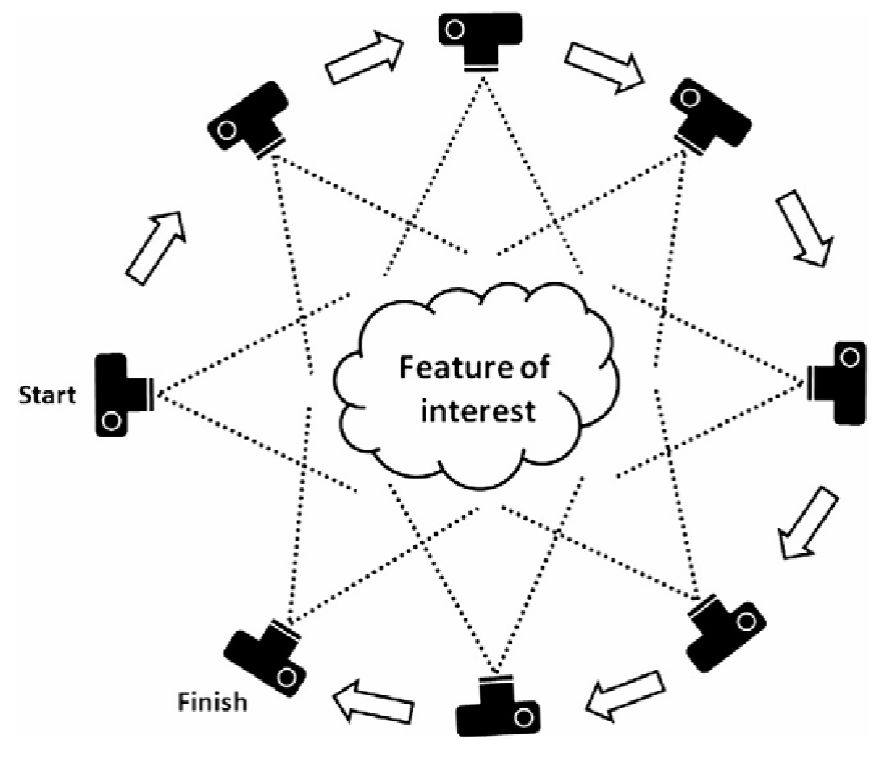


Figura 1. *Imágenes superpuestas*

Fuente: (Westoby et al., 2012).

A diferencia de los métodos fotogramétricos tradicionales, que requieren conocer previamente la posición 3D de la cámara o de puntos de control para reconstruir una escena, SfM permite estimar simultáneamente la geometría tridimensional y la orientación de la cámara sin necesidad de datos GCP iniciales. Esto se logra a través de la detección automática de características coincidentes en múltiples imágenes, las cuales se rastrean entre sí, debido a que cada característica coincidente está coloreada, la textura de la escena como un conjunto de valores rojo-verde-azul (RGB) se registra fácilmente lo que permite

realizar estimaciones iniciales de las posiciones de la cámara y las coordenadas de los objetos que luego se refinan de manera iterativa mediante la minimización de mínimos cuadrados no lineal (Snavely, 2011; Smith et al., 2016).

2.13 Software

Existen diversos paquetes de software para la generación de modelos SfM, que varían entre servicios web, programas de código abierto y soluciones comerciales. Entre los servicios web gratuitos destacan Autodesk 123DCatch y Microsoft Photosynth, ambos con versiones móviles y de escritorio. Sin embargo, sus capacidades de posprocesamiento son limitadas, por lo que suelen requerir la exportación de resultados a programas adicionales como Meshlab. Para generar nubes densas con Photosynth, se suelen utilizar herramientas como PMVS2 (Fonstad et al., 2013; James & Varley, 2012). Ambos servicios han sido utilizados en aplicaciones de geografía física (Gómez-Gutiérrez et al., 2014; Micheletti et al., 2015). ARC3D, por su parte, se ha empleado principalmente en el ámbito del patrimonio cultural (Smith et al., 2016).

En el ámbito de los paquetes de código abierto, se utilizan herramientas como *Bundler* para obtener nubes dispersas (K. Snavely, 2011; N. Snavely et al., 2008) y PMVS2 para generar nubes densas (Furukawa et al., 2010; James & Robson, 2012). Aunque *Bundler* tiene limitaciones, como la falta de aprovechamiento de GPU y su modelo simplificado de cámara, programas como *VisualSfM* integran *Bundler*, *CMVS* y *PMVS* en una sola interfaz, mejorando la eficiencia computacional. *MicMac*, por otro lado, ofrece un flujo de trabajo completo que permite una calibración detallada de la cámara y la integración de GCPs para lograr una reconstrucción precisa (Ouédraogo et al., 2014; Stumpf et al., 2015). *Ecosynth* es otra herramienta libre enfocada principalmente en la cartografía de vegetación (Zahawi et al., 2015).

En cuanto al software comercial, *Agisoft Photoscan* (ahora *Metashape*) es una de las herramientas más utilizadas debido a su interfaz accesible (Javernick et al., 2016; Leon et al., 2015; M. W. Smith, 2014). *Pix4D Mapper* ha sido empleado en estudios de erosión, destacándose en el ajuste de bloques, aunque presenta menor rendimiento en emparejamiento denso y ortofotos (Castillo et al., 2012; Eltner et al., 2015; Unger et al., 2014). *Eos PhotoModeler Scanner* también se ha utilizado en investigaciones de geografía física (Irvine-Fynn et al., 2014; Micheletti et al., 2015). Otros programas comerciales, como *Autodesk ImageModeler* y *D-Sculptor*, requieren mayor experiencia técnica en fotogrametría.

Para la visualización y edición de nubes de puntos, herramientas de código abierto como *Meshlab* y *CloudCompare* son muy utilizadas por sus completas funcionalidades. Alternativamente, los resultados de SfM-MVS pueden integrarse en software de escaneo láser terrestre, como *Leica Cyclone* o *RiSCAN PRO* (Smith et al., 2016).

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en el parque El Paraíso de la ciudad de Cuenca, en las coordenadas UTMX: 723481 y UTM Y: 9677990 a 2491 m s.n.m en el período comprendido entre diciembre y marzo del ciclo 2023-2024.

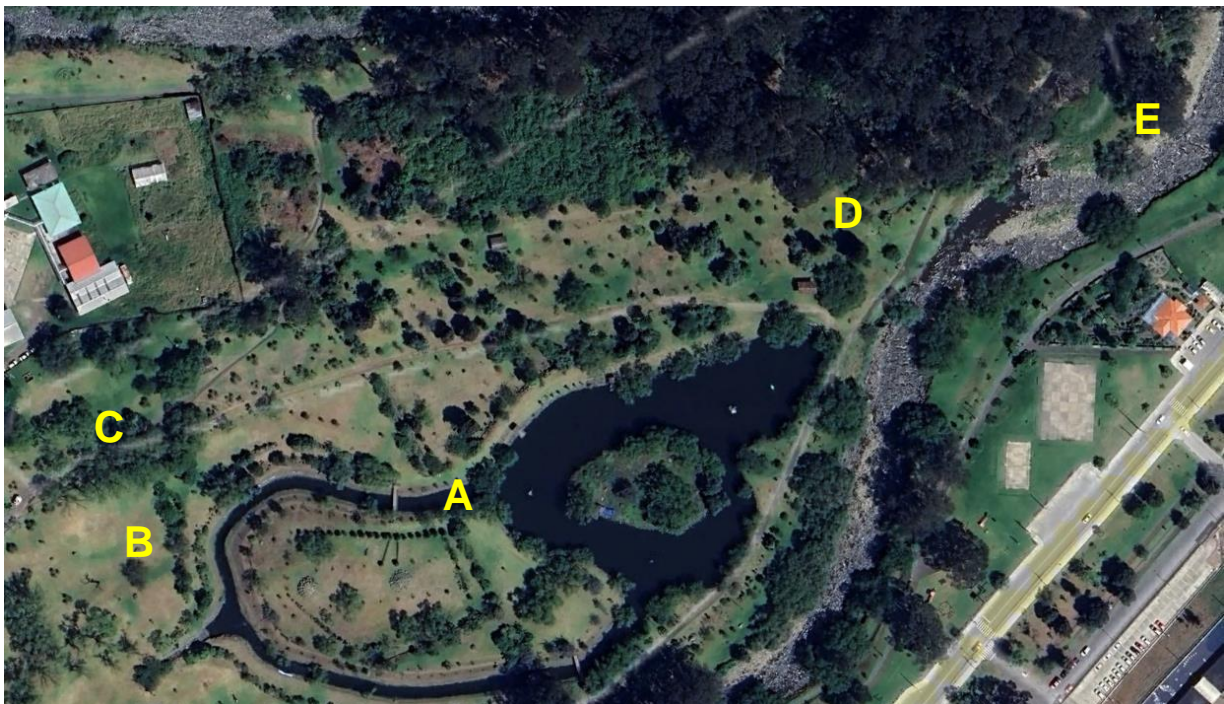


Figura 2. Distribución de árboles en el área de estudio (A-E).

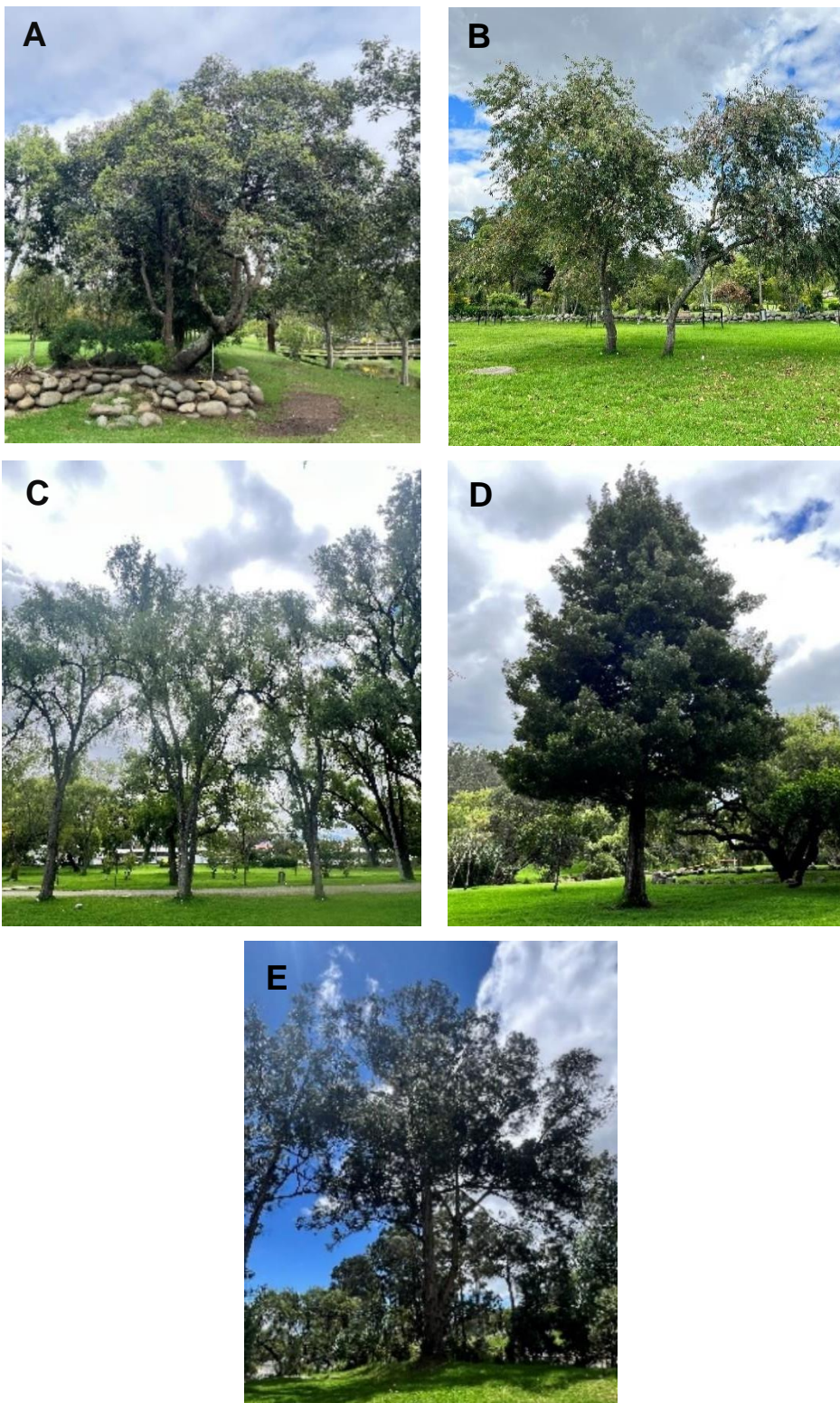


Figura 3. Representación visual de los árboles de estudio

3.2 Materiales

Se emplearon diversos equipos e instrumentos ópticos, referenciales y de medición. El inventario detallado figura en la Tabla 1. Las especificaciones técnicas de los dispositivos principales de captura incluyendo características generales y parámetros EXIF para el análisis fotogramétrico se presentan en las Tablas 2 y 3. Asimismo, las propiedades del sensor LiDAR del iPhone 13 Pro Max se describen en la Tabla 4, y la densidad de puntos estimada en función de la distancia de escaneo se resume en la Tabla 5.

