

GENERACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL  
INVENTARIO FORESTAL COMBINANDO FOTOGRAMETRÍA AÉREA Y  
TERRESTRE EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis*

EDGAR ALBERTO AGUDELO DEL RIO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN  
MANIZALES  
2020

GENERACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL  
INVENTARIO FORESTAL COMBINANDO FOTOGRAMETRÍA AÉREA Y  
TERRESTRE EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis*

EDGAR ALBERTO AGUDELO DEL RIO

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAGISTER EN  
TELEDETECCIÓN

TUTOR: DR. OSCAR CARDONA MORALES

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN  
2020

## AGRADECIMIENTOS

A la División Forestal de Smurfit Kappa Colombia por todo el apoyo logístico y económico.

A mis compañeros de trabajo por el apoyo académico, profesional y emocional.

A mi familia por su apoyo incondicional, tiempo y comprensión

A mi tutor por su apoyo académico

A todos... *¡Gracias totales!*

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS .....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3. MARCO TEÓRICO.....	17
3.1 INVENTARIO FORESTAL .....	17
3.2 ESTIMACION DE VARIABLES DASOMETRICAS POR SENSORES REMOTOS. 19	
4. MATERIALES Y METODOS .....	26
4.1 AREA DE ESTUDIO.....	26
4.2 ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS .....	27
4.3 MEDICIÓN DE VARIABLES DASOMETRICAS.....	28
4.3.1 Instrumentos. ....	28
4.3.2 Ubicación de las parcelas en campo: .....	28
4.3.3 Establecimiento y demarcación de la parcela:.....	28
4.3.4 Medición del diámetro: .....	29
4.3.5 Medición de alturas: .....	29
4.4 FOTOGRAFÍAS AÉREAS .....	30
4.4.1 Planificación de vuelos:.....	30
4.4.2 Toma de fotografías aéreas: .....	31
4.5 FOTOGRAFIAS TERRESTRES. ....	32
4.6 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS .....	34
4.6.1 Estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP).....	35
4.6.2 Generación de modelos .....	36
4.6.3 Estimación de Alturas .....	36
4.7 CALCULO DEL INVENTARIO .....	39
4.7.1 Estimación de Alturas .....	39
4.7.2 Estimación de volumen .....	39
4.7.3 Cálculo de parámetros de rodal .....	39

4.8	COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE METODOS .....	39
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
5.1	INVENTARIO TRADICIONAL.....	41
5.2	FOTOGRAMETRIA AEREA Y TERRESTRE .....	42
5.2.1	Estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP).....	43
5.2.2	Generación de modelos .....	46
5.2.3	Estimación de Alturas .....	47
5.3	COMPARACION ESTADISTICA DE METODOS.....	50
5.3.1	A nivel de árbol. ....	50
5.3.2	A nivel de parcela.....	55
6.	CONCLUSIONES.....	58
7.	RECOMENDACIONES .....	59
	BIBLIOGRAFÍA.....	60

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Especificaciones cámara DJI Mavic 2 Pro.....	31
Tabla 2. Toma de fotografías aéreas.....	31
Tabla 3. Toma de fotografías terrestres .....	33
Tabla 4. Datos resultantes del inventario tradicional .....	42
Tabla 5. Propiedades de las nubes de puntos de fotogrametría aérea y terrestre.....	43
Tabla 6. Diferencias entre el número de árboles por parcela según el tipo de inventario. .	45
Tabla 7. Datos resultantes del inventario por fotogrametría aérea y terrestre. ....	50

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Diferenciación entre el DTM, DSM y CHM. (Michez et al., 2016) .....	22
Figura 2. Ejemplo de un enfoque de detección y delimitación de copas de árboles individuales.....	22
Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio .....	26
Figura 4. Localización de las parcelas y puntos de control en el área de estudio.....	27
Figura 5. Diseño de los puntos de control .....	27
Figura 6. Establecimiento de la parcela y etiquetado de árboles al DAP .....	29
Figura 7. Errores en la estimación de alturas con árboles inclinados. ....	30
Figura 8. Toma de fotografías terrestres .....	32
Figura 9. Puntos de control adicionales para la parcela.....	33
Figura 10. Nubes de puntos .....	34
Figura 11. Nubes de puntos de cortes transversales a árboles. ....	35
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología expuesta .....	38
Figura 13. Generación de nube de puntos fotogrametría terrestre .....	43
Figura 14. Clasificación de nube de puntos fotogrametría terrestre.....	44
Figura 15. Extracción nube de puntos al DAP.....	44
Figura 16. Selección de árboles que se encuentran en la parcela 5.....	45
Figura 17. Combinación de nube de puntos para la generación de modelos .....	46
Figura 18. DSM para el área de estudio.....	46
Figura 19. DTM (a) y CHM (b) para la parcela 5 .....	47
Figura 20. Generación de alturas para cada árbol en la parcela 5.....	47
Figura 21. Ventanas de tamaño variable circular .....	48
Figura 22. Ventanas de tamaño variable cuadradas .....	49
Figura 23. Diagrama de dispersión entre el DAP del método tradicional y el método por fotogrametría. ....	51
Figura 24. (a) Diagrama de dispersión entre las diferencias y promedios de DAP del método tradicional y el método de fotogrametría terrestre. ....	52
Figura 25. Diagrama de dispersión entre la altura del método tradicional y el método de fotogrametría. ....	53
Figura 26. (a) Diagrama de dispersión entre las diferencias y promedios de altura del método tradicional y el método de fotogrametría. ....	54
Figura 27. Diagramas de dispersión entre las variables de rodal del método tradicional y el método de fotogrametría. ....	57

## ACRONIMOS Y ABREVIATURAS

Acrónimo	Significado
CHM	Modelo de altura del dosel ( <i>Canopy Height Model</i> )
DAP	Diámetro del árbol a la altura del pecho
DSM	Modelo digital de superficie ( <i>Digital Surface Model</i> )
DTM	Modelo digital del terreno ( <i>Digital Terrain Model</i> )
FA	Fotogrametría aérea
IWD	Método delimitación inversa de cuencas hidrográficas ( <i>Inverse Watershed Delineation</i> )
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
MVS	Esterero fotogrametría multi vista ( <i>Multi-View Stereo- Photogrammetry</i> )
RMSE	Error medio cuadrático
SfM	Estructura a partir del movimiento ( <i>Structure from Motion</i> )
TLS	Escáner laser terrestre ( <i>Terrestrial Laser Scanner</i> )
VANT	Vehículos aéreos no tripulados
VSW	Método ventana de tamaño variable ( <i>Variable Sized Window</i> )



## RESUMEN

En el manejo de plantaciones forestales resulta de gran importancia el inventario forestal, pues este permite obtener una valoración económica de activos y la correcta planificación de actividades silvícolas y de aprovechamiento de las mismas. Los métodos tradicionales de inventario presentan altos errores debido a las condiciones propias de la plantación, a los instrumentos de medición y la toma de los datos en campo por los operarios. Las principales medidas de campo para conocer el inventario son la medición del diámetro a la altura del pecho y la estimación de la altura, con lo cual se hace necesario encontrar métodos alternativos apoyados en sensores remotos, que permitan mejorar los costos, los tiempos y la precisión.

En esta investigación se modeló el inventario forestal de plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis* a partir de imágenes obtenidas con vehículos aéreos no tripulados en combinación con imágenes obtenidas debajo del dosel que permiten generar una nube de puntos desde el suelo hasta la copa de los árboles. Tanto con los datos de campo como con los obtenidos de la metodología propuesta se modeló el inventario y las existencias de madera en un lote de plantación y se realizaron comparaciones estadísticas de los resultados.

Los resultados sugieren que existe un buen ajuste de los datos para los árboles individuales en cuanto al DAP ( $r = 0.99$ ) y la altura ( $r = 0.82$ ). A nivel de parcela y de rodal, el modelo presenta buen ajuste a nivel de diámetro medio y aquellas variables que son dependientes del DAP; mientras que las variables dependientes de la altura o la densidad mostraron menos ajuste. Esto se debe principalmente a los pocos datos tomados para la comparación de alturas y a las diferencias en el establecimiento de la parcela de campo. Con el desarrollo de este estudio se demostró una metodología que permite la estimación del DAP y la altura para plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis*, que puede ser aplicada en estudios futuros a otros lotes de la misma especie.

**PALABRAS CLAVE:** Inventario forestal, *Eucalyptus grandis*, VANT, fotogrametría aérea y terrestre

## ABSTRACT

The forest inventory is a very important tool in forest management; it provides the data for obtaining an economic valuation of assets and the correct planning of silvicultural and harvest activities. The traditional inventory methods have high errors due to the conditions of the plantation, the measurement instruments and the data collection by field workers. Diameter at breast height (DBH) and tree height are the most important variables when taking forest inventories, for that reason, it is necessary to find alternative methods supported by remote sensors, which allow improving the costs, time and precision.

In this investigation, the forest inventory of forest of *Eucalyptus grandis* plantations was modeled. It was done based on images obtained with unmanned aerial vehicles in combination with images obtained under the canopy allowing generating a cloud of points from the ground to the treetops. Both with the field data and with those obtained from the proposed methodology, inventory and timber stocks were modeled in a plantation stand and statistical comparisons of the results were made.

The results suggest that there is a good fit of the data for the individual trees in terms of DBH ( $r = 0.99$ ) and height ( $r = 0.82$ ). At the plot and stand level, the model shows a good fit at the mean diameter level and for those variables that are dependent on DBH; in contrast the dependent variables of height or density showed less fit. This result is mainly due to the few data taken for the comparison of heights and the differences in the establishment of the field plot. This research shows that the methodology applied allows a good estimation of the DBH and tree height for forest plantations of *Eucalyptus grandis*, which can be applied in future studies to other stands of the same species.

**KEY WORDS:** Forest inventory, *Eucalyptus grandis*, UAV, aerial and terrestrial photogrammetry

## 1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales tienen una importancia creciente para satisfacer las necesidades de madera y sus productos derivados en una población mundial creciente, y para mejorar los niveles de vida, como asimismo para disminuir la presión de madera y otros productos forestales provenientes de los bosques naturales que afectan grandes ecosistemas. Se estima que durante el período 2015-2020 la tasa de deforestación de los bosques a nivel mundial fue de 10 millones de hectáreas al año (FAO y PNUMA, 2020).

En el mundo existen aproximadamente 132 millones de hectáreas de plantaciones forestales, es decir, bosques establecidos con un espaciado regular y de manejo intensivo, de la misma edad, establecidos con una o varias especies de árboles maderables y establecidas sobre todo con fines productivos. En América del Sur el 99% de la superficie de bosques plantados está dedicado a plantaciones forestales (FAO y PNUMA, 2020). A nivel local, Colombia cuenta con 568.769 hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales el 44% se encuentran en el eje cafetero, el 26% en la Orinoquia y el 18% en el caribe (MinAgricultura, 2019).

La correcta gestión de las cantidades de madera provenientes de plantaciones forestales brinda a los productores una serie de oportunidades para mejorar las condiciones de manejo en las áreas establecidas. Para ello el inventario forestal juega un papel primordial, pues provee información sobre la cantidad, ubicación y la calidad de los recursos forestales, permitiendo estimar la biomasa y la modelación del carbono acumulado en la parte aérea y terrestre de los bosques naturales y plantados; y constituye una herramienta básica para la toma de decisiones como el manejo y aprovechamiento, maximizando los beneficios sociales, ambientales y económicos de la región en la que opera.

Debido al tamaño de las áreas plantadas se hace difícil medir todas las características de los árboles, lo que resultaría en unas altas inversiones de tiempo, personal y dinero, es por ello que el inventario está basado en un muestreo de la población y mediante modelación se llega a la estimación de las variables de crecimiento y volumen, que permiten obtener una valoración económica de activos y la correcta planificación de actividades silvícolas y de aprovechamiento. (Imaña-Encinas, 2011)

En un inventario forestal se incluyen dos componentes básicos de las plantaciones: los árboles y el terreno. Respecto a los árboles, son el diámetro a la

altura del pecho (DAP) y la altura las principales variables consideradas; también se observa el estado sanitario y cantidad de árboles por área determinada, permitiendo con estos datos estimar el volumen de madera que presenta la plantación forestal. En cuanto al terreno se hacen todas las asociaciones que permitan mejorar el manejo, como son las vías, las quebradas y la topografía (Imaña-Encinas, 2011).

Las asociaciones entre diámetros y circunferencias representan un elemento importante para las estimaciones de variables relacionadas con las labores de inventarios como son: el área basal, el volumen, crecimiento, clasificación del sitio, comparación de variables etc. El DAP es la medida más típica del diámetro de un árbol y por convención se mide a los 1.3 metros sobre el nivel del suelo. Esta es una medida que se hace directamente sobre el árbol y cuya precisión depende del equipo de medición y el operario (Lema Tapias, 2003)

La altura del árbol es otra importante variable dendrométrica, necesaria para estimar junto con el diámetro, fundamentalmente el volumen de madera del árbol y sus componentes. Necesariamente esta variable en un inventario debe estimarse por medidas indirectas, que son aquellas que se hacen sin tocar el árbol, con la ayuda de algún instrumento óptico o de ultrasonido, la única forma de hacer mediciones directas es el método destructivo. Esta variable representa en un inventario la mayor fuente de error ya que dependen altamente de la precisión del equipo usado y de las estimaciones del operario (Krause et al., 2019; Panagiotidis, Abdollahnejad, Surovyy, et al., 2017).

Es así como los métodos de inventario tradicional para recopilar información forestal que se utilizan en la actualidad requieren mucho tiempo y costos laborales (Mikita et al., 2016). Adicionalmente, los métodos tradicionales de inventario presentan altos errores debido a las condiciones propias de la plantación, a los instrumentos de medición y la toma de los datos en campo por los operarios (Wallace, Lucieer, et al., 2014). Con lo cual se hace necesario encontrar métodos alternativos apoyados en sensores remotos, que permitan mejorar los costos, los tiempos y la precisión.

Como ya se mencionó, el 44% de las plantaciones forestales en Colombia se encuentran en la región alto andina, la cual presenta condiciones de alta pendiente y predominio de nubes (Minaet, 2011), lo que dificulta el uso de sensores remotos tradicionales o imágenes de satélite de alta resolución para obtener información que permita evaluar el crecimiento, estimar los inventarios o hacer seguimiento a las

labores silvícolas. Lo anterior, sumado a la baja resolución temporal y los altos costos de adquisición (Grenzdörffer et al., 2008).

Existen tecnologías que permiten la adquisición de datos tridimensionales (3D) que se basan en sensores activos como el escaneo laser o Light Detection and Ranging (LiDAR) o en sensores pasivos como la fotogrametría aérea (FA) (Mikita et al., 2016). Ambas tecnologías tienen la ventaja de una mayor escala y una adquisición de datos muy rápida de áreas forestales relativamente grandes y con muy alta resolución (Peduzzi et al., 2012). Pero también, tienen grandes restricciones para determinar la forma y el tamaño del tallo (Nex & Remondino, 2014)

El escáner laser terrestre (TLS, por sus siglas en inglés) o LiDAR terrestre, se está aplicando cada vez más en el sector forestal. Aunque TLS proporciona una gran cantidad de información detallada del entorno forestal y del árbol individual, el precio actual de los dispositivos de escaneo láser restringe su uso en los inventarios forestales (Mikita et al., 2016). Otra forma de generar nubes de puntos a nivel terrestre son las presentadas por Liang et al., (2014) y Mikita et al., (2016) en las que por métodos de fotogrametría terrestre con cámaras fotográficas convencionales logran identificar los tallos de los arboles individuales y estimar su forma y dimensiones.

La tecnología LiDAR ofrece mejor desempeño que la FA para penetrar el dosel y obtener información del suelo o el sotobosque y la posibilidad de calcular la altura de los árboles. Uno de los aspectos únicos de LiDAR es su capacidad de penetrar a través del dosel y detectar la presencia de malezas y sotobosque bajo dosel en rodales con dosel cerrado (Peduzzi et al., 2012) Sin embargo, el precio de los equipos y los valores de adquisición de datos son costosos, por lo que los hace restringidos (Moe et al., 2020).

Las nubes de puntos derivadas de las imágenes por fotogrametría aérea se generan de acuerdo con los principios de la fotogrametría estereoscópica tradicional, utilizando características geométricas bien definidas capturadas en múltiples imágenes desde diferentes puntos de vista angulares (Sotier, 2014; Wallace et al., 2016). Y en combinación con nubes de puntos obtenidas por fotogrametría terrestre permiten modelar la altura de los árboles de una similar a los datos LiDAR (Iglhaut et al., 2019)

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT's) se han convertido en una herramienta rápida, sencilla y de bajo costo para la obtención de datos, especialmente imágenes de alta resolución y productos derivados. En contraste con las imágenes satelitales o las imágenes de sensores aerotransportados o los datos LiDAR, las imágenes obtenidas con estos vehículos ofrecen mayor resolución espacial y temporal y son poco dependientes de la nubosidad o de las condiciones climáticas (Grenzdörffer et al., 2008; Tang & Shao, 2015).

