

Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados

Estimation of dasometric variables in stands under forest management with unmanned aerial vehicles

Reyes-Zurita, Neftali; Rodríguez-Ortiz, Gerardo; Enríquez-del Valle, José Raymundo; Jiménez-Colmenares, Carlos Leonel; Rincón-Ramírez, Joaquín Alberto

 Neftali Reyes-Zurita

rezunef@gmail.com

TecNM-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca., México

 Rodríguez-Ortiz, Gerardo

gerardo.rodriguez@voaxaca.tecnm.mx

TecNM-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, México

 Enríquez-del Valle, José Raymundo

jose.ev@voaxaca.tecnm.mx

TecNM-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, México

 Jiménez-Colmenares, Carlos Leonel

carlos_leyto89@hotmail.com

TecNM-Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, México

 Joaquín Alberto Rincón-Ramírez

jrincon@colpos.mx

Colegio de posgraduados, Campus Tabasco., México

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN: 1390-7042

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 13, núm. 1, 2022

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 03 Septiembre 2021

Aprobación: 31 Enero 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/624/6242851003/index.html>

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3299>



Resumen: La constante evolución de la tecnología ha hecho posible su aplicación en el sector forestal, actualmente es posible caracterizar la vegetación realizar inventario y gestión forestal. El objetivo de este trabajo fue estimar variables dasométricas usando imágenes capturadas con un vehículo aéreo no tripulado (dron), mediante procesamiento fotogramétrico integrado en un sistema de información geográfica en rodales bajo manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca, México. Se utilizó una muestra de 30 árboles, seleccionados del área en donde fue capturado y procesado las fotografías del dron en donde se le midió altura, diámetro de copa (dc), área de copa (AC) y diámetro normal (dn) de la forma tradicional para la validación de la información digital. Los resultados de la comparación de ambos métodos por medio de prueba de t-Student indican que la estimación de la variable altura y dc no presentan diferencias significativas ($p > 0.05$); sin embargo, en las demás variables de inventario existieron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.01$). Además, el modelo exponencial utilizado para estimar el dn y diámetro de copa en función de la altura de la especie *Pinus oaxacana* resultó significativo ($R^2 = 0.90$ y 0.93 respectivamente).

Palabras clave: Dron, fotogramétrico, información digital, manejo forestal.

Abstract: The constant evolution of technology has made possible its application in the forestry sector, it is currently possible to characterize the vegetation and estimate forest inventory variables. The objective of this research was to estimate forest inventory variables using images captured with an unmanned aerial vehicle (drone) using photogrammetric processing integrated in a geographic information system in trees on stands under forest management in Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca, Mexico. A sample of 30 trees was used, selected from the census captured and processed by the drone photographs in the stands where height, crown diameter (Cd), crown area (Ca) and diameter at breast height (Dbh) were measured in the traditional way in order to validate digital information. The results of the comparison of both methods using the t-Student test indicate that the estimation of the height and Cd variable

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Cómo citar: Reyes-Zurita, N., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Jiménez-Colmenares, C. L. & Rincón-Ramírez, J. A. (2022). Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 22–31. <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3299>

does not show significant differences ($p > 0.05$); however, in the rest of forest inventory variables there were significant statistical differences ($p < 0.01$). In addition, the exponential model used to estimate the Dbh and crown diameter as a function of the height of *Pinus oaxacana* species was significant ($R^2 = 0.90$ and 0.93 respectively).

Keywords: Drone, photogrammetric, digital information, forest management.

INTRODUCCIÓN

La comprensión de las dinámicas de las masas forestales es fundamental para su correcta gestión y ordenación, en ocasiones no basta con un inventario cualitativo, siendo necesaria una valoración cuantitativa, mediante la estimación de variables dasométricas (Cabrera et al., 2014).

