



DOI: 10.29298/rmcf.v16i87.1488

Artículo de investigación

Medición de parámetros de inventario forestal en bosques plantados, mediante tecnología *LiDAR*: Comparación de métodos

Measuring forest inventory parameters in planted forests using *LiDAR* technology: Comparison of methods

José Antonio Hernández-Moreno^{1,2}, Diego Rafael Pérez-Salicrup²,
Alejandro Velázquez-Martínez^{3*}

Fecha de recepción/Reception date: 6 de junio de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 27 de noviembre de 2024.

¹Campo Experimental El Palmar, INIFAP. México.

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: alejvela@colpos.mx

*Corresponding author; e-mail: alejvela@colpos.mx

Resumen

El inventario forestal describe cantidad, tamaño y calidad de los árboles de un bosque, así como las características del espacio donde crecen. Tradicionalmente, el inventario forestal se realiza manualmente, con calibradores (forcípulas) para medir el diámetro a la altura del pecho (*DAP*), y dispositivos que utilizan principios geométricos, como el clinómetro para la estimación de la altura total (*AT*). En el presente trabajo se documenta la aplicabilidad de una tableta con tecnología *LiDAR* integrada para la medición de parámetros de inventario forestal, mediante la comparación de datos dendrométricos obtenidos mediante *LiDAR* y con métodos tradicionales: posición geográfica, *DAP*, *AT*, diámetro de copa (*DC*) y altura de fuste limpio (*FL*) de árboles individuales, en un bosque plantado de coníferas. Se realizó un análisis de regresión lineal simple con cada variable y se aplicó una prueba *t-student*, para la determinación de diferencias entre medias, así como el cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RECM*) para medir el error entre los valores predichos y los observados. Los resultados muestran una $R^2=0.99$ y $RECM=0.657$ cm para el *DAP*; $R^2=0.98$ y un $RECM=0.369$ m para la *AT*; $R^2=0.95$ y $RECM=0.341$ cm para el *DC* y $R^2=0.97$ y $RECM=0.208$ cm para el *FL*. El tiempo total del escaneo para la adquisición de datos *LiDAR* fue 3.4 veces menor al tiempo del inventario forestal tradicional. El método propuesto para inventario forestal en bosques plantados mediante el dispositivo móvil es confiable, preciso y consume menos tiempo, en comparación con el enfoque tradicional.

Palabras clave: Escaneo láser terrestre, *iPad Pro*[®], parámetros forestales, realidad aumentada, *software* de uso libre, sensor *LiDAR* móvil.

Abstract

Forest inventory describes the quantity, size, and quality of the trees in a forest and the characteristics of the space where they grow. Traditionally, a forest inventory is carried out manually, with calipers to measure the diameter at breast height (*DBH*), and devices that use geometric principles, such as the clinometer for the estimation of total height (*TH*). This paper documents the applicability of a tablet with integrated LiDAR technology for the measurement of forest inventory parameters, by comparing dendrometric data obtained with LiDAR and traditional methods: geographic position, *DBH*, *TH*, crown diameter (*CD*) and clear stem height (*CS*) of individual trees in a planted coniferous forest. A simple linear regression analysis was performed with each variable, and a *t*-student test was applied to determine differences between means, as well as to calculate the Root Mean Square Error (RMSE) to measure the error between predicted and observed values. The results show a $R^2=0.99$ and $RMSE=0.657$ cm for *DBH*; a $R^2=0.98$ and a $RMSE=0.369$ m for *TH*; a $R^2=0.95$ and $RMSE=0.341$ cm for *CD*, and a $R^2=0.97$ and $RMSE=0.208$ cm for *CS*. The total scanning time for LiDAR data acquisition was 3.4 times less than traditional forest inventory time. The proposed method for forest inventory in planted forests using the mobile device is reliable, accurate, and less time-consuming than the traditional approach.

Key words: Terrestrial laser scanning, iPad Pro®, forest parameters, augmented reality, free to use software, mobile LiDAR sensor.

Introducción

El incremento en la demanda de productos y servicios que se obtienen del bosque, junto con la necesidad de preservar el medio ambiente y los recursos naturales, ha propiciado el establecimiento de bosques plantados para satisfacer de manera más eficiente estas demandas. Además, suelen contribuir a reducir las presiones sobre los bosques naturales, que cada vez se enfocan más en la conservación de la biodiversidad y en la regulación de recursos naturales como el suelo y el agua (Musálem, 2006). Es por ello, que el desarrollo de métodos precisos para el inventario maderable, orientados a estimar los parámetros estructurales de los bosques plantados son una herramienta silvícola crucial para la predicción de la productividad forestal; además, pueden proporcionar una evaluación cuantitativa de las masas forestales.