Tabla 1. Listado de equipos e instrumentos utilizados.

Unidad	Equipos e instrumentos
1	Computadora
1	Dron DJI Air 2s
1	iPhone 13 Pro Max
1	iPhone 6s
1	GPSMAP 65s Garmin
1	Trípode
1	Cinta diamétrica
1	Cinta métrica
20	Esferas de espuma Flex
5	Lonas de control
1	Clinómetro Suunto

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los equipos óptico/referencial utilizados.

Equipo	Característica	Especificaciones principales
Dron DJI Air 2S	Sensor	CMOS de 1 pulgada, 20 MP
	Resolución de imagen	5472 x 3648 píxeles
	GPS	GNSS (GPS+GLONASS+Galileo)
	Autonomía de vuelo	Aprox. 31 minutos

iPhone 13 Pro Max	Cámara principal	Triple cámara 12 MP (Ultra gran angular, Gran angular y Teleobjetivo)
	Resolución máxima de foto	4032 x 3024 píxeles
	GPS	A-GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou
GPSMAP 65s Garmin	Precisión de posicionamiento	<3 m con GPS / <1.8 m con GNSS (GPS + GLONASS + Galileo)
	Sensores adicionales	Altímetro barométrico, brújula electrónica de 3 ejes
	Autonomía	Hasta 16 horas con dos baterías AA
	Resistencia	IPX7 (resistente al agua)

Tabla 3. Especificaciones técnicas y parámetros EXIF relevantes de los equipos utilizados

Equipo	Especificación / EXIF	Valor / Detalle
Dron DJI Air 2S	Longitud focal (real)	8.4 mm
	Punto F (Apertura)	f/2.8 fijo
	ISO automático	100–3200 (foto), 100–12800 (video)
	Tiempo de exposición	1/8000 – 8 s
	Modelo de medición	Promedio (centrado)
	Estabilización	Gimbal mecánico de 3 ejes
	Distancia focal equivalente (35 mm)	22 mm
iPhone 13 Pro Max	Longitud focal (real)	1.57 mm (ultra) / 5.1 mm (principal) / 9 mm (teleobjetivo)
	Punto F (Apertura)	f/1.5 (principal), f/1.8 (ultra), f/2.8 (tele)
	ISO	Variable, típicamente 32–2000
	Tiempo de exposición	Variable, típicamente 1/1000 – 1/30 s

Estabilización	Óptica (principal y teleobjetivo) + digital (ultra gran angular)
Distancia focal equivalente (35 mm)	13 mm (ultra) / 26 mm (principal) / 77 mm (teleobjetivo)

Tabla 4. Especificaciones del sensor LiDAR del iPhone 13 Pro Max

Especificación	Detalle
Tipo de sensor	LiDAR (ToF – Time of Flight, tipo indirecto)
Tecnología	Scanner láser infrarrojo con medición por tiempo de vuelo (VCSEL + SPAD)
Alcance efectivo	Hasta 5 metros (en interiores y condiciones óptimas)
Resolución espacial	~0.1 m (10 cm) aprox. en escaneo de objetos
Frecuencia de muestreo	Variable (dependiente del uso en apps de AR o escaneo)
Integración	Cámara trasera (no usa imágenes, solo datos de profundidad)

Tabla 5. Densidad de puntos estimada del sensor LiDAR del iPhone 13 Pro Max en función de la distancia

Distancia aproximada al objeto	Densidad de puntos estimada (puntos/m ²)
1 – 2 metros	60.000 – 100.000
3 metros	20.000 – 40.000
5 metros	<10.000

3.3 Metodología

3.3.1 Procedimiento integral para el cumplimiento de todos los objetivos específicos

Se definió como unidad experimental a los árboles fotografiados, considerando un total de cinco individuos distribuidos en la zona de estudio. La selección se realizó conforme a los criterios establecidos al inicio de la investigación: buen estado fitosanitario, estructura morfológica natural sin intervenciones recientes y accesibilidad para la captura de imágenes desde distintos ángulos y alturas. Se excluyeron aquellos individuos que presentaban enfermedades o que contaban con obstáculos visuales cercanos significativos (Tabla 6).

El diseño experimental empleado fue de bloques completamente al azar (Figura 4), considerando al individuo como factor de bloqueo. Se definieron cuatro tratamientos (Tabla 7), los cuales fueron aplicados a los cinco árboles seleccionados. En los tratamientos que requirieron procesamiento fotogramétrico se incluyeron tres (T2) y cuatro (T3) modelos de captura distintos por tratamiento, implementados en cada individuo como repeticiones técnicas (Tablas 9 y 10).

Tabla 6. *Especies seleccionadas*

Etiqueta	Nombre común	Nombre Científico
A1	Yubar	<i>Myrsine andina (Mez) Plpoly</i>
A2	Eucalipto	<i>Eucalyptus</i>
A3	Aligustre	<i>Ligustrum lucidum</i>
A4	Capulí	<i>Prunus salicifolia</i>
A5	Molle	<i>Schinus molle</i>

Tabla 7. *Descripción de tratamientos según el método de captura de datos.*

Tratamiento	Descripción del método de captura	Tipo de Tratamiento
T0	Medición directa en campo utilizando métodos directo no destructivo	Control
T1	Captura de datos mediante escaneo con el sensor LiDAR del iPhone	Control

T2	Captura de datos a partir de fotografías aéreas obtenidas con dron (RGB)	Experimental
T3	Captura de datos a partir de fotografías terrestres tomadas con teléfono móvil	Experimental

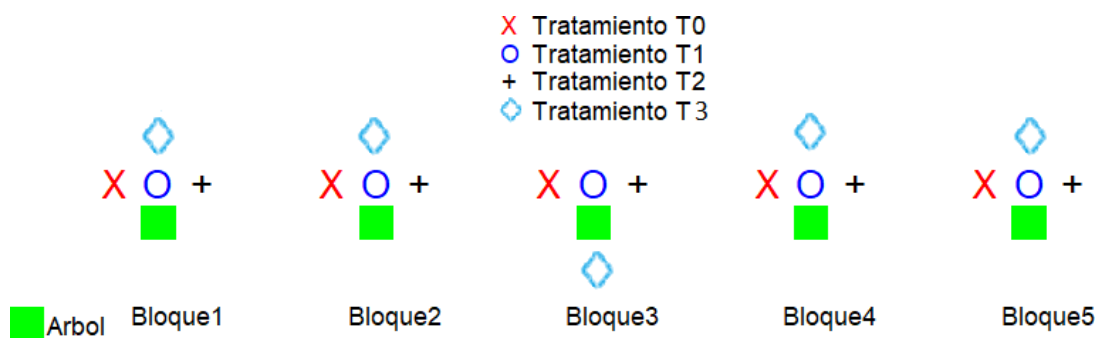


Figura 4. Representación del diseño experimental.

Las variables que se evaluaron en este estudio se presentan a continuación (Tabla 8):

Tabla 8. Variables

Variables	Unidades
Altura total	Metros (m)
Altura de copa	Metros (m)
Volumen de madera	Metro cúbico (m ³)
Area de copa	Metro cuadrado (m ²)
Volumen de Copa	Metro cúbico (m ³)
Diámetro a la altura del pecho	Centímetros (cm)
Biomasa aérea	Kilogramo por metro cuadrado (kg/m ²)

3.3.2 Parámetros de Captura

Tabla 9. Modelos de captura aérea

Modelo	Altura de vuelo	Ángulo de cámara (°)	Desplazamiento lateral (m)	Solapamiento (%)	Patrón de vuelo
Modelo 1	Baja	0° (horizontal)	15	90	Mapeo mediante órbitas circulares
Modelo 2	Media	45° (inclinación oblicua)	15	90	Mapeo mediante órbitas circulares
Modelo 3	Alta	90° (cenital)	15	90	Mapeo mediante órbitas circulares

Tabla 10. Modelos de captura terrestre

Modelo	Ángulo de cámara (°)	Desplazamiento lateral	Tipo de óptica
Modelo 1	20	Medio (Equivalente a la altura del árbol)	Gran angular
Modelo 2	20	Medio (Equivalente a la altura del árbol)	Ultra gran angular
Modelo 3	20	Alto (1.5 veces altura del árbol)	Gran angular
Modelo 4	20	Alto (1.5 veces altura del árbol)	Ultra gran angular

3.3.3 Procedimiento de captura de imágenes

La adquisición de imágenes se realizó bajo condiciones ambientales óptimas, priorizando días soleados con baja nubosidad y con el sol ubicado en su cenit, a fin de minimizar sombras proyectadas y maximizar la iluminación homogénea sobre los objetos de interés.

En el caso del levantamiento aéreo con dron, el procedimiento se desarrolló de la siguiente manera:

- **Establecimiento de puntos de control terrestre (GCPs):** Se colocaron 4 GCPs (marcadores físicos con coordenadas geográficas conocidas) por árbol utilizando lonas de referencia claramente visibles desde el aire.
- **Registro de coordenadas:** La geolocalización precisa de cada GCP fue realizada mediante receptor GPS Garmin.
- **Planificación de vuelo:** Con las coordenadas de los GCPs, se procedió a la planificación automatizada del vuelo mediante la aplicación *DroneHarmony* (versión iOS) y para complementar los vuelos con patrón manual, según fue necesario, se utilizó la aplicación *DJI Fly*.
- **Captura de imágenes:** Una vez definidos los parámetros de vuelo y completada la planificación, se procedió con la ejecución de los vuelos y la adquisición de imágenes. La duración de captura fue programada para intervalos de 3 a 6 minutos, esto varío en función del área del polígono seleccionado, asegurando una cobertura continua y controlada. Durante el levantamiento se realizó una revisión periódica de las imágenes, con el objetivo de identificar posibles errores de enfoque o problemas de iluminación.

Para la :

- **Instalación de puntos de control (CP - Control Points):** Se colocaron 12 marcas de referencia con medidas conocidas, utilizando esferas de espuma de alta visibilidad (tipo Flexx), fijadas en posiciones estratégicas alrededor del árbol.
- **Captura estructurada:** Se utilizó un trípode para estabilizar el dispositivo móvil y asegurar una altura constante de disparo. Las imágenes fueron capturadas utilizando los modos gran angular estándar y ultra gran angular del teléfono, el intervalo de captura fue entre 5 y 10 minutos.
- **Distancia de captura y desplazamiento controlado:** Con el uso de una cinta métrica, se determinaron las distancias radiales respecto al objeto, las cuales se replicaron en el terreno mediante la colocación de un hilo de nailon atado al árbol. Este hilo sirvió como guía para mantener una trayectoria circular constante alrededor del árbol durante la captura. De igual manera para asegurar una cobertura homogénea del objeto desde múltiples ángulos, se realizó un desplazamiento en pasos circulares regulares de 25 cm. En cada paso se detenía momentáneamente para realizar la

captura de la imagen, repitiendo este proceso hasta completar una vuelta completa alrededor del árbol.

- **Revisión en campo:** Al igual que con el dron, se realizó una evaluación inmediata de las imágenes para descartar aquellas con desenfoque u otros defectos técnicos

3.3.4 Mediciones dasométricas convencionales

Para el tratamiento control (T0), se utilizaron técnicas tradicionales. La altura total del árbol se midió desde la base del tronco hasta el ápice mediante el clinómetro Suunto. El área calculo en base a la sombra proyectada de copa con la siguiente fórmula

$$A = \frac{4}{\pi} * D1 * D2$$

Donde:

$D1$ = Diámetros mayor de la copa

$D2$ = Diámetros menor de la copa

La altura de copa se calculó como la distancia entre la base de la primera rama principal y el punto más alto del tallo principal.

De igual manera el volumen de copa se calculó en usando las siguientes fórmulas

$$V_{copa} = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{D2}{2} \right)^2 Hc$$

Donde:

$D2$ = diámetro de la copa

Hc = altura de la copa.

El factor 1/3 proviene de la propiedad geométrica de los conos

Esta fórmula fue usada para las siguientes arboles: Eucalipto, Aligustre y Molle.

$$V_{copa} = \frac{2}{3} A_{copa} * H_{copa}$$

Donde:

Acopa = área proyectada de la copa (en m²)

Hcopa = altura de la copa (en m)

El factor 2/3 surge de la fórmula del volumen de un paraboloido

Esta fórmula fue usada para las siguientes arboles: Yubar y Capulí

El volumen de la madera se calculó con las siguientes formulas

$$V = fc * G * HC$$

$$G = \left(\frac{3.14 * D^2}{4} \right)$$

Donde:

fc = factor de forma de la copa

G = área basal proyectada de la copa

Hc = altura de la copa

D = diámetro de la copa

Esta fórmula fue usada para las siguientes arboles: Aligustre y Molle.

$$v = \left(\frac{3.14 * D^2}{4} \right) * HC$$

Donde:

D = diámetro de la copa

Hc = altura de la copa

Esta fórmula fue usada para las siguientes arboles: Yubar, Eucalipto y Capulí.