Ferreira (1994) menciona que el inventario forestal es el método más usado para medir y registrar los datos del bosque, el procesamiento de los datos obtenidos permite obtener información de cantidad y calidad del arbolado, todas estas características requeridas para un inventario, generan problemas para evaluar una superficie forestal de grandes extensiones, no siempre se cuenta con los elementos necesarios para llevarlo a cabo; según Gambetta y Bermúdez (1994) la forma de la distribución de las muestras, es el gran parte del éxito del inventario forestal. Otro problema ligado al tamaño de muestra son los altos costos del muestreo, ya que pequeños incrementos en precisión lo elevan considerablemente. Actualmente los vehículos aéreos no tripulados o también conocidos como drones han generado mucho interés por sus múltiples aplicaciones (Baena et al., 2018), además, los costos y el conocimiento requerido para su implementación han disminuido constantemente debido a los avances rápidos en el desarrollo de unificación de hardware y software (Colomina y Molina 2014). Mediante técnicas de procesamiento fotogramétricos AP-navegan, como la estructura de los algoritmos de movimiento, los vehículos aéreos no tripulados (drones) permiten una adquisición de datos hipertemporal e hiperespacial de nubes de puntos 3D (Lucieer et al., 2012).

Por lo tanto, los drones han demostrado ser valiosas plataformas para las cámaras métricas, que permiten crear nubes de puntos fotogramétricos a través de la estructura de la técnica de movimiento de montaje (Westoby et al., 2012; Fritz et al., 2013); de tal manera se puede generar ortofotos, modelos e imágenes 3D con alta resolución. Actualmente se han hecho estudios recientes que han demostrado la capacidad de los drones, usados en los inventarios forestales (Hung et al., 2012; Zarco-Tejada et al., 2014), un ejemplo de un estudio hecho en los bosques forestales de Hayas para la descripción del dosel (Corona et al., 2015) y ecosistemas semiáridos en el estado de Chihuahua. Gracias a estas herramientas se pueden caracterizar de manera eficiente en escalas de centímetros los diferentes estratos forestales (Cunliffe et al., 2016). El objetivo del presente trabajo fue evaluar la capacidad de las nuevas tecnologías fotogramétricas para la estimación de variables dasométricas forestales de un inventario en rodales bajo manejo, con vehículos aéreos no tripulados (drones).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, en la Región Sierra Norte de Oaxaca, México, en dos rodales bajo manejo forestal.

El primero cuenta con 2.65 ha y el segundo fue de 7.43 ha con una altitud máxima de 2595 msnm.

Inventario en rodales

En este estudio se empleó un muestreo de tipo sistemático, con una intensidad del 2% para ambos predios con sitios circulares de 400 m², en los cuales se midieron los datos dasométricos de la forma tradicional: diámetro normal (cm) se utilizó una cinta diamétrica colocada a 1.30 m, el diámetro de copa (m) se midió con un longímetro en dos direcciones, norte-sur y este-oeste y la estimación de alturas total (m) de los árboles se realizó con pistola Haga altímetro marca GAFMEX modelo 2012 y con un longímetro se midió la distancia del punto del observador al árbol.

Obtención de imágenes de dron

Para las fotografías se utilizó el dron DJI Phantom3 Professional, del cual las características son: cámara de 12 megapíxeles en fotografía, resolución de video 4k, distancia de vuelo 7 km, tiempo de vuelo 25 min cuenta con vuelo estacionario en modo GPS/GNSS, permitiendo al dron mantener su ubicación en todo momento y comunicación con el mando de control.

Validación

Para la comparación o validación de los datos del dron se realizó un muestreo simple al azar, seleccionando una muestra n= 30 árboles/rodal del censo del procesamiento de las imágenes con dron. Físicamente se fue a cada rodal para medir diámetro normal (cm), altura (m) y diámetro de copa (m) para la comprobación (Figura 1).