El inventario forestal describe la cantidad, tamaño y calidad de los árboles de un bosque, así como otras características de la superficie donde crecen (Ayrey & Hayes, 2018). También, es la base de análisis y planificación que constituye el punto de partida de la gestión forestal sostenible. La estimación de la información

de un solo árbol y del rodal completo es una de las tareas centrales del inventario forestal.

En México, tradicionalmente, los datos del inventario forestal se recopilan mediante equipo de medición manual como las cintas diamétricas o las forcímulas para el diámetro normal (*DAP*), el clinómetro para la altura total (*AT*) o fuste limpio (*FL*), así como flexómetros para la medición de los diámetros de copa (*DC*). En la práctica, esto requiere mucho tiempo y personal, además es costoso (Liang *et al.*, 2018; Ritter *et al.*, 2017); esta estrategia que se realiza directamente en el bosque es la base para efectuar estudios que utilizan métodos indirectos de medición. Lo anterior exige evaluar y comparar métodos alternativos como los de percepción remota, para derivar parámetros de los árboles (Ciesielski & Sterenczak, 2019; Hernández, 2020).

El escáner láser terrestre (TLS) se reconoce cada vez más como una opción alternativa a los métodos convencionales de inventario forestal (Liang *et al.*, 2016; Newnham *et al.*, 2015). En los últimos años se han desarrollado con éxito algoritmos automáticos para la detección y medición de árboles mediante TLS (Calders, 2015; Elsherif *et al.*, 2018; Estornell *et al.*, 2017). El TLS, al medir las distancias a múltiples puntos en las superficies de los objetos circundantes, construye nubes de puntos 3D a partir de las cuales se pueden estimar rápidamente los tamaños y las distribuciones espaciales de los árboles. Sin embargo, el alto costo del equipo TLS (cuyo precio suele superar los 40 000 dólares estadounidenses) lo ha puesto fuera del alcance de muchos usuarios potenciales (Mokroš *et al.*, 2021; Tatsumi *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). En adición, el peso de estos también ha sido un desafío, lo que dificulta su transporte hacia y dentro de algunas áreas, lo que agrega costos por tiempo invertido en el traslado y manipulación (Gollob *et al.*, 2021).

La necesidad de programas informáticos especializados es otro factor que ha limitado el uso colectivo del TLS (Elsherif *et al.*, 2018; Hernández, 2020). Para

superar esto, se han usado, como métodos alternativos, el escáner láser móvil (MLS) (Liang et al., 2014) y la fotogrametría de corto alcance (Tomaščík et al., 2017). Algunos estudios señalan que estos dispositivos móviles pueden adquirir nubes de puntos 3D en bosques (Gollob et al., 2021; Mokroš et al., 2021; Wang et al., 2022). Sin embargo, para derivar información a nivel de árbol de estas nubes (p. ej. diámetro del fuste) se deben realizar análisis posteriores en un dispositivo separado con múltiples *softwares* (Wang et al., 2022).

En la actualidad, existe como alternativa el uso de aplicaciones para *iPhone*[®]/*iPad*[®], dispositivos móviles personales (*smartphones* o *tablets*), para el registro de información 3D de árboles individuales en un contexto de inventario forestal, que son fáciles de usar y de bajo costo. Desde 2020, *Apple Inc.*[®] (Apple Inc., 2022) incorporó un sensor de alcance y detección de luz (*LiDAR*) en algunos modelos de *iPhone*[®] y *iPad*[®] (versiones Pro), los cuales están disponibles con precio aproximado de 1 000 USD y son de peso liviano (187-684 g), en comparación con otros dispositivos *LiDAR* en el mercado; además, con una interfaz de programación de aplicaciones de realidad aumentada (AR). Lo anterior, hace posible el acceso a nubes de puntos 3D generadas por *LiDAR* con dispositivos móviles personales. Este dispositivo funciona con el sensor *LiDAR* integrado, el sistema de cámaras, los sensores de movimiento (giroscopio de tres ejes, acelerómetro, Unidad de Medición Inercial, barómetro, sensor de luz ambiental) y el sistema GPS/GNSS (Apple Inc., 2022).