La estimación de biomasa aérea se realizó aplicando las ecuaciones alométricas desarrolladas por Chave et al. (2014).

$$AGB = 0.0673 * (\rho D^2 H)^{0.976}$$

Donde:

Constante 0.0673 = coeficiente empírico obtenido por ajuste de regresión no lineal en el conjunto de datos tropicales húmedos de Chave et al. (2014).

ρ = densidad básica de la madera

D = diámetro a la altura del pecho (1.3 m)

H = altura total del árbol en m,

Finalmente, el diámetro a la altura del pecho (DAP) se midió a 1.30 metros sobre el nivel del suelo utilizando cinta diamétrica.

3.3.5 Procesamiento de datos

La generación de nubes de puntos dispersa y densa a partir de las imágenes se realizó utilizando dos plataformas fotogramétricas: el software comercial *Agisoft Metashape* y el software de código abierto *MicMac*.

La segmentación y depuración de las nubes de puntos se efectuó mediante *CloudCompare*, lo que permitió eliminar ruido, filtrar datos irrelevantes y aislar las estructuras arbóreas de interés.

A partir de las nubes de puntos limpias, se extrajeron métricas estructurales:

- Altura total, volumen de copa, volumen del fuste, área de copa y dap: fueron estimadas mediante el *CloudCompare* y *Python*, utilizando proyecciones ortogonales de la nube de puntos y aplicando el algoritmo de casco cóncavo (concave hull), Voxelización 3D y Alpha Shape en el caso de *Python*.
- La estimación de biomasa aérea se realizó aplicando ecuaciones alométricas desarrolladas por Chave et al. (2014) ampliamente validadas para regiones tropicales y estructuras arbóreas complejas.

Para el procesamiento de datos derivados de sensores LiDAR, se emplearon dos aplicaciones disponibles en la App Store:

- Open access: *Scaniverse*, y *ForestScanner*.

Estas herramientas permitieron generar modelos tridimensionales directamente desde el dispositivo, facilitando la evaluación preliminar de estructuras arbóreas en campo y aportando datos complementarios para la validación cruzada.

3.4 Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante los softwares R y Python. Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Al no cumplirse los supuestos de normalidad, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para identificar diferencias significativas entre tratamientos. Además, se complementó el análisis con una prueba post hoc de Dunn, utilizando la corrección de Bonferroni para comparaciones múltiples entre pares de tratamientos.

Dado que los datos no presentaron una distribución normal, se utilizó la correlación de Spearman para evaluar la relación entre los valores estimados y medidos. Adicionalmente, se calcularon métricas de evaluación del desempeño del modelo: error absoluto, error relativo, error cuadrático medio (RMSE) y sesgo (bias), utilizando las siguientes fórmulas:

$$E A_i = | y_i - y^{\wedge}_i |$$

Dónde:

$E A_i$ = error absoluto

y_i = valor observado

y^{\wedge}_i = valor estimado

$|\cdot|$ = valor absoluto (elimina el signo negativo)

$$E R \%_i = \frac{y_i - y^{\wedge}_i}{y_i} \times 100$$

Dónde:

$E R \%_i$ = error relativo

y_i = valor observado

y^i = valor estimado

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y^i)^2}$$

Dónde:

$RMSE$ = error cuadrático medio

n = número total de observaciones

y_i = valor observado

y^i = valor estimado

Considerando que el RMSE cuantifica la magnitud promedio del error entre valores estimados y observados, donde valores cercanos a cero indican mayor precisión del modelo.

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^i - y_i)$$

Dónde:

n = número total de observaciones

y^i = valor estimado

y_i = valor observado

Por otro lado, el sesgo que tiene en cuenta la tendencia sistemática del modelo a sobrestimar (valores negativos) o subestimar (valores positivos) los valores reales, siendo cero el valor óptimo que indica ausencia de error sistemático.

Estos análisis se realizaron para las siguientes variables:

- Altura total
- Altura de copa
- Volumen de madera
- Area de copa

- Volumen de Copa
- DAP
- Biomasa aérea

3.5 Facilidad de uso

Para evaluar la facilidad de uso de los cuatro métodos de medición y procesamiento de datos forestales (T0, T1, T2 y T3), se utilizó una versión adaptada del *System Usability Scale* (SUS), una escala estandarizada y ampliamente validada para medir la facilidad de uso percibida de sistemas tecnológicos (Brooke, 1996).

El cuestionario original consta de 10 ítems con respuestas en una escala tipo Likert de 5 puntos, desde “totalmente en desacuerdo” (1) hasta “totalmente de acuerdo” (5). Las preguntas fueron modificadas para ajustarse al contexto específico del uso de tecnologías forestales, incorporando aspectos como la adquisición de datos, el procesamiento posterior, la interpretación de métricas, la complejidad técnica y la necesidad de capacitación.

La adaptación mantuvo el equilibrio entre ítems de redacción positiva y negativa, con el fin de conservar la validez psicométrica del instrumento y captar con mayor precisión la percepción de usabilidad de cada método.

Las respuestas fueron registradas para cada método evaluado y procesadas mediante un script en *Python*, el cual implementó el algoritmo de cálculo estándar del puntaje SUS. Este cálculo ajusta las respuestas según la naturaleza del ítem (positivo o negativo) y genera un puntaje final en una escala de 0 a 100, donde valores más altos reflejan una mayor facilidad de uso percibida.

4. Resultados

4.1 Objetivo específico 1: Fotogrametría aérea

4.2 Resultados generales de la adquisición de imágenes

Los métodos fotogramétricos evidenciaron variaciones significativas en la densidad de nubes de puntos según las configuraciones de captura y sujetos arbóreos analizados. Para *Yubar* (*Árbol 1*), el Modelo 1 registró 53 fotogramas procesados, derivando en una reconstrucción

de 854.416 puntos, mientras que el Modelo 2 redujo la muestra a 43 imágenes genero 484.584 puntos. El modelo Modelo 3 requirió 64 capturas para sintetizar 191.686 puntos.

En *Eucalipto* (*Árbol 2*) se observó un comportamiento divergente: el Modelo 1 produjo 210.462 puntos a partir de 35 imágenes, contrastando con el Modelo 2 que, pese a emplear 89 fotografías, alcanzó una densidad máxima de 831.637 puntos. El enfoque nadiral (Modelo 3) aquí mostró eficiencia intermedia, generando 398.518 puntos con solo 39 registros.

El género *Aligustre* (*Árbol 3*) manifestó particularidades notables: el Modelo 1 logró una reconstrucción hiperdensa (3.080.869 puntos) mediante 72 imágenes, superior en un orden de magnitud al Modelo 3 (196.653 puntos con 48 capturas), pese a que el Modelo 2, con 97 fotogramas, obtuvo 740.005 puntos.

Para *Capulí* (*Árbol 4*), el Modelo 1 demostró alta eficacia fotogramétrica (2.104.547 puntos/112 imágenes), superando ampliamente al Modelo 2 (135.142 puntos/67 imágenes) y al Modelo 3 (19.188 puntos/55 imágenes). Finalmente, en *Molle* (*Árbol 5*) se registró relativa uniformidad entre Modelos 1 y 2 (377.941 y 364.046 puntos con 73 y 60 imágenes respectivamente), mientras el Modelo 3, pese a emplear 110 capturas, solo alcanzó 87.625 puntos, revelando limitaciones en esquemas nadirales para especies de follaje denso.

4.2.1 Diferencias en los parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría aérea

Los diferentes patrones de captura de imágenes permitieron generar de manera efectiva nubes de puntos densas para cada árbol (Figura 5). De los métodos utilizados con el dron, el modelo 1 resultó ser el más eficiente, generando en promedio 641,7 % más puntos que el modelo 3 el cual produjo la menor cantidad de puntos promedio (Tabla 11).

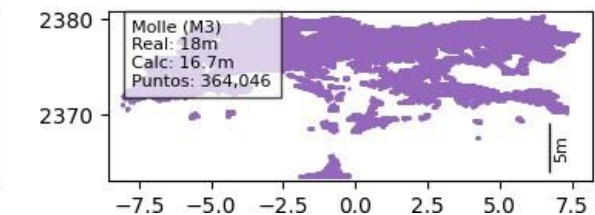
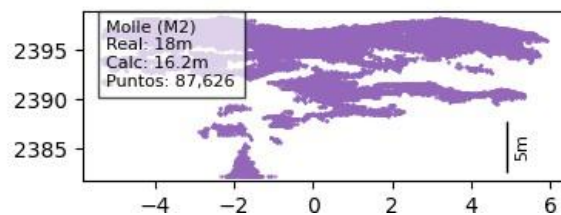
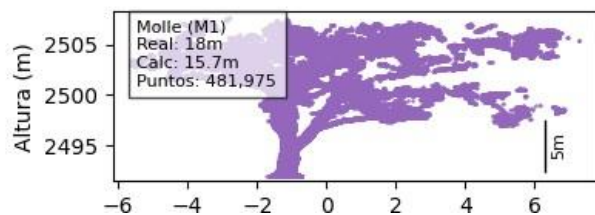
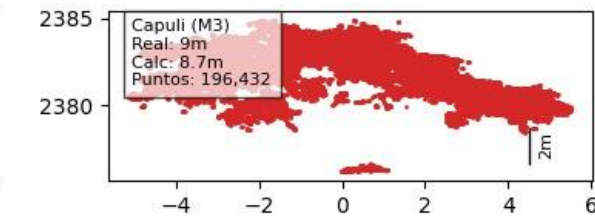
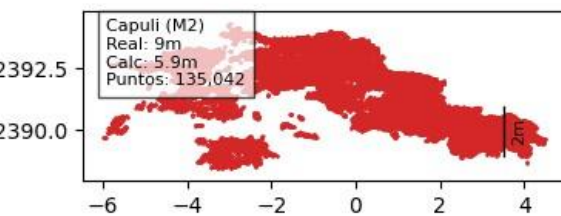
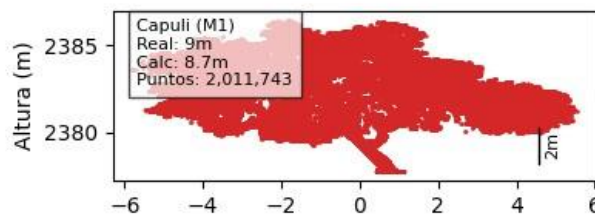
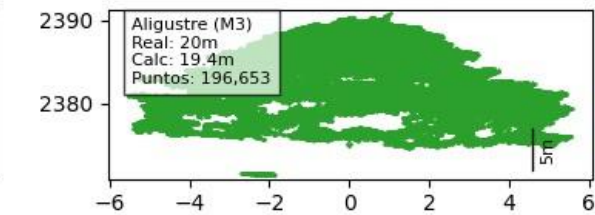
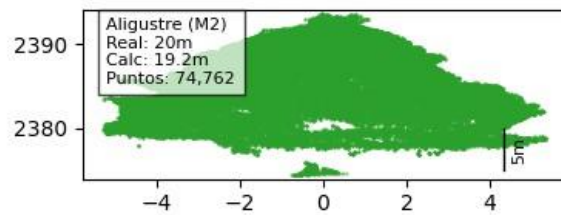
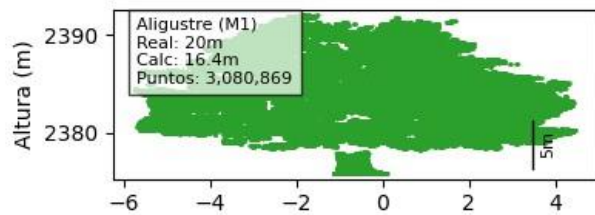
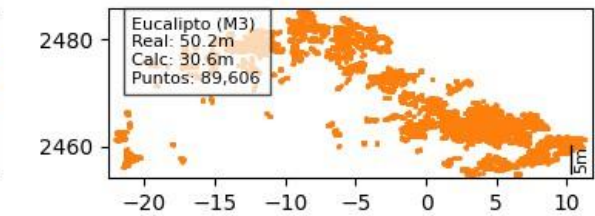
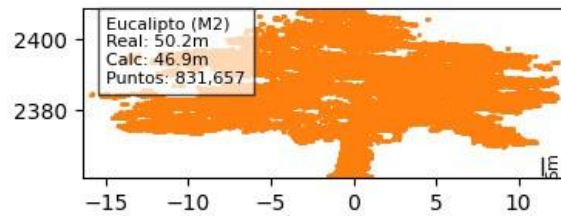
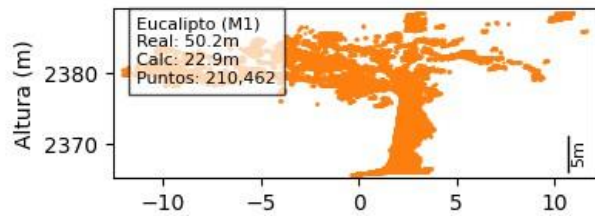
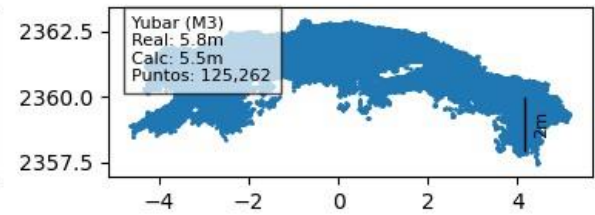
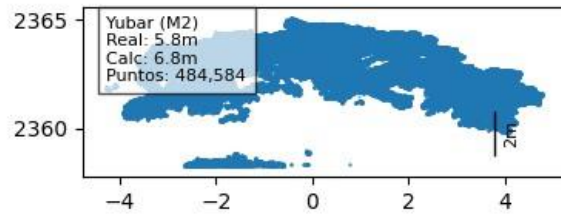
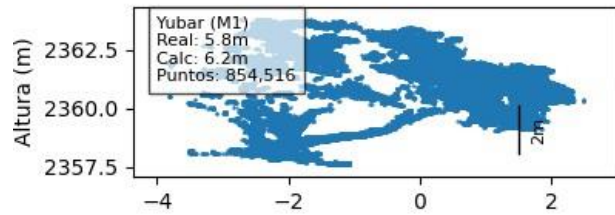


Figura 5. *Nube de puntos generada a partir de fotografías de UAV*

Nota. La palabra M que se encuentra dentro de la leyenda de cada árbol hace alusión al método usado.