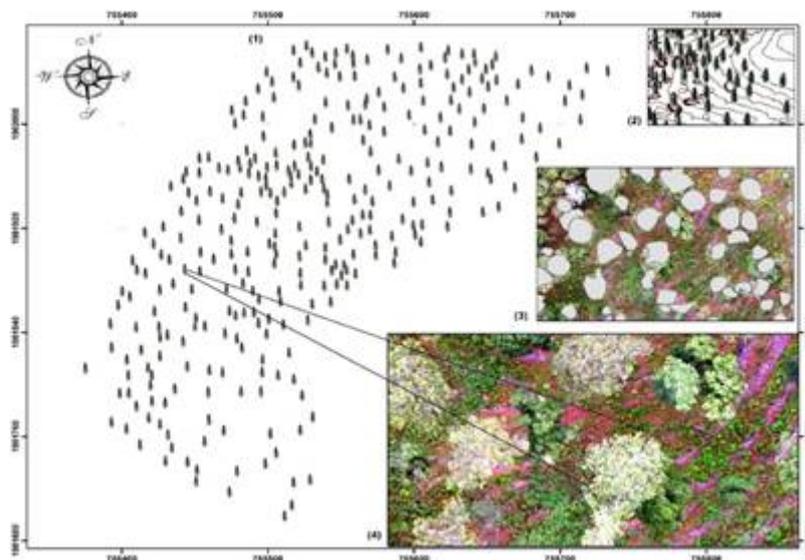


FIGURA 1

Mapa del censo forestal hecho con fotografía de dron y procesamiento SIG para el rodal 2

(1) Muestra la identificación de árboles individuales, (2) Perspectiva de la distribución del arbolado, (3) Segmentación de copas, (4) Ortofoto realizada con fotografía de dron.

Manejo y análisis de datos

Mediante los datos registrado en campo se estimó el volumen usando formulas biométricas (Vargas-Larreta et al., 2017), para generar los modelos de predicción se utilizó el software SAS® (SAS, 2004). El modelo de regresión seleccionado para la predicción fue de tipo exponencial, con base en sus indicadores de ajuste.

Para este estudio la proyección de dicha relación puede representarse por un modelo de predicción para el diámetro normal (DN) haciendo uso principalmente de las variables dasométricas: área de copa y la altura de árboles, ya que con las imágenes obtenidas por el dron el tipo de información que se obtuvo es relacionada con la superficie del dosel forestal.

Mediante el software PIX4D® se tomaron las fotografías y se generaron distintos modelos fotogramétricos como nube de puntos, ortofotos, modelo digital de superficie (MDS), modelo digital de terreno (MDT), modelo 3d y con el software AGISOFT PHOTOSCAN® se realizaron visualizaciones previas para ver el resultado del procesamiento fotogramétrico y corregir errores. Para cuantificar los árboles del predio y

calcular el área de copa se procesó con el software eConcnition Developer Trial® y la herramienta Multiple Segmentation con la que se generaron varios polígonos, en base al modelo digital de superficie (MDS), es decir, se segmentaron la mayoría de las copas de los árboles. Posteriormente en el software ArcGIS® se calculó el área de los polígonos (área de copa).

Del censo forestal realizado con las imágenes de dron se seleccionó una muestra de 30 árboles al azar a los que se les hicieron mediciones manuales: altura (m), diámetro de copa (m) y diámetro normal (cm). Haciendo uso del software SAS® y con el procedimiento Proc means (N MEAN VAR STD T PRT) se realizó una comparación de medias pareadas (t-Student, 0.05) para cada variable dasométrica obtenida de manera manual y también de las obtenidas por las imágenes de dron; así como también de la estimación del diámetro normal estimadas por la (Ecuación 1) de tipo exponencial con las variables altura y diámetro de copa.

$$Y = \beta_0 e^{\beta_1} \tag{Ec. (1)}$$

RESULTADOS

La estimación de las alturas de los árboles por medio de los modelos digitales MDT y MDS, generados de las fotografías de dron (Tabla 1) de 34.1 m a 34.9 m del primer rodal, fueron similares a los valores levantado manualmente como en las imágenes de dron, pero existe un mayor coeficiente de variación en área de copa esto suele pasar porque son más difícil de calcular de forma manual teniendo una diferencia de 8 m.