Tatsumi et al. (2021) desarrollaron y probaron una aplicación móvil gratuita, llamada *ForestScanner*[®] (MAPRY Co. Ltd., 2022) que permite realizar inventarios forestales basados en escaneo láser por medio del sensor *LiDAR* incorporado en un *iPhone*[®]/*iPad Pro*[®], mismo que no requiere ningún análisis manual o de posproceso de nubes de puntos 3D ya que, a medida que el usuario escanea árboles con el dispositivo, la aplicación estima los *DAP* y sus coordenadas espaciales, con base en detección de objetos en tiempo real y ajuste de círculos (Tatsumi et al., 2021),

mediante la plataforma de realidad aumentada (AR) y el sensor *LiDAR* (Kuželka *et al.*, 2020).

Los objetivos de este trabajo fueron: (1) Probar el rendimiento del *iPad Pro*[®], mediante aplicaciones *LiDAR* y de *AR* para estimar la posición geográfica, *DAP*, *AT*, *DC* y *FL* en árboles individuales; y (2) Comparar sus resultados con mediciones realizadas mediante métodos tradicionales. La evaluación y determinación del potencial del *iPad Pro*[®] en inventarios forestales a través del nivel de precisión en la estimación de los parámetros propuestos permitirá establecer y proporcionar un método innovador, de menor costo y preciso, que sea aplicable a inventarios forestales en bosques plantados.

Materiales y Métodos

El levantamiento de datos se realizó en 20 sitios de muestreo establecidos en un bosque plantado mixto de aproximadamente 35 años de edad, con una superficie de 4.64 ha, ubicado en la ribera de la presa de Cointzio, localizada a 12 km al suroeste de la ciudad de Morelia, Michoacán, México (LN: 19.621; LO: -101.262). Las especies principales en la plantación son: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. y *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., además de ejemplares aislados de *Eucalyptus* sp. y *Casuarina equisetifolia* L., tales taxones fueron parte de bosques plantados para restauración y conservación de suelo (Figura 1).

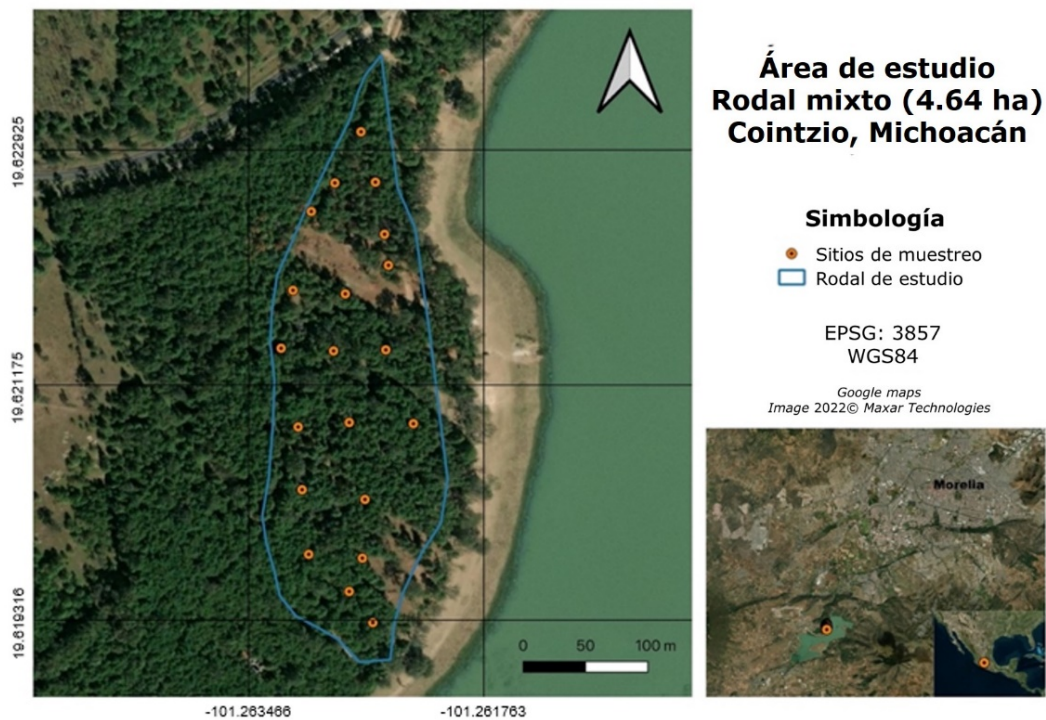


Figura 1. Rodal de estudio y localización de los 20 sitios de muestreo.