Actualmente en Colombia el uso de VANT's en plantaciones forestales no ha sido explorado, por el contrario, su uso ha estado orientado a las aplicaciones agrícolas, especialmente en cultivos de grandes extensiones. En el presente, el uso de VANT's en aplicaciones forestales se encuentra en una fase inicial, pero es razonable anticipar que, en un futuro próximo, el papel de éstos superará el sensoramiento remoto con aviones tripulados (Guimarães et al., 2020; Tang & Shao, 2015).

Este estudio se realizó para el caso de la empresa Smurfit Kappa Colombia, la cual posee 67.879 ha de terreno, ubicadas sobre las cordilleras Occidental y Central del suroeste y Viejo Caldas Colombianos. El área se distribuye en seis departamentos y 33 municipios del territorio nacional, y se administra en tres zonas: 1. Zona Sur, 2. zona Valle y 3. Zona Norte que a su vez se dividen en 16 Núcleos Forestales con 42,426 ha dedicadas a plantaciones, 22.389 cubiertas por bosques naturales y un restante dedicado a infraestructura, vías y áreas administrativas (Smurfit Kappa Colombia, 2020). Para el adecuado manejo de todas las áreas, la correcta estimación de existencias y planificación de actividades, se hace necesario una adecuada metodología de inventario forestal. Pues está estrechamente relacionado con los beneficios sociales, ambientales y económicos.

Todas las asunciones anteriores permiten realizar la pregunta ¿Cómo estimar las variables dasométricas y calcular en inventario forestal combinando fotogrametría aérea y terrestre?

El presente documento está dividido en secciones. La primera es la introducción. Una segunda sección incluye los objetivos de este estudio y la forma en la que se desarrolla. La tercera sección ilustra acerca de las teorías relacionadas con el inventario forestal tradicional y las técnicas de sensoramiento remoto empleadas para obtener el inventario forestal. Una cuarta sección se relaciona con la metodología empleada para el cálculo del inventario tradicional y por sensores remotos, también las estadísticas empleadas para comparar los métodos. La quinta

sección muestra los resultados, la discusión y las comparaciones estadísticas a las que llega el estudio. Por último, se hacen unas conclusiones y unas recomendaciones para estudios futuros.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Generar una metodología para la estimación de las variables dasométricas a partir de fotografías aéreas y terrestres que permita el cálculo del inventario forestal de plantaciones de *Eucalyptus grandis*

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar una metodología para la estimación del diámetro a la altura del pecho mediante el procesamiento de nubes de puntos generados por fotogrametría terrestre.
- Estimar la altura de los arboles a partir del procesamiento de nubes de puntos generadas por fotogrametría aérea y terrestre, y la metodología ventana de tamaño variable
- Comparar estadísticamente variables dasométricas medidas en inventario forestal tradicional de plantaciones forestales con valores obtenidos por métodos derivados de fotogrametría aérea y terrestre.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 INVENTARIO FORESTAL

Un inventario forestal consiste en la recolección sistemática de datos sobre los recursos forestales de una zona determinada. Permite la evaluación del estado actual y sienta las bases del análisis y la planificación, que constituyen el punto de partida de una gestión forestal sostenible (Picard et al., 2012)

La forma de medir el incremento en rendimiento de las plantaciones es por medio del inventario forestal, que consiste en el establecimiento de parcelas en campo con un arreglo estadístico que permite obtener una intensidad de muestreo, de modo tal que el área muestreada represente las existencias en el rodal o área que se desea inventariar (Lema Tapias, 2003; Wallace, Musk, et al., 2014).

El diámetro del árbol a la altura del pecho (DAP) y la altura son los parámetros más importantes al realizar inventarios forestales. El DAP generalmente se mide manualmente con un calibre o una cinta métrica y se registra junto con las especies durante los inventarios de campo (Forsman et al., 2016). La altura del árbol generalmente se mide con un instrumento de medición de altura basado en mediciones de ángulos y distancias, el cual, es una de las variables con mayor grado de dificultad de estimar y la que mayor incertidumbre arroja en la medición de inventarios (Mikita et al., 2016). De acuerdo a lo citado por (Trincado & Leal D., 2006), en la actividad forestal una de las actividades más costosas en términos de tiempo y recursos es la medición de alturas totales en árboles en pie.

Los inventarios forestales se han dividido en varios tipos dependiendo del método estadístico y según su objetivo (Lema Tapias, 2003):

- a. Según el método estadístico: Esta clasificación se divide en Censos (inventario al 100%), muestreo al azar, muestreo sistemático y muestreo estratificado. Es decir, el tipo de inventario elegido debe considerar una medición total o parcial del bosque con una distribución al azar o sistemática. Y dependiendo de las características del recurso a medir, se debe considerar o no la división en estratos.
- b. Según el objetivo: Dependiendo de la información en términos de calidad y cantidad se consideran los siguientes tipos
  - Inventario exploratorio: Tienen como objeto recolectar información básica para la evaluación y monitoreo de bosques a gran escala. En estos casos la intensidad de muestreo esta entre el 1% y el 2%.

- Inventario de manejo: Está relacionado con el crecimiento y manejo del bosque o plantación, para estos se establecen parcelas permanentes que llevan varias mediciones en el tiempo.
- Inventarios precosecha: Se relaciona con el inventario de existencias en un rodal o plantación previamente a ser aprovechado, tiene como fin la planificación de actividades forestales de cosecha.

Dependiendo del método estadístico y del objetivo del inventario, existen diversos tamaños y formas de las parcelas. En Colombia, Lema Tapias, (2003) recomienda las parcelas circulares de 250 m<sup>2</sup> o 1/40 de hectárea para el inventario en plantaciones forestales comerciales. Este diseño de parcela permite el montaje y la lectura de todos los elementos desde un mismo aumentando el rendimiento y disminuyendo el esfuerzo (Silvano, 2005).

Las principales variables incluidas en los términos de inventarios forestales son las siguientes: (Imaña-Encinas, 2011; Lema Tapias, 2003)

- Diámetro a la Altura del Pecho (*DAP*): Dentro de las variables dasométricas el DAP es la variable más importante, pues guarda una estrecha relación en el comportamiento de una especie. El DAP por convenciones internacionales debe ser medido a 1,30 m de altura del suelo. Existen muchos dispositivos y equipos para medirlo. Sin embargo, la cinta diamétrica es la más usada en la actualidad, la cual transforma el perímetro del árbol en el diámetro de una circunferencia sin importar la forma del tallo.
- Área basal: Está asociada al área transversal en un corte horizontal hipotético realizado en el tronco del árbol a la altura del DAP y su relación se hace respecto al área que llegaría a cubrir este tronco por otra unidad de superficie. Para un árbol está representada por la letra “g” en m<sup>2</sup> y el área basal de un rodal por “G” en m<sup>2</sup>/ha.
- Diámetro cuadrático (*DQ*): El DQ representa el diámetro del árbol de área basal promedia en un rodal, esta medida es más apropiada DAP, para representar directamente el nivel de ocupación del espacio.
- Altura del árbol (*h*): distancia vertical considerada desde el suelo hasta el ápice de la copa.
- Volumen: El volumen corresponde a la cantidad de madera, en un inventario forestal, comúnmente se determina el volumen de madera con corteza (VCC), por estudios mediciones se determina el volumen de la corteza y esta se descuenta del volumen de madera comercial, resultando en la medida de Volumen Sin Corteza que finalmente es la madera que se comercializa.

### 3.2 ESTIMACION DE VARIABLES DASOMETRICAS POR SENSORES REMOTOS.

Las mediciones de la estructura de la vegetación en tres dimensiones a partir de imágenes de alta resolución espacial son esenciales para estimaciones más exactas de la biomasa vegetal, la contabilidad del carbono, la silvicultura, la evaluación de riesgo de incendio y otros de gestión de la tierra y otras aplicaciones científicas (Dandois & Ellis, 2010)

De acuerdo con (Sotier, 2014), las nubes de puntos que se pueden obtener de las imágenes capturadas con vehículos aéreos no tripulados pueden ser también procesadas de manera similar a las nubes provenientes de escáner laser aerotransportados o terrestre. Si bien los sensores LiDAR pueden obtener directamente propiedades 3D en forma de nubes de puntos, para lograr lo mismo con los sensores pasivos se puede utilizar el procesamiento fotogramétrico (Guimarães et al., 2020).

Recientemente se han desarrollado sensores y técnicas innovadoras de procesamiento de imágenes, como la estructura a partir del movimiento (*SfM Structure from Motion*), para generar nubes de puntos derivadas de imágenes (Iglhaut et al., 2019; Turner et al., 2012). Esta técnica aplica algoritmos sofisticados, que se basan en principios de fotogrametría estereoscópica tradicional, que utilizan características geométricas captadas en varias imágenes con diferentes puntos de vista angulares para generar una nube de puntos 3D (Guerra-Hernández et al., 2018). En el caso de imágenes aéreas adquiridas por VANT, las técnicas SfM permiten extraer información 3D, proporcionando nubes de puntos basadas en coincidencias de características dentro de imágenes superpuestas. De esta manera, las imágenes de VANT emergieron como una alternativa viable para el monitoreo de la estructura 3D de los bosques (Puliti et al., 2015).

Una nube de puntos es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional. Estos vértices se identifican habitualmente como coordenadas X, Y, y Z y son representaciones de la superficie externa de un objeto. Son generadas mediante sensores LiDAR o por las técnicas SfM y dependiendo del tipo de sensor, cada punto, presenta una información adicional asociada como son los niveles digitales de la imagen o el tipo de pulso. Sin embargo, para explorar en profundidad estos productos en el contexto forestal, se pueden aplicar algunos métodos para obtener automáticamente parámetros relacionados con el bosque que son cruciales

para su monitoreo, como el DAP, la altura del árbol, volumen, entre otros. (Guimarães et al., 2020).

Para la medición de variables bajo el dosel y la estimación del DAP o el área basal diversos estudios sobre la estimación de los atributos del tallo utilizan fotogrametría terrestre entre estos Hapca et al., (2007), presentan un método fotográfico digital que es capaz de reconstruir el perfil del tallo sobre árboles en pie hasta una altura de 12 m y proporcionar un nivel de detalle fino. El método utiliza dos fotografías digitales tomadas a 90° entre sí y no requiere condiciones especiales de iluminación. El método realiza una reconstrucción del perfil del árbol en 3D. La exactitud de este método para medir la forma del árbol se probó comparando los resultados con los obtenidos de un sistema láser. La comparación mostró que el método fotográfico proporciona una buena evaluación de la forma de árboles en pie.

Dick et al., (2010) presentan una técnica para derivar mapas de tallos de una serie de fotografías digitales procesadas para formar una imagen panorámica de 360°. Los procesos se describen para derivar la distancia desde el centro de la parcela y el azimut a cada árbol de la parcela. La técnica se ensayó en 46 parcelas de campo (1.398 árboles de muestra) bajo una gama de condiciones de bosque y se comparó con los métodos tradicionales. El error de distancia absoluta media fue  $0,38 \pm 0,44$  m, y el error de azimut absoluto promedio fue  $2,3 \pm 2,5^\circ$ . La exactitud horizontal media calculada fue de  $0,40 \pm 0,42$  m, y el 85% de los árboles medidos están a 0,5 m de la ubicación del árbol medido en el campo.

Liang et al., (2014) evaluó la viabilidad de una nube de puntos generada con una cámara convencional a nivel de parcela y midió la parcela hasta nivel de árbol individual. Los tallos de árboles individuales en la parcela fueron detectados y modelados a partir de la nube de puntos basada en imágenes, y se estimó el DAP de cada árbol. Los resultados se compararon con mediciones de campo y con los resultantes de los datos de TLS. Los resultados mostraron que la precisión fue del 88% y el RMSE de las estimaciones de DAP de árboles individuales fue de 2,39 cm. Las principales ventajas de los datos de nube de puntos basados en imágenes residen en el bajo costo de los equipos necesarios para la recopilación de datos, las cuales son simples y rápidas y el procesamiento automatizado de datos. Las desventajas de los datos de nube de puntos basados en imágenes incluyen la capacidad limitada de cartografiar árboles pequeños y bosques complejos.

Miller et al., (2015) diseñaron y describieron un método para los modelos de árboles individuales utilizando la técnica SfM y MVS (Multi-View Stereo-

Photogrammetry) para medir con precisión árboles. SfM-MVS es una técnica de visión por computador, en la que las coordenadas geográficas de los objetos se calculan a partir de una serie de fotografías, resultando en un modelo de nube de puntos 3D. Probaron la capacidad de las técnicas SfM-MVS para estimar las medidas del árbol y reconstruir modelos a partir de datos 2D (altura, copa del árbol, altura de la copa, el diámetro del tallo) y 3D (volumen).

Mikita et al., (2016) combinaron fotogrametría aérea tomada desde VANT`s con fotogrametría terrestre para generar una nube de puntos con el fin de obtener los parámetros de árboles individuales. Utilizaron las mismas técnicas SfM-MVS y en combinación con una serie de procesos SIG para procesar la nube de puntos y la delimitar DAP. El error de la estimación del diámetro estaba por debajo de 1 cm RMSE y el error de estimación de altura fue de 1 m. Aparte de la precisión, la principal ventaja de este trabajo es una menor demanda de tiempo para la medición de campo

Con la asociación y el procesamiento de las nubes de puntos se pueden obtener productos derivados como modelos digitales de terreno (DTM), modelos digitales de superficie (DSM), curvas de nivel y pendientes del terreno. Un DSM representa las características por encima del nivel del suelo, por ejemplo, árboles y arbustos, y su generación se hace a partir de las elevaciones máximas de los puntos, mientras que el DTM descarta las características por encima del nivel del suelo, utilizando solo los puntos que pertenecen al suelo. La sustracción de ambos modelos (DSM-DTM) proporciona la diferencia de altura entre los objetos / características presentados sobre el nivel del suelo proporcionando, en el caso del monitoreo de vegetación, un modelo de altura del dosel (CHM) (Popescu et al., 2003).

La figura 1 muestra en un corte de perfil las formas como se construye el DTM, el DSM y el CHM (Michez et al., 2016).

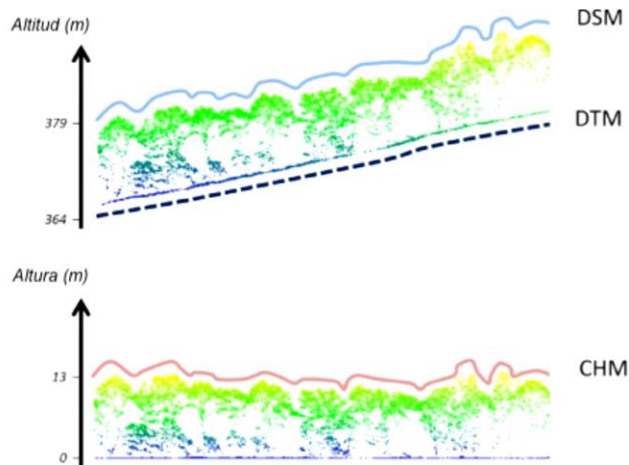


Figura 1. Diferenciación entre el DTM, DSM y CHM. (Michez et al., 2016)

Es común el uso del CHM o el DSM, las nubes de puntos y la información espectral obtenida de las imágenes para los procesos de segmentación de la vegetación. (Guerra-Hernández et al., 2018). En relación a la detección de parámetros estructurales relacionados con parte alta de los árboles hay dos métodos ampliamente utilizados (usando el raster del CHM o DSM): ventana de tamaño variable (*VSW Variable-Sized Window*) y delimitación inversa de cuencas hidrográficas (*IWD Inverse Watershed Delineation*) (Figura 2) (Guimarães et al., 2020; Krause et al., 2019).

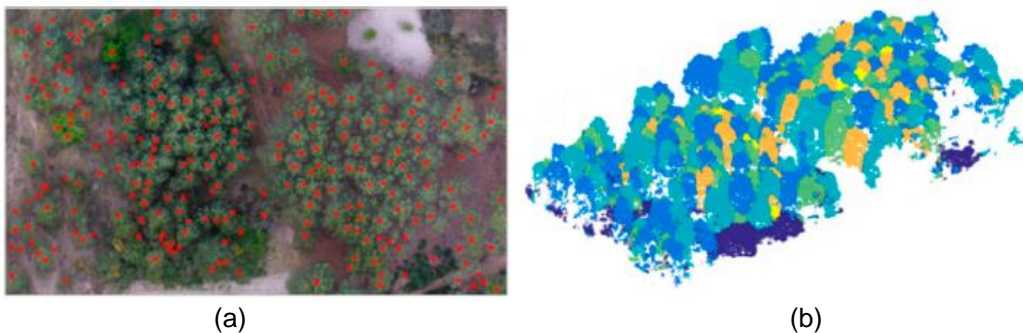


Figura 2. Ejemplo de un enfoque de detección y delimitación de copas de árboles individuales.