Tabla 11. *Promedio de puntos de métodos derivados de fotogrametría aérea*

Modelo	Promedio de puntos
Modelo 1	1.325.647
Modelo 2	511.083
Modelo 3	178.734

De los 15 vuelos realizados en el tratamiento T2 (Fotogrametría aérea), en todos los vuelos, las nubes de puntos generadas permitieron segmentar y extraer métricas en la escala correcta, como altura de copa, área de copa, altura total y volumen de copa. Aunque en el caso de biomasa aérea y volumen de madera solo pudo calcularse en 9 de los 15 vuelos, dado que solo en esos casos se obtuvieron valores del DAP a partir de los modelos fotogramétricos.

La identificación del modelo óptimo se realizó mediante un análisis comparativo por bloques, considerando las discrepancias entre los valores estimados por cada modelo y las mediciones de campo validadas. Para ello, se utilizaron métricas como el error absoluto y el error relativo (Tablas 12 a 18), lo que permitió seleccionar el modelo con mejor desempeño predictivo para cada variable en cada bloque específico. Complementariamente, se evaluó la precisión global de los modelos fotogramétricos considerando todos los datos disponibles, comparando las estimaciones obtenidas mediante fotogrametría aérea (UAVs) con los valores registrados por métodos tradicionales. En este caso, se emplearon métricas como el error cuadrático medio (RMSE), el sesgo (Bias) y la correlación de Spearman para cada modelo y variable (Tabla 19).

Los resultados comparativos de ambas estrategias de evaluación (bloque y general) se resumen en la Tabla 20. Esta tabla no solo compara el desempeño del modelo óptimo por bloque (ModeloO) frente al modelo general (Modelog) en términos de RMSE, sesgo y correlación, sino que también facilita la selección del modelo más adecuado para cada variable.

Altura total**Tabla 12** Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para la altura total

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m)	Estimación (m)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
1	Modelo 1	5,80	6,22	0,42	7,24
2	Modelo 2	50,20	46,90	3,30	6,57
3	Modelo 2	20,00	19,40	0,60	3,0
4	Modelo 1	9,00	8,74	0,26	2,89
5	Modelo 2	18,00	16,70	1,30	7,22

Nota. El Modelo 2 demostró ser el mejor para estimar la altura arbórea, siendo seleccionado como óptimo en el 60% de los bloques (3/5). Presentó errores relativos consistentes (3,00–7,22%) y mostró especial eficacia en árboles de mayor tamaño, donde mantuvo errores absolutos proporcionalmente bajos. El Modelo 1, aunque preciso en alturas menores a 10 m (error absoluto ≤ 0.42 m), mostró mayor variabilidad en error relativo (hasta 7.24%), lo que sugiere limitaciones en su escalabilidad.

Altura de copa**Tabla 13.** Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para la altura de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m)	Estimación (m)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
1	Modelo 3	4,8	5,49	0,69	14,38
2	Modelo 3	41,0	37,0	4,00	9,76
3	Modelo 3	17,0	16,8	0,20	1,18
4	Modelo 1	7,6	7,05	0,55	7,24
5	Modelo 2	13,1	12,1	1,00	7,63

Nota. El Modelo 3 mostró el mejor desempeño global, siendo seleccionado como óptimo en el 60% de los bloques (3/5), con errores relativos entre 1,18% y 14,38%. Destacó

especialmente en el Bloque 3 (error relativo = 1,18%). Los Modelos 1 y 2 presentaron mayor variabilidad, con errores relativos de 7,24% y 7,63% respectivamente.

Volumen de copa

Tabla 14. Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para el volumen de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m ³)	Estimación (m ³)	Error absoluto (m ³)	Error relativo (%)
1	Modelo 3	156	148	8,35	5,35
2	Modelo 2	9.578	1.567	8.011	83,64
3	Modelo 2	494	238	256	51,82
4	Modelo 1	179	166	13,5	7,54
5	Modelo 2	681	306	375	55,07

Nota. El Modelo 2 fue seleccionado como el peor, aunque este alló sobresalido en el 60% de los bloques (3/5), por que mostró errores relativos elevados (>50%) en los Bloques 2, 3 y 5, debido a subestimaciones significativas. El Modelo 3 destacó en el Bloque 1 con el menor error relativo (5.35%) siendo este el mejor, mientras que el Modelo 1 tuvo un desempeño aceptable en el Bloque 4 (7.54%).

Volumen de madera

Tabla 15. Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para el volumen de madera

Bloque	Modelo Óptimo	Valor Real (m ³)	Estimación (m ³)	Error Absoluto (m ³)	Error Relativo (%)
1	Modelo 1	0,02	0,017	0,003	15,00
2	Modelo 2	23,3	23,4	0,110	0,47
3	Modelo 3	0,41	0,35	0,060	14,63
4	Modelo 1	0,03	0,02	0,010	33,33
5	Modelo 1	0,70	0,65	0,050	7,14

Nota. El Modelo 1 fue seleccionado como óptimo en el 60% de los bloques (3/5), demostrando mayor consistencia en la estimación de volumen de madera. Aunque presentó un error relativo elevado (33,33%) en el Bloque 4 para volúmenes muy pequeños (<0,05 m³), mostró mejor precisión en rangos intermedios (0,5–0,7 m³), con errores relativos ≤15%. El Modelo 2

destacó puntualmente en el Bloque 2 (error relativo = 0,47%), pero solo para valores atípicamente altos (>20 m³). El Modelo 3 tuvo un desempeño intermedio (14,63% de error).

Diámetro a la altura del pecho

Tabla 16. Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para el DAP

Bloque	Modelo Óptimo	Valor Real (cm)	Estimación (cm)	Error Absoluto (cm)	Error Relativo (%)
1	Modelo 1	14,3	18,0	3,7	25,87
2	Modelo 2	1,8	1,72	0,08	4,44
3	Modelo 3	42,0	44,0	2,0	4,76
4	Modelo 1	29,0	29,0	0,0	0,00
5	Modelo 1	69,2	73,0	3,8	5,49

Nota. El análisis reveló que el Modelo 1 presentó el mejor desempeño global, siendo seleccionado como óptimo en 3 de los 5 bloques evaluados. Este modelo mostró estimaciones perfectas en el Bloque 4 (0,0 cm de error) y alta precisión en el Bloque 5 (error relativo de 5,49%). Sin embargo, presentó limitaciones en el Bloque 1 con un error relativo del 25,87%.

Biomasa Aérea

Tabla 17. Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para la biomasa aérea

Bloque	Modelo Óptimo	Valor Real (kg/m ²)	Estimación (kg/m ²)	Error Absoluto (kg/m ²)	Error Relativo (%)
1	Modelo 1	538	349	189	35,13
2	Modelo 2	76.143	63.982	12.162	15,97
3	Modelo 1	3.301	2.582	720	21,80
4	Modelo 1	290	282	8,19	2,82
5	Modelo 1	2.427	2.366	61,6	2,54

Nota. Los resultados mostraron que el Modelo 1 fue el más consistente, siendo seleccionado como óptimo en 4 de los 5 bloques evaluados (80%). Este modelo destacó especialmente en los Bloques 4 y 5, con errores relativos inferiores al 3% (2,82% y 2,54%, respectivamente).

Sin embargo, presentó limitaciones en los Bloques 1 y 3, con errores relativos superiores al 20% (35,13% y 21,80%). El Modelo 2 demostró ser más preciso en el Bloque 2 (error relativo = 15,97%), aunque con un error absoluto considerable (12.162 kg/m²).

Area de copa

Tabla 18. Desempeño comparativo de modelos predictivos aéreos para el aérea de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m ²)	Estimación (m ²)	Error absoluto (m ²)	Error relativo (%)
1	Modelo2	59,00	48,86	10,14	17,19
2	Modelo2	669,35	753,00	83,65	12,50
3	Modelo2	99,80	104,20	4,40	4,41
4	Modelo3	64,20	66,70	2,50	3,89
5	Modelo3	120,00	149,15	29,15	24,29

Nota. El Modelo 2 destacó en el 60% de los bloques (3/5), en el Bloque 3 con el menor error relativo (4.41%). Sin embargo, mostró limitaciones en el Bloque 2 con una sobrestimación significativa (error absoluto = 83.65 m², 12.50%). El Modelo 3 fue seleccionado como óptimo en los Bloques 4 y 5, registrando la mejor precisión (error relativo = 3.89%), pero presentó una sobrestimación crítica en el Bloque 5 (error relativo = 24.29%).

Tabla 19. RMSE, sesgo y correlación de las estimaciones obtenidas mediante fotogrametría aérea

Variables	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
	RMSE	Bias	Corr	RMSE	Bias	Corr	RMSE	Bias	Corr
Altura total	12.7	-6,75	1	1.71	-0.88	1	3.49	-2.82	1
Altura copa	18,4	-9,06	0	2.15	-1.33	1	2.24	-1.47	1
Área copa	64.4	-42.9	1	40.2	-11.1	1	100.1	-50.62	1
Volumen copa	3.632	-1.793	0.9	3.588	-1.740	0.9	3.707	-1.796	1
Volumen Fuste	11,8	+5,26	1	0,35	-0,186	0,61	10,4	-4,83	0
DAP	2,53	-1,08	0,99	30,22	+16,33	0,87	NA	-2	NA
Biomasa	20.477	+9.352	0,97	7.143	+4.799	0,98	NA	+1.833	NA

Nota. Los valores faltantes (NA) en las métricas del Modelo 3 se debieron a la insuficiencia de datos válidos (solo se contó con una observación disponible), lo que impidió el cálculo del RMSE y la correlación, ya que estas métricas requieren un mínimo de dos y tres datos respectivamente. Las exclusiones correspondieron a casos en los que los modelos no generaron estimaciones (valor estimado igual a 0).

Tabla 20. Comparación del desempeño de modelos fotogramétricos aéreos por bloque y generales en la estimación de variables dasométricas

Variable	Modelo \mathbf{O}	RMSE \mathbf{O}	Sesgo \mathbf{O}	Corr \mathbf{O}	RMSE \mathbf{g}	Sesgo \mathbf{g}	Corr \mathbf{g}	Modelo \mathbf{g}
Altura total	Modelo 2	2,08	-1,73	1,00	1,71	-0,88		1 Modelo 2
Altura copa	Modelo 3	2,35	-1,17	1,00	2,15	-1,33		1 Modelo 2
Área copa	Modelo 3	20,7	15,8	1,00	40,2	-11,1		1 Modelo 2
Volumen copa	Modelo 2	4633.	-2881	1,00	3.588	-1.740		0.9 Modelo 2
Volumen Fuste	Modelo 1	0,0295	-0,0210	1,00	0,35	-0,186		0,61 Modelo 2
DAP	Modelo 1	3,06	2,50	1,00	2,53	-1,08		0,99 Modelo 1
Biomasa	Modelo 1	373,0	-244,0	1,00	7.143	+4.799		0,98 Modelo 2

Nota. Los símbolos \mathbf{O} significan óptimo, mientras que \mathbf{g} general.