Se aplicó un muestreo sistemático (West, 2009), en líneas de muestreo de 60×60 m, los sitios fueron circulares de 400 m² (radio=11.28 m), lo cual corresponde a una superficie muestreada del 17.2 %, con respecto al total del bosque plantado (Cochran, 1977). Se definió a las parcelas como la unidad de muestreo y escaneo, se consideraron los tamaños de parcela que a menudo se adoptan en los programas de inventarios forestales nacionales e internacionales (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2014), porque este tamaño de muestra también fue usado por Tatsumi et al. (2021) quienes desarrollaron la app usada en el presente estudio, además de utilizarse en evaluaciones de *iPhone*[®]/*iPad*[®] (Gollob et al., 2021; Mokroš et al., 2021). Los sitios se ubicaron mediante un GPS *Garmin*[®] eTrex 20 (Figura 1), se registraron las posiciones geográficas del árbol central. A todos los árboles con un $DAP \geq 7.5$ cm se les midió su *DAP* con forcípula *Haglöf Sweden*[®] MANTAX BLUE (60 cm). Asimismo, se registraron las variables *AT*, *FL* y el *DC*; para los dos primeros

parámetros, se usó un clinómetro *Suunto*[®] PM-5/360. El *DC* se midió con cinta métrica *Truper*[®] TP50ME, en las direcciones norte-sur y este-oeste, se tomó como referencia la proyección de los extremos de la misma sobre el suelo y ambas medidas se promediaron.

Recopilación de datos de inventario

Para obtener las mediciones de *DAP* de los árboles en cada sitio, se usó la aplicación gratuita *ForestScanner*[®] (MAPRY Co. Ltd., 2022; Tatsumi *et al.*, 2021), instalada en *iPad Pro*[®], así cada sitio de muestreo fue escaneado; esta aplicación genera nubes de puntos y una base de datos de los *DAP* estimados de manera automática. A medida que se mueve el dispositivo, *ForestScanner*[®] escanea objetos dentro de una distancia de 5 m (intervalo máximo de escaneo del sensor), adquiriendo una nube de puntos 3D de las superficies de los objetos circundantes. Con el uso de *ForestScanner*[®], la nube de puntos y las mallas de triángulos 3D aparecen en la pantalla en tiempo real, lo que permite reconocer visualmente las superficies escaneadas. A medida que se escanean los árboles, los diámetros de los fustes aparecen instantáneamente en la pantalla en forma de *AR*, la nube de puntos se colorea con información RGB recopilada por las cámaras del dispositivo (procedimiento completo en video S1:

https://drive.google.com/file/d/1aI5wPjMeshOneTqk_V8XIBrO6fgAKZM2/view?usp=sharing).

La adquisición de datos con el sensor láser del *iPad Pro*[®] se inició en el centro de cada sitio de muestreo; el escaneo se realizó caminando a velocidad normal, mientras el sensor *LiDAR* recopilaba los datos de medición 3D. Durante el escaneo, *ForestScanner*[®] realiza un seguimiento de las coordenadas relativas del dispositivo desde el punto de inicio en función de la unidad de medición inercial (IMU) (navegación GNSS). La ubicación absoluta (coordenadas geográficas) del punto de inicio, está determinada por el GNSS integrado en el *iPad Pro*[®]. Cabe mencionar que

el modelo más reciente del *iPhone 15 Pro*[®] y *Pro Max*[®] (septiembre de 2023) ya poseen un GPS de precisión y doble frecuencia (Apple Inc., 2022). Los pasos para el levantamiento de un sitio de muestreo y las especificaciones detalladas de su uso se muestran en Tatsumi et al. (2021) y MAPRY Co. Ltd. (2022) (<https://mapry.co.jp/>). Los modelos 3D y los archivos de datos generados fueron exportados a una computadora portátil.

Altura Total, diámetro de copa y altura de fuste limpio

Para estimar la *AT*, *DC* y *FL* en árboles individuales de cada sitio de muestreo se utilizó la aplicación *Arboreal*[®] (Arboreal AB, 2022). La medición de la *AT* y *FL* se realizó de manera muy similar a cuando se realiza con clinómetro *Suunto*[®], con la gran diferencia de que al usar la tecnología de los sensores del *iPad Pro*[®], la distancia entre el sensor y el árbol por medir no es relevante, solo tiene que ser >10 m de la base del árbol, cuando los árboles son demasiado altos (>30 m) conviene alejarse hasta 15 o 20 m (procedimiento completo en video S2: <https://drive.google.com/file/d/1Ncvs5HSAFy2iRrLtJo0NYZUOrd3WRY1R/view?usp=sharing>). Otra ventaja es que las mediciones de cada árbol quedan registradas en archivos individuales en el *iPad Pro*[®], tanto la base de datos de árboles medidos (.csv) como las imágenes de las mediciones (.jpg) y pueden, incluso, compartirse con otros usuarios (mediante *AirDrop*[®], correo electrónico o *WhatsApp*[®]). Para el *DC*, la medición se hace simultáneamente para cada árbol mientras se registran la *AT* y la de *FL* (video S2).

