



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

ESTIMACIÓN DE CARBONO A NIVEL ÁRBOL INDIVIDUAL EN BOSQUE NATURAL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)

CARBON ESTIMATION AT THE INDIVIDUAL TREE LEVEL IN NATURAL FOREST USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

Hinojosa-Espinoza, S.I., Briseño Reyes, J., J.J. Corral-Rivas, J. Aguirre-Gutiérrez, D.J. Vega-Nieva, H.M. De los Santos Posadas

ESTIMACIÓN DE CARBONO A NIVEL ÁRBOL INDIVIDUAL EN BOSQUE NATURAL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)
CARBON ESTIMATION AT THE INDIVIDUAL TREE LEVEL IN NATURAL FOREST USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 177-198 México. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.11



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial ([CC BY-NC 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

Estimación de carbono a nivel árbol individual en bosque natural mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Carbon estimation at the individual tree level in natural forest using unmanned aerial vehicles (UAV)

Hinojosa-Espinoza, S.I.,
J. Briseño Reyes,
J.J. Corral-Rivas,
J. Aguirre-Gutiérrez,
D.J. Vega-Nieva,
H.M. De los Santos Posadas

ESTIMACIÓN DE
CARBONO A NIVEL ÁRBOL
INDIVIDUAL EN BOSQUE
NATURAL MEDIANTE
VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS (VANT)

CARBON ESTIMATION AT
THE INDIVIDUAL TREE
LEVEL IN NATURAL
FOREST USING
UNMANNED AERIAL
VEHICLES (UAV)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 177-198. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.11

Susana I. Hinojosa-Espinoza <https://orcid.org/0000-0001-6786-6624>

*Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México*

Jaime Briseño-Reyes / jaime.briseno@ujed.mx 

<https://orcid.org/0000-0003-0732-4908>
*Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México*

José Javier Corral-Rivas <https://orcid.org/0000-0002-2851-7517>

*Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México*

Jesús Aguirre-Gutiérrez <https://orcid.org/0000-0001-9190-3229>

*Environmental Change Institute, School of Geography
and the Environment, University of Oxford, UK*

Daniel José Vega-Nieva <https://orcid.org/0000-0002-1463-6523>

*Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México*

Héctor Manuel de los Santos Posadas <https://orcid.org/0000-0003-4076-5043>

*Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo. México*

RESUMEN: El uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) ha ido en aumento en los últimos años en el ámbito forestal, con aplicaciones como estimación de variables dendrométricas, biomasa aérea y contenido de carbono. Este trabajo tiene como objetivo estimar el contenido de carbono mediante VANT a nivel de árbol individual en bosques templados de la Sierra Madre Occidental en México. A partir de modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS), se generó un modelo de altura de dosel (canopy height model, CHM, por sus siglas en inglés) como base para la estimación de alturas, geolocalización e identificación de árboles, usando el paquete *ForestTools* de RStudio evaluando tres combinaciones de parámetros del algoritmo de filtro de ventana variable (variable-window-filter, VWF, por sus siglas en inglés). Además, se realizó un reconocimiento de especies mediante análisis de imágenes basado en objetos (object-based image analysis, OBIA, por sus siglas en inglés). Finalmente, se realizó una predicción de biomasa y contenido de carbono usando ecuaciones alométricas. Los resultados mostraron una alta concordancia en la identificación y conteo de árboles (96.10%) con la combinación de 0.05 + 0.6 en los parámetros del algoritmo de VWF. El análisis mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87 y 0.58 para alturas y diámetros respectivamente, además un índice Kappa de 0.92 en reconocimiento de especies. Comparando las estimaciones de carbono entre el método tradicional y el uso de VANT, se observó un r de 0.74 y un R^2 de 0.55, evidenciando una relación moderada entre ambos métodos. Los resultados muestran la viabilidad de los VANT para la estimación de carbono en bosques.

Palabras clave: Algoritmo de filtro de ventana variable, contenido de carbono, *ForestTools*, modelo de altura de dosel, OBIA, VANT.

ABSTRACT: The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has increased in recent years in the forestry field, with applications such as estimating dendrometric variables, aerial biomass, and carbon stock. This work aims to estimate carbon stock using UAV at the individual tree level in temperate forests of the Sierra Madre Occidental in Mexico. From digital terrain models (DTM) and surface models (DSM), a canopy height model (CHM) was generated as a basis for estimating heights, geolocation, and tree identification using the *ForestTools* package in RStudio, evaluating three parameter combinations of the variable window filter (VWF) algorithm. Additionally, species recognition was performed using object-based image analysis (OBIA). Finally, biomass and carbon stock prediction was performed using allometric equations. The results showed high concordance in tree identification and counting (96.10%) with the combination of 0.05 + 0.6 in the VWF algorithm parameters. The analysis showed a coefficient of determination (R^2) of 0.87 and 0.58 for heights and diameters respectively, as well as a Kappa index of 0.92 in species recognition. Comparing carbon estimates between the traditional method and the use of UAV, a r of 0.74 and an R^2 of 0.55 were observed, evidencing a moderate relationship between both methods. The results demonstrate the feasibility of UAV for carbon estimation in forests

Key words: Variable Window Filter (VWF) algorithm, carbon stock, *ForestTools*, canopy height model, OBIA, UAV.

INTRODUCCIÓN

Los bosques ocupan casi un tercio de la superficie total terrestre y representan importantes sumideros de carbono, ya que fijan y almacenan cantidades superiores que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Palacios-Cruz *et al.*, 2020). Actualmente el almacenamiento de carbono se considera un servicio de regulación clave para mitigar el cambio climático (Buotte *et al.*, 2020). De tal manera que, los bosques constituyen la base para la implementación de instrumentos financieros, tales como los bonos de carbono, que convierten el secuestro natural de dióxido de carbono (CO_2) en un mecanismo de financiamiento para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta estrategia resulta especialmente pertinente para países en desarrollo con vastas extensiones forestales, como México, donde los bosques cubren 65.7 millones de hectáreas, lo que representa un tercio del territorio nacional (FAO, 2021), y estados como Durango albergan reservas forestales significativas en la Sierra Madre Occidental (Novo-Fernández *et al.*, 2018).

Por lo anterior, contar con avances tecnológicos en la captura y procesamiento de imágenes mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT), junto con el uso de técnicas fotogramétricas y algoritmos de aprendizaje automatizado permite caracterizar de manera detallada los ecosistemas forestales (Dainelli *et al.*, 2021; Hernando *et al.*, 2019), lo que favorece entre otras cosas, a los proyectos de compra y venta de bonos de carbono (Shteto *et al.*, 2025). Estas herramientas posibilitan también la estimación precisa de variables dendrométricas relevantes como el diámetro a altura de pecho (DAP) y la altura total de los árboles, así como la detección y delimitación de copas individuales (Ke y Quackenbush, 2011), la identificación de diversas especies (Komárek *et al.*, 2018) y sus rasgos funcionales (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2021). Asimismo, el uso de VANT equipados con cámaras RGB (Red, Green, Blue) ofrece una alternativa rentable y eficiente en comparación con tecnologías como LiDAR (Light Detection and Ranging) que requieren una mayor inversión económica (Alzamora *et al.*, 2021), reduciendo significativamente tanto los costos económicos como el tiempo requerido en los inventarios forestales tradicionales, cubriendo áreas extensas de manera eficiente. En este contexto, disponer de inventarios forestales precisos y confiables sobre almacenes de biomasa y contenido de carbono en los bosques, facilitan el diseño de estrategias de manejo forestal que contribuyen a la

mitigación del cambio climático (Martínez *et al.*, 2025). Si bien, en la región de Durango se han desarrollado estudios orientados al análisis de biomasa aérea mediante el uso de imágenes satelitales (López Serrano *et al.*, 2021; Rosas-Chavoya *et al.*, 2023), así como al modelado de atributos biométricos a través de VANT (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2023). Hasta el momento no se cuenta con registros de investigaciones que estimen el carbono a nivel árbol individual a partir de imágenes generadas con VANT RGB.

Este estudio tiene como objetivo estimar el contenido de carbono a nivel de árbol individual en un bosque natural utilizando VANT, con el fin de optimizar los recursos y mejorar la eficiencia en la cuantificación de captura de carbono, ofreciendo una alternativa precisa y escalable a los métodos tradicionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio es un sitio perteneciente a la red nacional de Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS, <https://forestales.ujed.mx/monafor>) con presencia en 15 estados del país establecidos a través de las metodologías de Corral-Rivas *et al.* (2009). El SPIFyS de 50x50 m se encuentra dentro del ejido “La Victoria” en el municipio de Pueblo Nuevo, ubicado dentro de la cadena montañosa de la Sierra Madre Occidental al sur del estado de Durango (Figura 1). El ejido se encuentra ubicado en 105°25'39.465" Oeste y 23°43'53.022" Norte, con una altitud que va desde los 2,400 y 2,850 metros sobre el nivel del mar (msnm). La vegetación predominante es bosque de pino-encino con estructuras mixtas constituidos principalmente por los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus*, *Cupressus*, *Pseudotsuga*, *Arbutus* y *Alnus* (Vega *et al.*, 2022).