Para la variable de altura total, ambos enfoques seleccionaron consistentemente el modelo 2 como el más adecuado. De forma similar, en altura de copa, aunque el modelo óptimo por bloque fue el modelo 3, el modelo general 2 logró un RMSE menor (2,15 m frente a 2,35 m) y mantuvo una correlación perfecta. En cuanto al volumen de copa, el modelo general 2 también mostró un desempeño superior tanto en RMSE como en correlación, lo que indica que este modelo es una opción robusta para estimar estas variables.

Por otro lado, para variables como área de copa, volumen de fuste y biomasa aérea, los mejores resultados provinieron de distintos modelos óptimos por bloque: el modelo 3 para área de copa y el modelo 1 para volumen de fuste y biomasa aérea. En estos casos, los modelos ajustados por bloque superaron claramente al modelo general en términos de RMSE y sesgo. Finalmente, para el diámetro a la altura del pecho (DAP), ambos análisis coincidieron en seleccionar el modelo 1. El modelo general presentó una ligera ventaja en RMSE y sesgo, aunque la diferencia fue mínima y ambos modelos mantuvieron una correlación muy alta.

Los análisis de ModeloO y Modelog permitieron identificar el mejor modelo para cada variable, no se encontró un modelo único (1, 2 o 3) que estimara con precisión todas las variables dasométricas. Por ello, se recomendó la siguiente selección por variable: modelo 2 para altura total, altura de copa y volumen de copa; modelo 3 para área de copa; modelo 1 para volumen de fuste, biomasa aérea y DAP. Esta estrategia específica por variable garantiza mayor precisión y reduce el sesgo en las estimaciones fotogramétricas, evitando así el uso de un único modelo universal que no se adapta óptimamente a todas las variables dasométricas.

4.3 Objetivo específico 2: Fotogrametría terrestre

4.3.1 Resultados generales de la adquisición de imágenes

Los métodos fotogramétricos evidenciaron variaciones significativas en la densidad de las nubes de puntos, en función de las configuraciones de captura y de los sujetos arbóreos analizados. Para Yubar (Árbol 1), el Modelo 1 registró 46 fotogramas procesados, generando una nube de 2.072.316 puntos. En contraste, el Modelo 2 redujo la muestra a 30 imágenes, obteniendo 1.365.131 puntos. El Modelo 3 requirió 37 capturas, produciendo 772.121 puntos; mientras que el Modelo 4 también procesó 37 imágenes, generando 448.341 puntos.

En el caso del Eucalipto (Árbol 2), el Modelo 1 procesó 33 imágenes y reconstruyó 341.027 puntos; el Modelo 2, con 24 imágenes, obtuvo 130.075 puntos. El Modelo 3 usó 27 capturas para generar 367.056 puntos; por su parte, el Modelo 4 procesó 53 imágenes y produjo 531.377 puntos. Para Aligustre (Árbol 3), el Modelo 1 registró 83 imágenes y generó 1.605.725 puntos; el Modelo 2 incrementó la muestra a 84 imágenes, con una reconstrucción de 1.093.456 puntos. El Modelo 3 necesitó solo 30 capturas, pero alcanzó 3.294.159 puntos; el Modelo 4, con 28 imágenes, produjo 750.865 puntos.

En el caso de Aligustre (Árbol 4), el Modelo 1 procesó 67 imágenes, obteniendo 132.722 puntos; el Modelo 2, con 69 imágenes, logró 98.366 puntos. El Modelo 3 empleó 87 capturas y generó 192.540 puntos, mientras que el Modelo 4, con 92 imágenes, produjo solo 65.996 puntos. Finalmente, para el Molle (Árbol 5), el Modelo 1 registró 82 fotogramas y reconstruyó 692.565 puntos; el Modelo 2 utilizó 75 imágenes, logrando 354.840 puntos. El Modelo 3 procesó 73 capturas para obtener 207.053 puntos, y el Modelo 4, con el mismo número de imágenes, generó 118.026 puntos.

4.3.2 Diferencias en los parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría terrestre

Los patrones de captura de imágenes permitieron generar de manera efectiva nubes de puntos densas para cada árbol derivados de fotogrametría terrestre (Figura 12). De los métodos fotogramétricos evaluados, el Modelo 3 resultó ser el más eficiente, generando en promedio 113% más puntos que el Modelo 4 que fue el menos eficiente (Tabla 21).

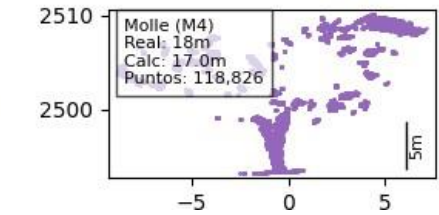
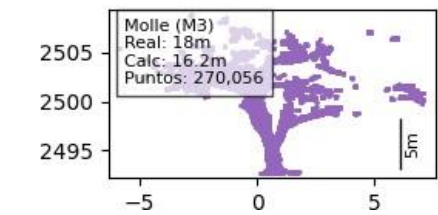
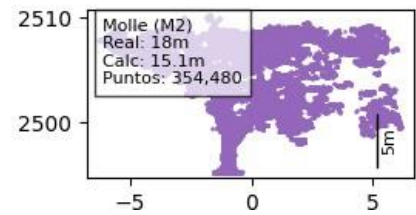
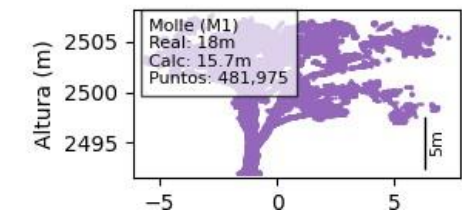
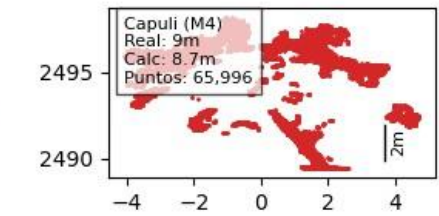
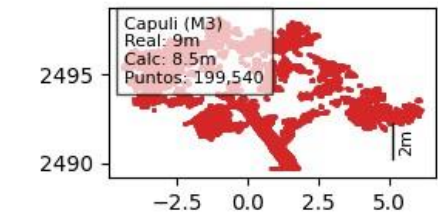
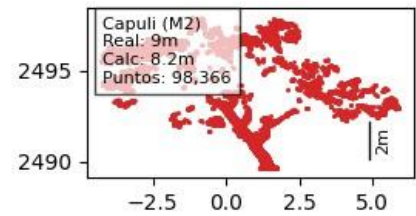
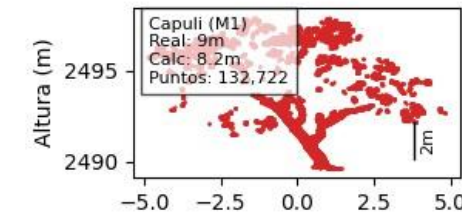
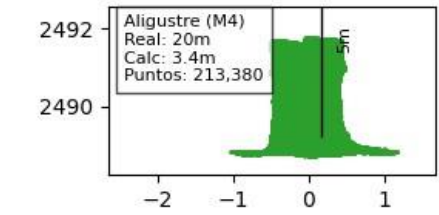
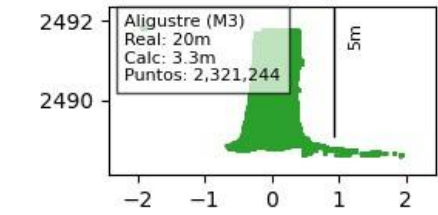
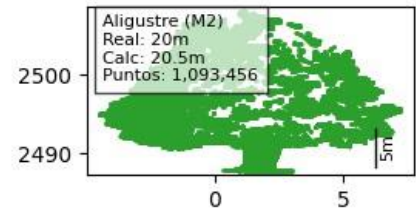
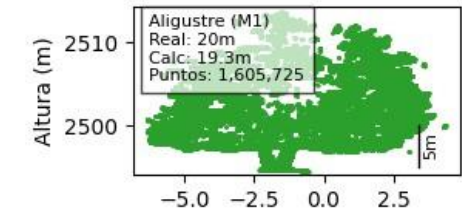
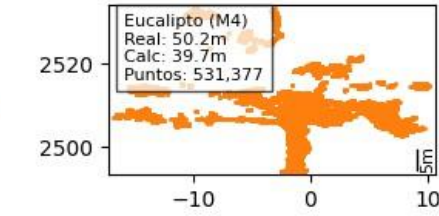
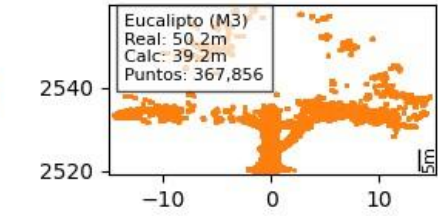
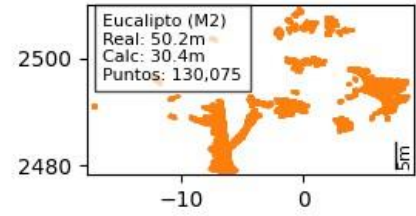
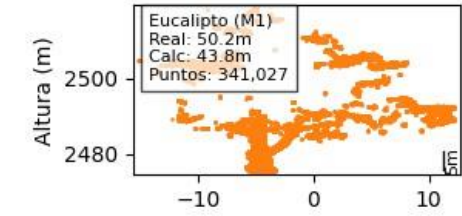
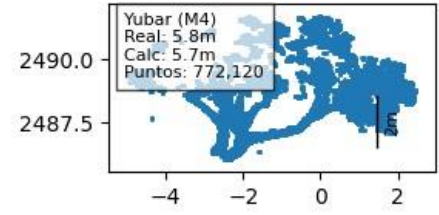
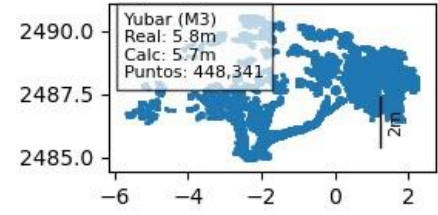
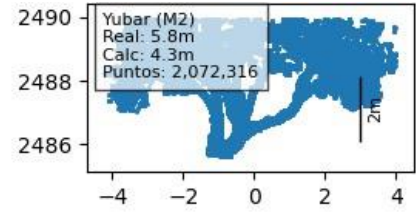
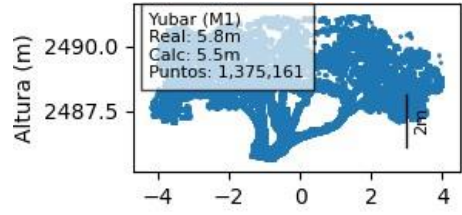


Figura 6. Nube de puntos generada a partir de fotografías de Celular

Nota: la palabra M que se encuentra dentro de la leyenda de cada árbol hace alusión al método usado

Tabla 21. Promedio de puntos de métodos derivados de fotogrametría terrestre

Modelo	Promedio de puntos
Modelo 1	8.912
Modelo 2	10.789
Modelo 3	19.030
Modelo 4	7.116

La identificación del modelo óptimo se realizó mediante un análisis comparativo por bloques, considerando las discrepancias entre los valores estimados por cada modelo y las mediciones de campo validadas. Para ello, se utilizaron métricas como el error absoluto y el error relativo (Tablas 22 a 28), lo que permitió seleccionar el modelo con mejor desempeño predictivo para cada variable en cada bloque específico.

Complementariamente, se evaluó la precisión global de los modelos fotogramétricos considerando todos los datos disponibles, comparando las estimaciones obtenidas mediante fotogrametría terrestre con los valores registrados por métodos tradicionales. En este caso, se emplearon métricas como el error cuadrático medio (RMSE), el Sesgo (Bias) y la correlación de Spearman para cada modelo y variable (Tabla 29).

los resultados comparativos de ambas estrategias de evaluación (bloque y general) se resumen en la Tabla 30. Esta tabla no solo compara el desempeño del modelo óptimo por bloque (ModeloO) frente al modelo general (Modelog) en términos de RMSE, sesgo y correlación, sino que también facilita la selección del modelo más adecuado para cada variable.

Altura total

Tabla 22. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para la altura total

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m)	Estimación (m)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
B1	Modelo 4	5,8	5,7	0,10	1,72
B2	Modelo 3	50,2	53,5	3,26	6,49

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m)	Estimación (m)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
B3	Modelo 4	20,0	20,5	0,50	2,50
B4	Modelo 4	9,0	8,7	0,30	3,33
B5	Modelo 3	18,0	16,2	1,80	10,00

Nota. El Modelo 4 fue el más consistente, siendo seleccionado como óptimo en 3 de los 5 bloques (60%). Mostró una buena precisión en estimaciones menores a 10 m (errores absolutos $\leq 0,30$ m). El Modelo 3 tuvo un mejor desempeño en árboles más altos (ej. Bloque 2), aunque con un error absoluto de 3,26 m (6,49%). En general, los errores relativos fueron moderados (1,72–10,00%).