TABLA 1
Medias y desviación estándar de las variables obtenidas de la selección al azar de 30 árboles con muestreo tradicional contra lecturas fotográficas de dron y procesamiento SIG, para el rodal1 y el rodal 2

	Rodal 1									
	Dn	Alt	Dc	Ac	Alt_d	Dc_d	Ac_d	$Dn = \beta_0 e^{\beta_1 (dc)}$	$Dn = \beta_0 e^{\beta_1 (alt)}$	
Media	54.9	34.1	6.8	38.6	34.9	7.5	46.1	77.5	49.9	
desv. Est	10.6	5.8	1.7	19.1	5.8	1.6	18.2	23.9	9.0	
CV	19.3	17	25	50.1	16.6	21.3	39.4	30.8	18	
	Rodal 2									
Media	56.6	36.53	7.92	52.18	34.97	8.16	55.34	61.90	47.88	
Des. Est	15.09	7.56	1.97	25.52	7.00	2.02	27.31	22.04	10.51	
CV	26.6	20.6	24.8	50.8	20	24.7	49.3	35.6	21.9	

Dn = diámetro normal (cm) Alt=altura total (m) Dc=diámetro de copa (m) Ac=área de copa (m²)
 Alt_d=altura total con lecturas de dron (m) Dc_d= diámetro normal con lecturas de dron (m) Ac_d=área de copa con lecturas de dron (m²). $Dn = \beta_0 e^{\beta_1 (dc)}$ =Estimación del diámetro normal en función del diámetro de copa (cm). $Dn = \beta_0 e^{\beta_1 (alt)}$ =Estimación del diámetro normal en función de la altura total (cm) CV=coeficiente de variación (%).

Las ecuaciones generadas para la estimación del diámetro normal (DN) muestran un nivel de significancia ($p=0.0001$) en ambas especies y rodales, sin embargo las más representativas, manifiestan menor variabilidad (CV) y son las que se encuentran en función del diámetro de copa (DC) (Tabla 2).

El modelo exponencial utilizado para estimar el diámetro normal en función de la altura (ALT) para la especie *P. oaxacana* en el rodal 1 y 2 resultó significativo, es decir que la variable altura es un predictor confiable del Dn, con una bondad de ajuste $R^2 = 0.90$ y 0.93 y un de $CV = 28.40\%$ (Tabla 2). La diferencia encontrada se debe a las condiciones de sitio y el crecimiento de cada arbolado, aunado a esto cada rodal tienen diferentes microclimas, es por ello la altura de los árboles explica el 90% del total de la variación en diámetro normal.

El modelo de estimación del diámetro normal en función de la altura resultó altamente significativo ($p=0.0001$), de la misma forma el modelo utilizado para la estimación del diámetro normal en función del diámetro de copa de la especie *Pinus Oaxacana* del primer rodal, con una bondad de ajuste $R^2 = 0.99$ y un coeficiente de variación, $CV = 9.0\%$; de esta manera, el modelo explica el 99% del total de la variación en diámetro normal. Sin embargo, se puede observar que, en el segundo rodal el coeficiente variación fue mínimo (Tabla 2).

Para la especie *Q. crassifolia* el modelo de estimación del diámetro normal en función de la altura (Cuadro 2) resultó altamente significativo ($p=0.0001$); con una bondad de ajuste $R^2 = 0.87$ y un coeficiente de $CV = 28.5\%$ (Tabla 2). Este mismo comportamiento fue para ambos modelos.

Al realizar la mezcla de especies del rodal 1 para conocer las discrepancias entre los datos obtenidos manualmente y con lecturas de fotografías de dron (Tabla 3), no se encontraron diferencias significativas las variables altura y Dn y dn_alt_d , sin embargo, para las variables Dc, AC y Dn y dn_dc_d existen diferencias estadísticas significativas entre ambos procedimientos ($p < 0.01$)

En el segundo rodal (Tabla 4), las diferencias existentes entre los datos de inventario y los obtenidos con las imágenes de dron fueron similares para altura de árboles y la estimación alométrica del Dn en función a el diámetro de copa ($p > 0.05$); sin embargo, para las variables Dc, AC y Dn y dn_alt_d existieron diferencias estadísticamente significativas entre ambos procedimientos ($p < 0.01$).