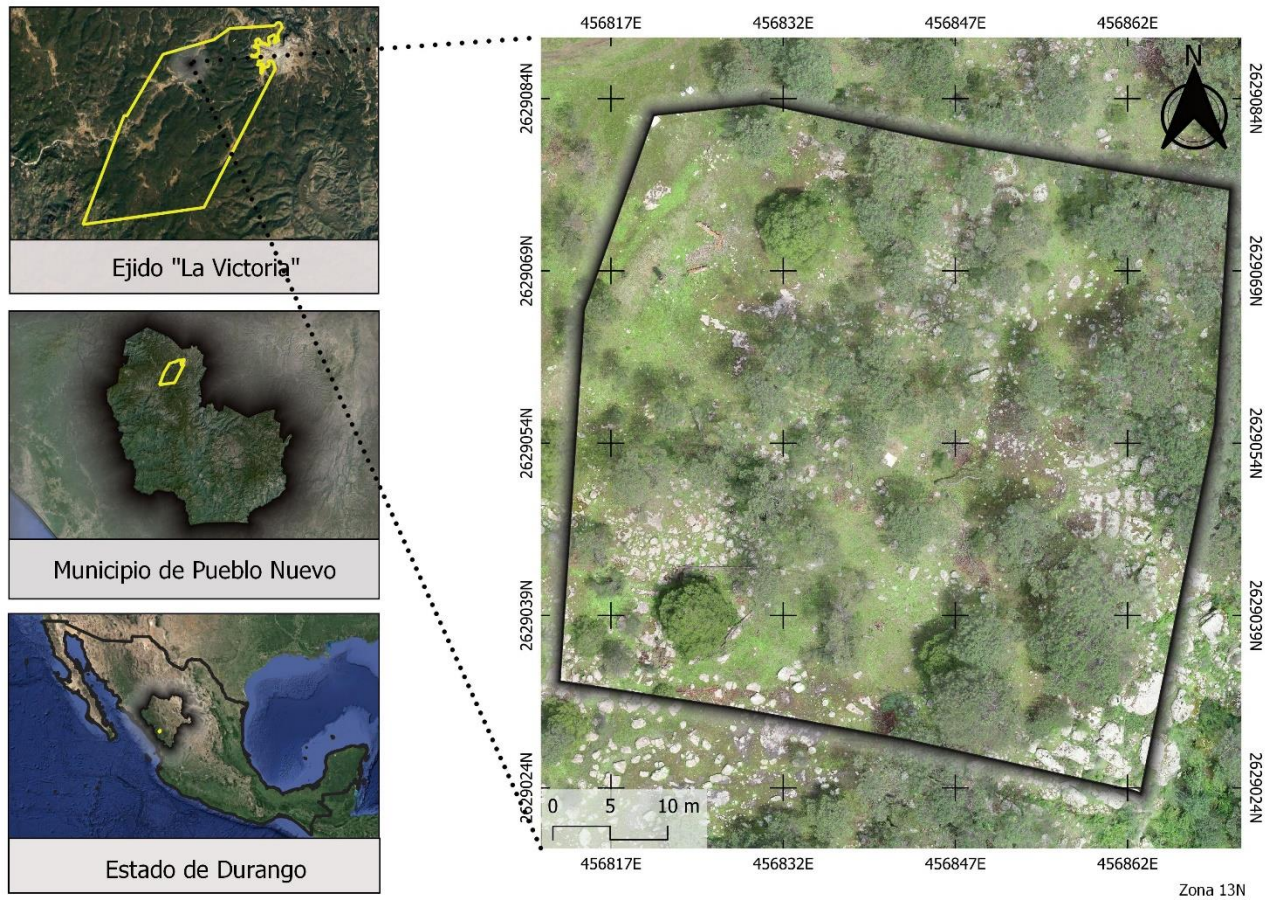


Figura 1. Localización del área de estudio en el ejido "La Victoria"
Figure 1. Location of the study area in the ejido "La Victoria"

Flujo de trabajo

El diagrama del proceso general utilizado para la estimación de carbono mediante VANT se ilustra en la Figura 2.

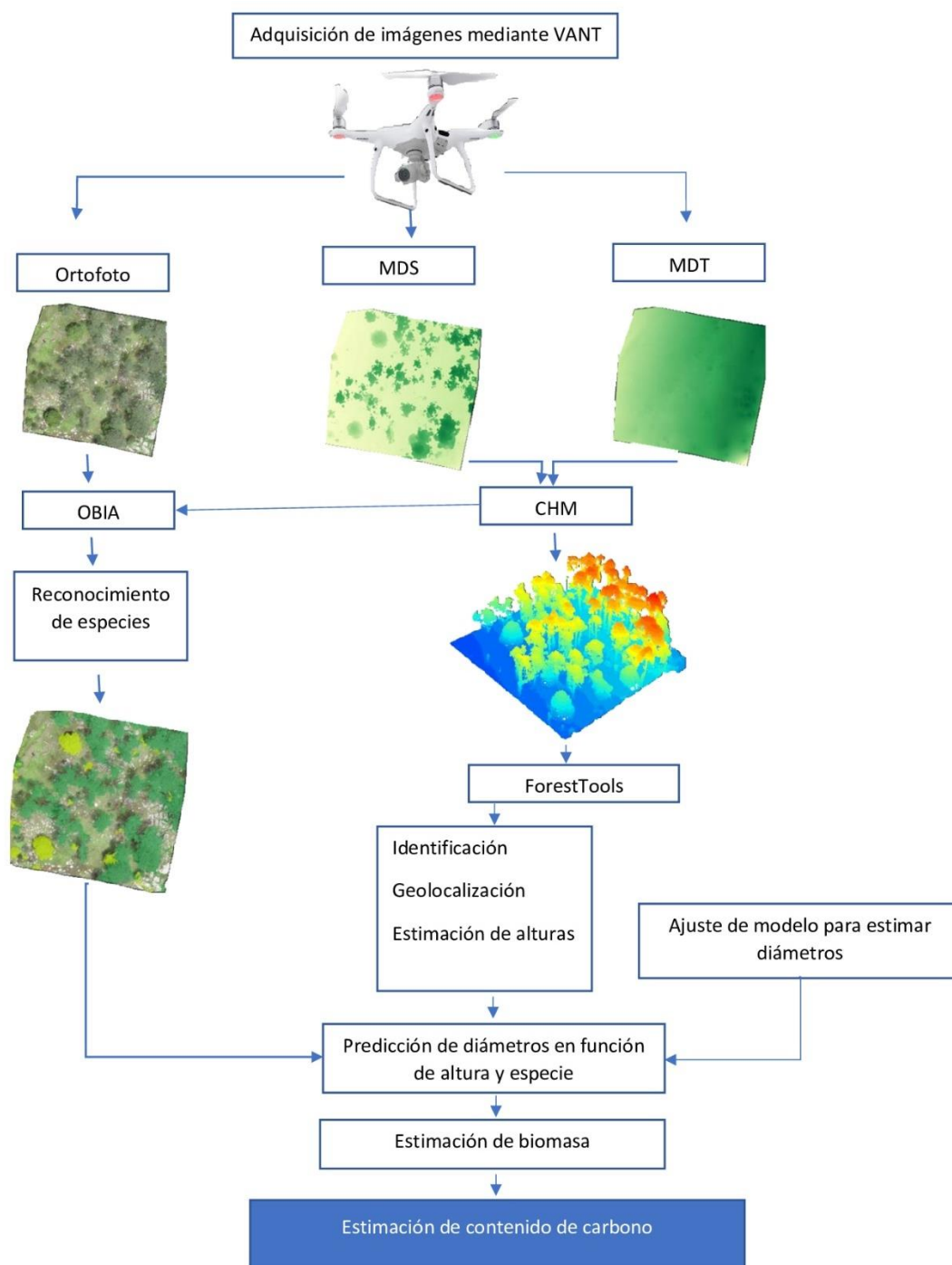


Figura 2. Flujo de trabajo para la estimación de contenido de carbono mediante VANT; modelo digital de superficie (MDS), modelo digital de terreno (MDT), modelo de altura de dosel (CHM) y análisis de imágenes basado en objetos (OBIA).
Figure 2. UAV-based workflow for carbon stock estimation; digital surface model (MDS), digital terrain model (MDT), canopy height model (CHM) and object-based image analysis (OBIA).

Adquisición de imágenes mediante VANT

El 01 de septiembre del año 2024 a las 18:00 horas se sobrevoló la zona de estudio empleando un VANT Phantom 4 Pro de la marca DJI con un sensor RGB de 20 megapíxeles, con capacidad de georreferenciación de imágenes de manera directa gracias a su sistema de posicionamiento global (GPS), y con un rango de precisión de vuelo de ± 0.5 m en ubicación vertical y ± 1.5 m en ubicación horizontal (<https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro-v2/specs> consultado el 02 de septiembre de 2024). El plan de vuelo se diseñó mediante la aplicación Pix4Dcapture, con un área de 70 x 70 metros. Se realizaron un total de cinco vuelos a una altitud constante de 50 metros sobre el nivel del suelo. Esta baja altitud permite obtener mayor precisión y detalle en la reconstrucción de productos fotogramétricos, ya que reduce la distancia entre el sensor y el objeto de estudio (Seifert *et al.*, 2019). Se empleó una superposición de 80% entre fotografías y 80% entre líneas. Los primeros dos vuelos se realizaron con un ángulo de cámara de 90° siguiendo un patrón de cuadrícula en dirección horizontal y vertical respecto al área de estudio. Los dos vuelos subsecuentes se efectuaron a la misma altitud, con un ángulo de 75° en la cámara, finalmente el quinto vuelo se realizó con un ángulo en cámara de 75° y una ruta de vuelo con una rotación de 45° respecto a las rutas de vuelo anteriores. Esta combinación de ángulos de visión se implementó para aumentar el nivel de detalle en la parte inferior y los laterales del dosel, lo que permite una reconstrucción más completa de la estructura forestal (Nesbit y Hugenholtz, 2019). Para mejorar la precisión de los productos fotogramétricos, se colocaron puntos de control en el centro y en cada una de las cuatro esquinas del sitio, distribución recomendada para obtener resultados precisos en ortofotos, modelos digitales de superficie (MDS) y modelos digitales de terreno (MDT) derivados de VANT (Ortiz *et al.*, 2019). Los puntos de control cuentan con una dimensión de 1x1 metro (m) y se encuentran numerados del 1 al 5. En cada punto de control se registró la coordenada utilizando el dispositivo Spectra MobileMapper con precisión submétrica.

Procesamiento fotogramétrico

Se capturaron un total de 235 imágenes RGB durante los 5 vuelos, estas fueron sometidas a procedimientos fotogramétricos y de georreferenciación utilizando las coordenadas registradas en cada uno de los puntos de control. Estos procedimientos se llevaron a cabo mediante el software para procesamientos fotogramétricos Pix4D Mapper (versión 4.5.6), que permite generar mapas 2D y modelos 3D a partir de imágenes aéreas obtenidas mediante VANT (<https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software/> consultado el 03 de septiembre de 2024). El procesamiento fotogramétrico permitió obtener un ortomosaico RGB, un MDS, un MDT y una nube de puntos de la zona.