Altura de copa

Tabla 23. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para la altura de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m)	Estimación (m)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
B1	Modelo 3	4,8	4,26	0,54	11,30
B2	Modelo 1	41,0	36,6	4,40	10,70
B3	Modelo 3	17,0	17,0	0,00	0,00
B4	Modelo 3	7,6	6,69	0,91	12,00
B5	Modelo 3	13,1	11,5	1,59	12,10

Nota. El Modelo 3 fue seleccionado como óptimo en 4 de los 5 bloques (80%), aunque presentó una alta variabilidad en errores relativos (0,00–12,10%). Se destacó en el Bloque 3 con estimación perfecta. El Modelo 1 fue óptimo solo en el Bloque 2, pero con un error relativo de 10,70%, lo que sugiere limitaciones en árboles altos.

Volumen de copa

Tabla 24. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para el volumen de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m ³)	Estimación (m ³)	Error absoluto (m ³)	Error relativo (%)
B1	Modelo 1	156	126	30,1	19,3
B2	Modelo 4	9.578	1.615	7.963	83,1
B3	Modelo 4	494	269	226	45,6
B4	Modelo 3	179	151	28,8	16,0
B5	Modelo 1	681	384	297	43,6

Nota. El desempeño general fue variable. El Modelo 4 fue el peor en 2 bloques por presentar sobreestimaciones importantes, especialmente en el Bloque 2 (error relativo = 83,1%). El Modelo 1 tuvo un mejor comportamiento en el Bloque 1 (error relativo = 19,3%) y fue nuevamente seleccionado en el Bloque 5, aunque con un error elevado (43,6%). El Modelo 3 mostró mejor precisión relativa en el Bloque 4 (16%) siendo este el más preciso.

Volumen de madera

Tabla 25. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para el volumen de madera

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m ³)	Estimación (m ³)	Error absoluto (m ³)	Error relativo (%)
B1	Modelo 1	0,020	0,019	0,001	5,00
B2	Modelo 4	23,3	23,3	0,07	0,30
B3	Modelo 1	0,41	0,42	0,01	2,44

Bloque Modelo Óptimo		Valor real (m ³)	Estimación (m ³)	Error absoluto (m ³)	Error relativo (%)
B3	Modelo 2	0,41	0,42	0,01	2,44
B4	Modelo 1	0,03	0,04	0,01	33,3
B4	Modelo 3	0,03	0,04	0,01	33,3
B5	Modelo 3	0,70	0,64	0,06	8,57

Nota. El Modelo 1 fue seleccionado como óptimo en 3 bloques, mostrando buen desempeño en volúmenes intermedios (errores relativos $\leq 5\%$). Sin embargo, en el Bloque 4, varios modelos empataron con un error elevado (33,3%) debido al bajo volumen real. El Modelo 4 destacó por su precisión en el Bloque 2 (error relativo = 0,30%). El Modelo 3 fue óptimo en un solo bloque, pero con desempeño aceptable (8,57%).

Diámetro a la altura del pecho

Tabla 26. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para el DAP

Bloque Modelo Óptimo		Valor real (cm)	Estimación (cm)	Error absoluto (cm)	Error relativo (%)
B1	Modelo 1	14,3	14,0	0,300	2,10
B1	Modelo 2	14,3	14,0	0,300	2,10
B2	Modelo 4	1,8	1,8	0,000	0,00
B3	Modelo 1	42,0	43,0	1,000	2,38
B4	Modelo 3	29,0	29,0	0,000	0,00
B5	Modelo 3	69,2	68,0	1,200	1,73

Nota. Los modelos mostraron alta precisión general. El Modelo 1 fue óptimo en dos bloques con errores relativos bajos (2,10%–2,38%), incluso compartiendo desempeño con el Modelo 2 en el Bloque 1. El Modelo 4 logró una estimación perfecta en el Bloque 2. El Modelo 3 fue óptimo en los Bloques 4 y 5, mostrando excelente precisión (error relativo $\leq 1,73\%$) siendo este el mejor.

Biomasa Aérea

Tabla 27. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para la biomasa aérea

Bloque	Modelo Óptimo	Valor Real (kg/m ²)	Estimación (kg/m ²)	Error Absoluto (kg/m ²)	Error Relativo (%)
B1	Modelo 1	538,0	422,0	116,0	21,6
B2	Modelo 3	76.143	71.588	4.555	5,98
B3	Modelo 3	3.301	3.014	288,0	8,72
B4	Modelo 2	290,0	283,0	7,08	2,44
B5	Modelo 2	2.427	2.640	213	8,79

Nota. El Modelo 1 fue óptimo solo en el Bloque 1, donde tuvo un error relativo del 21,6%. El Modelo 3 fue seleccionado en dos bloques, destacando en el Bloque 2 (error relativo = 5,98%). El Modelo 2 también fue óptimo en dos bloques, con buen desempeño general (error relativo $\leq 8,79\%$), sobresaliendo en el Bloque 4 con su menor error (2,44%) siendo este el mejor.

Area de copa

Tabla 28. Desempeño comparativo de modelos predictivos terrestres para el area de copa

Bloque	Modelo Óptimo	Valor real (m ²)	Estimación (m ²)	Error absoluto (m ²)	Error relativo (%)
B1	Modelo 1	48,9	50,0	1,14	2,33

Bloque Modelo Óptimo		Valor real (m ²)	Estimación (m ²)	Error absoluto (m ²)	Error relativo (%)
B2	Modelo 4	753,0	643,0	110,0	14,6
B3	Modelo 4	104,0	107,0	2,80	2,69
B4	Modelo 3	66,7	60,4	6,30	9,45
B5	Modelo 1	149,0	152,0	2,85	1,91

Nota. El Modelo 1 fue seleccionado como óptimo en dos bloques, mostrando alta precisión (errores relativos $\leq 2,33\%$) siendo este el mejor. El Modelo 4 fue óptimo en los Bloques 2 y 3, aunque con una sobrestimación notable en el Bloque 2 (error absoluto = 110 m²; 14,6%). El Modelo 3 fue óptimo en un solo bloque (B4), pero con un error relativo elevado (9,45%).

Tabla 29. RMSE, sesgo y correlación de las estimaciones obtenidas mediante fotogrametría terrestre

Variables	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4		
	RMSE	Bias	Corr	RMSE	Bias	Corr	RMSE	Bias	Corr	RMSE	Bias	Corr
Altura total	9,33	-5,76	0,4	12,7	-8,92	0,4	1,83	0,312	1	4,70	-2,52	1
Altura copa	7,91	-4,99	0,4	11,4	-8,13	0,4	4,73	-2,69	1	4,68	-2,70	1
Área copa	173	-98,3	0,6	203	-116	0,7	89,4	-53,5	1	53,4	-36,4	1
Volumen copa	3.865	-1.902	0,6	3.945	-1.947	0,7	3.641	-1777	1	3.567	-1.746	1
Volumen Fuste	2,78	-1,27	1	6,06	-2,69	1	12,5	5,56	0,975	0,145	0,082	1
DAP	1,18	-0,534	1	4,61	2,59	1	1,20	-0,922	1	8,21	5,5	1
Biomasa	9.068	-4.780	0,4	16.921	-8.199	0,4	2.047	-1002	1	6.793	-2.758	1

Tabla 30. Comparación del desempeño de modelos fotogramétricos terrestres por bloque y generales en la estimación de variables dasométricas

Variable	Modelo O	RMSE O	Sesgo O	Corr O	RMSE g	Sesgo g	Corr g	Modelo g
Altura total	Modelo 4	0,34	0,03	1	1,83	0,312	1	Modelo 3
Altura copa	Modelo 3	0,95	-0,76	1	4,68	-2,70	1	Modelo 4
Área copa	Modelo 1	2,26	2,05	1	53,4	-36,4	1	Modelo 4
Volumen copa	Modelo 1	211	-164	1	3.567	-1.746	1	Modelo 4
Volumen Fuste	Modelo 1	0,008	0,006	1	0,14	0,08	1	Modelo 4
DAP	Modelo 3	0,84	-0,60	1	1,20	-0,92	1	Modelo 3
Biomasa	Modelo 2	151.0	103.0	1	2.047	-1.002	1	Modelo 1

Nota. Los símbolos **O** significan óptimo, mientras que **g** general.

En general, los resultados muestran que la selección de un modelo óptimo por bloque tiende a mejorar la precisión de las estimaciones para la mayoría de las variables dasométricas analizadas. En variables como altura total, altura de copa, volumen de madera, DAP, biomasa aérea y área de copa, los modelos por bloque presentaron errores más bajos y sesgos menos pronunciados que los modelos generales. Por ejemplo, en la variable altura total, el modelo óptimo presentó un error más de cinco veces menor que el del modelo general, con una diferencia marcada también en el sesgo. De forma similar, la altura de copa y el DAP mostraron mejoras evidentes en la precisión cuando se aplicó un modelo por bloque.

Una excepción notable fue el volumen de copa, donde el modelo general mostró mejor rendimiento que el modelo óptimo por bloque. Este comportamiento puede atribuirse a la alta variabilidad de esta variable, la cual podría hacer más eficaz un modelo entrenado con una muestra más amplia y diversa. No obstante, este caso fue aislado, ya que en el resto de variables el patrón se mantuvo a favor de la selección por bloque.

En cuanto a la correlación entre los valores estimados y reales, se observó un coeficiente perfecto ($r = 1$) en todos los casos, lo que sugiere que las diferencias entre modelos se explican principalmente por la magnitud del error y del sesgo, más que por la capacidad del modelo para reflejar la tendencia de los datos.

No se identificó un modelo único que fuera óptimo para todas las variables dasométricas. Estos resultados refuerzan la necesidad de ajustar modelos de manera diferenciada por tipo de variable, Específicamente, la selección recomendada por variable fue la siguiente: modelo 4 para altura total; modelo 3 para altura de copa y DAP; modelo 1 para área de copa, volumen de copa y volumen de fuste; y modelo 2 para biomasa aérea. Esta estrategia diferenciada por variable permite mejorar sustancialmente la exactitud de las estimaciones derivadas de la fotogrametría, evitando así el uso de un modelo universal que no se ajusta adecuadamente a las particularidades de cada variable dasométrica.

4.3.3 Fotogrametría terrestre 2

El análisis de los datos derivados del LiDAR de corto alcance T1 frente a la medición en campo T0 reveló patrones distintos en la precisión métrica entre especies. Para Yubar, se registró alta fidelidad en volumen, pero subestimación en DAP (-1,3 cm). Para el Eucalipto se obtuvo las mayores discrepancias (DAP: +8 cm). Las especies restantes presentaron errores aceptables en volumen (<0,06), aunque con sobrestimación progresiva en DAP, particularmente en Molle (+2,8 cm) (Tabla 31).

Tabla 31. Precisión y sesgo de LiDAR de corto alcance frente a medición en campo

Variables	Yubar		Eucalipto		Aligustre		Capulí		Molle	
	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias	RMSE	Bias
Volumen M	0.003	-0.003	2,21	+2,21	0,04	-0,04	0,01	+0,01	0,05	+0,05
DAP	1.3	- 1,3	8	+8	2	-2	2	+2	2,8	+2,8

Análisis estadístico

Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk indicaron que no se cumple el supuesto de normalidad en ninguno de los grupos de tratamiento ($p < 0,05$). No obstante, la prueba de Levene mostró que las varianzas son homogéneas entre tratamientos ($p = 0,662$) (Tabla 32). Por esta razón, se aplicó el análisis no paramétrico de Kruskal–Wallis (Tabla 33), el cual reveló que, en general, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, con

excepción de la biomasa aérea. Para identificar específicamente entre qué tratamientos existían diferencias, se empleó la prueba post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni (Tabla 34).

Tabla 32. Resultados de las pruebas de supuestos para el análisis de varianza

Estadístico	Tratamiento	p-valor
Shapiro-Wilk	T0	1,482e-17
	T1	1,703e-02
	T2	5,010e-22
	T3	1,612e-24
Levene-Test		0,662

Tabla 33. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis

Variable	P<0.05
Altura total	0,43
Altura de copa	0,42
Volumen de madera	0,08
Area de copa	0,43
Volumen de Copa	0,133
DAP	0,139
Biomasa aérea	0,047

Tabla 34. Comparaciones múltiples post-hoc para variables entre tratamientos

Variable	Comparación	Z	p ajustado (adj)
Biomasa aérea	T0 – T2	-2,35	0,05
	T0 – T3	-0,93	1
	T2 – T3	1,75	0,24

4.4 Objetivo 3: Flujo de trabajo

A partir de la evaluación de la precisión de los modelos seleccionados, se diseñó un flujo de trabajo específico para su aplicación en fotogrametría terrestre y aérea (Figura 7).