DISCUSIÓN

La medición de variables dasométricos en las especies forestales siempre existe un porcentaje de error al momento de la captura, levantamiento de datos (Safonova et al., 2021) o por la geografía del lugar, de esta forma el resultado de este estudio fue similar a los datos arrojado de forma manual y la capturada fotografía del dron, porque ya que se contaba con la ubicación de cada árbol los cuales fueron seleccionados del área en donde se tomaron las fotografía (Figura 1) pese al terreno irregular de los rodales, aun así, no presentaba variabilidad en los resultados obtenidos manualmente con lecturas de dron. Sin embargo, Sperlich et al. (2014), en un estudio realizado en Alemania con esta tecnología, reportan que el porcentaje de detección para el bosque de coníferas es de 87.68% en el radio de búsqueda 1 m y 90.41% en el radio de búsqueda 2m. Es por eso que Ferrer-Porras (2015) menciona que la posibilidad de obtener información de estructura y variables dasométricas a partir de sensores aerotransportados (drones y LiDAR), acceden estimaciones directas de variables de producción de bosque.

TABLA 2
Modelos de regresión exponencial para la predicción del Dn, para Pinus
oaxacana y Quercus crassifolia con las variables altura (m) y diámetro
de copa (m) para los rodales bajo manejo de Santa Catarina Ixtepeji

Modelo	R ² ajust	CME	CV (%)	Significancia	Parámetros	Valor t_Student
1er rodal						
<i>P. oaxacana</i>						
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(ALT)}$	0.9	234.9	28.4	<.0001	β_0	112.1**
					β_1	-0.0240**
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(DC)}$	0.99	23.736	9	<.0001	β_0	20.517**
					β_1	0.1766**
<i>Q. crassifolia</i>						
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(ALT)}$	0.87	22.7933	28.5	<.0001	β_0	6.7067**
					β_1	0.0960**
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(DC)}$	0.9	17.9767	25.2	<.0001	β_0	8.6364**
					β_1	0.1922**
2do rodal						
<i>P. oaxacana</i>						
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(ALT)}$	0.93	97.4892	19.2	<.0001	β_0	27.9603**
					β_1	0.0169**
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(DC)}$	0.94	78.0038	17.2	<.0001	β_0	25.8447**
					β_1	0.1150**
<i>Q. crassifolia</i>						
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(ALT)}$	0.68	140.3	47.9	<.0001	β_0	21.2974**
					β_1	0.00852**
$Dn = \beta_0 e^{\beta_1(DC)}$	0.87	55.1415	29.9	<.0001	β_0	18.9441**
					β_1	0.0433**

Dn = diámetro normal (cm), Alt = altura total (m), Dc = diámetro de copa (m), No significativo ^{ns>0.05}, Poco significativo *≤0.05, Altamente significativo **≤0.01

TABLA 3
t Pareada datos dasométricos obtenidos manualmente y con lecturas de fotografías de dron, para ambas especies (*P. oaxacana* y *Q. crassifolia*) del rodal 1.

n	Media	Varianza	Dev. Std	Valor de t	Variables
30	-0.75	12.27	3.50	-1.19 ^{ns}	Altura (m)
30	-0.69	0.82	0.90	-4.16**	Diámetro de copa(m)
30	-7.48	116.65	10.80	-3.80**	Área de copa(m ²)
30	-22.62	429.79	20.73	-5.98**	Dn y dn_dc_d(cm)
30	5.083	273.24	16.529	1.68 ^{ns}	Dn y dn_alt_d(cm)

No significativo ^{ns>0.05}, Poco significativo * ≤ 0.05 , Altamente significativo ** ≤ 0.01 , t-Student pareada ($\alpha = 0.05$), ALT= Altura, DC= diámetro copa, AC= Área de copa, Dn y dn_dc_d= estimación del diámetro normal con fotos del dron, Dn y dn_alt_d= estimación de la altura con fotos de dron

TABLA 4
t Pareada datos dasométricos obtenidos manualmente y con lecturas de fotografías de dron, para ambas especies (*P. oaxacana* y *Q. crassifolia*) del rodal 2.