(a) un modelo copas de árboles identificadas utilizando máximos locales; y (b) delimitación de la copa de los árboles mediante delimitación inversa de cuencas hidrográficas (Guimarães et al., 2020; Krause et al., 2019)

El método VSW fue desarrollado por Popescu et al.,(2003) utiliza una ventana de tamaño variable para identificar los máximos locales en una superficie, estas ventanas varían desde 3 x 3 a 31 x 31 píxeles y buscan obtener el máximo valor, el

conjunto de los radios de copa extrae los valores máximos asociados a cada árbol.. El método de IWD está basado en un procesamiento que invierte el CHM o DSM con el objetivo de detectar los mínimos locales de las crestas, similares a las depresiones en cuencas en cuencas hidrográficas y así, delimitar las copas de los árboles individuales adyacentes (Fritz et al., 2013; Koch et al., 2006; Panagiotidis, Abdollahnejad, Surov, et al., 2017). Ambos métodos pueden ser combinados para obtener la máxima local de cada árbol seleccionado (Mikita et al., 2016).

(Dandois & Ellis, 2010), analizaron el potencial de combinar tecnologías aéreas de bajo costo de uso recreacional con procedimientos de código abierto de SfM. De esta forma obtuvieron nubes de puntos a partir de las imágenes RGB obtenidas con la plataforma aérea, en un área de 2,25 ha en Baltimore (Estados Unidos). Estas nubes de puntos fueron analizadas por medio de técnicas SfM, y se obtuvieron un  $R^2 > 0,64$ . La exactitud de los resultados en sentido vertical estuvieron altamente influenciados por la exactitud de los puntos de control empleados para georreferenciación y corrección. Emplearon también datos LiDAR, y generaron modelos con precisiones altas,  $R^2 > 0,82$ . Los algoritmos SfM generan geometrías tridimensionales (3D), a partir de grandes conjuntos de fotografías superpuestas que se encuentran en dos dimensiones (2D), mediante la automatización de técnicas estándar de visión computarizada y fotogrametría.

Posteriormente, Dandois & Ellis (2013), generaron nubes de puntos con densidades entre 30-67puntos/m<sup>2</sup> a partir de imágenes capturadas con un UAV sobre un área de 6,25ha de bosques deciduos templados. Las nubes de puntos fueron georreferenciadas con precisión entre 1,2–4,1 m de RMSE horizontal y 0,4–1,2 de RMSE vertical. Aplicaron técnicas similares al tratamiento de datos LiDAR para determinar el modelo digital de superficies.

Wallace, Lucieer, et al., (2014) llevaron a cabo un experimento para obtener una nube de puntos de tres de retornos de datos LiDAR de un rodal de *Eucalyptus globulus* de 4 años de edad en Tasmania. La plataforma de escáner fue un VANT, que podía volar a baja altura (40 m) y a baja velocidad. De esta manera se obtuvieron nubes de puntos de alta densidad (145 y 220 pulsos / m<sup>2</sup>). Los datos LiDAR se recogieron antes y después de la poda. Las copas de los árboles individuales fueron segmentadas automáticamente de los datos y tanto el volumen de la copa como la altura de la base se determinaron utilizando la geometría de la nube de puntos. Los resultados mostraron diferencias significativas en las propiedades del dosel, tanto en los arboles podados como los que estaban sin

podar, lo que indica que la nube de puntos generada podría distinguir con eficacia los tratamientos de poda.

Wallace, Musk, et al., (2014) validaron y verificaron la precisión de las mediciones forestales a partir de datos recogidos con un sistema VANT con escáner Laser (LS) en una plantación de eucaliptos. Se describe un flujo de trabajo para la extracción automática de las métricas de inventario a nivel de árbol individual. El flujo de incluye una determinación del efecto de la geometría del sensor en el resultado. La repetitividad de todas las etapas de este flujo de trabajo y las mediciones derivadas, tanto a nivel de la parcela como del árbol se evaluó utilizando conjuntos de datos múltiples recogidos en seis parcelas, los resultados de este estudio sugieren que se obtienen resultados más precisos en la determinación de variables del inventario tales como la altura y que dichas mediciones son mucho más rápidas y económicas que con los métodos de inventario tradicional.

Torres-Sánchez et al., (2015) presentan el procedimiento para automatizar elementos geométricos tridimensionales de árboles individuales a partir de la generación de modelos de superficie (DSM) con tecnología de VANT y análisis orientado a objetos. Las alturas fueron estimadas con errores de 0,17–0,18m, en las imágenes capturadas con cámara de rango visible, y de 0,22–0,53m en las imágenes capturadas con cámara multiespectral. En este estudio se encontró, además, que la altura de vuelo afecta los resultados obtenidos, ya que a 50m de vuelo, los resultados fueron mejores entre un 10 y un 20% que los resultados obtenidos a 100m de altura de vuelo.

Panagiotidis, Abdollahnejad, Surov, et al., (2017) combinaron las técnicas VWS e IWS para obtener la altura y el diámetro de copa en dos áreas con diferentes especies forestales. Los resultados mostraron una mayor concordancia entre los datos de campo y los datos obtenidos para las alturas que para los diámetros de copa basados en el % RMSE, que estaban en el rango de 11,42 a 12,62 para la altura y 14,29 a 18,56 para el diámetro de la copa. En general, la precisión de los resultados fue aceptable y mostró que los métodos eran factibles para detectar la altura de los árboles y el diámetro de la copa.

Krause et al., (2019) realizaron la comparación de 281 alturas medidas con el método VSW, mediciones directas de campo y medidas destructivas al cosechar los árboles, encontrando que las medidas de campo tendían a sobreestimar la altura y las medidas y se observó una cantidad muy baja de error con un RMSE de 0,138 m (0,79%), lo que sugiere un alto potencial para futuras aplicaciones. Sostiene que el



método es muy confiable en la estimación de la altura de árboles dominantes y co-dominantes, pero no lo es tanto para los árboles suprimidos.

En este estudio se emplearán los métodos SfM para generar nubes de puntos combinando fotogrametría aérea desde VANT y fotogrametría terrestre en áreas de plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis*, para la determinación del DAP se empleará gran parte de la metodología empleada por Mikita et al., (2016), en la cual se deriva desde la nube de puntos una base de puntos correspondiente a un corte transversal de 1 cm de grosor a los 1.30 de altura desde el suelo y por medio de técnicas y herramientas SIG derivar el DAP.

Con la generación de la nube de puntos aérea y terrestre se generan los modelos DSM, DTM y CHM, los cuales por combinación algebra de mapas y usando la metodología de ventana de tamaño variable (VSW) desarrollada por Popescu et al.,(2003), se obtienen los máximos de altura para cada árbol dentro de la parcela.

La generación de los datos de DAP y Altura para cada árbol y cada parcela serán procesados de la misma manera que los datos del inventario tradicional siguiendo la metodología empleada por la empresa Smurfit Kappa Colombia y los resultados serán comparados a nivel de árbol y de parcela.

## 4. MATERIALES Y METODOS

En esta sección se presenta la descripción de la metodología empleada para la ejecución de esta investigación, se incluyen las teorías, fundamentos y conceptos usados para la ejecución de cada proceso.

### 4.1 AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizada en el municipio de Darién – Valle del Cauca, finca Los Alpes (Figura 3); el lote de plantación forestal de *Eucalyptus grandis* con una edad de 5.58 años al momento de toma de la información. La altitud promedio del lote es 1574 m.s.n.m. y las coordenadas geográficas del centro del lote son  $76^{\circ} 26' 52''$  W,  $3^{\circ} 59' 59''$  N. La plantación se encuentra en una distribución espacial de espaciamiento de 3 x 3 metros entre árboles. En el sitio se practicó un buen control de arvenses y se eliminaron todas las ramas bajas de los arboles con el fin de eliminar la mayor cantidad de ruido o información no deseada en las parcelas de inventario.

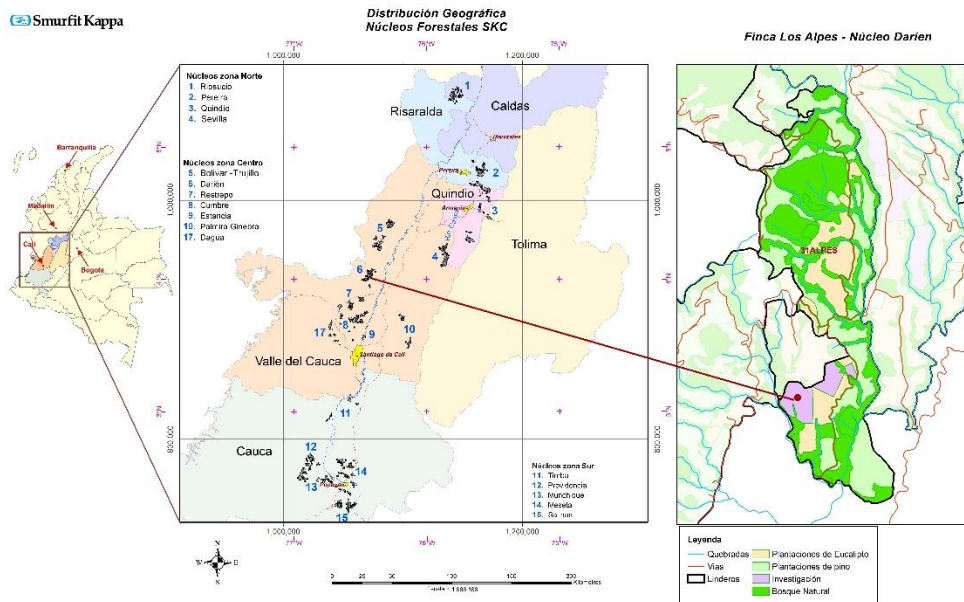


Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio

## 4.2 ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS

En total se establecieron 10 parcelas en todo el lote (Figura 4), en el centro de las parcelas se localizó un punto de control (PC), el cual fue utilizado como centro de la parcela de inventario y que sirvió de apoyo para el ajuste de la fotogrametría aérea y terrestre. Los PC utilizados fueron impresos en lonas de 60 x 60cm divididas en cuatro cuadros blancos y negros y un tache en el centro que permitiera la medición del punto con precisión (Figura 5). La localización de los puntos de control se realizó con un Receptor GNSS Trimble R3 (Trimble Inc., USA) y sus datos fueron posprocesados en oficina para mejorar la precisión de los mismos.



Figura 4. Localización de las parcelas y puntos de control en el área de estudio



Figura 5. Diseño de los puntos de control

### 4.3 MEDICIÓN DE VARIABLES DASOMETRICAS

La medición de las variables dasométricas se realizó en las 10 parcelas. Para la toma de este inventario se siguieron los protocolos diseñados por Smurfit Kappa Colombia (SKC), los cuales consisten en las siguientes etapas:

#### 4.3.1 Instrumentos.

En el establecimiento y medición de parcelas circulares de 250 m<sup>2</sup> se usan diferentes equipos e instrumentos dependiendo de la actividad. Para la estimación de alturas: Haglöf Vertex (precisión aprox. 0.5 m); opcional Nikon Forestry Pro. Para la medición del DAP: Cinta diamétrica (Precisión 0.1 cm) y para la generación de la parcela: Brújula de mapa Suunto MC-1G (precisión 2°) y cinta métrica (20 m, precisión 0.2 cm) con la que se genera un radio de 8.92 m para establecimiento de parcelas de 250 m<sup>2</sup>.

#### 4.3.2 Ubicación de las parcelas en campo:

La ubicación de las parcelas debe hacerse en el centro de cuatro árboles, de modo se garantice la visual de todos los árboles que se van a medir en la parcela. Su ubicación fue previamente seleccionada en oficina y el operario busca su ubicación apoyado en GNNS.

#### 4.3.3 Establecimiento y demarcación de la parcela:

Para el establecimiento de una parcela circular de 250 m<sup>2</sup>, desde el centro de la misma, el líder orienta la parcela hacia el norte y mide el radio de 8.92 m, el primer árbol desde el centro de la parcela se marca y etiqueta con el #1 y el número de la parcela. Posteriormente, considera todos los arboles dentro del radio de 8.92 m y los va marcando desde el norte, en el sentido horario hasta completar todos los árboles de la circunferencia, estos mismos son marcados con una línea que representa el DAP y son etiquetados orientados hacia el centro de la parcela (Figura 6).

Todos los árboles que se encuentren en la parcela deben ser considerados, incluyendo aquellos que están muertos en pie, caídos, bifurcados o rebrotados y que midan más 4.5 cm. Los árboles que están en el límite de los 8.92 m de radio deben considerarse dentro de la parcela si su mayor parte se encuentra contenida en esta. El radio de la parcela de 8.92 se expresa como una superficie plana y debe ser corregido cuando el terreno sea pendiente, garantizando que se cumplan los 250 m<sup>2</sup>.

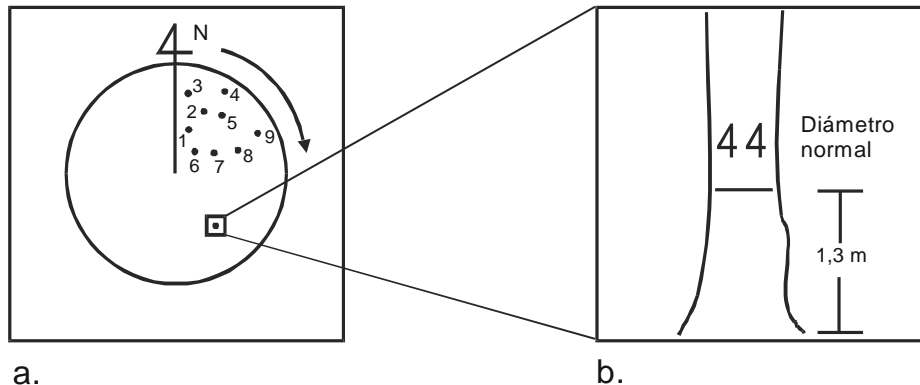


Figura 6. Establecimiento de la parcela y etiquetado de árboles al DAP  
(a.) Diseño y orientación de la numeración en parcelas circulares; (b.) Etiquetado y marcación de la línea al DAP.

#### 4.3.4 Medición del diámetro:

La medición del DAP se realiza desde el punto más cercano del árbol al suelo a una altura de 1.30 m siguiendo el fuste del árbol, sin importar si el árbol es perpendicular al suelo o si se encuentra torcido. Para esta medición se utiliza la cinta diamétrica, la cual convierte el diámetro del fuste sin importar su forma en un diámetro equivalente a un círculo. (Lema Tapias, 2003). El protocolo diseñado por SKC contempla la medición de árboles inclinados, bifurcaciones, engrosamientos, deformaciones y otras anomalías.

#### 4.3.5 Medición de alturas:

Como se ha mencionado, el otro factor de importancia para la modelación del inventario es la altura. Es una variable difícil y costosa de obtener, que por lo regular en rodales homogéneos presenta alta variabilidad. Su medición tradicionalmente se hace de dos formas: la forma directa solo se puede hacer con métodos destructivos, es decir, apeando el árbol. La otra forma es la estimación por medio de instrumentos de ángulos, los cuales basados en principios trigonométricos permiten una lectura de un ángulo a la base y otro al ápice. La resta de estos ángulos y la distancia al objetivo permite la estimación de la altura.

En la estimación de la altura se deben considerar factores importantes como son la inclinación de los árboles, la pendiente del terreno, el ángulo de observación y el instrumento de medición. Lo que se traduce en sub o sobre estimaciones en la altura. En la figura 7 se observan los errores típicos cometidos en la estimación de

la altura de los árboles, dependiendo del punto de vista se pueden hacer falsas estimaciones de la misma.

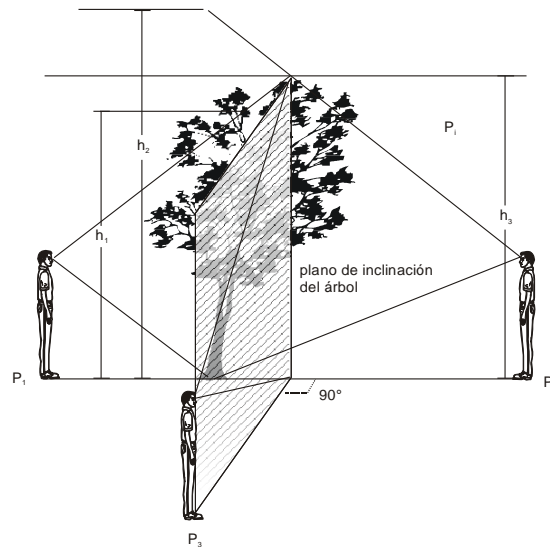


Figura 7. Errores en la estimación de alturas con árboles inclinados.