Evaluación y análisis de datos

El análisis de las variables se realizó comparando el valor de las variables dendrométricas estimadas de la manera tradicional (medida de referencia) *versus* el valor obtenido a través de la tecnología alternativa (*LiDAR+AR*). La hipótesis fue demostrar la igualdad de los valores de las variables con ambos métodos. Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal simple con cada variable (Ecuación 1), mismo que se evaluó con el Coeficiente de determinación (R^2) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RECM*) con el modelo (Infante & Zárate, 2012):

$$Y = a + bX + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

Y = Variable dependiente cuyo valor se obtuvo mediante método convencional

a = Coeficiente a estimar que corresponde al intercepto (término constante) que representa el valor de Y cuando X es 0

b = Coeficiente a estimar que corresponde a la pendiente e indica cuánto cambia Y por cada unidad de cambio en X

X = Variable independiente obtenida mediante *LiDAR+AR*

ε = Error aleatorio del modelo, que indica las variaciones de Y que no son explicadas por X

Se aplicó una prueba *t-student* para probar la hipótesis de que las dos alternativas de medición son significativamente diferentes para la determinación de las diferencias entre las varianzas muestrales y para la construcción del intervalo de confianza. También, se utilizó el estadístico *RECM* (Ecuación 2) que mide la cantidad

de error que hay entre dos conjuntos de datos. En este caso, compara un valor predicho (V_{LAR}) y un valor observado o de referencia (V_{Tra}) (Infante & Zárate, 2012).

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{LAR} - V_{Tra})^2}{n}} \quad (2)$$

Donde:

V_{LAR} = Valor de la variable (DAP , AT , DC y FL) estimado o predicho por la regresión

V_{Tra} = Valor de referencia de los mismos parámetros, estimados con métodos tradicionales

n = Número de muestras utilizadas en el análisis (446 árboles) provenientes de 20 sitios de muestreo

Resultados

Mediante el uso de la app con tecnología *LiDAR ForestScanner*[®], el tiempo de escaneo por sitio para registrar el DAP y la posición geográfica osciló entre 0.8 y 3.8 min, con un promedio de 2.3 min por sitio. Se requirió de un total de 45.6 min para los 446 árboles totales de los 20 sitios de muestreo, sin considerar el tiempo de traslado entre sitios. Esta actividad de registro fue realizada por una sola persona (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación del tiempo y número de personas requeridas para medir los parámetros de inventario (446 árboles) con el método propuesto (*iPad Pro*[®]) *versus* el método tradicional.

Parámetros medidos	Método <i>LiDAR+AR</i>					Método tradicional				
	<i>iPad Pro</i> [®] y <i>Arboreal</i> [®]				Tiempo total	Forcípula	Clinómetro		Cinta métrica	Tiempo total
	<i>DAP</i> y 446 coordenadas	<i>AT</i>	<i>FL</i>	<i>DC</i>	Todas las variables	<i>DAP</i> y 1 coordenada	<i>AT</i>	<i>FL</i>	<i>DC</i>	Todas las variables
Número de personas	1*		1*		1	2**		2**		2**
Tiempo utilizado (h)	0.76		3.55		4.31	3.99		10.65		14.64
Personas×hora	0.76		3.55		4.31	1.96		5.33		7.32

*Un solo operador, las mediciones se registran automáticamente en el dispositivo.

**Un medidor del *DAP*, *AT*, *FL* y *DC*, y otra persona que realiza el registro en un formato, el cual después deberá de capturarse en algún programa de cómputo. *DAP* = Diámetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa; *FL* = Altura de fuste limpio.

El tiempo de medición de los datos de referencia de los *DAP*, medidos con forcípula, entre dos personas y solo la coordenada del árbol central, fue en promedio de 12 min por sitio, con un total de 239.5 min (3 h 59.4 min). En contraste, con el método *iPad Pro*[®] se redujo el tiempo requerido para medir el *DAP* a 19.03 %; es decir, 5.25 veces menor (239.5 min vs. 45.6 min), con el plus de que lo realiza una sola persona (Cuadro 1). Todos los datos quedan registrados en un archivo digital exportable, además, para cada uno de los árboles escaneados se registra su posición geográfica, a diferencia del inventario tradicional, que solo obtiene la coordenada del árbol central, además se requiere que posteriormente todos los datos e información del inventario sea capturada mediante trabajo adicional de gabinete.