Detección de árboles y estimación de altura

Se delimitó el área de estudio (sitio de 50 x 50m) sobre el ortomosaico, el MDS y el MDT. A partir de estos modelos se generó un modelo de altura de dosel (canopy height model, CHM, por sus siglas en inglés) mediante la resta del MDT al MDS ($CHM = MDS - MDT$) (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020). El CHM obtenido corresponde a una representación espacialmente continua de las alturas del dosel, en formato ráster, con valores por píxel que reflejan la diferencia de elevación entre la superficie del dosel y el terreno, lo cual permite estimar de manera detallada la estructura vertical de la vegetación dentro del área. La resta de los modelos se llevó a cabo utilizando el software QGIS (versión 3.16) (<https://www.qgis.org/es/site/> consultado el 03 de septiembre de 2024). Mediante el software estadístico RStudio (versión 4.4.1) (<https://posit.co/download/rstudio-desktop/> consultado el 03 de septiembre de 2024) y con el paquete *ForestTools* se estimó la altura y conteo de árboles dentro del sitio a partir del modelo CHM. El software emplea el algoritmo de filtro de ventana variable (variable-window-filter, VWF, por sus siglas en inglés) desarrollado por Popescu y Wynne (2004). Este algoritmo evalúa cada píxel en el modelo CHM como una potencial copa de árbol, analiza todos los píxeles alrededor del píxel focal para identificar la copa de los árboles y obtener la altura máxima (Young *et al.*, 2022). Se asume un modelo lineal entre la altura y el radio de VWF. Por tanto, la relación entre la altura del píxel focal (x) y el radio de la ventana de búsqueda (y) se modela con la siguiente ecuación:

$$y = a + bx$$

Donde:

y = Radio de la ventana de búsqueda.

x = Altura del píxel focal.

a = Intersección (controla el tamaño mínimo de la ventana de búsqueda).

b = Coeficiente (define la pendiente de la relación entre la altura del árbol (x) y el tamaño de la ventana de búsqueda (y)).

Con el propósito de identificar la totalidad de los árboles levantados en campo, se probaron tres combinaciones diferentes de los parámetros de intersección (a) y pendiente (b) del algoritmo VWF: (0.04+0.6), (0.05+0.6) y (0.07+0.9). Entendiendo que, al otorgarle valores mayores a los rangos, mayor es la ventana de búsqueda de las copas, así como también el ancho de copa identificado, al tratarse de especies en su mayoría con copas de diámetros pequeños se probó una variación en amplitud en un rango de búsqueda de tamaño mínimo, medio y máximo (Chang *et al.*, 2016; Popescu y Wynne, 2004). Además, se estableció una altura mínima de 3 metros para cada combinación con el fin de excluir arbustos y árboles con diámetros menores a 7.5 cm.

Reconocimiento de especies mediante análisis de imágenes basado en objetos (OBIA, object-based image analysis)

Dentro de la zona de estudio se encuentran dos especies arbóreas: *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana* conocidas comúnmente como pino blanco y táscate, respectivamente. La identificación de las especies se realizó mediante observación directa en campo y a través de OBIA. Este enfoque permitió identificar individualmente los árboles localizados mediante el algoritmo VWF, y posteriormente clasificar su especie con base a las características espectrales y estructurales.

El proceso de segmentación se llevó a cabo implementando el algoritmo de desplazamiento medio (mean shift segmentation) mediante el software Orfeo Toolbox (versión 7.1), siguiendo la metodología propuesta por Hinojosa-Espinoza *et al.* (2021), quienes recomiendan una combinación óptima de parámetros para lograr una clasificación efectiva. Los valores establecidos fueron: radio espacial = 5, radio de rango = 7, tamaño mínimo de la región = 250 píxeles. El radio espacial determina la distancia espacial entre clases e indica el tamaño de la ventana para crear segmentos (toma como base el promedio de los píxeles analizados), un valor más alto genera segmentos más grandes, pero se puede perder nivel de detalle. El radio de rango, también denominado rango de color, especifica el umbral de diferencia radiométrica (reflectancia) permitido entre píxeles para ser agrupados dentro de un mismo segmento. Este parámetro es fundamental para la identificación de especies ya que cada especie tiene una reflectancia diferente, lo que discrimina una especie de otra. Por su parte el tamaño mínimo de la región indica la cantidad mínima de píxeles que forman un segmento, los segmentos que tienen un número de píxeles por debajo del establecido en este parámetro se fusionan con el segmento más cercano que tenga la misma firma espectral. Finalmente, el número máximo de iteraciones del algoritmo se estableció en 100 con el fin de permitir una adecuada convergencia del proceso de agrupamiento, pocas iteraciones suelen generar segmentos no representativos (De Luca *et al.*, 2019). Para mejorar la segmentación y clasificación se utilizó un layerstack compuesto por el ortomosaico RGB y el CHM, así como también se consideraron los valores de elevación de los píxeles, la textura y la intensidad del color (Bhatnagar *et al.*, 2020). Los polígonos de referencia se seleccionaron de manera aleatoria y manual mediante interpretación en pantalla y verificación en campo. Una vez obtenidos, se dividieron de manera aleatoria en dos subconjuntos: 80% (288 muestras) para el entrenamiento del modelo y un 20% (72 muestras) para su validación. Los parámetros del modelo Random Forest se establecieron con base en las recomendaciones de Immitzer *et al.* (2016), cuya metodología ha demostrado ser efectiva en contextos similares. Los valores utilizados fueron: número máximo de árboles = 100, profundidad máxima de cada árbol = 5, número mínimo de muestras en cada nodo = 10, tasa de error (out of bango OOB, por sus siglas en inglés) 0.01 y número de variables seleccionadas aleatoriamente por nodo = 0 (valor por defecto, \sqrt{n} características). Cada uno de estos parámetros influye en la precisión del modelo; un mayor número de árboles puede mejorar la estabilidad y reducir la varianza del clasificador; el

sobreajuste se reduce con una menor profundidad, el umbral mínimo de muestras por nodo evita la generación de nodos con poca representatividad estadística, el error OOB es una métrica interna de validación cruzada que sirve para detener el entrenamiento cuando el modelo deja de mejorar sustancialmente (Han *et al.*, 2020).

Para evaluar la precisión de la clasificación se utilizó el índice de Kappa (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986), el cual permite cuantificar la concordancia entre la clasificación obtenida y los datos de referencia.

Modelo para la predicción del diámetro normal a partir de la altura

Para predecir el diámetro normal o a la altura del pecho (DAP, 1.3 m sobre el nivel del suelo), se desarrolló un modelo matemático de regresión no lineal, considerando la predicción del DAP en función de la altura del árbol. El modelo empleado es de tipo potencial, y es frecuentemente utilizado en estudios de biometría por su flexibilidad y aplicabilidad en distintas especies forestales (Morales *et al.*, 2019). El modelo corresponde con la siguiente ecuación:

$$DAP = a \cdot H^b$$

Donde:

DAP = Diámetro a la altura de pecho (cm).

H = Altura del árbol (m).

a y b = Parámetros estimados mediante regresión no lineal.

Los parámetros *a* y *b* se estimaron mediante el método de mínimos cuadrados no lineales utilizando la función *nls* en RStudio. El ajuste del modelo se realizó utilizando un total de los 2,220 árboles de las especies *Pinus cooperi*, y *Juniperus deppeana*. Estos datos se obtuvieron de MONAFOR, un repositorio de libre acceso para la gestión, almacenamiento y evaluación de datos de SPIFYS en México y provienen de la misma Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) donde se localiza el sitio de estudio (<https://forestales.ujed.mx/monafor> consultado el 07 de septiembre de 2024).

El modelo ajustado se utilizó para predecir el DAP de los árboles pertenecientes al sitio de estudio a partir de los datos del VANT y la especie identificada mediante análisis OBIA.

Recolección de datos dendrométricos en campo

Para el estudio se incluyeron todos los árboles presentes en el sitio, excluyendo únicamente los individuos con un diámetro menor a 7.5 cm, ya que su contribución a la biomasa del sitio es mínima (Nanos y Sjöstedt de Luna, 2017). Del mismo modo se excluyeron los individuos pertenecientes a las siguientes dominancias: categoría 7 (muerto en pie), 8 (muerto caído) y 9 (tocón). Cada árbol fue etiquetado y numerado de manera manual. La altura (m) se determinó mediante un hipsómetro de la marca Haglöf Vertex IV con precisión de 0.1 m, el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) se midió a la altura de 1.3 m, con una forcípula forestal Häglöf con precisión milimétrica, promediando dos mediciones perpendiculares para corregir excentricidades. Las coordenadas de cada individuo se registraron utilizando el dispositivo Spectra MobileMapper. En total se registraron 77 árboles dentro del SPIFYS. Las estimaciones en altura obtenidas mediante el VANT fueron validadas y comparadas con los datos de las mediciones de campo.

Estimación del contenido de carbono

Se calculó la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas específicas para el noroeste de México, desarrolladas para *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana* por Vargas-Larreta *et al.* (2017) (Tabla 1). Posteriormente, la biomasa aérea estimada fue convertida a carbono aplicando factores de conversión específicos para cada especie (tabla 2), mismos que también fueron propuestos por Vargas-Larreta *et al.* (2017).

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de biomasa en *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*
Table 1. Equations for calculating biomass for *Pinus cooperi* and *Juniperus deppeana*

Ecuación del componente de biomasa del árbol	Estadísticos de bondad de ajuste	
	R ²	RMSE
<i>Pinus cooperi</i>		
$W_w = 0.031126d^{2.09355}h^{0.768845}$	0.97	41.22
$W_b = 0.011361d^{1.676006}h^{0.74627}$	0.81	10.43
$W_{br} = 0.007965d^{1.599044}h^{1.347388}$	0.89	27.06
$W_f = 0.049925d^{1.122846}h^{0.600293}$	0.74	3.79
$W_t = \Sigma W_i$	0.94	87.21
<i>Juniperus deppeana</i>		
$W_w = 0.01289d^2h$	0.91	28.98
$W_b = 0.000772d^2h$	0.57	3.15
$W_{br} = 0.00204d^2h$	0.81	5.87
$W_f = 0.00098d^2h$	0.67	3.92
$W_t = \Sigma W_i$	0.90	37.00

Donde, d= diámetro a la altura de pecho (cm), h = altura total (m), W_w = biomasa de madera del tallo (kg árbol⁻¹), W_b = biomasa de corteza del tallo (kg árbol⁻¹), W_{br} = biomasa de madera más corteza de las ramas (kg árbol⁻¹), W_f = biomasa del follaje (hojas/acículas) (kg árbol⁻¹), W_t = biomasa total sobre el suelo ($W_w + W_b + W_{br} + W_f$) (kg árbol⁻¹), RMSE = raíz del error medio cuadrático.