En el proceso de estimación de alturas en parcelas de 250 m<sup>2</sup>, se realiza la medición de tres árboles por parcela, uno dominante (más alto), un árbol co-dominante (altura promedio) y un árbol suprimido (más bajo). La estimación de la altura se hace con un Vertex (Haglöf Vertex) es el instrumento a emplear por defecto ya que permite hacer la determinación de la distancia y hace las correcciones por pendiente y distancias.

Toda la información es consignada en formularios digitales que posteriormente se procesan estadísticamente en oficina.

## 4.4 FOTOGRAFÍAS AÉREAS

### 4.4.1 Planificación de vuelos:

La planeación del vuelo se realizó con la aplicación Map Pilot V4.1.13 (Maps Made Easy, USA), el cual permite planificar el vuelo siguiendo el contorno del terreno y variando la altura del vuelo, lo que permite obtener fotografías con una altura respecto al terreno relativamente constante, lo que favorece el procesamiento. Se planificaron vuelos a diferentes alturas (120, 150, 180 y 210 metros), con un traslape frontal del 90% y lateral del 80%.

#### 4.4.2 Toma de fotografías aéreas:

La toma de fotografías aéreas se realizó con un VANT marca DJI Mavic 2 Pro (DJI, Shenzhen, China), cuyas especificaciones de la cámara se encuentran resumidos en la tabla 1 (DJI, 2020). La toma de las fotografías aéreas se realizó el 22 de agosto de 2020, con diferentes alturas de vuelo (120, 150, 180 y 210 metros), con el fin de garantizar que todas las fotos de una misma altitud fueran procesadas (Tabla 2).

Tabla 1. Especificaciones cámara DJI Mavic 2 Pro

<b>Característica</b>	<b>Valores</b>
Modelo	Hasselblad L1D-20c
Pixeles efectivos	20 Mpxl
Tipo de sensor	1" CMOS
Canales multiespectrales	3 (RGB) Continua
Distancia Focal (mm)	28
Numero de pixeles	5472 x 3648
Relación	4:3
Apertura Lentes	f/2.8–f/11
FOV	77°
Resolución radiométrica	10 bits
Velocidad de obturación	8–1/8000s
Rango ISO	100-3200

Tabla 2. Toma de fotografías aéreas

Altura vuelo (m)	Cantidad de imágenes	Nombre	Traslape V/H	Horas
120	271	DJI_0808 – DJI_0078	90/80	12:15 a 12:43
150	147	DJI_0904 – DJI_0049	80/70	11:54 a 12:10
180	210	DJI_0692 – DJI_0901	90/80	11:19 a 11:44
210	96	DJI_0395 – DJI_0490	80/70	11:31 a 11:37

En la toma de las fotografías aéreas se probaron diferentes alturas, traslapes y velocidades de vuelo con el fin de garantizar la suficiente superposición de las imágenes y que toda el área fotografiada quedara cubierta por una nube de puntos. Después del pre-procesamiento de las fotos aéreas y asumiendo la altura de los árboles, se trabajó con la altura del vuelo a 180 metros por presentar mejores ajustes.



#### 4.5 FOTOGRAFIAS TERRESTRES.

La fotogrametría terrestre se realizó con la misma cámara del Mavic 2 Pro, colocada en un soporte especial en un poste a una altura de 6.5 m apuntando hacia adelante. El soporte fue diseñado para sostener el VANT y la cámara estaba dirigida a un ángulo de 45 grados con el eje vertical (Figura 8a), el sistema de estabilización del VANT garantizó la orientación y el ángulo de la cámara.

La toma de imágenes se realizó en base a la captura continua de imágenes durante el cruce por la parcela por entre las líneas de árboles, primero en un sentido y luego en forma perpendicular, con una velocidad de aproximadamente 5 km por hora con el intervalo de un segundo por imagen capturada (Figura 8b). Este procedimiento aseguró una alta superposición de imágenes, por lo que la mayoría de las ubicaciones fueron cubiertas por más de nueve imágenes. Para corregir la posición de las imágenes se utilizaron los mismos PC de las fotografías aéreas y cuatro puntos de apoyo adicionales. La tabla 3 resume la cantidad de fotografías tomadas por parcela y su consumo en tiempo.

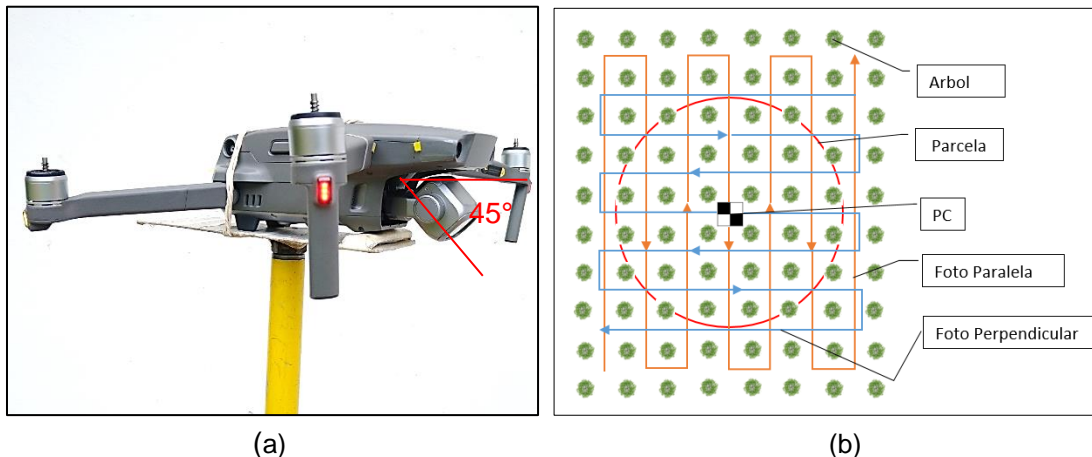


Figura 8. Toma de fotografías terrestres (a). Posición de la cámara para la toma de fotografías terrestres (b) Diseño de toma de fotografías terrestres en la parcela.

En la toma de las fotografías terrestres se probaron diferentes métodos de captura, como son múltiples tomas desde el centro hacia afuera; desde el exterior de la parcela mirando hacia el centro de la parcela. También, se probaron diferentes ángulos de la cámara y se encontró que el mejor ajuste y superposición se conseguía a 6.5 metros con un ángulo a 45°.



Tabla 3. Toma de fotografías terrestres

Parcela	Cantidad Imágenes	Nombre	Tiempo Adquisición(Min)
1	220	DJI_0705 – DJI_0925	11
2	222	DJI_0926 – DJI_0148	12
3	229	DJI_0149 – DJI_0377	14
4	269	DJI_0378 – DJI_0646	20
5	276	DJI_0647 – DJI_0923	13
6	251	DJI_0924 – DJI_0175	10
7	241	DJI_0715 – DJI_0955	16
8	272	DJI_0669 – DJI_0940	11
9	266	DJI_0403 – DJI_0668	12
10	226	DJI_0176 – DJI_0402	9

Para el procesamiento de los datos y con el fin de garantizar la correcta georreferenciación de la fotogrametría terrestre, se hizo necesario el establecimiento de otros cuatro puntos de control en el borde de la parcela y ubicados en los puntos cardinales, puesto que con uno solo, no se garantizaba un correcto ajuste y precisión, la figura 9 muestra localización de los puntos de control adicionales dentro de una nube de puntos.

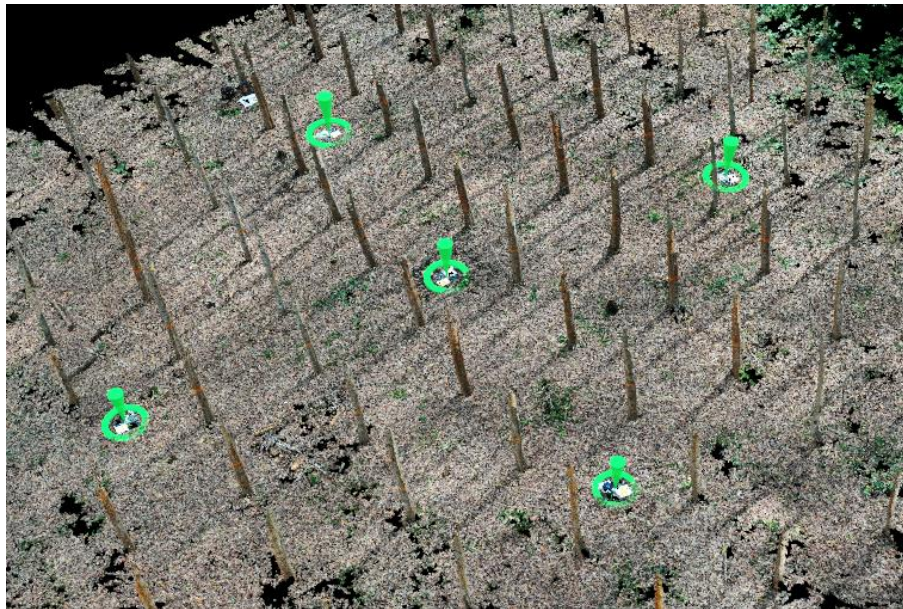


Figura 9. Puntos de control adicionales para la parcela

## 4.6 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Las fotografías aéreas y terrestres fueron procesadas usando el software Pix4Dmapper (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland), primero se calibraron las fotos de manera automática, luego se marcaron al menos 12 fotos para cada punto de control, de modo tal que se garantizara el ajuste. Luego se construyó una nube de puntos en la que, que posteriormente se clasifica de manera automática, generando en este caso varias categorías (Suelo, Vegetación, construcciones y otros objetos). Todas las nubes de puntos generadas, tanto para las fotografías aéreas y las terrestres fueron clasificadas manualmente, separando las categorías que presentaban errores.

Después del procesamiento y clasificación en puntos terrestres y no terrestres en Pix4Dmapper, ambas nubes de puntos (aéreas y terrestres) se exportaron en formato LAS 1.2. (El formato LAS es un formato de archivo diseñado para el intercambio y archivo de datos de nube de puntos LIDAR de ASPRS: Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Percepción Remota) para su posterior procesamiento en el software ArcGIS Pro 2.6.2 (ESRI, Redlands, LA, EE. UU.), usando las extensiones Análisis Espacial, y LAStools (Rapidlasso GmbH, Gilching, Alemania).

El procesamiento de las nubes de puntos aéreas (Figura 10a) y terrestre (Figura 10b) permitió la identificación automática de las posiciones de los árboles y la detección automática del DAP y la altura de los árboles dentro de la parcela.

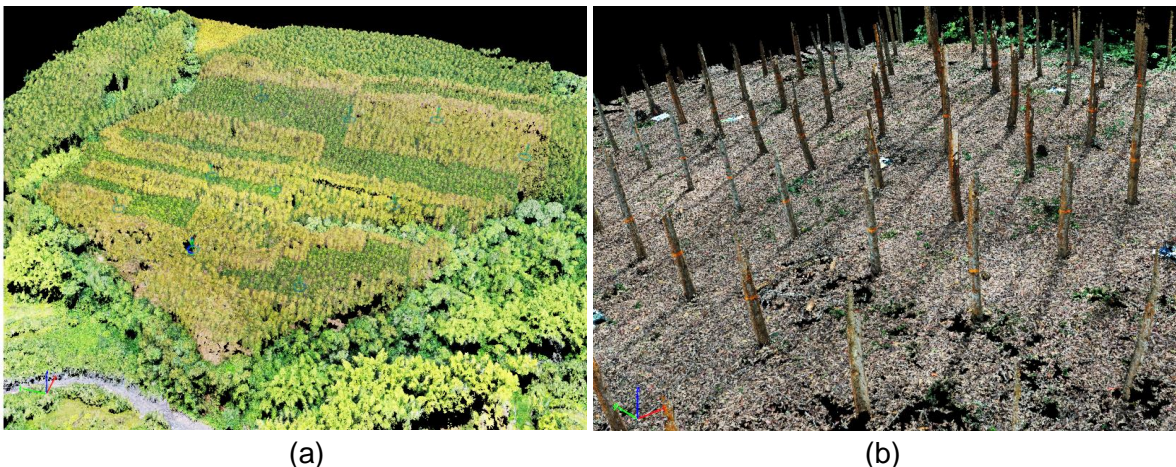


Figura 10. Nubes de puntos

(a). Nube de puntos fotogrametría aérea (b) Nube de puntos fotogrametría terrestre.

#### 4.6.1 Estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP).

Para la obtención del DAP se utilizó la nube de puntos de la fotogrametría terrestre de cada parcela, en ellos estaban previamente clasificados los puntos de suelo y los puntos de vegetación (Correspondientes a los fustes de los arboles). Usando la herramienta LASHeight se realizó un corte transversal a los arboles entre los 1.29 y 1.30 metros de altura sobre el nivel de suelo. Este corte transversal permite obtener una nube de puntos que corresponde al área basal del árbol (Figura 11)

Las nubes de puntos de las secciones transversales de todos los arboles identificados se exportaron a una geodatabase (GDB), se creó un Buffer de 10cm en cada punto y se disolvió por proximidad, cada uno de estos polígonos correspondía a un árbol; cada uno de estos se asoció con el número del árbol de la parcela de inventario tradicional de cada parcela.

La obtención del área basal ( $g$ ) se realizó con la herramienta Delimitación de Geometría Mínima (*Minimum Bounding Geometry*), la cual permite obtener un tipo de geometría envolvente convexa más próxima a los puntos (Figura 11). Con la identificación del árbol individual y la parcela se obtiene el diámetro de cada árbol, usando la siguiente formula:

$$g (m^2) = \pi \left( \frac{DAP}{2} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

Donde " $g$ " es el área basal del árbol, expresada en metros cuadrados, al despejar el DAP, queda así:

$$DAP (cm) = \sqrt{\left( \frac{g}{\pi} \right)} * 200 \dots\dots\dots (2)$$

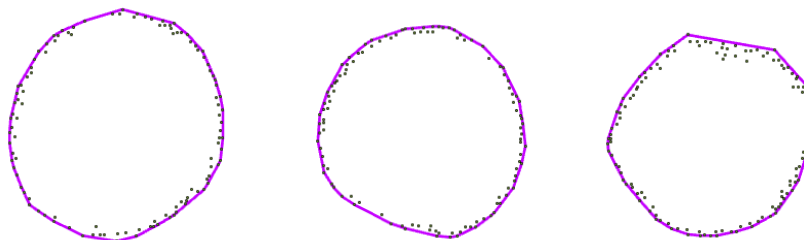


Figura 11. Nubes de puntos de cortes transversales a árboles. La línea continua representa el área basal ( $g$ ).

La metodología empleada permitió obtener de manera automatizada desde las nubes de puntos el DAP de todos los árboles de las 10 parcelas.

#### 4.6.2 Generación de modelos

Con las nubes de puntos generadas para cada categoría, se generaron los Modelos Digitales del Terreno (DTM *Digital Terrain Model*) y el Modelo de Elevación de Superficies (DSM – *Digital Surface Model*) cada uno de ellos con una resolución espacial de 4 cm. Para la generación del DTM se utilizaron los datos clasificados como suelo, para los cuales el software usa el promedio de los datos de esta categoría. Para la generación del DSM se utilizaron los datos clasificados como vegetación, el cual toma los datos de toda la nube de puntos y realiza el proceso por los puntos de mayor altitud. La clasificación automática se basó en tres parámetros: i) ángulo máximo (grados), ii) distancia máxima (m) y iii) tamaño de celda o pixel (m) (Panagiotidis, Abdollahnejad, & Surovy, 2017; Torres-Sánchez et al., 2015)

#### 4.6.3 Estimación de Alturas

Para la determinación de las alturas se precisa la combinación de los datos derivados de la fotogrametría terrestre y la aérea. El Modelo de Elevación del Dosel (CHM - *Canopy Height Model*) consiste en la diferencia entre la superficie superior del dosel y la topografía del terreno subyacente a este. Es decir, La resta del DSM del DTM. Para cada parcela se generó un CHM y se aplicó un filtro de paso bajo, el cual reduce el ruido y suaviza los valores de los pixeles.

La altura de los árboles se obtuvo aplicando el método de ventana de tamaño variable (VSW), en la cual la se altura derivó del CHM con base en la evaluación de los máximos locales por medio de la herramienta de Estadísticas Focalizadas (*Focal Statistics*) por el valor máximo, esta herramienta realiza una operación de vecindad que calcula un ráster de salida, donde el valor para cada celda de salida es una función de los valores de todas las celdas de entrada que estén en una vecindad especifica alrededor de esa ubicación. La función que se realiza en la entrada es una estadística, como el máximo de todos los valores que se encuentran en esa vecindad (Panagiotidis, Abdollahnejad, & Surovy, 2017).