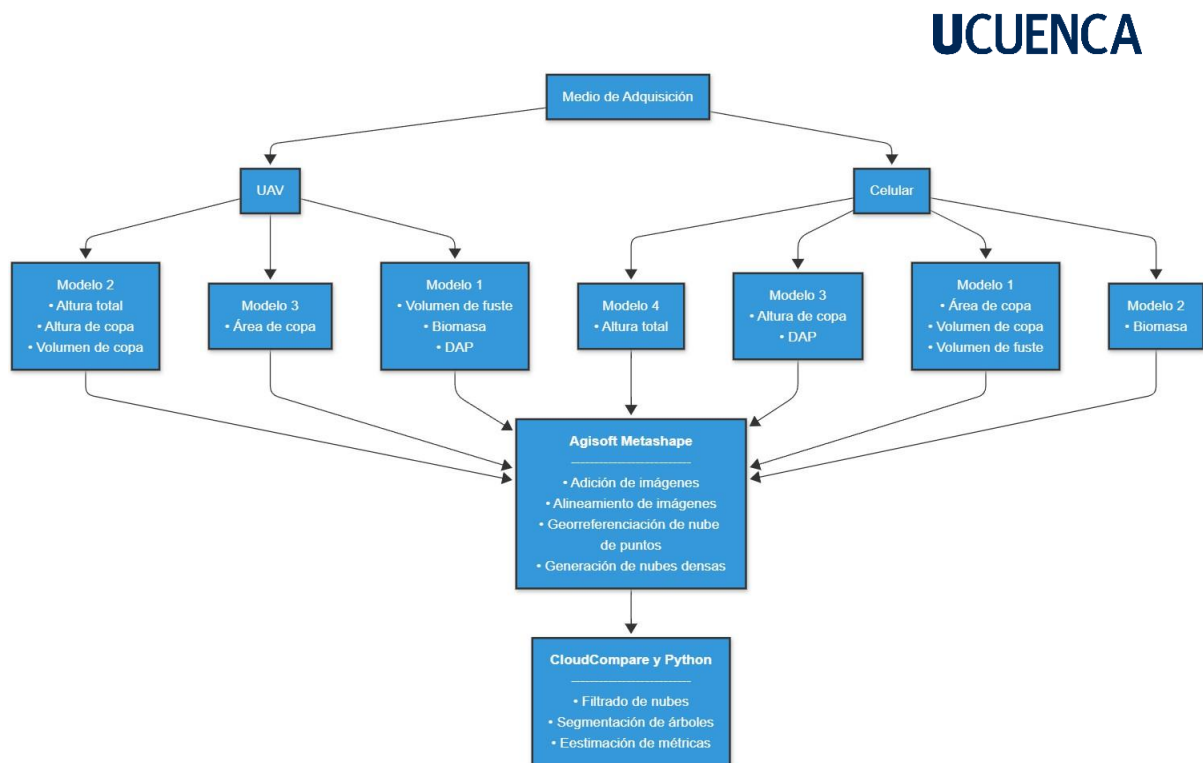


Figura 7. Flujo de trabajo para la estimación de parámetros de arquitectura arbórea mediante fotogrametría terrestre y aérea

Nota. Adaptado de (Balestra et al., 2023).

4.4.1 Tiempo de captura y procesamiento

El tiempo requerido para la captura de datos y el procesamiento varió entre los métodos evaluados. En el método tradicional, las mediciones directas demandaron un tiempo prolongado en campo debido a la necesidad de medir cada parámetro en promedio tres horas para todos los árboles.

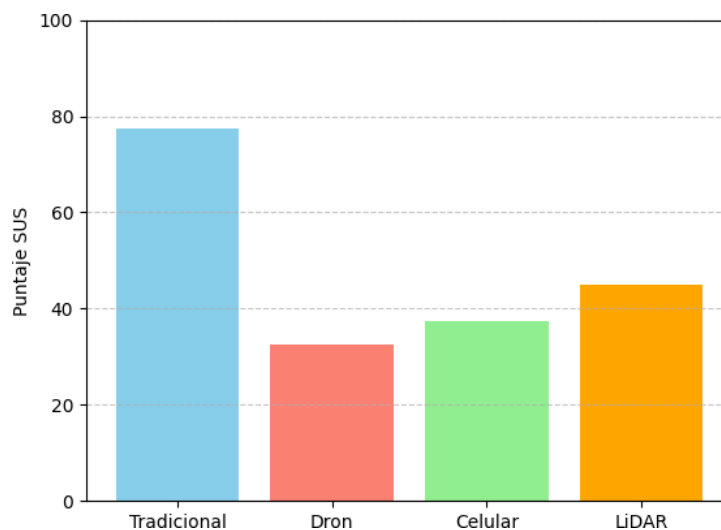
En contraste, el uso del dron permitió reducir significativamente el tiempo de captura en campo, ya que en un solo vuelo fue posible capturar imágenes de varios ángulos alrededor del árbol un tiempo promedio de siete minutos por árbol. Sin embargo, este método requirió un tiempo adicional en gabinete para procesar las imágenes mediante software especializado. Dependiendo del poder computacional disponible y las características de los árboles, los tiempos pueden variar de 1 a 11 horas/árbol.

Por su parte, la fotogrametría con celular presentó un tiempo de captura de datos en campo parecido al de los drones, ya que las imágenes debieron tomarse de manera manual alrededor del árbol mismo caso que el dron, el tiempo promedio fue de 6 minutos/árbol, el procesamiento en gabinete fue considerablemente más corto en comparación al dron, a pesar de que se contaba con la misma interpolación de imágenes, en promedio un tiempo máximo de 2.20 horas, este valor también está sujeto al poder computacional con el que se cuente.

Estos resultados evidencian que los métodos fotogramétricos permiten optimizar el tiempo en campo, aunque incrementan el tiempo en gabinete debido al procesamiento digital de las imágenes.

4.4.2 Facilidad de uso

A partir de la autoevaluación aplicada mediante el cuestionario de usabilidad (*System Usability Scale*, SUS), los puntajes obtenidos (Figura 8) indicaron que el método tradicional presentó una buena usabilidad, con un puntaje total de 77,5. Este resultado refleja una mayor familiaridad y comodidad al utilizar dicho método, en comparación con los demás. En contraste, los métodos basados en tecnologías (dron, celular y LiDAR) obtuvieron puntajes de usabilidad considerablemente más bajos. Lo cual se atribuyó principalmente a la necesidad de capacitación y práctica para dominar estas tecnologías, más que a limitaciones inherentes a las mismas.



Puntaje SUS por método

4.5 Costos

A continuación, se presentan los costos de los equipos e instrumentos utilizados en los diferentes métodos de evaluación de la arquitectura arbórea. Los precios están sujetos al mercado local al momento de la investigación:

Tabla 35. Costos

Unidad	Equipos e instrumentos	Precio de los equipos (USD)
1	Computadora	629
1	Dron DJI Air 2S	894
1	iPhone 13 Pro Max	800
1	GPSMAP 65s Garmin	486,9
1	Trípode	180
1	Cinta métrica	15
20	Esferas de espuma Flex	10,5
5	Lonas de control	20
Total		3.035,15

4.6 Aplicabilidad

Los resultados obtenidos evidenciaron que la técnica Structure from Motion (SfM) aplicada con drones y celulares puede presentar una buena aplicabilidad y precisión general para estimar los parámetros de arquitectura arbórea en la mayoría de las especies evaluadas.

El análisis del desempeño de los modelos fotogramétricos muestra que el uso de dispositivos móviles (celulares) ofreció estimaciones más precisas en variables como el DAP, la biomasa

aérea, el volumen de fuste, así como en altura y área de copa, superando en muchos casos al rendimiento de los modelos aéreos. Por otro lado, el uso de drones (UAV) mostró una mayor consistencia en la estimación de la altura total, aunque con errores más altos en otras variables.

Es importante destacar que ambos medios de adquisición presentaron una tendencia sistemática a la subestimación, reflejada en sesgos negativos en la mayoría de las variables, tanto en condiciones óptimas como generales. Esto indica que, aunque los modelos muestran buena correlación con los datos reales, tienden a infraestimar los valores absolutos, estos pueden ser corregidos si se aplicara una corrección lineal, esto se debe ser considerado al extrapolar estos resultados a otros contextos o especies.

En este sentido, la aplicabilidad de la técnica SfM dependerá del objetivo de cada estudio y de los límites máximos de error que se definan como aceptables para cada parámetro de interés, siendo adecuada en contextos donde se toleren mayores errores en especies complejas o donde se priorice una estimación rápida y no destructiva.

5. Discusiones

SfM con fotogrametría aérea

En relación con la variable diámetro a la altura del pecho, Mikita et al. (2016) reportaron un valor de RMSE de 0,911, el cual no coincide con los valores obtenidos en esta investigación ($2,50 < \text{RMSD} < 3,60$), ya que resulta superior. Esta diferencia puede atribuirse a múltiples factores técnicos y metodológicos. En particular, Mikita et al. (2016), usa calibración precisa de las cámaras, así como algoritmos automáticos de detección y ajuste cilíndrico para la extracción del DAP. En contraste, en el presente estudio se utilizaron plataformas más accesibles como un dron de consumo lo cual si bien refleja una mayor aplicabilidad en campo, también incrementa la incertidumbre en la definición del perímetro basal del tronco. Estos factores justifican la diferencia en la precisión obtenida.

Respecto a la variable altura total, los resultados obtenidos en este estudio (RMSE entre 1,78 m y 2,80 m, dependiendo del análisis óptimo o global) son comparables a los reportados por Jurjević et al. (2020), quienes informaron errores en el rango de 1,11 m a 1,58 m. No obstante, se observan diferencias importantes en cuanto al sesgo: mientras Jurjević et al. identificaron una tendencia a la sobreestimación (sesgo positivo entre +0,46 m y +0,88 m), en

este estudio se evidenció una subestimación sistemática (sesgo negativo entre $-0,88$ m y $-1,78$ m). Esta tendencia ha sido previamente documentada por Krause et al. (2019), quienes advierten que los modelos generados mediante fotogrametría aérea basada en UAV tienden a subestimar la altura de los árboles, especialmente en contextos de dosel denso o copas irregulares. Además, los autores destacan que dicha subestimación puede inducir a errores de interpretación cuando las alturas obtenidas desde modelos 3D se comparan con mediciones de campo, como ocurre en el presente estudio.

Así mismo al comparar la estimación de la altura total a partir de datos fotogramétricos obtenidos con UAV se presentó un error medio cuadrático (RMSE) de 2,8 m para vuelos de altura media, un valor superior al reportado por Puliti et al. (2015), quienes obtuvieron un RMSE de 0,72 m bajo condiciones de captura similares mientras que Mikita et al. (2016), mediante fotogrametría de corto alcance (una metodología similar a la utilizada en este estudio), reportaron un RMSE de 1,16 m. A diferencia de otros estudios donde la falta de georreferenciación precisa podría explicar errores elevados, en este caso se emplearon puntos de control terrestre (GCPs), lo que garantiza una correcta escala y orientación del modelo tridimensional generado. Sin embargo, las especies evaluadas *Myrsine andina*, *Eucalyptus spp.*, *Ligustrum lucidum*, *Prunus salicifolia* y *Schinus molle* presentan arquitecturas arbóreas diversas, con copas densas o irregulares, y diferencias marcadas en la distribución del follaje y la visibilidad del ápice.

Estas características morfológicas, propias de entornos tropicales y subtropicales, dificultan la identificación precisa de la base y la punta del árbol en las nubes de puntos derivadas de fotogrametría. Además, la heterogeneidad estructural y la oclusión vertical causada por la vegetación circundante incrementan los errores verticales incluso en modelos bien referenciados. Por tanto, la mayor magnitud del RMSE observada en este estudio puede atribuirse más a la complejidad del dosel y a la variabilidad morfológica de las especies analizadas, que a deficiencias en la metodología de captura o procesamiento.

En cuanto al volumen de fuste, Mikita et al. (2016) reportaron un RMSE de 1.016, mientras que en la presente investigación se obtuvo un RMSD entre 0,29 y 0,35, siendo estos valores considerablemente menores. Esta diferencia podría atribuirse a los parámetros de captura de las imágenes, los cuales no fueron los mismos en el estudio comparado que los utilizados en la metodología de esta investigación.

SfM con fotogrametría terrestre

Los valores de RMSE obtenidos para la estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP), que oscilaron entre 0,64 cm y 1,20 cm, indican una alta precisión del modelo empleado. Estos resultados son notablemente inferiores a los reportados por Liang et al. (2015), quienes registraron valores de RMSE para DAP entre 2,98 cm y 6,79 cm. Esta diferencia sugiere que la técnica SfM implementada con dispositivos móviles en el presente estudio ofrece un nivel de precisión adecuado para aplicaciones prácticas en inventarios forestales, como también señalan Liang et al. al considerar aceptable dicho rango de error. Por otro lado, Putra et al. (2021) reportaron un RMSE de 2,749 cm, significativamente mayor al logrado aquí, lo que refuerza la validez y eficacia del enfoque metodológico utilizado.