Tabla 2. Valores utilizados para el cálculo de carbono mediante los factores de conversión en *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*

Table 2. Values used for carbon calculation using conversion factors for *Pinus cooperi* and *Juniperus deppeana*

Especie	Proporción de carbono			
	Madera	Corteza	Hojas/acículas	Total (sd)
<i>Pinus cooperi</i>	0.485	0.511	0.471	0.489 (0.0020)
<i>Juniperus deppeana</i>	0.527	0.438	0.496	0.487 (0.0045)

Donde, Total = contenido de carbono total, sd = desviación estándar

Validación estadística

Los resultados de la estimación de variables dendrométricas, incluyendo altura, DAP y contenido de carbono, fueron validados mediante análisis estadístico. Se utilizaron estadísticas descriptivas como la media aritmética y la mediana, así como de correlación y estadísticos de bondad de ajuste, incluyendo el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de determinación, el coeficiente de determinación ajustado y el valor de significancia estadística (p-value), con el fin de comparar los resultados obtenidos en campo mediante el método tradicional y los resultados obtenidos a partir del vuelo del VANT.

RESULTADOS

Con las 235 imágenes adquiridas, se generó un MDT, MDS y ortomosaico RGB, derivados del procesamiento fotogramétrico (Figura 3, inciso a, b y c, respectivamente). La utilización de los puntos de control junto con el sistema GPS integrado en el VANT contribuyeron a obtener una mayor exactitud posicional del ortomosaico y de los modelos generados. En la figura 3, inciso d), se observa que las estimaciones del modelo CHM, mismas que resultan de la diferencia entre MDS y MDT, utilizados para el cálculo de alturas, varían desde 0 m, correspondientes a zonas

sin presencia de arbolado (indicada en tono amarillo claro) hasta 18.35 m, que representa la altura máxima registrada (indicada en tono verde oscuro). Por otro lado, de las tres combinaciones de parámetros del algoritmo de VWF, la combinación óptima para la zona de estudio fue 0.05 + 0.6, ya que logró identificar el 96.1% de los árboles, lo que equivale a 74 de los 77 individuos presentes en el sitio de estudio. En contraste, la combinación 0.07 + 0.9 identificó únicamente 56 individuos, mientras que la combinación 0.04 + 0.6 detectó el 90.9% de los árboles (Tabla 3).

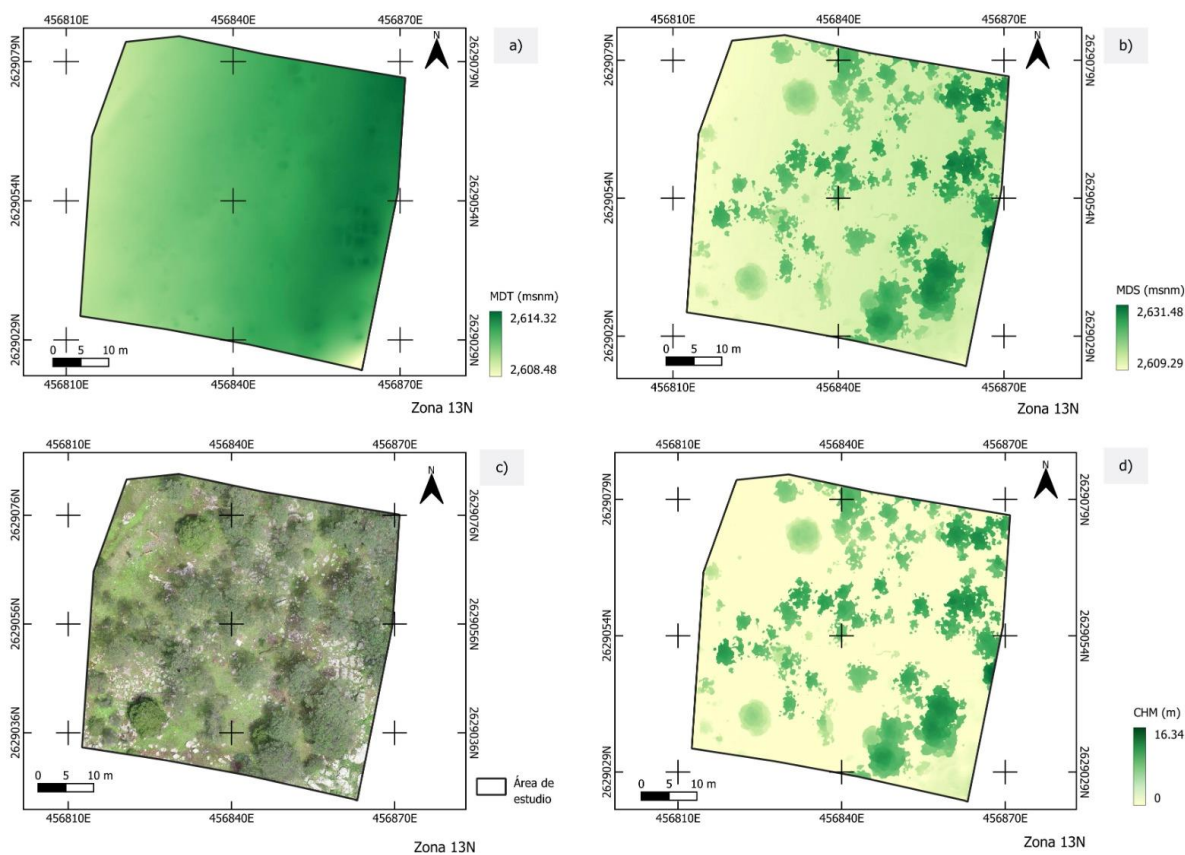


Figura 3. a) Modelo digital de terreno (MDT) b) Modelo digital de superficie (MDS) c) Ortomosaico d) Modelo de altura de dosel de la zona de estudio (CHM).

Figure 3. a) Digital Terrain Model (MDT) b) Digital Surface Model (MDS) c) Orthomosaic d) Canopy Height Model (CHM) of the study area.

Tabla 3. Número y porcentaje de árboles detectados con las diferentes combinaciones de valores de los parámetros de intersección y pendiente en el algoritmo VWF

Table 3. Number and percentage of trees detected with different parameter value combinations of intersection and slope in the VWF algorithm

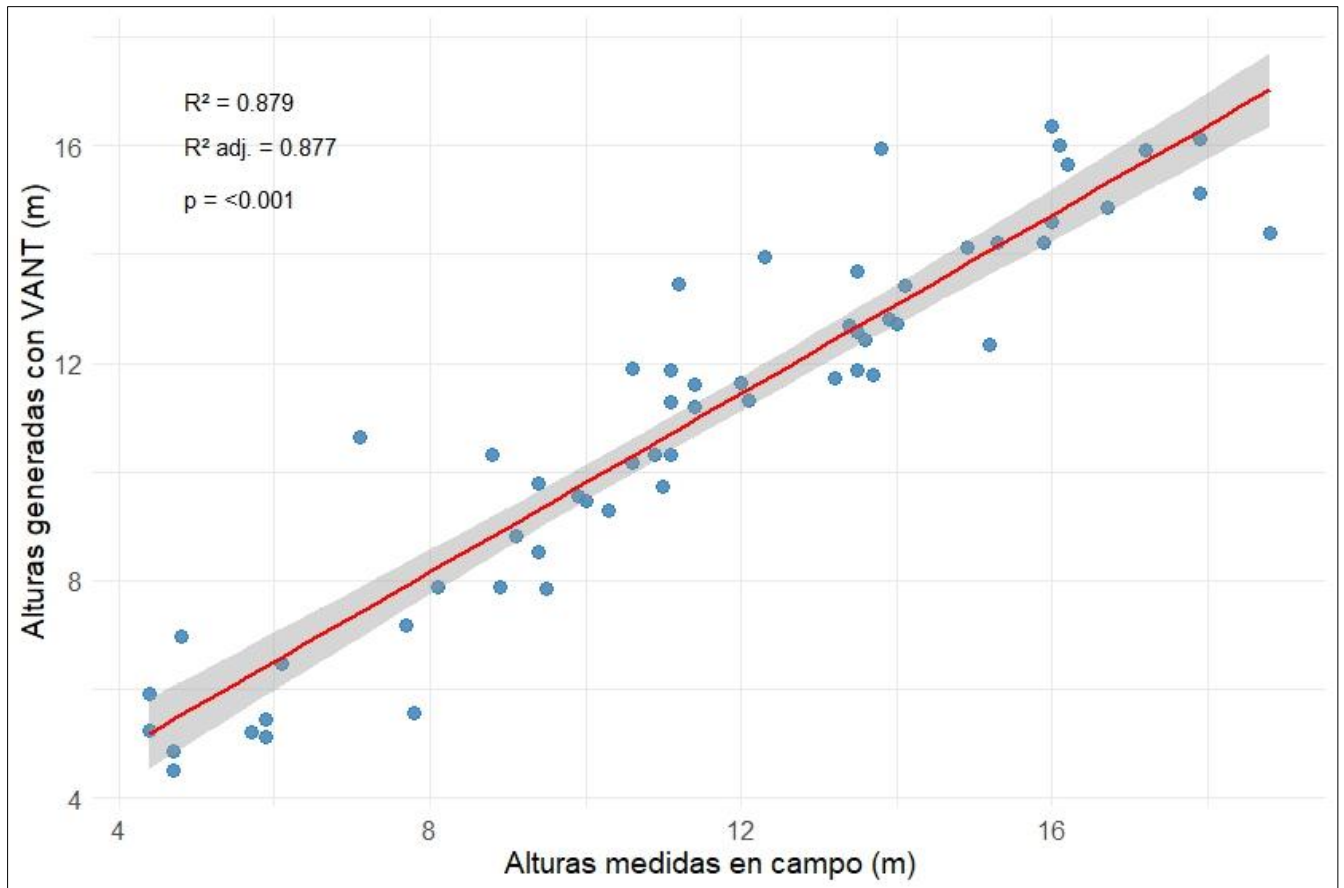
Combinación de valores en el algoritmo VWF	Número de árboles detectados	Porcentaje de árboles detectados
(0.04 + 0.6)	70	90.9 %
(0.05 + 0.6)	74	96.1 %
(0.07 + 0.9)	56	72.7 %