Una vez obtenidos los datos ráster de cada punto máximo de la estadística focal, por medio de algebra de mapas, estos se hacen coincidir con el CHM usando la siguiente ecuación:

*Con ('CHm' = 'EstadisticaFocal', 1)..... (3)*

La herramienta condicional (*Con*) realiza una evaluación condicional en cada una de las celdas de entrada de un ráster de entrada y devuelve el valor binario de 0 (para no datos) o 1 (para valor de datos). El valor de retorno fue el valor cuando el valor de CHM igualó la salida de las estadísticas focales (ráster). Por último estos datos se exportaron a la GDB y se asociaron a cada árbol.

Para obtener cada ráster, se probaron diferentes formas y tamaños de ventanas (Circulares con radio 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 metros y cuadradas de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 metros). Los mejores resultados obtenidos están relacionados con las ventanas circulares radio 1.5 m y ventanas cuadradas de 1.5 x 1.5 metro. En los que se observó que se asociaban con la mayoría de los árboles de la parcela. Los árboles no asociados por este método estaban relacionados con los árboles suprimidos o de menor tamaño, cuyo ápice se encuentra cubierto por la copa de otros árboles, la lectura de estos se realizó de forma manual con la ayuda del ortofotomosaico y la nube de puntos.

El flujo de trabajo de la metodología expuesta para la estimación del DAP y la altura de todos los árboles en cada parcela se resume en la figura 12.



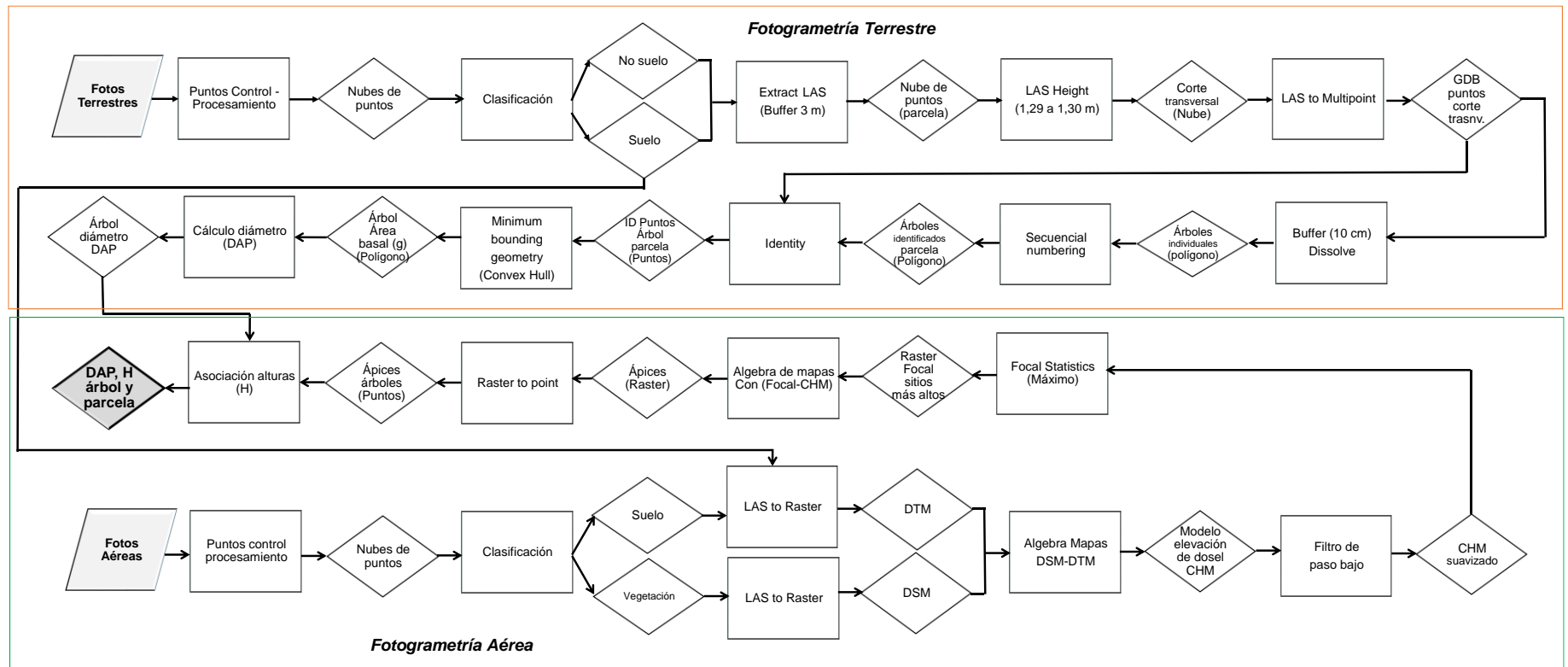


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología expuesta

## 4.7 CALCULO DEL INVENTARIO

### 4.7.1 Estimación de Alturas

El en caso del inventario tradicional, como este método solo considera la medición de tres árboles, se hace necesario la estimación de las alturas de los arboles restantes, para ello se usaron tres modelos básicos de regresión para la estimación de alturas a nivel de árbol como se describe a continuación:

$$\text{Modelo lineal } h = aDAP + b \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Modelo inverso } h = aDAP^{-1} + b \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Modelo exponencial } h = ae^{bDAP} \dots\dots\dots (6)$$

Donde  $h$  es la altura estimada en metros,  $DAP$  es el diámetro medido en cm a la altura del pecho (1.30 m) y  $a$  y  $b$  son los estimadores. El mejor modelo se selecciona de acuerdo a criterios de calidad predictiva y de bondad de ajuste.

### 4.7.2 Estimación de volumen

A nivel de árbol se estima el volumen utilizando la metodología de spline cúbica (Liu, 1980). Con este método se obtiene un factor de volumen ( $FV$ ) el cual es usado como factor de corrección asumiendo el volumen mediante la expresión

$$V = \pi(DAP/2)^2 h FV \dots\dots\dots (7)$$

### 4.7.3 Cálculo de parámetros de rodal

A nivel de parcela se calculan diferentes características que describen un rodal. Entre ellas se calculó el  $DAP_{Medio}$ ,  $Altura_{Media}$  el diámetro cuadrático ( $DQ$ ), la densidad de rodal como número de árboles por hectárea ( $N/ha$ ), el área basal en  $m^2/ha$  y el volumen total en  $m^3/ha$ .

## 4.8 COMPARACIÓN ESTADISTICA DE METODOS

Para evaluar las diferencias entre los métodos de medición de campo y fotogrametría se calcularon varias métricas, tales como, el coeficiente de determinación ( $R^2_{ajustado}$ ), el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ), el sesgo medio (Ecuación 8) y la precisión (Ecuación 9).

$$Sesgo_{Medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{Fotogrametría} - y_{Tradicional}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{Precisión} = \text{Desv. Estándar}(y_{\text{Fotogrametría}} - y_{\text{Tradicional}}) \dots \dots \dots (9)$$

Donde  $y_{\text{Fotogrametría}}$  es la medida obtenida por el método de la fotogrametría y  $y_{\text{Tradicional}}$  es la medida lograda por el método tradicional.

También se calcularon los límites de acuerdo entre las metodologías comparadas utilizando la propuesta de (Bland & Altman, 1986). Para muestras grandes, como lo fue a nivel de árbol, el intervalo de concordancia se calculó como  $\text{Sesgo}_{\text{Medio}} \pm z_{\alpha/2} \text{Desv. Std}_{\text{Error}}$ , mientras que para muestras pequeñas el intervalo calculado fue  $\text{Sesgo}_{\text{Medio}} \pm t_{(\alpha/2, n-1)} \text{Desv. Std}_{\text{Error}} / \sqrt{n}$ . Para garantizar inferencias adecuadas en las pruebas de correlación y de muestras pareadas se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Los cálculos y los análisis estadísticos fueron realizados con el software R Project (R Core Team, 2020).



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los resultados de este estudio, la primera parte estará enfocada en mostrar los resultados a nivel de medición de las parcelas de con el método tradicional, la segunda parte está orientada a la información obtenida por la fotogrametría aérea y terrestre y la estimación de las variables dasométricas. Y posteriormente se hablará del análisis estadístico entre los dos métodos de inventarios tanto a nivel de árbol, como a nivel de parcela.

### 5.1 INVENTARIO TRADICIONAL

El protocolo de establecimiento de parcelas de Smurfit Kappa contempla la medición todos los DAP y la altura de 3 árboles por parcela, un árbol dominante, uno co-dominante y otro suprimido. Para la estimación del resto de las alturas de la parcela, se empleó la siguiente ecuación

$$h = \max(1.30, a * [1 - e^{b*DAP+c*edad+d}]) \dots\dots\dots (10)$$

En este modelo  $h$  es la altura estimada en metros, 1.30 es la altura mínima que debe tener un árbol para poseer medición de DAP,  $DAP$  es el diámetro medido en cm a la altura del pecho, edad es la edad del árbol en años y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son los estimadores.

Posteriormente con estas relaciones de todos los árboles y las parcelas se obtienen las demás variables que hacen parte del inventario (Tabla 4). Por ser esta información sensible y que hace parte del conocimiento de la empresa, estas fórmulas y procesos para determinar el inventario no se mostraran en el estudio.

Tabla 4. Datos resultantes del inventario tradicional

Parcela	Número arboles parcela	Alturas medidas	DAP Prom. (cm)	Altura Prom. (m)	DQ* (cm)	Número arboles /ha	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	Volumen TCC* (Ton/ha)	Volumen TSC* (Ton/ha)
1	29	3	16.6	25.7	16.9	1160	25.9	308.0	257.8
2	29	3	18.1	27.0	18.4	1160	30.8	383.9	323.2
3	32	3	19.6	28.8	19.8	1280	39.6	512.3	432.8
4	33	3	15.4	24.3	16.1	1320	26.9	321.9	269.4
5	30	3	18.3	27.2	18.6	1200	32.8	410.7	346.0
6	32	3	18.1	27.3	18.4	1280	33.9	425.1	357.7
7	30	3	18.1	27.0	18.6	1200	32.7	414.8	349.8
8	32	3	17.2	26.3	17.6	1280	31.2	386.7	325.3
9	26	3	17.4	26.5	17.8	1040	25.8	318.3	267.4
10	33	3	17.9	27.0	18.4	1320	35.2	449.1	378.5

DQ: Diámetro Cuadrático, TCC: Vol. Total Con Corteza y TSC: Vol. Total Sin Corteza

La variación del número de árboles por parcela obedece a que algunos árboles después de plantados no crecieron, otros en el transcurso del tiempo se vieron afectados por alguna condición o simplemente murieron. Este número también está asociado al establecimiento de la parcela y la correcta medición del radio de 8.92 metros, es posible que con esta metodología algunos árboles entren por error o lo contrario, queden por fuera. Lo que se traduce en sub o sobrestimaciones del número de árboles por unidad de área y por lo tanto del volumen de madera.

## 5.2 FOTOGRAMETRIA AEREA Y TERRESTRE

La Tabla 5 muestra los resultados del procesamiento de imágenes aéreas y terrestres y sus respectivos errores, es notable la diferencia en densidad de puntos entre la fotogrametría aérea y las parcelas terrestres. Esto se debe a que la fotogrametría terrestre toma muchas más fotos por unidad de área, lo que se traduce en un GSD mucho menor para el suelo. Sin embargo, la generación del DTM desde la nube de realzo se hizo con una resolución espacial de 4 cm, de modo tal que los resultados fueran consistentes con los del DSM.

Tabla 5. Propiedades de las nubes de puntos de fotogrametría aérea y terrestre.

Parcela	N Imágenes	Densidad de Puntos (Pts/m <sup>3</sup> )	GSD (cm)	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)
F. Aérea	204	26.45	4.16	19	22	5.2
1	221	446,315	0.2	0.02	0.076	0.039
2	222	418,385	0.2	0.046	0.013	0.017
3	229	542,642	0.2	0.29	0.26	0.56
4	269	694,258	0.16	0.054	0.05	0.75
5	276	561,754	0.18	0.284	0.619	2.05
6	251	354,619	0.19	0.271	0.139	1.7
7	241	455,916	0.21	0.169	0.168	3.17
8	272	386,602	0.2	0.193	0.189	0.983
9	266	380,603	0.2	0.012	0.023	0.015
10	226	529,572	0.18	0.677	0.772	0.069

Debido a que los procesos de fotogrametría aérea y terrestre se procesan de manera independiente, el establecimiento de puntos de control se hace necesario, pues estos mejoran ostensiblemente la precisión de los datos y permite fusionar correctamente las nubes de puntos.

### 5.2.1 Estimación del diámetro a la altura del pecho (DAP).

Para la estimación del DAP de cada árbol en cada parcela, una vez generada la nube de puntos (Figura 13), esta se clasificó las clases suelo y vegetación (Figura 14), posteriormente se realizó el corte a la nube de puntos con la herramienta LASHeight entre 1.29 y 1.30 metros desde el nivel del suelo y se extrajeron todos puntos correspondientes al área basal (Figura 15).



Figura 13 Generación de nube de puntos fotogrametría terrestre

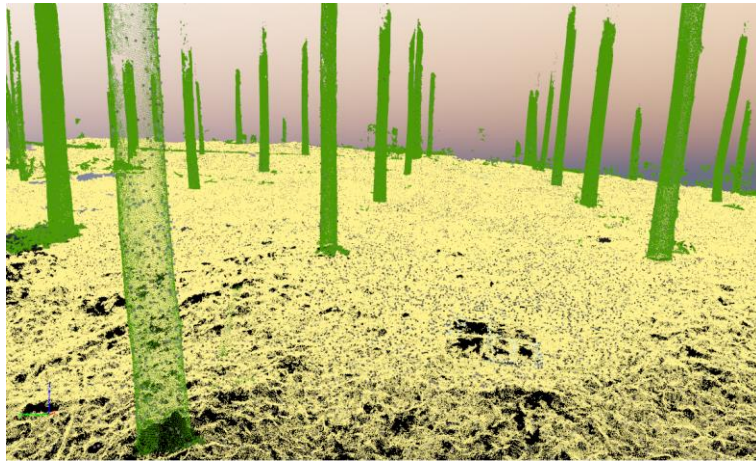


Figura 14 Clasificación de nube de puntos fotogrametría terrestre

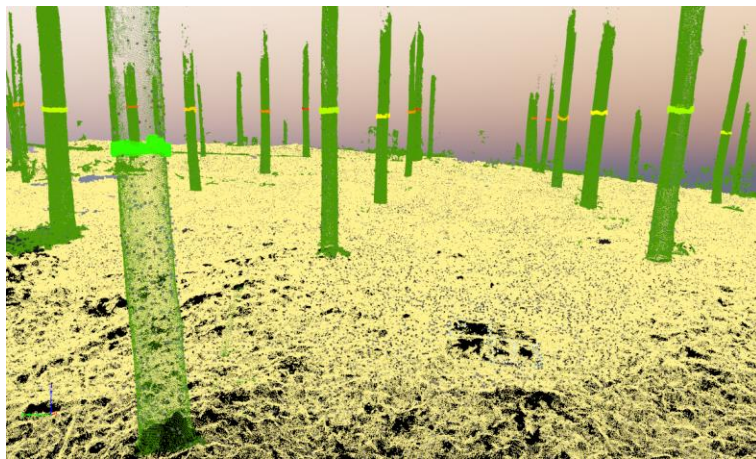


Figura 15 Extracción nube de puntos al DAP

La metodología empleada para la toma de las fotografías terrestres y el alto traslape de las fotos, permitió que la gran mayoría de las fotos capturadas fueran procesadas por el software, coincidiendo con lo expresado por Iglhaut et al., (2019). La alta densidad de puntos de la fotogrametría terrestre garantiza que todos los fustes de los árboles estén cubiertos por una cantidad importante de fotos, con lo cual, al extraer la franja de 1 *cm*, cubra toda la circunferencia del árbol.

De la nube de puntos proveniente del corte al DAP se seleccionaron y clasificaron únicamente los árboles que se encontraban dentro de un radio de 8.92 m del centro de la parcela, garantizando los arboles seleccionados se encuentren dentro de la parcela (Figura 16).