El tiempo de medición de los parámetros *AT*, *DC* y *FL* con la app *Arboreal*[®] osciló entre 2.5 y 18.9 min, con un promedio de 10.7 min por sitio y un tiempo total de

213.2 min (3 h 33 min), y fue realizado por una sola persona (Cuadro 1). En contraste, con instrumentos clásicos de medición para la *AT*, *FL* y *DC* con dos personas, el tiempo total de medición fue de 638.8 min (10 h 39 min). Se determinó que con el uso del *iPad Pro*[®] se redujeron las horas y personas requeridas para realizar las mediciones referidas a 33.37 % (cuadros 1 y 2), es decir, 3 veces menos (638.8 min vs. 213.2 min). Además, se tiene el plus de que lo realiza una sola persona y todos los datos quedan registrados en un archivo digital exportable, a diferencia del método tradicional, que requiere de dos personas, y la información de campo se tiene que capturar en gabinete, lo cual implica mayor consumo de tiempo y personal de oficina.

Cuadro 2. Estadísticas derivadas de la prueba *t-student* de dos muestras, entre el tiempo consumido en las mediciones de *LiDAR+AR* y con el método tradicional.

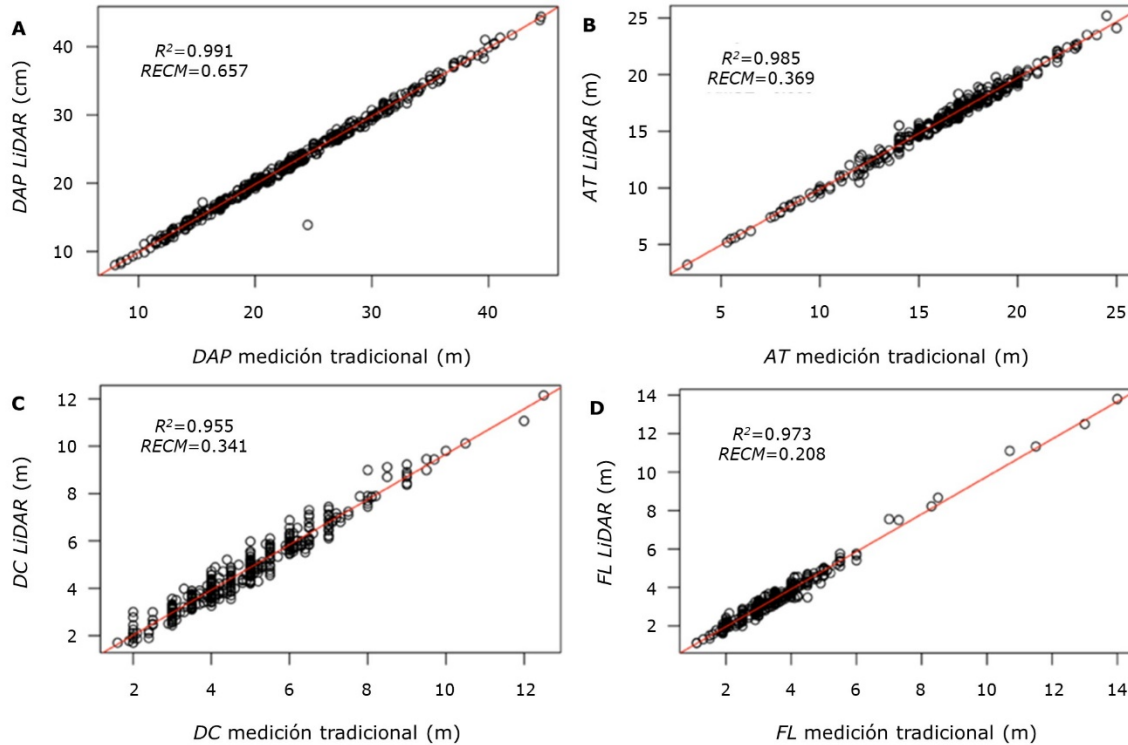
Parámetro	Valor de <i>t</i>	Grados de libertad	Valor de <i>p</i>	Estimaciones de muestra	
				Media <i>x</i>	Media <i>y</i>
<i>DAP</i>	9.775	20.669	3.36E-09	11.97	2.28
<i>AT-DC-FL</i>	7.558	25.275	6.06E-08	31.94	10.66

DAP = Diámetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa;
FL = Altura de fuste limpio.

Al comparar el tiempo registrado para realizar las mediciones con ambos métodos mediante la prueba *t-student*, se detectó que existen diferencias significativas (valor $p < 0.05$) (Cuadro 2).