Con base a los resultados anteriores, se realizó un análisis de correlación de Pearson y se ajustó el modelo de regresión potencial previamente definido a los 74 árboles identificados. Las estadísticas descriptivas obtenidas para los datos registrados en campo y los obtenidos por el VANT se muestran en la tabla 4. Los datos obtenidos en campo y usados en este trabajo como datos de referencia, mostraron una altura mínima de 4.40 m, mientras que los datos generados por VANT registran 4.49 m, indicando una sobreestimación de 0.09 m. En contraste, la altura máxima fue subestimada en 2.46 m por el algoritmo de VWF. La mediana estimada por el VANT (11.60 m) sobreestimó en 0.40 m a la mediana registrada en campo (11.20 m). Asimismo, la media aritmética del VANT (10.96 m) subestimó en 0.46 m la media de campo (11.42 m). Finalmente, los valores de ambos cuartiles (primero y tercero) obtenidos con el VANT fueron ligeramente inferiores, sugiriendo una tendencia general de subestimación en las mediciones realizadas por este método frente a los métodos tradicionales. No obstante, la mayoría de las diferencias observadas se encuentran dentro del rango de precisión del instrumento utilizado en campo (hipsómetro Haglöf Vertex IV), el cual, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, presenta una precisión de $\pm 1\%$ en la medición de distancias y una resolución de 0.1m para la estimación de altura. Por lo tanto, la incertidumbre asociada a las mediciones de campo puede considerarse en el orden de ± 0.1 a ± 0.2 m, dependiendo de factores como distancia al árbol, visibilidad y la experiencia del operador (<https://haglofsweden.com/> consultado el 25 de abril de 2025). Lo anterior indica que las estimaciones con VANT presentan un nivel aceptable de concordancia con los datos de referencia.

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las alturas medidas en campo y alturas generadas mediante VANT
Table 4. Descriptive statistics of heights measured in the field and heights generated using UAV

	Datos obtenidos en campo	Datos generados mediante VANT
Min.	4.40	4.49
1st Qu.	9.00	8.67
Median	11.20	11.60
Mean	11.42	10.96
3rd Qu.	13.95	13.57
Max.	18.80	16.34

En el análisis de correlación de Pearson realizado entre las alturas medidas en campo mediante el método tradicional y las obtenidas mediante VANT evidenció una relación lineal positiva y altamente significativa (r de 0.93, p -value $< 2.2e^{-16}$). Este hallazgo se refleja de manera equivalente en el modelo de regresión lineal, el cual explica el 87% de la variabilidad observada en la altura de los árboles muestra ($R^2 = 0.87$, $RMSE = 1.34$ m) (Figura 4). En cuanto a los diámetros, la comparación entre los valores medidos en campo y aquellos predichos a partir de la altura estimada con el VANT mostró una correlación positiva ($r = 0.76$). Este valor sugiere una relación moderadamente fuerte entre las observaciones medidas en campo y las predicciones. Además, se obtuvo un valor de p -value de $6.07 e^{-13}$ lo que indica que la correlación es estadísticamente significativa, descartando la posibilidad de que la relación observada se deba al azar. En este caso, el R^2 fue de 0.58, lo que sugiere que el modelo explica el 58% de la variabilidad observada en los diámetros de los árboles. Con un valor de $RMSE$ de 6.44 cm, que refleja un error promedio considerable entre los diámetros medidos y los predichos, indicando el potencial del modelo para la predicción de diámetros usando la altura estimada con VANT como variable predictiva (Figura 5).



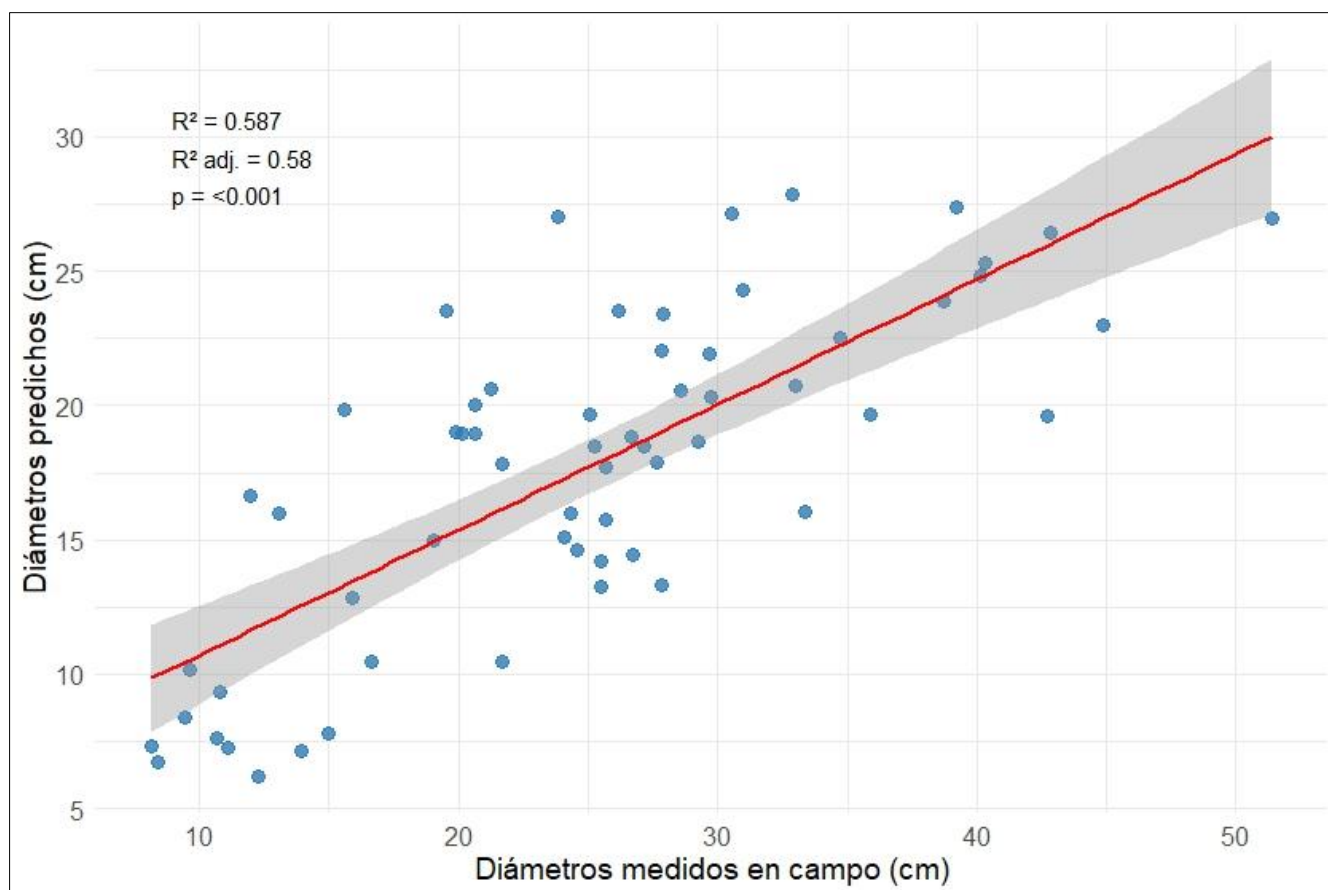


Figura 5. Relación de diámetros estimadas con VANT vs diámetros medidos en campo.
Figure 5. Relationship of diameters estimated with UAV vs diameters measured in the field

En cuanto al reconocimiento de las especies mediante OBIA, los resultados indican una identificación efectiva de las especies *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*, obteniendo un índice de kappa de 0.92. Este valor indica un alto nivel de concordancia entre el reconocimiento de especies mediante OBIA y la identificación de las especies realizada en campo (Figura 6). Esta elevada concordancia sugiere que el modelo logró representar con precisión la distribución espacial de ambas especies dentro del área de estudio, la separación espectral y espacial permitió diferenciar correctamente entre ambas especies.