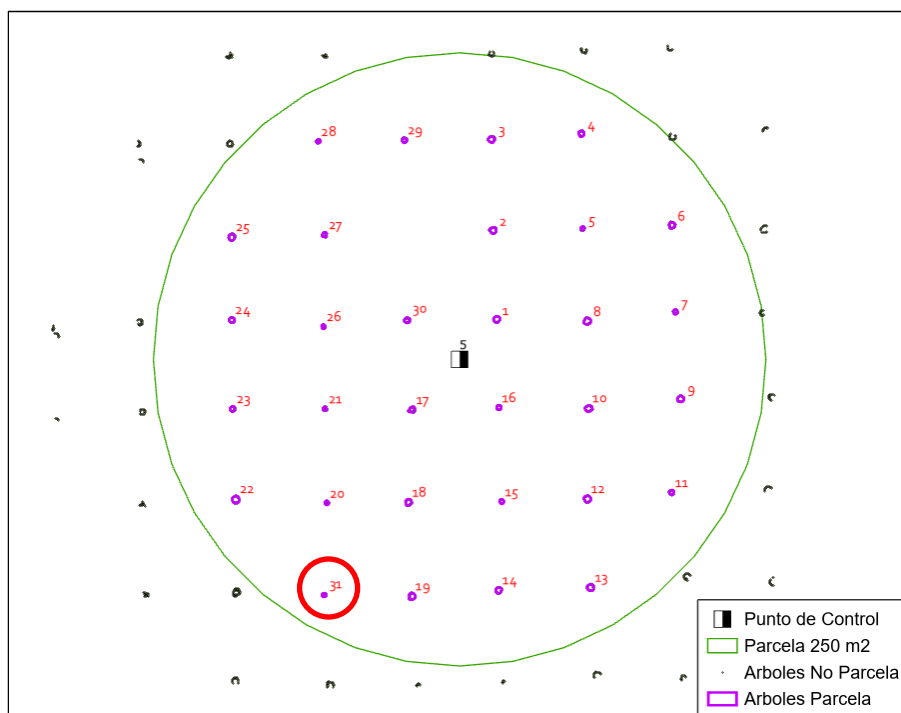


Figura 16. Selección de árboles que se encuentran en la parcela 5.

Los arboles seleccionados, en este caso se etiquetaron siguiendo el protocolo del inventario tradicional, para posteriormente realizar las comparaciones estadísticas árbol a árbol. Este método solo incluye aquellos árboles que están completamente contenidos o mayormente contenidos por la parcela. En este caso en especial se observa de la figura 16, que, siguiendo la nomenclatura, aparece un nuevo árbol (Árbol 31) el cual no fue tenido en consideración dentro de la parcela de inventario tradicional. La tabla 6 muestra las diferencias entre los arboles medidos por el método tradicional y el método propuesto

Tabla 6. Diferencias entre el número de árboles por parcela según el tipo de inventario.

Parcela	Inv. Trad.	Inv Foto.	Diferencia
	Num. Arboles	Num. Arboles	
1	29	29	0
2	29	28	-1
3	32	32	0
4	33	32	-1
5	30	31	1
6	32	32	0
7	30	30	0
8	32	31	-1
9	26	27	1
10	33	33	0



### 5.2.2 Generación de modelos

La figura 17 muestra la combinación de las nubes de puntos, desde la cual se generan los diferentes modelos

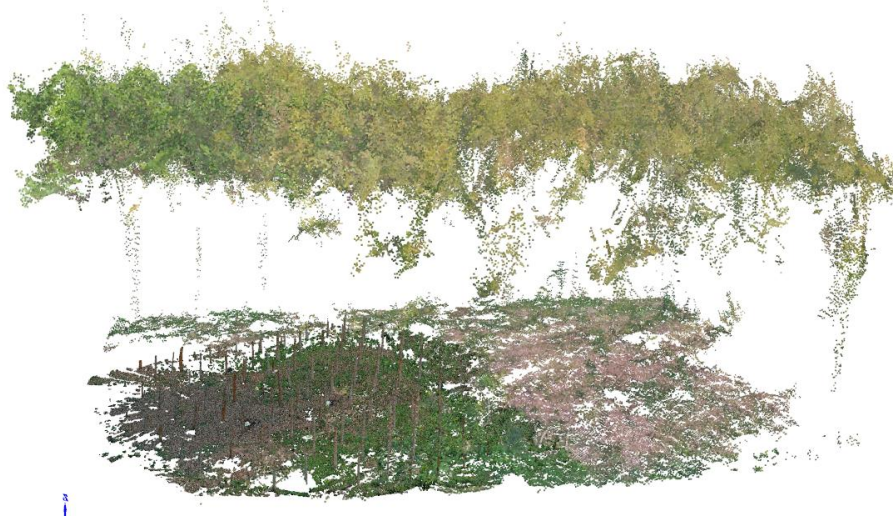


Figura 17. Combinación de nube de puntos para la generación de modelos

Una vez procesadas y clasificadas las nubes de puntos se generaron los modelos DSM para toda la zona de la fotogrametría aérea (Figura 18); y DTM y CHM a nivel de parcela (Figura 19).

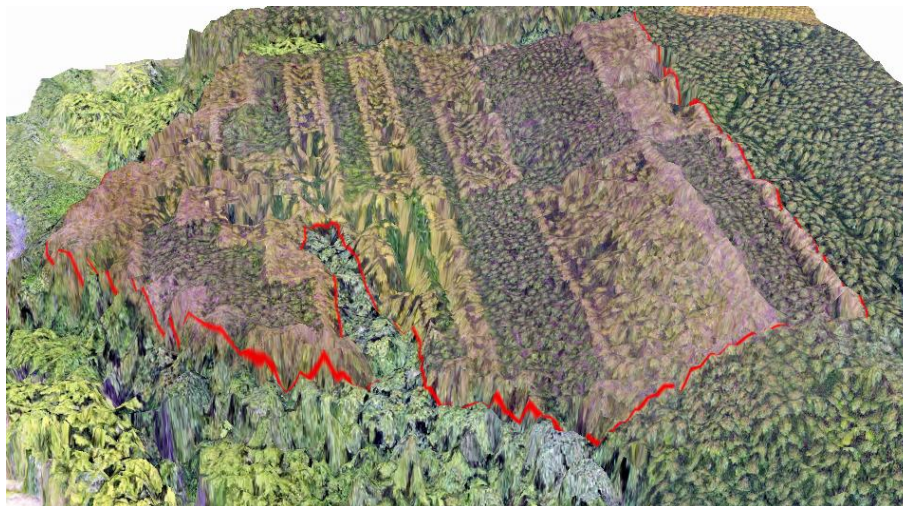


Figura 18. DSM para el área de estudio

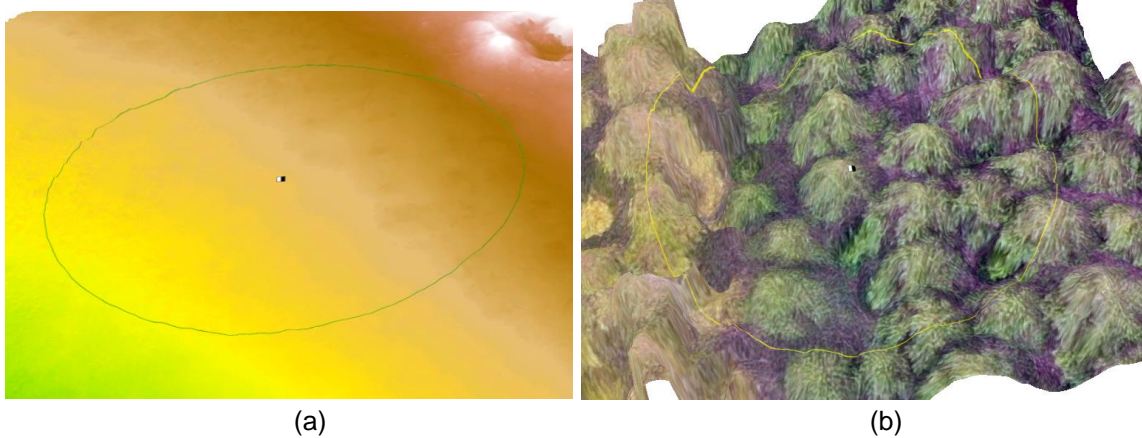


Figura 19. DTM (a) y CHM (b) para la parcela 5

### 5.2.3 Estimación de Alturas

Una vez realizadas las estadísticas focales aplicando el método de ventana de tamaño variable (VSW), se obtuvo la estimación de las alturas de la mayoría de los árboles, estas fueron asociadas por cercanía a los DAP generados de la fotogrametría terrestre (Figura 20).

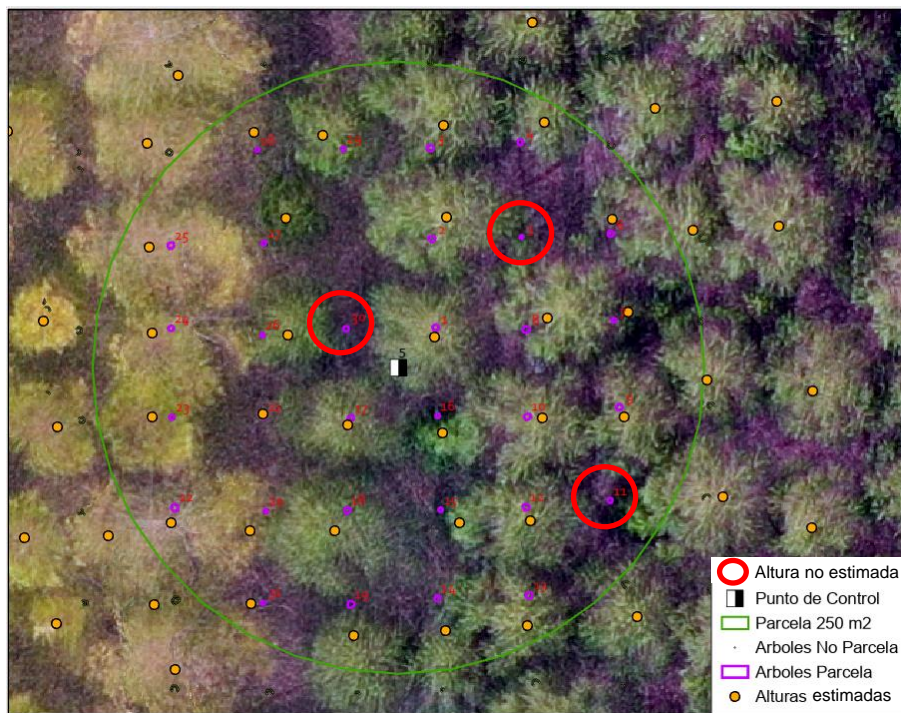


Figura 20. Generación de alturas para cada árbol en la parcela 5.



En el caso de la estimación de la altura usando la técnica de la ventana variable, se encontró que con este método se obtiene una estimación del 93% de las alturas de los árboles, en este caso las lecturas que no fueron estimadas por el modelo, corresponden a los arboles suprimidos, en los cuales su copa se encuentra debajo de otro árbol dominante. Por lo tanto, la lectura de estas alturas debió hacerse de forma manual con la ayuda de la nube de puntos.

Al probar las diferentes ventanas, se encontró que la ventana circular de 1.5 metros de radio y la ventana cuadrada de 1.5 x 1.5 metro, detectaron la mayor parte de las alturas, concordando con la distribución espacial que tienen los árboles en el campo que se encuentran se parados en una distancia de 3 x 3 metros pero que está influenciado fuertemente por el tamaño de la copa y la altura misma. La figura 21 muestra el método de la ventana de tamaño variable de forma circular con diferentes radios; y la figura 22 muestra el método de la ventana de tamaño variable de forma cuadrada con diferentes tamaños.

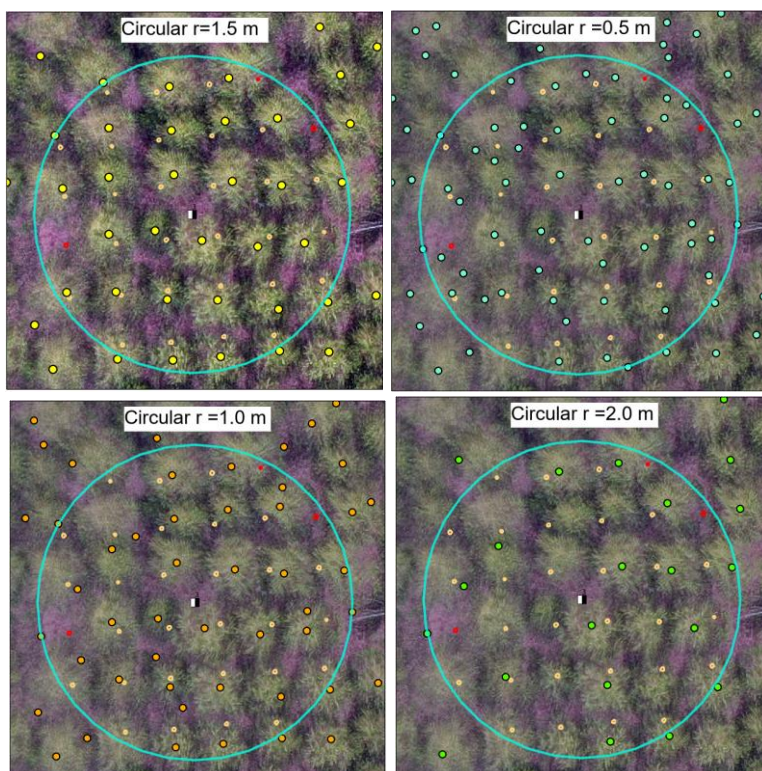


Figura 21. Ventanas de tamaño variable circular



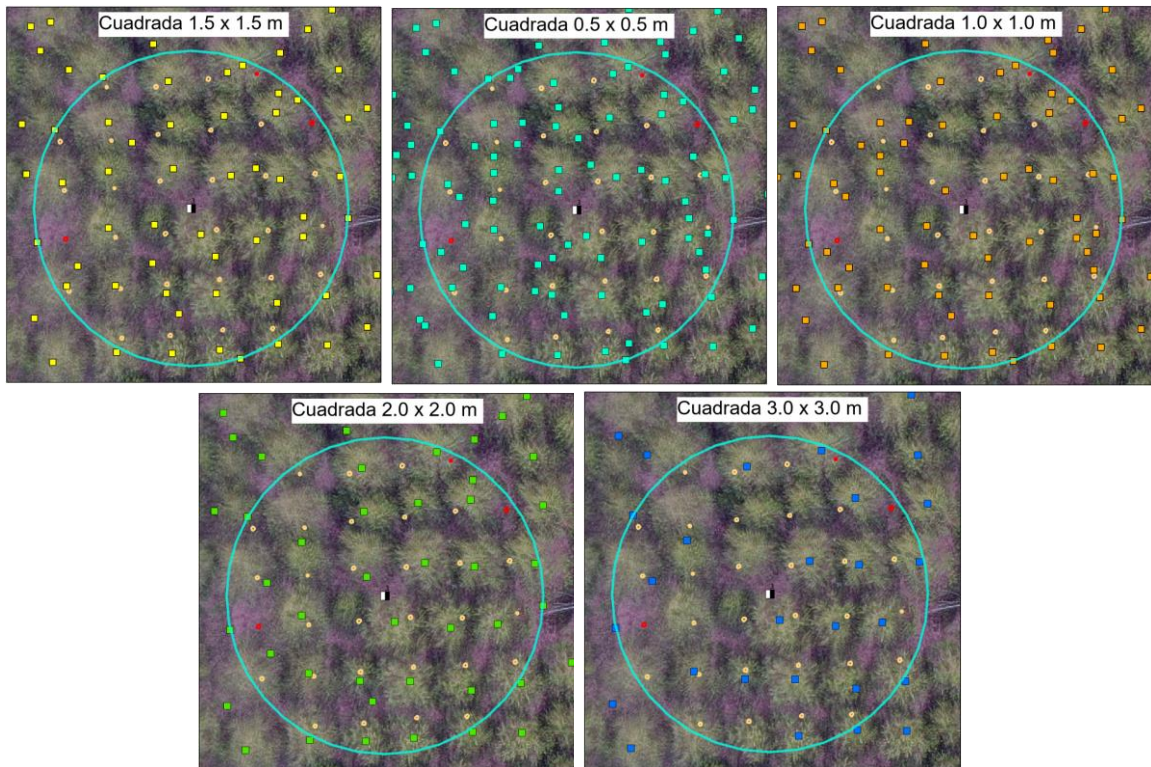


Figura 22. Ventanas de tamaño variable cuadradas

Para ambas formas de las ventanas la detección de partes altas en el modelo disminuye a medida que aumenta el tamaño de la ventana; en ambos métodos para los valores de 0.5 y 1 estiman más alturas lo que representa confusiones al asociar al árbol detectado; en los modelos después de los 2 metros se observa que no se detectan todos los ápices de los árboles y que varios de ellos quedan sin asociación, esto es común en árboles que tienen la copa pegada uno a otro y el modelo solo busca un punto alto. Considerando el espaciamiento de la plantación y el tipo de copa de estos árboles se recomienda una ventana circular de 1.5 metros de radio.

La tabla 7 resume los valores estimados para el DAP y las alturas para cada parcela. Con estas variables se procedió a realizar la modelación del inventario a nivel de parcela de manera similar al inventario tradicional, en la cual se estimaron las diferentes variables del inventario, como son:  $DAP_{Medio}$ ,  $Altura_{Media}$  el diámetro cuadrático ( $DQ$ ), la densidad de rodal como número de árboles por hectárea ( $N/ha$ ), el área basal en  $m^2/ha$  y el volumen total en  $m^3/ha$ .