En el comparativo por regresión lineal de los parámetros analizados, en términos de la desviación de las estimaciones con la tecnología *LiDAR+AR* y de las mediciones de referencia, se observó en general un buen ajuste, con una $R^2=0.991$ y un $RECM=0.657$ cm para el *DAP*; $R^2=0.985$ y un $RECM=0.369$ m para la *AT*, $R^2=0.955$ y un

$RECM=0.341$ cm para el *DC*, y $R^2=0.973$ y un $RECM=0.208$ cm para el *FL* (Figura 2, Cuadro 3).



A = DAP; B = AT; C = DC; D = FL.

Figura 2. Regresión lineal de la relación entre las mediciones de *LiDAR+AR* y las mediciones de los parámetros del arbolado con el método tradicional.

Cuadro 3. Valores de los coeficientes (*a* y *b*) para los parámetros del arbolado obtenidos por regresión lineal.

Parámetro	Estadístico					Error estándar residual (444 grados de libertad)	R^2	Estadística <i>F</i> (444 grados de libertad)	Valor de <i>p</i>
	Coefficiente estimado	Error estándar	Valor de <i>t</i>	$Pr(> t)$					
<i>DAP</i>	<i>a</i>	-0.122	0.107	-1.146	0.252	0.658	0.991	50 490.0	2.2E-16
	<i>b</i>	0.999	0.004	224.691	2.0E-16				

AT	a	0.030	0.094	0.320	0.749	0.370	0.985	29 870.0	2.2E-16
	b	0.985	0.006	172.840	2.0E-16				
DC	a	0.104	0.050	2.087	0.038	0.341	0.955	9 462.0	2.2E-16
	b	0.956	0.010	97.272	2.0E-16				
FL	a	0.008	0.028	0.272	0.786	0.208	0.973	16 260.0	2.2E-16
	b	0.976	0.008	127.519	2.0E-16				

DAP = Diámetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa;
FL = Altura de fuste limpio.

El buen ajuste de las ecuaciones de predicción de los parámetros dendrométricos medidos con los métodos *LiDAR+AR* y tradicional (Figura 2, Cuadro 3), también se corroboró con la prueba *t* de dos muestras de *Welch*, con la cual no se detectaron diferencias significativas ($p\text{-value}>0.05$) para obtener las mediciones del *DAP*, *AT*, *DC* y *FL* (Cuadro 4). Por lo tanto, se puede asumir que existe igualdad en las estimaciones de tales parámetros medidos con el *iPad Pro*[®] como método alternativo (*LiDAR+AR*) y los obtenidos de forma convencional (forcípula, clinómetro y cinta métrica), debido a los altos valores de R^2 y bajos valores del *RECM*.

Cuadro 4. Estadísticas derivadas de la prueba *t-student* de dos muestras, entre las mediciones de *LiDAR+AR* y el método tradicional.

Parámetro	Prueba <i>t</i> de dos muestras			Estimaciones de muestra	
	Valor de <i>t</i>	Grados de libertad	Valor de <i>p</i>	Media <i>x</i>	Media <i>y</i>
<i>DAP</i>	0.323	889.990	0.746	22.966	22.814
<i>AT</i>	0.999	889.950	0.317	16.231	16.025
<i>DC</i>	0.978	889.570	0.328	4.787	4.680
<i>FL</i>	0.884	889.890	0.377	3.414	3.338

DAP = Diámetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa;
FL = Altura de fuste limpio.

Discusión

Con los escaneos *LiDAR* con *iPad Pro*[®] se logró 100 % de detección de árboles con $DAP > 7.5$ cm, esto implica que los escaneos y las nubes de puntos se generan de manera completa en el área del fuste que se desea medir (altura de 1.30 m desde el nivel del suelo), lo cual coincide con Bobrowski *et al.* (2022), Brach *et al.* (2023) y Çakir *et al.* (2021), quienes también detectaron 100 % de los árboles medidos. En otros estudios se citan porcentajes de detección menores, al comparar el uso de aplicaciones de escaneo *LiDAR* para *iPad Pro*[®] Gollob *et al.* (2021) y Wang *et al.* (2022) documentan una detección de 85 a 97 %; con escáner láser móvil (MLS) y escaneo láser personal (PLS); Bauwens *et al.* (2016), Ko *et al.* (2021) y Zhou *et al.* (2019) detectaron porcentajes inferiores a 100 % en árboles con $DAP > 10$ cm. El porcentaje de detección disminuye en parcelas de muestreo con densidad alta de árboles y $DAP < 5$ cm (Bauwens *et al.*, 2016; Gollob *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2019).