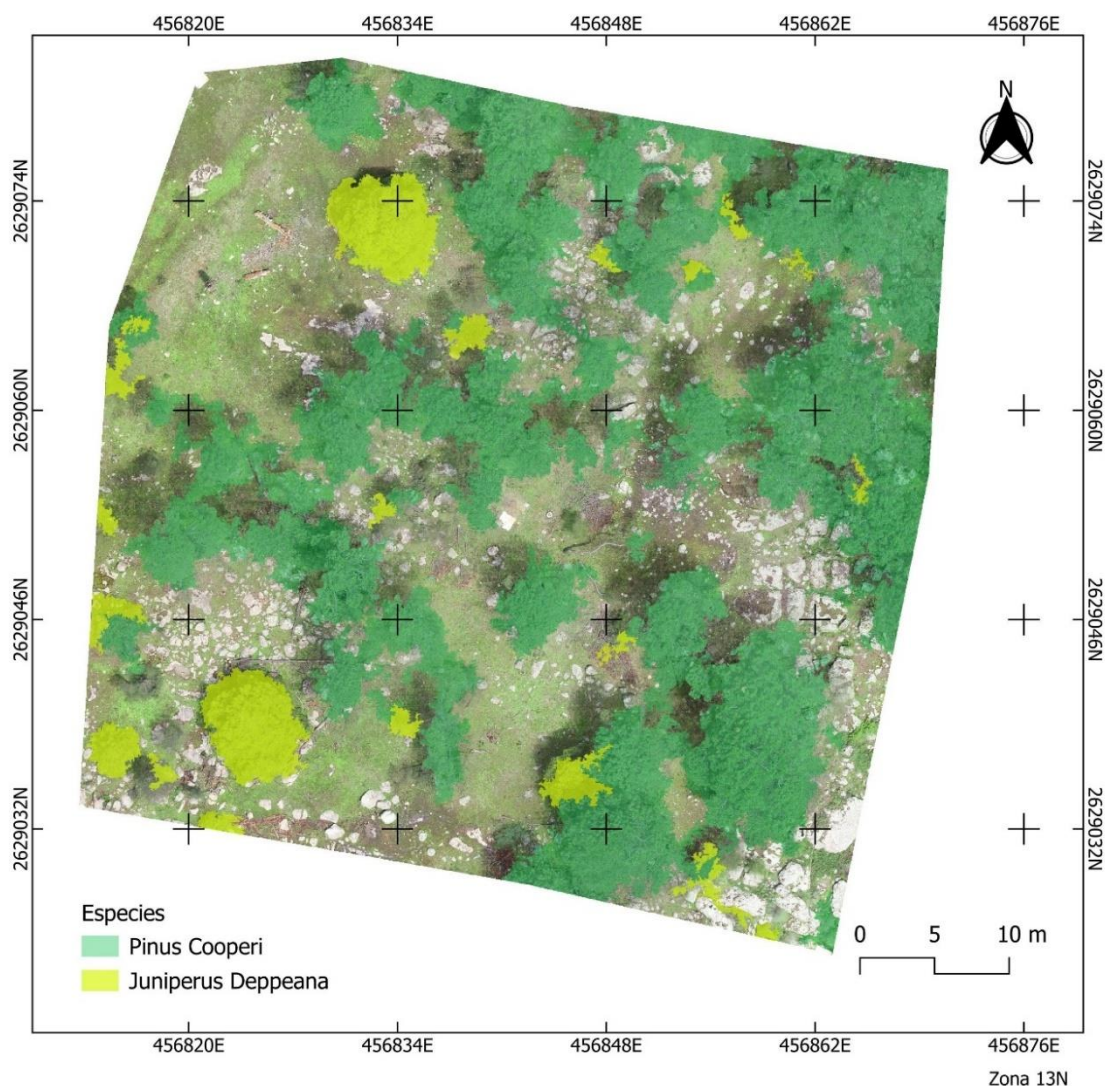


Figura 6. Reconocimiento de especies mediante OBIA en la zona de estudio

Figure 6. Species identification using OBIA in the study area

Finalmente, el análisis comparativo entre las estimaciones de contenido de carbono obtenidas mediante el método tradicional y aquellas derivadas de los datos recolectados por el vuelo del VANT mostró un r de 0.74, indicando una relación positiva moderadamente fuerte entre ambos enfoques. Las estimaciones de carbono derivadas de los datos generados mediante VANT fueron consistentemente inferiores a las obtenidas a partir de mediciones en campo. La media estimada con VANT, que fue de $70.01 \text{ kg árbol}^{-1}$, en comparación con los $150.35 \text{ kg árbol}^{-1}$ obtenida con los datos de campo. Estos resultados sugieren una subestimación sistemática del contenido de carbono cuando se emplean datos obtenidos mediante VANT (tabla 5). Asimismo, el análisis de regresión lineal arrojó un R^2 de 0.55 (Figura 7) y una RMSE de $88.99 \text{ kg árbol}^{-1}$ y un p -value de <0.001 , lo cual sugiere que el modelo basado en datos del VANT explica aproximadamente el 55% de la variabilidad en la estimación de carbono respecto al método tradicional. Estos resultados indican que el VANT presenta un nivel aceptable de concordancia con el método convencional, sin embargo, aún persiste un margen considerable de variabilidad.

Tabla 5. Estadísticas descriptivas de la estimación de carbono en campo y la estimación generada mediante VANT
Table 5. Descriptive statistics of the field carbon estimate and the estimate generated by UAV

	Estimación de carbono en campo (kg árbol ⁻¹)	Estimación de carbono mediante datos generados con VANT (kg árbol ⁻¹)
Mín.	5.853	3.551
1st Qu.	64.055	31.630
Median	114.613	60.455
Mean	150.354	70.009
3rd Qu.	189.24	101.323
Max.	661.027	189.605

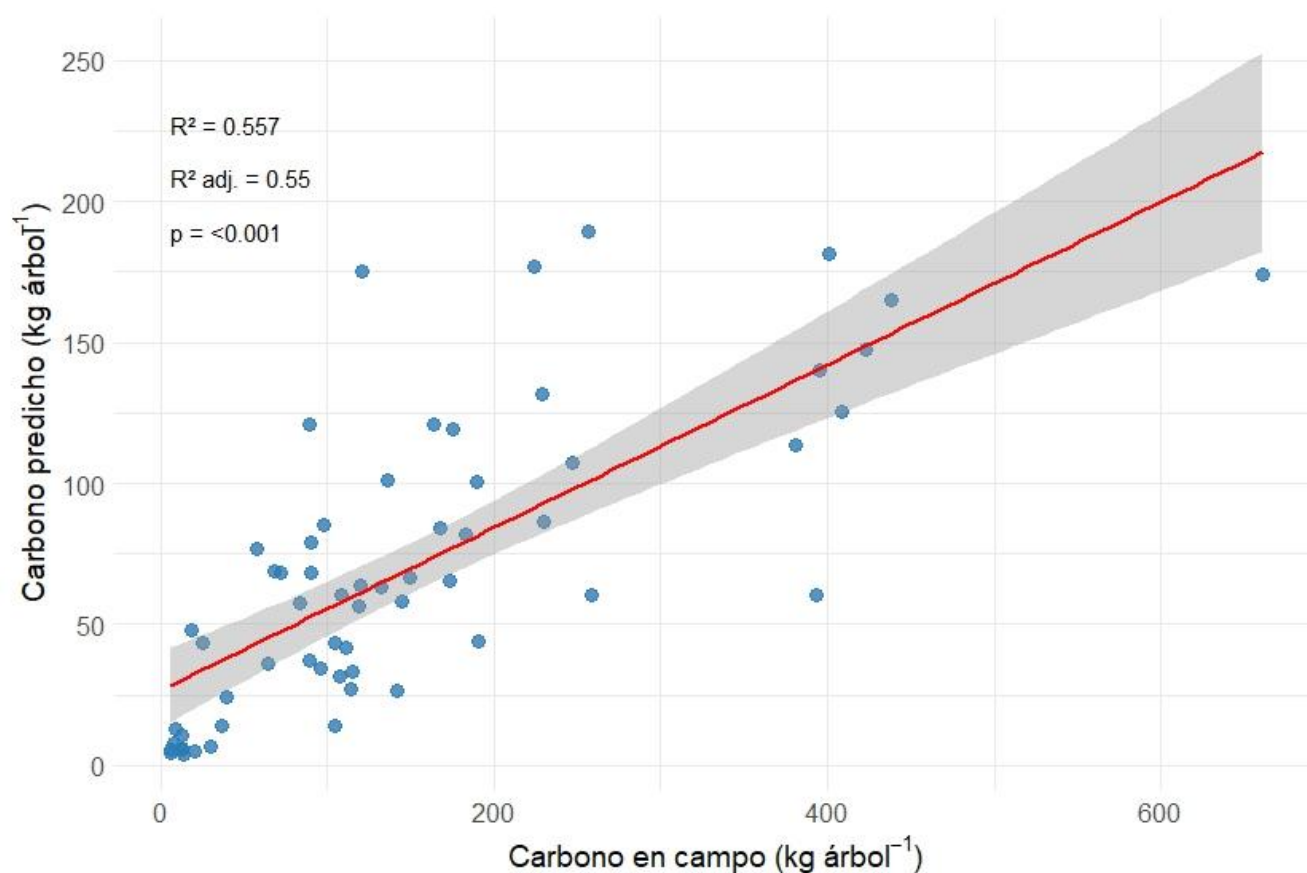


Figura 7. Regresión lineal del contenido de carbono estimado en campo y el predicho a través de las variables obtenidas mediante VANT.

Figure 7. Linear regression of carbon stock estimated in the field and predicted through variables obtained using UAV.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante el algoritmo VWF demuestran un alto nivel de eficacia en la detección individual de árboles (96.1%), comparable e incluso superior a lo reportado en estudios previos. Investigaciones como las de Mohan *et al.* (2017) y Chen *et al.* (2021) reportaron tasas de detección del 85% y 80% en bosques mixtos densos, respectivamente, mientras que Wu *et al.* (2019), empleando tecnología LiDAR, alcanzaron una precisión del 98% en plantaciones

forestales. En este estudio, la combinación de parámetros aplicada (intersección = 0.05, pendiente = 0.6) resultó adecuada para un bosque con baja densidad y características estructurales poco complejas, permitiendo detectar 74 de los 77 individuos presentes. Además, cabe destacar que la aplicación de diferentes combinaciones de parámetros en el algoritmo VWF para ajustar el tamaño de la ventana de búsqueda mejora la precisión en la identificación de árboles en bosques con diferentes alturas de dosel. Ya que, fue posible observar que valores más altos en los parámetros del algoritmo VWF (intersección y pendiente) incrementan el tamaño de la ventana de búsqueda, lo que se traduce en una mayor área proyectada para las copas identificadas. Esto podría ser adecuado para áreas donde predominan especies con copas amplias, ya que permite una mejor detección de individuos dominantes. Los árboles no identificados en este trabajo corresponden con individuos ubicados en sotobosque, lo cual coincide con lo señalado por Young *et al.* (2022), quienes destacan una mayor precisión en identificación con el algoritmo VWF para árboles dominantes y una menor precisión para aquellos del sotobosque.

El coeficiente de correlación estimado para estimación de las alturas en esta investigación (0.93) refuerza la capacidad del uso de VANT con cámaras RGB para modelar la estructura vertical de los bosques. Este valor es superior al obtenido con sensores LiDAR en algunos estudios, como el de Kwong y Fung (2020), quienes reportaron un $r = 0.81$ para VANT con sensor RGB y $r = 0.76$ para LiDAR en una reserva natural. Sin embargo, son escasos los estudios que reportan una correlación mayor al utilizar sensores RGB en comparación con LiDAR.