Tabla 7. Datos resultantes del inventario por fotogrametría aérea y terrestre.

Parcela	Número arboles parcela	Alturas estimada	DAP Prom. (cm)	Altura Prom. (m)	DQ* (cm)	Número arboles /ha	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	Volumen TCC* (Ton/ha)	Volumen TSC* (Ton/ha)
1	29	29	16.1	29.2	16.4	1160	24.4	328.1	273.9
2	28	28	18.0	28.6	18.4	1120	29.7	390.0	328.2
3	32	32	19.5	27.6	19.7	1280	39.0	475.0	400.7
4	33	33	15.4	25.7	16.0	1320	26.5	330.4	276.6
5	29	29	18.7	27.4	19.0	1160	32.8	402.8	339.5
6	32	32	17.6	27.5	17.9	1280	32.3	402.4	337.7
7	30	30	18.1	26.6	18.6	1200	32.7	397.8	335.1
8	31	31	16.8	26.4	17.3	1240	29.0	357.1	300.0
9	27	27	18.0	27.2	18.2	1080	28.2	345.8	290.3
10	33	33	18.0	27.1	18.6	1320	35.9	450.8	383.9

DQ: Diámetro Cuadrático, TCC: Vol. Total Con Corteza y TSC: Vol. Total Sin Corteza

### 5.3 COMPARACION ESTADISTICA DE METODOS

A continuación, se presentan los resultados de las comparaciones de los métodos evaluados en las diferentes escalas de observación tanto a nivel de árbol como a nivel de parcela.

#### 5.3.1 A nivel de árbol.

La figura 23 muestra la relación entre el diámetro medido tradicionalmente y el diámetro obtenido mediante fotogrametría terrestre. En ella se puede observar que hay una asociación lineal positiva fuerte ( $r = 0.99$ ). Según (Heo et al., 2019), quienes compararon diámetros obtenidos mediante LiDAR con los medidos en campo, encontraron que las relaciones lineales fueron débiles. El sesgo muy cercano a cero ( $\beta_0 = 0.03$ ) y una proporción aproximada a uno, lo que indica que los parámetros de regresión son muy similares a la recta de identidad. El  $R^2$  de dicha regresión también fue muy cercano a 1 lo que demuestra la gran explicación que obtuvieron los diámetros del sensoramiento remoto en la variabilidad total del diámetro medido en campo. Esto concuerda con lo obtenido por (Xie et al., 2020), en donde el coeficiente de determinación fue cercano a uno en la comparación de diámetros medidos en campo y los producidos por LiDAR.

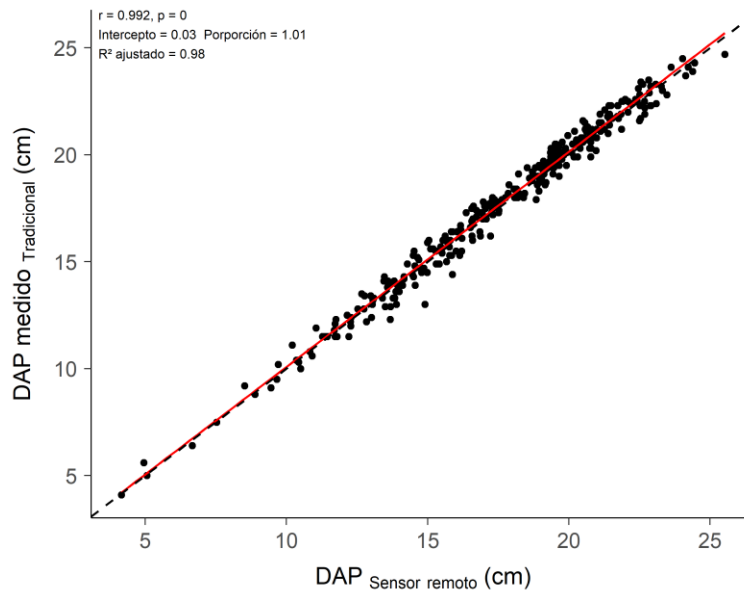


Figura 23. Diagrama de dispersión entre el DAP del método tradicional y el método por fotogrametría.

*Línea segmentada: Recta de identidad. Línea sólida: Recta de regresión.*

La determinación del intervalo de concordancia que se muestra en la figura 24 refleja ciertas medidas que se encuentran por fuera de los límites en los que se considera que los métodos concuerdan. En total fueron 9 medidas pareadas que contrastaron significativamente en sus magnitudes, es decir un 0.03% que en su mayoría superaron el límite superior dando indicios de una sobrestimación del diámetro en el método de fotogrametría terrestre.

El sesgo medio para el diámetro obtenido fue de 0.51. Según (Bland & Altman, 1986) la distribución normal de los errores se debe garantizar antes de obtener los intervalos de acuerdo. Tal como se puede observar en el histograma de frecuencias, hay una aproximación de las desviaciones de las mediciones por pares a dicha distribución.

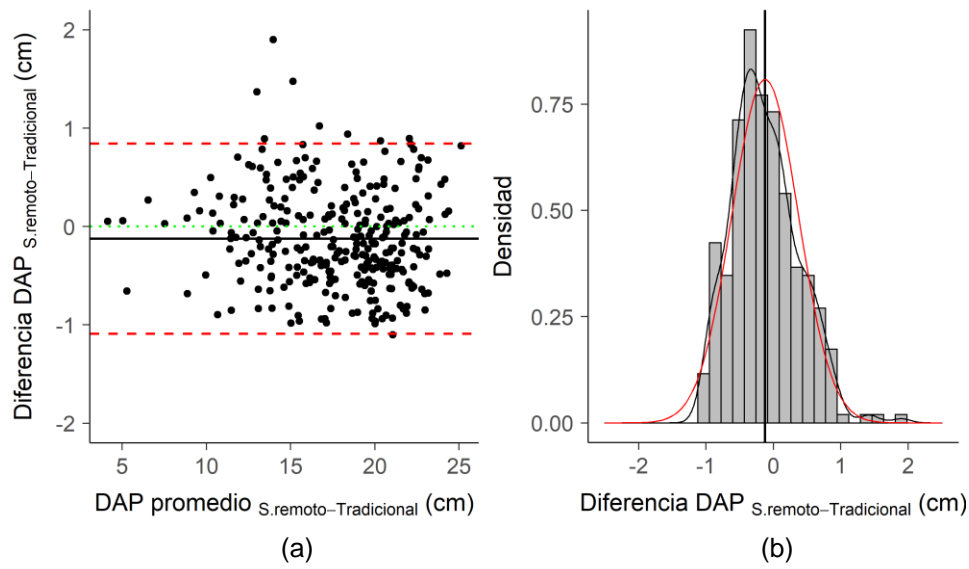


Figura 24. (a) Diagrama de dispersión entre las diferencias y promedios de DAP del método tradicional y el método de fotogrametría terrestre. *Líneas segmentadas: Límites de concordancia al 95%. Línea sólida: Sesgo medio. Línea punteada: Diferencia igual a cero.* (b) Histograma de frecuencias de los errores.

En la variable altura se presentó una relación positiva, aunque menos fuerte que para el diámetro ( $r = 0.82$ ). Esto concuerda con lo obtenido por Heo et al., (2019); Jurjević et al., (2020) y Moe et al., (2020). Según Wang et al., (2019), el nivel de dificultad para la medición de las alturas en la parcela tuvo un efecto sobre la fuerza de la correlación, obteniendo correlaciones más altas en parcelas de dificultad fácil a intermedia. Los parámetros estimados de regresión mostraron cierta desviación respecto a la recta de identidad. El sesgo del intercepto fue de  $-0.86$ , mientras que la proporción fue de  $1.01$ . Al evaluar el coeficiente de determinación se encontró que estuvo alejado de  $1$ , al igual que Pariyar & Mandal, (2009), quien comparó la altura real y la medida con varios instrumentos obteniendo  $R^2$  no tan cercanos a  $1$ . Esto indica que hay una explicación regular de la altura lograda por fotogrametría en la variabilidad total en la altura obtenida por el método tradicional. Esto se presentó debido a que la dispersión entre las medidas fue aumentando a medida que incrementó la altura dando indicios de sobrestimación y subestimación, lo cual Krause et al., (2019) también encontró, al contrastar alturas tomadas en campo y obtenidas por sensor remoto (figura 25). Según Larjavaara & Muller-Landau, (2013), se puede presentar sobrestimación de las alturas medidas en campo cuando la inclinación a la vista superior es mayor de  $70$  grados.

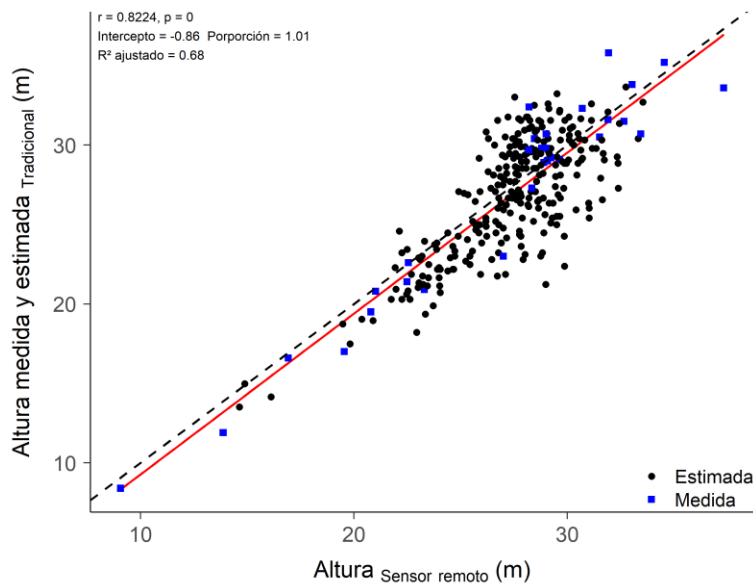


Figura 25. Diagrama de dispersión entre la altura del método tradicional y el método de fotogrametría.

*Línea segmentada: Recta de identidad. Línea sólida: Recta de regresión*

El nivel de concordancia de la altura se muestra en la figura 26. En ella se lograron encontrar varias mediciones por pares que tuvieron una diferencia significativa y, por lo tanto, fueron catalogadas como no concordantes. De las 301 mediciones pareadas se detectaron 13 mediciones por fuera de los límites de acuerdo, lo que equivale al 0.04%. Es de resaltar que de las 30 medidas de alturas que fueron medidas directamente en campo, sólo 1 estuvo por fuera de los intervalos de concordancia, lo cual refleja que la mayor parte de los contrastes en desacuerdo estuvieron relacionados con estimaciones indirectas.

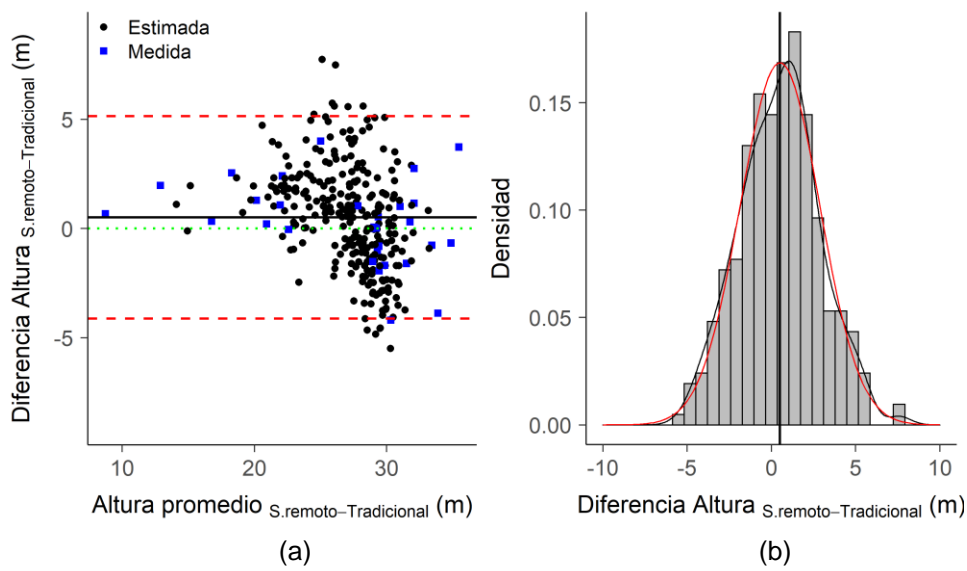


Figura 26. (a) Diagrama de dispersión entre las diferencias y promedios de altura del método tradicional y el método de fotogrametría. *Líneas segmentadas: Límites de concordancia al 95%. Línea sólida: Sesgo medio. Línea punteada: Diferencia igual a cero.* (b) Histograma de frecuencias de los errores.

El sesgo medio obtenido fue de 0.51. El histograma de frecuencias muestra una aproximación a la distribución normal de los errores, lo cual valida los intervalos de concordancia estimados (Bland & Altman, 1986).

A nivel de árbol se observa una buena relación entre los diámetros y las alturas medidos en el método tradicional con los estimados por el método de sensores remotos. Se presenta una relación menor en la altura la cual está muy influenciada por las pocas mediciones para poder realizar comparaciones en el método tradicional, pero se observa que la variabilidad de la altura por el método tradicional está fuertemente influenciada por los equipos de medición, los operarios y las condiciones de visibilidad de la parte alta de los árboles.

Lo anterior tiene implicaciones fuertes en la estimación del inventario por uno u otro método, ya que la incertidumbre relacionada con la variable altura presenta una fuerte relación con las mismas estimaciones, lo que sugiere que se deben medir todos los arboles de la parcela o realizar la comparación con las alturas realmente medidas al cosechar los árboles.

### 5.3.2 A nivel de parcela.

Luego de validar la aproximación de la distribución de las variables que son objeto de análisis se obtuvieron los siguientes resultados. En la figura 27 se presentan los gráficos de dispersión de varias de variables de rodal obtenidas por el método tradicional y las logradas por el método de fotogrametría.

El diámetro medio obtuvo un coeficiente de correlación de 0.95 lo que determina una asociación lineal positiva y fuerte. El intercepto fue de 2.2 cm y la proporción de cambio estimada fue de 0.88. El coeficiente de determinación fue cercano a 1. Al realizar la prueba de  $t$  pareada se pudo concluir que no hay diferencias entre las medias del  $DAP_{Medio}$  obtenido por uno y otro método. Lo que está en estrecha relación con lo que muestran los datos a nivel de árbol, puesto que en esta variable todos los diámetros fueron medidos

La variable de rodal altura media presentó una relación lineal débil  $r = 0.3$ . Tanto el intercepto como la proporción estuvieron alejados de los valores de la relación de identidad, ya que  $\beta_0 = 17.37$  muy alejado de cero y la tasa de incremento estuvo desviada de 1 considerablemente. Esto expresa un coeficiente de determinación muy alejado de 1 lo que representa un bajo nivel de explicación de la variabilidad total de la altura media. Este bajo desempeño se debe a que al parecer hay un error sistemático asociado de tipo curvilíneo. A pesar de ello, la prueba de  $t$  pareada concluyó que la diferencia entre las medias de los dos métodos es cero. A nivel de árbol esta variable fue la que presentó la relación más débil, puesto que para el método tradicional tiene un tamaño de muestra muy reducido, lo que sugiere que se debe ampliar el número de árboles a medir o combinar la estimación de la altura con los métodos destructivos.

Un escenario muy similar al del diámetro medio se obtuvo en la variable de rodal diámetro cuadrático. La correlación lineal fue fuerte  $r = 0.96$ . El sesgo del intercepto fue de 2.5 cm y la proporción cercana a 1 ( $\beta_1 = 0.86$ ). El  $R^2_{ajustado}$  fue de 0.92, indicando una buena explicación de la variabilidad total del diámetro cuadrático obtenido de forma tradicional. La prueba de  $t$  determinó que las medias son similares entre los dos métodos.

En cuanto a la densidad de rodal se logró un coeficiente de correlación que representa una asociación lineal positiva fuerte  $r = 0.96$ . A pesar de la magnitud de la variable, el intercepto fue bajo  $\beta_0 = 1.98$  y la proporción de cambio fue exactamente 1. Esto llevó a obtener un coeficiente de determinación muy cercano

a 1 ( $R^2_{ajustado} = 0.91$ ). La media de la densidad de rodal obtenida tradicionalmente no fue estadísticamente diferente de la media lograda por el método de fotogrametría. Dichas variaciones en la densidad del rodal están explicadas básicamente por las diferencias presentadas en algunas parcelas en las que se presentan más o menos árboles por el método tradicional que en el método de sensores remotos, en la cual se garantiza que todos los árboles medidos se encuentran dentro de la parcela.