n	Media	Varianza	Dev. Std	Valor de t	Variables
30	1.56	44.74	6.68	1.28 ^{ns}	Altura(m)
30	-0.23	0.36	0.60	-2.14*	Diámetro de copa(m)
30	-3.15	65.48	8.09	-2.14*	Área de copa(m ²)
30	-5.29	277.49	16.65	-1.74 ^{ns}	Dn y Dn_dc_D(cm)
30	8.72	160.95	12.68	3.77**	Dn y DN_alt_D(cm)

No significativo ^{ns>0.05}, Poco significativo * ≤ 0.05 , Altamente significativo ** ≤ 0.01 , t-Student $\alpha = 0.05$ b, Dn= diámetro normal, Dn_dc_d= estimación del diámetro normal con fotos del dron, Dn_alt_d= estimación de la altura con fotos de dron

Yépez-Rincón y Lozano-García (2014), quienes mapearon el arbolado urbano con tecnología LiDAR, señalan que los datos de esta herramienta es eficaz para evaluar las medidas de diámetro de copa y altura pero Sperlich et al. (2014) en su estudio asociando LiDAR y drones reportan que la precisión de estimación de alturas es de 0.5 m, mientras para este estudio fueron similar en ambos datos (cuadro 1 y 2), por lo que el uso de fotogrametría con drones es válida para trabajos de precisión en la obtención de alturas, y como una herramienta fiable en el sector forestal, además es más accesible en comparación con el LiDAR.

Para la estimación de la altura con foto de dron se obtuvo una media de 8.72 m y una desviación estándar 12.68, comparando los resultado obtenido por Andersen et al. (2006) fue superior -1.12 m y una desviación estándar de 0.56 en una combinación de *Pinus douglas* y *Pinus Ponderosa*.

Al probar y comparar los datos registrado en campo y con las imágenes de drones (Tabla 1) se obtuvo resultado similares a lo reportado por Giannetti et al. (2018), en donde usaron fotografía de los drones para predecir los volúmenes en los bosques forestales aun cuando no se dispone un modelo digital del terreno (MDT) de alta resolución, por otra parte Polewski et al. (2019) mencionan que las especies de coníferas son más fáciles de predecir porque poseen una parte superior distintiva y bien definida, mientras que las latifoliadas son más complicadas porque no siguen ningún patrón de forma riguroso, de esta manera se reduce que las herramientas utilizadas son confiable para su uso en bosque artificiales y bajo manejo.

Los modelos de regresión lineal obtenidos en este estudio presentan diferencias significativas ($p = 0.0001$), similares a los que obtuvieron Pearse et al. (2018), al realizar una comparación entre la imagen satelital y escáner laser aerotransportado (ALS) fue de $R^2 = 0.81$ y 0.88 en una plantación de *Pinus radiata*. D. en Nueva Zelanda, y Zahawi et al. (2015) mediante un modelo de regresión simple, reportan un $R^2 = 0.83$ y 0.85 en una área de restauración entre la Estación Biológica las Cruces y la ciudad de Agua Buena el Sur de Costa Rica y zonas boscosa; (Dandois y Ellis, 2013), ($R^2 = 0.63$ a 0.84) en tres sitios de estudios forestal en Maryland en el Condado de Baltimore. fue similar a lo reportado en este estudio en bosque bajo manejo forestal de un $R^2 = 0.87$ y 0.93 tomando en cuenta la variable altura (Tabla 1).

Comparando los resultados obtenidos de la desviación estándar 3.50 y 6.68 (Tabla 1) de altura de las dos especies forestales en los dos rodales, medido manualmente y área de copa tomado con las fotografías del dron, fueron similares a los obtenidos por (Wang et al., 2019), (5.8 a 7.4). El R^2 fue de 0.90 el cual indica que es una variable altamente significativa para la medición de los bosques forestales.