Los resultados obtenidos en la estimación de alturas mediante el modelo de regresión lineal ($R^2 = 0.87$, RMSE = 1.34 m) son consistentes con lo reportado por Islami *et al.* (2021) y Nasiri *et al.* (2021), quienes obtuvieron un R^2 de 90% y 80%, con RMSE de 0.83 m y 3.22 m, respectivamente, al emplear modelos CHM en bosques mixtos. Hao *et al.* (2021) sugieren que la precisión mejora cuando las estimaciones se realizan a nivel rodal, alcanzando un R^2 de 0.95 y un RMSE de 0.12 m, en comparación con R^2 de 0.89 y un RMSE de 0.22m a nivel árbol individual. Estos hallazgos refuerzan que la precisión de estas estimaciones está condicionada por la densidad y distribución espacial de los árboles, factores que afectan directamente la calidad del CHM. En este sentido, Birdal *et al.* (2017) reportaron un valor de la RMSE de apenas 28 cm, en un bosque urbano de coníferas con baja densidad, lo que evidencia cómo la estructura del dosel incide directamente en la reducción del error en la estimación de alturas.

En cuanto a la predicción del DAP a partir de la altura, el ajuste del modelo con más de 2,000 árboles de las mismas especies contribuyó a la mejora de la precisión de las predicciones. Sin embargo, el R^2 obtenido indica que el modelo solo explica el 58% de la variabilidad observada en los diámetros, lo cual es esperado ya que predecir el DAP a partir de la altura representa un reto, principalmente debido a la dificultad para medir con exactitud las alturas en campo, especialmente en bosques densos donde el solapamiento de copas complica la identificación de la parte superior de los árboles. En ese sentido, el principal error en la predicción del DAP se debe a una medición inadecuada de las alturas, cuya precisión puede verse afectada por factores como la densidad del sitio y el solapamiento de copas (Young *et al.*, 2022). En contraste, la predicción de alturas a partir de variables como el diámetro normal o el diámetro de tocón tiende a ser más precisa (Cuevas *et al.*, 2017). Un ejemplo de esto es el estudio de Corral-Rivas *et al.* (2007) quienes obtuvieron un R^2 superior a 95% al predecir el diámetro a la altura de pecho en función del diámetro del tocón en especies forestales. Esto sugiere que, mientras la estimación de altura basada en diámetro puede ofrecer resultados más consistentes, la relación inversa presenta mayores desafíos. Es importante destacar que, aunque existen numerosos estudios que abordan la predicción de variables dendrométricas utilizando datos de inventarios forestales tradicionales, son escasos los trabajos que exploran la estimación de DAP a partir de alturas obtenidas mediante VANT RGB. Por lo que, esta investigación contribuye significativamente en este sentido, al proporcionar evidencia empírica de la aplicabilidad y las limitaciones de los datos recolectados con VANT RGB para la estimación de DAP, resaltando la necesidad de continuar desarrollando y refinando modelos que integren tecnologías de teledetección en el ámbito forestal.

La identificación de especies dentro de un bosque es esencial para la aplicación precisa de ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono. En este estudio, el reconocimiento de especies mediante OBIA reflejó una alta capacidad de discriminación entre las especies *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*, el índice de Kappa

obtenido (0.92) representa una concordancia “casi perfecta” según la escala de interpretación propuesta por Landis y Koch. (1977), lo que aporta evidencia sólida sobre la fiabilidad del método empleado. Este valor no solo implica que la clasificación automatizada se asemeja estrechamente a la identificación en campo, sino que además reduce considerablemente la probabilidad de coincidencias producto del azar. En estudios de teledetección aplicada a sistemas forestales, alcanzar valores superiores a 0.80 ya se considera un indicador de alto rendimiento, tal es el caso de Yang *et al.* (2022) quienes lograron un índice de Kappa de 0.94 en la identificación de olivos chinos (*Canarium album* L.) utilizando un VANT multiespectral; por lo que, un valor de 0.92 posiciona al enfoque como una herramienta precisa para el monitoreo y gestión de la vegetación. Además, estos resultados sugieren que el modelo logró capturar adecuadamente tanto las características espectrales como espaciales relevante de cada especie, lo cual es fundamental en zonas donde coexisten diferentes especies. No obstante, es importante señalar que la efectividad de métodos como OBIA tiende a aumentar con el uso de sensores multiespectrales que incluyen el infrarrojo cercano (Near-infrared, NIR, por sus siglas en inglés), ya que estos sensores ofrecen un mayor rango espectral y son capaces de detectar variaciones sutiles en la reflectancia entre distintos tipos de vegetación. Esto es evidente en la investigación de Franklin (2018) quien reportó una precisión de 69% en la detección de especies comerciales de coníferas y árboles caducifolios con el uso de un sensor RGB, mientras que la precisión se incrementó al 80% al incorporar un sensor multiespectral.

Los resultados de esta investigación se centraron también en evaluar la estimación de contenido de carbono, destacando la relación entre el carbono medido en campo mediante métodos convencionales y el carbono predicho a partir de los datos recopilados con VANT. Se observó que el $R^2 = 0.55$ estuvo significativamente afectado por la omisión en la detección de árboles, especialmente de *Pinus cooperi*, una de las especies con mayor capacidad de almacenamiento de carbono (Barrón *et al.*, 2016). La subestimación en la detección de estos individuos conduce a discrepancias notables entre las mediciones en campo y las predicciones derivadas de los datos VANT. En este contexto, se observó que el DAP máximo medido en campo fue de 50 cm, mientras que el valor predicho alcanzó solo 30 cm. De manera similar, el contenido de carbono promedio de los árboles estimado mediante el método tradicional fue de 661 kg, en contraste con los 189 kg estimados a partir de los datos del VANT. Estas discrepancias pueden atribuirse a que el modelo de predicción del DAP explica solo el 58% de la variabilidad observada, siendo más preciso en árboles de menor altura. Dado que el bosque estudiado está dominado por árboles de altura considerable, la predicción del DAP tiende a ser menos precisa, lo que incrementa el rango de error y afecta directamente la estimación de contenido de carbono. Si bien se reconoce el uso de VANT para estimaciones de biomasa y carbono (Dainelli *et al.*, 2021), es crucial evaluar el alcance de un VANT de bajo costo equipado con cámara RGB en bosques naturales mixtos como los usados en este estudio. La mayoría de los estudios previos se han enfocado en tecnología LiDAR, que en general, proporciona una mayor precisión (Sanaa *et al.*, 2022). Por ejemplo, (Juan-Ovejero *et al.*, 2023) estimaron el carbono almacenado en una plantación forestal, obteniendo resultados aceptables con R^2 de 0.68 utilizando un VANT con cámara RGB. Un aspecto adicional a considerar es que la estimación de contenido de carbono se llevó a cabo a nivel árbol individual lo cual añade un valor significativo a los resultados permitiendo observar las variaciones de biomasa y carbono en los diferentes árboles. Ya que de esta manera es posible reducir el error de sobreestimación o subestimación que se genera en las estimaciones a nivel parcela (Bueno-López *et al.*, 2019).

Finalmente, aunque el enfoque aplicado en este estudio demostró ser efectivo en un bosque natural de baja complejidad estructural y diversidad moderada, su escalabilidad hacia otras regiones con mayor heterogeneidad estructural aún requiere validación. Ecosistemas con múltiples estratos, copas densas, y especies de difícil discriminación representan un desafío significativo para la generalización de estos métodos. Por lo tanto, se destaca la necesidad de desarrollar modelos adaptativos que integren sensores multiespectrales o LiDAR que ofrecen mayor detalle y precisión, así como algoritmos más robustos, que permiten extender la aplicabilidad de herramientas como los VANT a contextos más complejos. Sin embargo, es importante destacar que el uso de VANT RGB (Phantom 4 PRO) representa una alternativa de bajo costo frente a sistemas LiDAR cuya adquisición y operación pueden ser hasta 10 veces más

costosa. Estos hallazgos subrayan el potencial del enfoque, pero también las oportunidades para su mejoría en términos de precisión, resolución y escalabilidad, particularmente en lo referente a la estimación individualizada de carbono en bosques naturales.

CONCLUSIONES

El uso de VANT para estimar contenido de carbono es una herramienta relativamente nueva que ofrece un campo amplio de exploración para estimar las reservas de carbono en los bosques, a través de un método no destructivo que propone un panorama atractivo para el sector forestal con una reducción en recursos económicos y tiempo. En este sentido, la posibilidad de estimar de manera rápida y precisa la biomasa aérea a nivel de árbol brinda la posibilidad de entrar en una nueva etapa para el manejo y gestión de recursos forestales ofreciendo una opción con VANT de costos accesibles, como es en este caso, que se realizó únicamente con sensor RGB la precisión obtenida es aceptable, sin embargo, para un mejor resultado se sugiere el uso de sensores LiDAR y de tipo multiespectral. Sin duda, a pesar de que estas herramientas tecnológicas ofrecen una precisión estadísticamente aceptable, no se excluye por completo el trabajo de campo ya que este es necesario para la validación y control de calidad de las predicciones. Como trabajo a futuro se propone realizar el mismo estudio con diferentes densidades de bosques y diversidad de especies, para estimar las capacidades descriptivas de la técnica presentada.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Gutiérrez, J., Rifai, S., Shenkin, A., Oliveras, I., Bentley, L. P., Svátek, M., Girardin, C. A. J., Both, S., Riutta, T., Berenguer, E., Kissling, W. D., Bauman, D., Raab, N., Moore, S., Farfan-Rios, W., Figueiredo, A. E. S., Reis, S. M., Ndong, J. E., Ondo, F. E., ... Malhi, Y. (2021). Pantropical modelling of canopy functional traits using Sentinel-2 remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112122. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112122>
- Alzamora, R. M., Becker, J. C., Escudero, M., Pinto Rodríguez, A. A. (2021). Factibilidad técnico-económica de implementar LiDAR en una empresa forestal. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2721661>
- Barrón, R., Aguirre Calderón, O. A., Larreta, B., Pérez, J., Garza, E., y Yarena Yamallel, J. (2016). Modeling of biomass and aboveground arboreal carbon in forests of the state of Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7, 91–105.
- Bhatnagar, S., Gill, L., y Ghosh, B. (2020). Drone Image Segmentation Using Machine and Deep Learning for Mapping Raised Bog Vegetation Communities. *Remote Sensing 2020*, Vol. 12, Page 2602, 12(16), 2602. <https://doi.org/10.3390/RS12162602>
- Birdal, A. C., Avdan, U., y Türk, T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1144–1156. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1300608>
- Bueno-López, S. W., García-Lucas, E., Carballo-Rojas, L. R. (2019). Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of *Pinus occidentalis* trees. *Madera y Bosques*, 25(3). <https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2531868>
- Buotte, P. C., Law, B. E., Ripple, W. J., y Berner, L. T. (2020). Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications*, 30(2). <https://doi.org/10.1002/EAP.2039>
- Chang, K. T., Lin, C., Lin, Y. C., y Liu, J. K. (2016). Accuracy assessment of crown delineation methods for the individual trees using LIDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 585–588. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLI-B8-585-2016>
- Chen, S., Liang, D., Ying, B., Zhu, W., Zhou, G., y Wang, Y. (2021). Assessment of an improved individual tree detection method based on local-maximum algorithm from unmanned