El área basal obtuvo un coeficiente de correlación lineal de 0.96, indicando una relación lineal fuerte. El sesgo respecto a la recta de identidad fue de 1.9 m<sup>2</sup>/ha, mientras que la proporción de cambio estuvo cercana a 1. La buena explicación de las medidas obtenidas por fotogrametría en la variabilidad total del área basal lograda tradicionalmente se da ya que el  $R^2_{ajustado}$  fue de 0.9. Al realizar la prueba de t pareada se concluye que no hay diferencias entre las medias de los dos métodos.

En la variable de rodal de volumen total se puede determinar una asociación lineal fuerte ( $r = 0.96$ ). Sin embargo, hay un sesgo considerable respecto a la recta de identidad, ya que el intercepto fue de -96.34 y la proporción de cambio mayor que 1. A pesar de esto, el coeficiente de determinación estuvo cercano a 1. La prueba de t pareada indica que las medias de volumen estimada por ambos métodos son iguales.

En cuanto a la medición del sesgo para la parcela y el rodal. En la mayoría de los casos el sesgo fue negativo lo que indica que el método tradicional obtiene mediciones mayores respecto al método de fotogrametría. Excepto para la variable altura en donde el sesgo fue positivo. Según Mikita et al., (2016), la combinación de errores en ambos métodos puede ser un factor para determinar un error intrínseco entre los métodos comparados. Esto puede explicar los comportamientos expresados por las variables a nivel de parcela y a nivel de rodal, en donde no solo actúa un factor de error por combinación de los métodos, sino también por la extrapolación de errores a otras escalas de observación.

Para las variables medidas y estimadas relacionadas con el diámetro, como son el DAP, la densidad de rodal, el área basal y el diámetro cuadrático medio presentaron una buena relación por ambos métodos, lo que indica que a nivel de parcela rodal el método de sensores remotos presenta un muy buen ajuste y puede ser implementado, contando con una ventaja adicional como es el montaje de la parcela, la cual bajo el inventario tradicional puede verse influenciada por errores



en el montaje y delimitación de la parcela, dejando árboles por fuera o ingresar árboles que no deben ser medidos, lo que deriva en sub o sobre estimaciones del inventario a nivel de parcela.

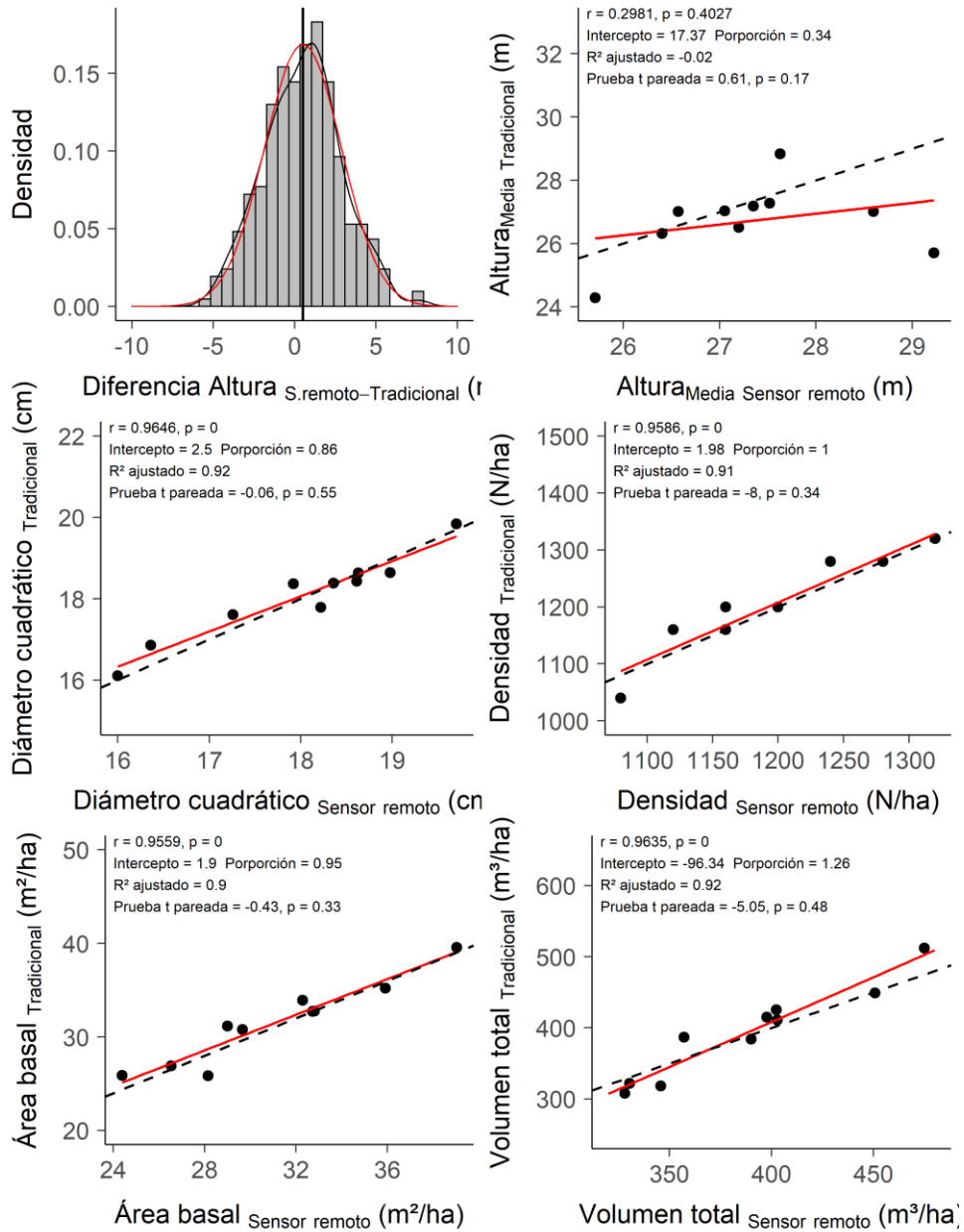


Figura 27. Diagramas de dispersión entre las variables de rodal del método tradicional y el método de fotogrametría.

*Línea segmentada: Recta de identidad. Línea sólida: Recta de regresión.*

## 6. CONCLUSIONES

En este estudio se logró establecer una metodología automatizada, que permite estimar el diámetro a la altura del pecho en el establecimiento de parcelas de inventarios forestales en plantaciones de *Eucalyptus grandis* a partir de imágenes provenientes de VANT. Se encontró una asociación lineal positiva fuerte ( $r = 0.99$ ) de los datos medidos en campo y con los estimados por el método de fotogrametría terrestre. Este método presenta una serie de ventajas respecto al tradicional como son: En el del montaje de la parcela, este garantiza que solo se clasifiquen los árboles que realmente pertenecen a la misma, mejorando la estimación del número de árboles por hectárea y por ende en el volumen del inventario. También, evita la comisión de errores debido a la digitación en la lectura del diámetro.

La estimación en campo de la variable altura representa la mayor incertidumbre en el establecimiento de parcelas; también, su adquisición resulta costosa en términos de tiempo y recursos. La metodología de ventana de tamaño variable demostró ser una metodología que permite obtener la mayoría de las alturas (93%) de la parcela de manera semiautomatizada. Se encontró que existe una relación lineal positiva, aunque menos fuerte que para el diámetro ( $r = 0.82$ ). Esto es atribuible a varios factores como son: el tamaño de la muestra de los árboles medidos en campo puede ser insuficiente para explicar la variabilidad de los datos, sumado a que los demás datos comparados a nivel de árbol para el método tradicional fueron estimados. La metodología expuesta, presenta como principal limitante la dificultad para la estimación de la altura de los árboles suprimidos, los cuales, de hacer una lectura directa, presentarían una sobre estimación y por lo tanto del inventario, la lectura de estos se debe realizar de manera manual en la nube de puntos.

A nivel estadístico, se puede concluir que la estimación del diámetro y la altura a nivel de árbol presenta una buena relación, siendo mejor para el diámetro que es la variable medida en campo. Para la altura la relación con las alturas estimadas en campo y las estimadas por fotogrametría presentan una mayor variabilidad. Los análisis a nivel de parcela y a nivel de rodal no presentaron un buen ajuste, salvo en aquellos análisis relacionados con el diámetro. Las asociaciones estadísticas a nivel de parcela están fuertemente influenciadas por el número de árboles detectados en la parcela, que como se vio varían según el método de inventario.

## 7. RECOMENDACIONES

Resultó de gran importancia en el estudio el establecimiento de puntos de control para garantizar el ajuste entre los dos modelos. Sin embargo, se recomienda el uso de un VANT con sistema RTK que permita ajustar los datos sin necesidad de establecer PC, ya que estos resultan costosos y demandan tiempo de establecimiento.

En futuras investigaciones, se sugiere la medición de todos los DAP y las alturas de los árboles en la parcela, a fin de mejorar las comparaciones estadísticas de las variables dasométricas a nivel de parcela y rodal. O establecer el estudio en un lote que se encuentre próximo a la cosecha y que todos sus árboles sean marcados y medidos en la altura.

Para mejorar la estimación de la variable altura, se recomienda la asociación del método de ventana de tamaño variable y el método de delimitación inversa de cuencas hidrográficas, asumiendo que la mezcla de estos métodos mejoraría el ajuste en la identificación del árbol individual.

Debido a las dificultades que representa la estimación de la altura para arboles suprimidos por métodos rasterizados, se sugiere en próximas investigaciones generar una metodología que permita la estimación de la altura directamente desde la nube de puntos.

Realizar más estudios modificando los ángulos de la cámara y la altura desde la cual se toman las fotografías con el fin de obtener una nube de puntos a nivel de árbol que permita modelar el volumen del árbol individual.

Evaluar la aplicabilidad de esta metodología en otros géneros de plantaciones forestales como son los pinos y analizar sus ventajas y limitaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bland, J., & Altman, D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327((8476)), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2010). Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*, 2(4), 1157–1176. <https://doi.org/10.3390/rs2041157>
- Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>
- Dick, A. R., Kershaw, J. A., & MacLean, D. A. (2010). Spatial tree mapping using photography. *Northern Journal of Applied Forestry*, 27(2), 68–74. <https://doi.org/10.1093/njaf/27.2.68>
- DJI. (2020). *Mavic 2 Pro / Zoom* (Issue 2.2, pp. 1–68). [https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic\\_2/Mavic\\_2\\_Pro\\_Zoom\\_User\\_Manual\\_v2.2\\_en.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/Mavic_2_Pro_Zoom_User_Manual_v2.2_en.pdf)
- FAO y PNUMA. (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Forsman, M., Börlin, N., & Holmgren, J. (2016). Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig. *Forests*, 7(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f7030061>
- Fritz, A., Kattenborn, T., & Koch, B. (2013). UAV-BASED PHOTOGRAMMETRIC POINT CLOUDS &ndash; TREE STEM MAPPING IN OPEN STANDS IN COMPARISON TO TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUDS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-141-2013>
- Grenzdörffer, G., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 1207–1213. [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/206.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/206.pdf)
- Guerra-Hernández, J., Cosenza, D. N., Rodriguez, L. C. E., Silva, M., Tomé, M., Díaz-Varela, R. A., & González-Ferreiro, E. (2018). Comparison of ALS- and UAV(SfM)-derived high-density point clouds for individual tree detection in Eucalyptus plantations. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5211–5235. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1486519>
- Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020).

- Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: A review focusing on the data, processing and potentialities. *Remote Sensing*, 12(6).  
<https://doi.org/10.3390/rs12061046>
- Hapca, I. A., Mothe, F., & Leban, J.-M. (2007). A digital photographic method for 3D reconstruction of standing tree shape. *Annals of Forest Science*, 64(6), 631–637. <https://doi.org/10.1051/forest:2007041>
- Heo, H. K., Lee, D. K., Park, J. H., & Thorne, J. H. (2019). Estimating the heights and diameters at breast height of trees in an urban park and along a street using mobile LiDAR. *Landscape and Ecological Engineering*, 15(3), 253–263. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00379-6>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Imaña-Encinas, J. (2011). *Mensura Dasométrica* (Universidade de Brasília (ed.); 2<sup>a</sup> Edición). Departamento de Engenharia Florestal.
- Jurjević, L., Liang, X., Gašparović, M., & Balenović, I. (2020). Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169(August), 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014>
- Koch, B., Heyder, U., & Weinacker, H. (2006). Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(4), 357–363. <https://doi.org/https://doi.org/10.14358/PERS.72.4.357>
- Krause, S., Sanders, T. G. M., Mund, J. P., & Greve, K. (2019). UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/rs11070758>
- Larjavaara, M., & Muller-Landau, H. C. (2013). Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(9), 793–801. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12071>
- Lema Tapias, Á. (2003). *Elementos estadísticos de dasometría y medición forestal* (Silvano (ed.)).
- Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyypä, J., Honkavaara, E., Liu, J., & Kaartinen, H. (2014). The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. *Remote Sensing*, 6(7), 6587–6603. <https://doi.org/10.3390/rs6076587>
- Liu, C. J. (1980). Log Volume Estimation with Spline Approximation. *Forest Science*. <https://doi.org/10.1093/forestscience/26.3.361>

- Michez, A., Bauwens, S., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2016). Characterization of Forests with LiDAR Technology. In *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-103-1.50008-X>
- Mikita, T., Janata, P., & Surový, P. (2016). Forest stand inventory based on combined aerial and terrestrial close-range photogrammetry. *Forests*, 7(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f7080165>
- Miller, J., Morgenroth, J., & Gomez, C. (2015). Urban Forestry & Urban Greening 3D modelling of individual trees using a handheld camera : Accuracy of height , diameter and volume estimates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 932–940. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.001>
- Minaet. (2011). *Plan Nacional de Desarrollo Forestal 2011-2020*.
- MinAgricultura. (2019). *Boletín Estadístico Forestal*. [https://vuf.minagricultura.gov.co/PublishingImages/BOLETIN ESTADISTICO FORESTAL PUBLICADO.pdf](https://vuf.minagricultura.gov.co/PublishingImages/BOLETIN%20ESTADISTICO%20FORESTAL%20PUBLICADO.pdf)
- Moe, K. T., Owari, T., Furuya, N., & Hiroshima, T. (2020). Comparing individual tree height information derived from field surveys, LiDAR and UAV-DAP for high-value timber species in Northern Japan. *Forests*, 11(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/f11020223>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., & Surový, P. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>
- Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., & Chiteculo, V. (2017). Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2392–2410. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>
- Pariyar, S., & Mandal, R. A. (2009). Comparative tree height measurement using different instrument. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1(2), 12–17. <http://www.ecologyjournal.in/article/view/9/1-2-12>
- Peduzzi, A., Wynne, R. H., Fox, T. R., Nelson, R. F., & Thomas, V. A. (2012). Estimating leaf area index in intensively managed pine plantations using airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 270, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.048>
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. In *Cirad*. <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003). Measuring individual tree

- crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 564–577. <https://doi.org/10.5589/m03-027>
- Puliti, S., Olerka, H., Gobakken, T., & Næsset, E. (2015). Inventory of Small Forest Areas Using an Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, 7(8), 9632–9654. <https://doi.org/10.3390/rs70809632>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. In *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Silvano, L. (2005). *Parcelas de Inventario Forestal*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3839.0888>
- Smurfit Kappa Colombia. (2020). *Resumen Plan de Manejo Forestal 2021 - 2025*. [https://www.smurfitkappa.com/co/-/media/files/smurfit-digital-marketing-platform/publications---country/colombia/resumen-plan-de-manejo-forestal-2021\\_2025.pdf](https://www.smurfitkappa.com/co/-/media/files/smurfit-digital-marketing-platform/publications---country/colombia/resumen-plan-de-manejo-forestal-2021_2025.pdf)
- Sotier, B. (2014). High resolution aerial images from UAV for forest applications State-of-the-Art. *Forest Resources & LiDar*, 2. <https://www.newfor.net/wp-content/uploads/2015/02/DL14-Newfor-SoA-UAV.pdf>
- Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. M. (2015). High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. *PloS One*, 10(6), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130479>
- Trincado, G., & Leal D., C. (2006). Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque*, 27(1), 23–34. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002006000100003>
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4(5), 1392–1410. <https://doi.org/10.3390/rs4051392>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovsky, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7(3), 62. <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- Wallace, L., Lucieer, A., & Watson, C. S. (2014). Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(12), 7619–7628.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2315649>

Wallace, L., Musk, R., & Lucieer, A. (2014). An assessment of the repeatability of automatic forest inventory metrics derived from UAV-borne laser scanning data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), 7160–7169. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2308208>

Wang, Y., Lehtomäki, M., Liang, X., Pyörälä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., Liu, J., Feng, Z., Chen, R., & Hyypä, J. (2019). Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147(October 2018), 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.008>

Xie, Y., Zhang, J., Chen, X., Pang, S., Zeng, H., & Shen, Z. (2020). Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack LiDAR system. *Forest Ecosystems*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00237-0>

Zarco-Tejada, P. J., Diaz-Varela, R., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, 55, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.004>