Además, en una investigación realizada por Malleux (1970), mediante un modelo cuadrático, estimó la relación DN con el diámetro de copa con un $R^2 = 0.97$, en el que reporta matemáticamente la existencia de una estrecha correlación entre estas dos variables en un bosque sub húmedo tropical, similares a los resultados que se obtuvieron en este estudio mostraron un buen ajuste con el modelo de tipo exponencial (Tabla 4), tomando en cuenta la asociación entre el diámetro de copa y el diámetro normal. En este mismo contexto se puede decir que, fisiológicamente hay una relación entre el crecimiento de la biomasa del follaje y el fuste. Morataya y Galloway (1998), demostraron con la aplicación de la teoría del modelo vascular (TMV), que establece que el área de la albura a una altura se relaciona con la biomasa del follaje por medio de una proporción constante. No obstante, es necesario señalar que esta relación puede ser retardada si la zona bajo manejo es aclareada de forma tardía, ya que cuando existe una alta competencia por los nutrientes entre individuos en un área de alta densidad y al tener copas pequeñas los procesos fotosintéticos son bajos y se ve afectado el crecimiento en biomasa, es decir poseen un pobre crecimiento vertical y horizontal.

Del análisis de los resultados fotogramétricos (Figura 1) se puede afirmar que, para la identificación a nivel de árbol individual resultó más efectivo hacerlo a través de la segmentación de copas por medio del MDS, y por identificación del centro de las coronas del dosel con la ortofoto, se generaba una zona más densa del arbolado; sin embargo puede variar según la densidad arbustiva del rodal, las condiciones de luz generada tanto por la exposición del rodal como por la diversidad estructural en el dosel sobre todo en los estratos dominantes y codominantes, ya que según Kattenborn et al. (2014) la precisión en la detección depende de la altura de los árboles de referencia, como de la densidad. Debido a que el área de este estudio es un rodal bajo manejo forestal y por el espacio que existe entre cada uno de ellos, se logró detectar el número de árboles y calcular la distancia entre las copas y el área, y por las irregularidades la segmentación se tenía que separar manualmente

CONCLUSIONES

En este estudio se realizaron la estimación de las variables dasométrica a las especies de coníferas y latifoliadas en dos métodos, la primera fue manualmente y la otra con las imágenes de dron, de los resultados obtenidos las variables diámetro de copa ($6.8m$ $7.5m$) y altura total (34.1 y 34.9) mostraron resultado probados

estadísticamente similares, la cual indican el uso potencial que se le puede dar, además de los modelos utilizado mostraron diferencia significativa como por ejemplo en la estimación del diámetro normal en función de la altura y el modelo utilizado para la estimación del diámetro normal en función del diámetro de copa de la especie *Pinus Oaxacana* del primer rodal resultaron altamente significativo ($p=0.0001$), con una bondad de ajuste $R^2 = 0.99$.

En la actualidad los proyectos forestales de grandes extensiones conllevan una inversión muy alta, las alternativas serían estas herramientas, no solo del monitoreo, también en la estimación de variables dasométricas, así como en la identificación de árbol individual.