Respecto a la estimación de la altura, el presente estudio registró un RMSE del 1,65%, evidenciando, al igual que Miller et al. (2015) y Morgenroth y Gomez (2014), una ligera tendencia a la sobreestimación. Estos últimos reportaron errores del 3% y 2,3%, respectivamente. La menor magnitud del error en este trabajo puede estar relacionada con la aplicación de un modelo más robusto, un mejor procedimiento de medición y validación. Además, una mayor calidad y cantidad de datos (fotografías) podría haber contribuido a reducir el error en la estimación de la altura, lo que evidencia una mejora metodológica frente a estudios previos.

LiDAR

Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron comparados con investigaciones previas que utilizaron tecnologías LiDAR móvil para la estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP). Guenther et al. (2024), en su artículo *“Un estudio de caso en bosques boreales, Ontario, Canadá”*, reportaron un error cuadrático medio (RMSE) de 1.03 cm para la variable DAP al emplear un escáner LiDAR integrado en un iPad Pro. Este valor es notablemente similar a los registrados en la presente investigación, donde los errores se situaron en el rango de $1.30 \text{ cm} < \text{RMSD} < 1.58 \text{ cm}$.

De manera similar, en el estudio *“Medición del diámetro de los árboles con un iPad equipado con LiDAR: una evaluación de las aplicaciones ForestScanner y Arboreal Forest”* (Howie & De Stefano, 2024) se obtuvo un RMSE de 5.27 cm al utilizar la aplicación ForestScanner. Este valor difiere considerablemente de los errores obtenidos en la presente investigación.

Por otro lado, otros estudios reportaron errores más próximos a los encontrados en este trabajo: RMSE = 2.78 cm (Wang et al., 2021), RMSE = 2.30 cm (Tatsumi et al., 2023) y RMSE = 2.33 cm (Gülci et al., 2023), valores que se aproximan a los resultados de este estudio.

Las discrepancias observadas entre los estudios revisados y los resultados obtenidos pueden atribuirse a diversos factores: (1) las diferencias taxonómicas y estructurales de las especies evaluadas, que influyen en la reflectancia y penetración del haz LiDAR; (2) las condiciones ambientales durante la captura de datos, como la iluminación y la densidad del follaje; y además, la experiencia del operador y la técnica de escaneo empleada pueden afectar la precisión de las mediciones. Otros factores como la velocidad de captura y el método de procesamiento de los datos también podrían explicar las variaciones en los resultados reportados por cada estudio.

Modelos

Los resultados obtenidos permiten evidenciar diferencias sustanciales en el desempeño de los modelos fotogramétricos según el medio de adquisición empleado (aéreo mediante UAV y terrestre mediante teléfono celular) y la variable dasométrica estimada. En términos generales, los modelos generados a partir de imágenes adquiridas con dispositivos móviles (fotogrametría terrestre) mostraron un mayor grado de precisión en variables relacionadas con la estructura basal del árbol, tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), el volumen de fuste y la biomasa aérea, mientras que los modelos derivados de imágenes capturadas con drones (fotogrametría aérea) fueron relativamente más consistentes en la estimación de la altura total y, en menor medida, del área de copa (Puliti et al., 2020; Cunliffe et al., 2016).

Este comportamiento se encuentra sustentado en las características geométricas y operativas de cada método. En la fotogrametría terrestre, la proximidad del sensor al objeto permite obtener imágenes con mayor resolución espacial y una cobertura angular lateral más amplia, condiciones que favorecen una reconstrucción tridimensional más precisa del tronco y las secciones inferiores del árbol. Esto es particularmente relevante en variables como el DAP, donde la capacidad de capturar detalles en planos verticales a nivel de suelo incide directamente en la calidad de la estimación. Andrade et al. (2022).

Por otro lado, el medio aéreo permite capturar información cenital a gran escala, lo que facilita la detección de extremos superiores del dosel y una cobertura completa de las copas. Esto lo hace más adecuado para la estimación de altura total y, en menor medida, área de copa, aunque con un nivel de error mayor en comparación con los modelos terrestres, posiblemente asociado a limitaciones en la resolución del sensor, presencia de oclusiones parciales y geometría de vuelo (Wallace et al., 2016). Pese a esto, los modelos aéreos mostraron un

comportamiento relativamente consistente, con RMSEO de 2.08 para altura total y una correlación general (Corrg) de 1.00 para dicha variable.

Un aspecto importante a resaltar es la tendencia sistemática a la subestimación observada en la mayoría de las variables, tanto en condiciones óptimas como generales. Esta tendencia se refleja en los sesgos negativos reportados en la mayoría de los modelos, particularmente en variables derivadas como volumen de copa y biomasa. Dicho sesgo puede estar asociado a limitaciones inherentes a los algoritmos de reconstrucción 3D, que tienden a suavizar los contornos y omitir estructuras finas o parcialmente ocluidas, especialmente en ambientes con alta densidad de vegetación (James & Robson, 2014). Asimismo, la estimación indirecta de variables como la biomasa, que depende de relaciones alométricas sensibles al DAP y a la altura, amplifica los errores acumulados durante la reconstrucción.

En síntesis, el desempeño diferencial de los medios de adquisición responde a principios geométricos bien documentados y pone de manifiesto la necesidad de seleccionar la plataforma de captura en función de las variables de interés.

Aplicabilidad

Marzulli et al. (2020) destacan que los enfoques fotogramétricos se presentan como una alternativa prometedora en el ámbito del levantamiento de información estructural en entornos forestales. Gracias a los avances en los algoritmos fotogramétricos, las técnicas basadas en imágenes han logrado generar nubes de puntos tridimensionales de calidad comparable a los datos obtenidos mediante escaneo láser terrestre (LiDAR) (Cavegn et al., 2014; Liang et al., 2015, 2016). La implementación de la metodología Structure from Motion (SfM) (Ullman & Brenner, 1997; Marzulli et al., 2020) ha sido crucial para optimizar este proceso, permitiendo la reconstrucción precisa de modelos tridimensionales a partir de imágenes aéreas y terrestres.

Numerosos estudios han demostrado la viabilidad de utilizar imágenes terrestres como fuente para la creación de nubes de puntos, especialmente para el mapeo de árboles, donde se han evidenciado su aplicabilidad y coste-efectividad en comparación con otras tecnologías (Morgenroth & Gómez, 2014; Liang et al., 2016; Forsman et al., 2016; Miller et al., 2015; Mikita et al., 2016; Panagiotidis et al., 2017). Estos enfoques han sido particularmente útiles en la estimación de características estructurales arbóreas, ofreciendo una opción viable y accesible.

Cada tecnología de teledetección requiere formas específicas de adquisición y procesamiento de datos, así como un proceso continuo de capacitación y desarrollo de capacidades (Böttcher et al., 2009). Los costos asociados a la adquisición de datos varían según las necesidades específicas del proyecto, mientras que los gastos derivados de la capacitación dependen de factores como el grado de automatización alcanzable en la recolección y procesamiento de la información. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) se presentan como una opción práctica para áreas de pequeño tamaño, aunque sus limitaciones en cuanto a energía y capacidad de carga útil restringen su uso en áreas extensas (Mlambo et al., 2017).

6. Conclusión

Los resultados obtenidos demostraron que ambos enfoques de fotogrametría aérea y terrestre son viables y precisos, siempre que se optimicen los parámetros de captura y se seleccione el modelo más adecuado según la variable a estimar.

En fotogrametría aérea, el Modelo 1 fue el más eficiente en la generación de nubes de puntos densas, superando significativamente a los demás en cuanto al número de puntos, aunque su rendimiento varió en función de la especie y la variable analizada. El análisis por bloques y a nivel global evidenció que no existe un modelo óptimo universal: el Modelo 2 fue más preciso para estimar altura total, altura y volumen de copa, mientras que el Modelo 1 sobresalió en la estimación de volumen de fuste, biomasa aérea y DAP. El Modelo 3, por su parte, mostró mejor desempeño en el cálculo del área de copa en casos específicos.

En cuanto a la fotogrametría terrestre, también se observaron diferencias en la densidad de puntos generados por árbol y por modelo. El Modelo 3 presentó la mayor densidad promedio de puntos. En términos de precisión, el análisis por bloques nuevamente indicó que no hay un modelo universalmente superior: el Modelo 4 se destacó en altura total; el Modelo 3, en altura de copa y DAP; el Modelo 1, en volumen de copa, área de copa y volumen de fuste; y el Modelo 2, en biomasa aérea. En general, los modelos específicos por bloque ofrecieron mejores niveles de precisión y menor sesgo frente a los valores reales. Además, el LiDAR mostró un buen desempeño en la estimación de volumen y DAP, con errores bajos, lo que respalda su uso como referencia. Asimismo, se logró implementar con éxito el flujo de trabajo planteado.

En síntesis, los resultados obtenidos a partir de las nubes de puntos generadas, altamente comparables con las obtenidas mediante LiDAR, los modelos identificados como más precisos, las métricas extraídas y la efectividad del flujo de trabajo aplicado permiten concluir que la técnica de Structure from Motion (SfM) constituye una alternativa técnicamente sólida, viable y metodológicamente consistente para la estimación de parámetros relacionados con la arquitectura arbórea. Esta técnica es especialmente útil en contextos donde se busca un equilibrio entre costo, accesibilidad y eficiencia.

7. Recomendaciones

Se recomienda ampliar la variedad de sensores empleados, incluyendo celulares de distintas gamas y cámaras integradas en drones de diferentes especificaciones técnicas (resolución, tamaño del sensor, óptica, capacidad de estabilización), con el fin de analizar la relación entre las características del equipo, el error sistemático y aleatorio en las mediciones. Igualmente, se sugiere integrar tanto la fotogrametría terrestre como la aérea, para obtener modelos tridimensionales más completos.

Asimismo, sería conveniente explorar distintos patrones y estrategias de captura, tales como helicoidales o zig-zag multieje, así como configurar diferentes ángulos de toma, solapes (horizontal y vertical) y resoluciones GSD (*Ground Sample Distance*), con el objetivo de optimizar la densidad y calidad de la nube de puntos generada. Esto permitiría no solo aumentar la precisión geométrica del modelo, sino también mejorar la capacidad de estimar parámetros estructurales clave como el DAP, el volumen de copa, el área de copa y la altura total.

Adicionalmente, se recomienda automatizar la adquisición de datos mediante misiones preprogramadas. Esto mejoraría significativamente la eficiencia operativa, la trazabilidad del proceso y la reproducibilidad de los resultados. Así como para el análisis cuantitativo de los modelos, se recomienda implementar algoritmos de análisis semiautomatizado o aprendizaje automático (*machine learning*) aplicados a nubes de puntos o modelos de superficie (DSM/DTM), mediante el uso de plataformas como PDAL, o herramientas basadas en Python (*Open3D, PyntCloud*, etc.). Esto permitiría extraer características geométricas y morfológicas con mayor rapidez y objetividad.

Por último, se considera clave fomentar la capacitación técnica en fotogrametría, procesamiento de datos geospaciales y modelado 3D, incluyendo temas como calibración de cámaras, corrección radiométrica, generación de modelos fotogramétricos precisos y validación cruzada con técnicas como LiDAR terrestre o mediciones manuales de referencia

8. Referencias

- Balestra, M., Tonelli, E., Vitali, A., Urbinati, C., Frontoni, E., & Pierdicca, R. (2023). Geomatic Data Fusion for 3D Tree Modeling: The Case Study of Monumental Chestnut Trees. *Remote Sensing*, 15(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs15082197>
- Dorji, Y., Schuldt, B., Neudam, L., Dorji, R., Middleby, K., Isasa, E., Körber, K., Ammer, C., Annighöfer, P., & Seidel, D. (2021). Three-dimensional quantification of tree architecture from mobile laser scanning and geometry analysis. *Trees*, 35(4), 1385-1398. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02124-9>
- Hallé, F., & Oldeman, R. (1970). *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Monographie de Botanique et de Biologie Végétale.
- Halle, F., Tomlinson, P., & Oldeman, R. (1998). *Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis by Halle, Francis; Tomlinson, P.B.; Oldeman, Roelof A.A.: Very Good Hardcover (1978) 1st Edition | Bingo Books 2 (1st Edition)*. Springer-Verlag. <https://www.abebooks.com/first-edition/Tropical-Trees-Forests-Architectural-Analysis-Halle/8562725042/bd>
- Morales, D., & Piazza, M. (2025). *Gestión Forestal Sostenible (GFS)*. Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS). <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/forest-inventory/credits/es/>
- Rodríguez, N. (2013). *GUÍA PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA BIOMASA Y EL CARBONO FORESTAL, GENERACIÓN DE MODELOS Y USO DE HERRAMIENTAS PARA SU ESTIMACIÓN*. CORPORACIÓN AUTONÓMA

REGIONAL DE CUNDINAMARCA.

<https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade19e5bcb8e.pdf>

Smith, Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(20), 247-275.

<https://doi.org/10.1177/0309133315615805>

Snaveley, K. (2011). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections.

IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications, 3.

<https://doi.org/10.2197/ipsjtcva.3.44>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012).

Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>