- aerial vehicle RGB imagery in overlapping canopy mountain forests. *International Journal of Remote Sensing*, 42(1), 106–125. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1809024>
- Corral-Rivas, J. J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderón, O. A., y Diéguez-Aranda, U. (2007). Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 80(1), 29–40. <https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPL048>
- Corral-Rivas, J. J., Vargas Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., Álvarez-González, J. G., y Rojo-Alboreca, A. (2009). Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango. *Editorial de La Universidad Juárez Del Estado de Durango*, octubre 2017, 54p. <https://www.researchgate.net/publication/305640430%0AGuía>
- Cuevas, X. G., Ramos, J. H., Ramos, A. H., Quiñonez Barraza, G., Carlos, J., Urías, T., Geraldine, G., y Espinoza, G. (2017). Predicción del diámetro normal, altura y volumen a partir del diámetro del tocón en especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43), 089–116. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V8I43.67>
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., y Matese, A. (2021). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/f12040397>
- De Luca, G., Silva, J. M. N., Cerasoli, S., Araújo, J., Campos, J., Di Fazio, S., y Modica, G. (2019). Object-Based Land Cover Classification of Cork Oak Woodlands using UAV Imagery and Orfeo ToolBox. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 1238*, 11(10), 1238. <https://doi.org/10.3390/RS11101238>
- FAO. (2021, octubre). *Marco estratégico para 2022-2031*. <https://openknowledge.fao.org/items/b9ad3bb8-39c5-447f-8eec-6a333e003cf7>
- Franklin, S. E. (2018). Pixel-and object-based multispectral classification of forest tree species from small unmanned aerial vehicles. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 6(4), 195–211. <https://doi.org/10.1139/JUVS-2017-0022>
- Gallardo-Salazar, J. L., y Pompa-García, M. (2020). Detecting Individual Tree Attributes and Multispectral Indices Using Unmanned Aerial Vehicles: Applications in a Pine Clonal Orchard. *Remote Sensing*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/rs12244144>
- Han, S., Kim, H., y Lee, Y. S. (2020). Double random forest. *Machine Learning*, 109(8), 1569–1586. <https://doi.org/10.1007/S10994-020-05889-1/TABLES/8>
- Hao, Z., Lin, L., Post, C. J., Jiang, Y., Li, M., Wei, N., Yu, K., y Liu, J. (2021). Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV). *New Forests*, 52(5), 843–862. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09827-w>
- Hernando, A., Puerto, L., Mola-Yudego, B., Manzanera, J., Abril, A., Maltamo, M., y Valbuena, R. (2019). Estimation of forest biomass components using airborne LiDAR and multispectral sensors. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 12, 207–213. <https://doi.org/10.3832/ifer2735-012>
- Hinojosa-Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C., y Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluation of segmentation parameters in OBIA for classification of land covers from UAV images. *Revista de Teledetección*, 2021(58), 89–103. <https://doi.org/10.4995/RAET.2021.14782>
- Immitzer, M., Vuolo, F., y Atzberger, C. (2016). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing 2016, Vol. 8, Page 166*, 8(3), 166. <https://doi.org/10.3390/RS8030166>
- Islami, M. M., Rusolono, T., Setiawan, Y., Rahadian, A., Hudjimartu, S. A., y Prasetyo, L. B. (2021). Height, diameter and tree canopy cover estimation based on unmanned aerial vehicle (UAV) imagery with various acquisition height. *Media Konservasi*, 26(1 SE-Research Articles), 17–27. <https://doi.org/10.29244/medkon.26.1.17-27>
- Juan-Ovejero, R., Elghouat, A., Navarro, C. J., Reyes-Martín, M. P., Jiménez, M. N., Navarro, F. B., Alcaraz-Segura, D., y Castro, J. (2023). Estimation of aboveground biomass and carbon stocks of *Quercus ilex* L. saplings using UAV-derived RGB imagery. *Annals of Forest Science*, 80(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S13595-023-01210-X/FIGURES/3>

- Ke, Y., y Quackenbush, L. J. (2011). A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 32(17), 4725–4747. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.494184>
- Komárek, J., Klouček, T., y Prošek, J. (2018). The potential of Unmanned Aerial Systems: A tool towards precision classification of hard-to-distinguish vegetation types? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.003>
- Kwong, I. H. Y., y Fung, T. (2020). Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest. *International Journal of Remote Sensing*, 41(14), 5228–5256. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1731002>
- Landis, J. R., y Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- López Serrano, P. M., Vega Nieva, D. J., Ramírez Aldaba, H., García Montiel, E., Corral Rivas, J. J. (2021). Estimation of forest parameters using Sentinel 2A data in Pueblo Nuevo, state of Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 81–106. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I68.1075>
- Martínez, R. G., Bañuelos, L. A. L., Jiménez, J. C. M., y Calixto, M. T. (2025). Almacén de carbono en las plantaciones forestales como estrategia para la mitigación del cambio climático. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 6762–6778. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V9I1.16368
- Mohan, M., Silva, C. A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A. T., y Dia, M. (2017). Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest. *Forests*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/f8090340>
- Morales, E. A. F., Calderón, O. A. A., Barraza, G. Q., Tagle, M. A. G., y Pérez, J. J. (2019). Estimación del diámetro normal, altura y volumen de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en función del diámetro del tocón. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55). <https://doi.org/10.29298/RMCF.V10I55.547>
- Nanos, N., y Sjöstedt de Luna, S. (2017). Fitting diameter distribution models to data from forest inventories with concentric plot design. *Forest Systems*, 26(2 se-special section mediterranean silviculture: homage to gregorio montero), e01S. <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-10486>
- Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Pierrot-Deseilligny, M., Namiranian, M., y Le Bris, A. (2021). Unmanned aerial vehicles (UAV)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest). *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 962–971. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0125>
- Nesbit, P. R., y Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 239, 11(3)*, 239. <https://doi.org/10.3390/RS11030239>
- Novo-Fernández, A., Franks, S., Wehenkel, C., López-Serrano, P. M., Molinier, M., y López-Sánchez, C. A. (2018). Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.015>
- Ortiz, D., Hernandez, F., y Hernandez, F. (2019). Análisis de la influencia de los puntos de control terrestre en la exactitud posicional de ortofotomosaicos generados por medio de un vuelo fotogramétrico realizado por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). *Revista de Topografía AZIMUT*, 10(1 SE-Artículos). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/14972>
- Palacios-Cruz, D., De Los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Fierros, A., y Santiago-García, W. (2020). Sistema de crecimiento y rendimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. Et Cham. bajo aprovechamiento

Recibido:
16/diciembre/2024

Aceptado:
9/junio/2025

- forestal (Growth and yield system to evaluate carbon sinks in managed *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. FORESTS). *Agrociencia*, 45, 241–257.
- Popescu, S. C., y Wynne, R. H. (2004). Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(5), 589–604. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.589>
- Quiñonez-Barraza, G., Pompa-García, M., Vivar-Vivar, E. D., Gallardo-Salazar, J. L., Hernández, F. J., Rodríguez-Flores, F. de J., Solís-Moreno, R., Bretado-Velázquez, J. L., Valdez-Cepeda, R. D., Hernández-Díaz, J. C. (2023). Modeling Biometric Attributes from Tree Height Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Natural Forest Stands. *Ingeniería e Investigación*, 43(2), 1-. <https://doi.org/10.15446/ING.INVESTIG.98945>
- Rosas-Chavoya, M., López-Serrano, P. M., Vega-Nieva, D. J., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., y Corral-Rivas, J. J. (2023). Estimating Above-Ground Biomass from Land Surface Temperature and Evapotranspiration Data at the Temperate Forests of Durango, Mexico. *Forests* 2023, Vol. 14, Page 299, 14(2), 299. <https://doi.org/10.3390/F14020299>
- Rosenfield, G. H., y Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(2), 223–227.
- Sanaa, F., Imane, S., Mohamed, B., Kenza, A. E., Souhail, K., Lfalah, H., y Khadija, M. (2022). Biomass and Carbon Stock Quantification in Cork Oak Forest of Maamora Using a New Approach Based on the Combination of Aerial Laser Scanning Carried by Unmanned Aerial Vehicle and Terrestrial Laser Scanning Data. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081211>
- Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt, J., Kunneke, A., y Seifert, T. (2019). Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 1252, 11(10), 1252. <https://doi.org/10.3390/RS11101252>
- Shteto, G., Werden, L. K., Villa, M., Tiburcio, J., y Cherif, E. (2025). *Assessing UAV direct-seeding for tropical forest restoration: carbon sequestration potential and cost efficiency*. <https://doi.org/10.32942/X2N041>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., y Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North- Western Mexico. *Forests*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/F8080269>
- Vega, A. A., Corral-Rivas, S., Corral-Rivas, J. J., y Diéguez-Aranda, U. (2022). Modelación de las estructuras diamétricas en bosques naturales de Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(73 SE-Artículo Científico), 75–101. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1187>
- Wu, X., Shen, X., Cao, L., Wang, G., y Cao, F. (2019). Assessment of Individual Tree Detection and Canopy Cover Estimation using Unmanned Aerial Vehicle based Light Detection and Ranging (UAV-LiDAR) Data in Planted Forests. *Remote Sensing*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/rs11080908>
- Yang, K.; Zhang, H.; Wang, F.; Lai, R., Marino, A., Rizzoli, P. (2022). Extraction of Broad-Leaved Tree Crown Based on UAV Visible Images and OBIA-RF Model: A Case Study for Chinese Olive Trees. *Remote Sensing* 2022, Vol. 14, Page 2469, 14(10), 2469. <https://doi.org/10.3390/RS14102469>
- Young, D. J. N., Koontz, M. J., y Weeks, J. (2022). Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(7), 1447–1463. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13860>