REFERENCIAS

- Andersen, H. E., Reutebuch, S. E. y McGaughey, R. J. 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(5), 355–366. doi: 10.5589/m06-030
- Baena, S., Boyd, D. S. y Moat, J. 2018. UAVs in pursuit of plant conservation - Real world experiences. *Ecological Informatics*, 47, 2–9. doi: 10.1016/j.ecoinf.2017.11.001
- Cabrera, J., Lamelas, M.T., Montealegre, A.L. y de la Riva, J. 2014. Estimación de Variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill. *XVI Congreso Nacional de Tecnología de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de junio de 2014*, 125-129
- Colomina, I. y Molina, P. 2014. Sistemas aéreos no tripulados para la fotogrametría y teledetección: Una revisión. *Diario de Fotogrametría y Teledetección*, 92, 79-97.
- Corona, P., Rindinella, A., Lastrì, C., Nardino, V., Bianchini, D., Guzzi, D., Disperati, L. y Chianucci, F. 2015. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 60–68. doi: 10.1016/j.jag.2015.12.005
- Cunliffe, A. M., Brazier, R. E. y Anderson, K. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing of Environment*, 83, 129–143. doi: 10.1016/j.rse.2016.05.019
- Dandois, J. P. y Ellis, E. C. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259–276. doi: 10.1016/j.rse.2013.04.005
- Ferreira, O. 1994. Manual de inventarios forestales. Siguatepeque, Honduras, Escuela Nacional de ciencias forestales. *Documento Técnico*, 96.
- Ferrer-Porras, A. G. 2015. Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y selvicultura.
- Fritz, U., Kattenborn, T. y Koch, B. 2013. UAV-based photogrammetric point Clouds- Tree Stem Mapping in open Stands in Comparison to Terrestrial Laser Scanner Point Clouds. Archivos Internacionales de la fotogrametría, teledetección y espacial. *Ciencias de la información*, 40,141-146.
- Gambetta, F. y Bermúdez, A. 1994. Curso inventarios forestales en bosques secos. *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE*. Turrialba. 93.
- Giannetti, F., Chirici, G., Gobakken, T., Naesset, E., Travaglini, D. y Puliti, S. 2018. A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data, *Remote Sensing of Environment*. 213, 195–205. doi: 10.1016/j.rse.2018.05.016
- Hung, C., Bryson, M. y Sukkarieh, S. 2012. Multi-class predictive template for tree crown detection. *Diario de fotogrametría y teledetección*, 68, 170-183.
- Kattenborn, T., Sperlich, M., Batua, K. y Koch, B. 2014. Automático de detección palm único árbol en plantaciones usando uav basados nubes fotogramétrico point. 7.

- Lucieer, A., Robinson, S., Turner, D., Harwin, S. y Kelcey, J. 2012. El uso de un micro-vehículo aéreo no tripulado de ultra-alta resolución de las observaciones de sensores múltiples de lechos de musgo antártico. *Archivos Internacionales de la fotogrametría, teledetección y la información espacial de Sci-cias*, 429-433.
- Malleux, J. 1970. Estudio de relación D.A.P. con el diámetro de copa en un bosque húmedo sub tropical. *Revista Forestal del Perú*, 4(1-2), 1-5.
- Morataya, R. y Galloway. 1998. Relaciones entre follaje y albura en tectona grandis y gemelina arbórea aplicación de la teoría del modelo vascular e implicaciones de manejo. *Revista Forestal Centroamericana*, 22:21-28.
- Pearse, G.D., Dash, J.P., Persson, H.J. y Watt, M.S. 2018. Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 257–267. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.06.006
- Polewski, P., Yao, W., Cao, L. y Gao, S. 2019. Marker-free coregistration of UAV and backpack LiDAR point clouds in forested areas. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 307–318. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.020
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/ETS®9.3 User's Guide; SAS. Cary, NC, USA.
- Safonova, A., Hamad, Y., Dmítriev, E., Georgiev, G., Trenkin, V., Georgieva, M., Dimitrov, S., Lliev, M. 2021. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones*, 5 (3) 77. doi: 10.3390/drones5030077.
- Sperlich, M., Kattenborn, T., Koch, B. y Kattenborn, G. 2014. *Potential of unmanned aerial vehicle based photogrammetric point clouds for automatic single tree detection*. 6.
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J.J., Aguirre-Calderón, O. A., López Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H.M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M.C. y Aguirre-Calderón, G. 2017. Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 3, 437-455.
- Wang, Y., Lehtomäki, M., Liang, X., Pyörälä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., Liu, J., Feng, Z., Chen, R. y 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*. 47, 132–145.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. y Reynolds, J.M. 2012. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Yépez-Rincón, F. D. y Lozano-García, D.F. 2014. Mapeo del arbolado urbano con LiDAR aéreo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5 (26), 58-75.
- Zahawi, R. A., Dandois, J. P., Holl, J.D., Nadwodny, D., Reid, J.L. y Ellis, E.C. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery, *Biological Conservation*, 186, 287–295. doi: 10.1016/j.biocon.2015.03.031
- Zarco-Tejada, P., Díaz-Varela, J.R., Angileri, V. y Loudjani, P. 2014. Árbol cuantificación altura con muy imágenes de alta resolución adquirida desde un avión no tripulado vehículo (uav) y 3D automático de foto-reconstrucción métodos, *Revista Europea de Agronomía*, 55, 89-99.