Çakir *et al.* (2021) utilizaron el sensor *LiDAR* del *iPad Pro*[®] para generar modelos 3D y estimar la variable *DAP* comparándolo con estimaciones hechas mediante TLS, el mejor ajuste fue para la estimación de *DAP* con TLS ($R^2=0.995$, $RECM=7.02$ cm); con *iPad Pro*[®] la R^2 fue de 0.995 y el $RECM$ 8.72 cm. En tanto, Bobrowski *et al.* (2022) al comparar mediciones con TLS y nubes de puntos generadas mediante el sensor *LiDAR* del *iPad Pro*[®], mediante la app *Abound Capture*[®] obtuvieron, al ajustar el perímetro a la altura del pecho (*PAP*), una $R^2=0.899$ y $RECM=7.41$ para la tableta, y una $R^2=0.912$ y $RECM=6.51$ para el TLS.

Cuando Brach *et al.* (2023) compararon mediciones de *DAP* con métodos tradicionales *versus* nubes de puntos generadas con *iPad Pro*[®], registraron un ajuste con una $R^2=0.990$ y $RMSE=5.340$ cm. Se resalta que las aplicaciones de escaneo *LiDAR* usadas por Bobrowski *et al.* (2022), Brach *et al.* (2023), Çakir *et al.* (2021), Gollob *et al.* (2021) y Wang *et al.* (2022) para medir *DAP* no fueron desarrolladas para tal efecto, a diferencia de la que se usó en el presente estudio

(*ForestScanner*[®]), la cual fue exclusivamente desarrollada para la medición de *DAP* en inventarios forestales (Tatsumi et al., 2021). Tal situación fue favorable para mejorar la detección de todos los árboles propuestos para inventario en el presente estudio ($DAP > 7.5$ cm), así como la calidad de las nubes de puntos (más densas).

En comparación con las técnicas de medición tradicionales, el tiempo total de medición con el *iPad Pro*[®] fue 3.4 veces más rápido (cuadros 1 y 2), lo cual coincide con los trabajos realizados por Gollob et al. (2021), Ko et al. (2021) y Wang et al. (2022), con 3.2, 2.5 y 3.8 veces más rápida la medición del *DAP*, respectivamente.

En relación con la variable *AT*, en la literatura solo se indica su estimación con dispositivos como *LiDAR* móvil (Heo et al., 2019) y *smartphone* con RGB-D SLAM (Ahamed et al., 2023; Fan et al., 2018). Para las variables *DC* y *FL* no se identificaron estudios que usen este tipo de tecnologías en dispositivos móviles para su estimación.

Gollob et al. (2021) señalaron que, en general, los $DAP > 5$ cm se sobrestimaron y que los $DAP > 35$ cm se subestimaron, al igual que Wang et al. (2022), tanto con el *iPad Pro*[®] como con el PLS, independientemente del método de ajuste. Asimismo, Bobrowski et al. (2022), Brach et al. (2023), Çakir et al. (2021) y Wang et al. (2022) identificaron que los errores se debían a la falta de un posproceso de la nube de puntos generada con la aplicación, para lo cual, y de acuerdo con Hernández (2020), tales nubes tienen que exportarse a una computadora y usar un *software* especializado para tal efecto.

Los hallazgos del presente estudio muestran que, en los cuatro parámetros estudiados, el ajuste de la línea de regresión explica de 97 a 99 % de la variabilidad en los datos (Figura 2; Cuadro 4). Esto sugiere que hay una fuerte correlación entre los métodos evaluados; las mínimas diferencias en las mediciones entre ellos se deben a la relación lineal establecida, por lo que las mediciones efectuadas con un método pueden predecirse con alta precisión en función de las del otro. Lo anterior se debe a que los algoritmos de la app *ForestScanner*[®] fueron creados exclusivamente

para detección y medición de *DAP* en coníferas, y su uso ha sido probado en diferentes condiciones de bosque natural y bosques plantados (MAPRY Co. Ltd., 2022; Tatsumi *et al.*, 2021).

Las comparaciones gráficas (Figura 2) evidencian que la relación entre la estimación de los parámetros con tecnología *LiDAR+AR* y la realizada con métodos tradicionales, presentan una tendencia similar. Esto coincide con Zhou *et al.* (2019), quienes estimaron los *DAP* con MLS y obtuvieron un ajuste con una $R^2=0.99$ y $RECM=0.70$ cm. Asimismo, Heo *et al.* (2019) calcularon con alta precisión la *AT* de árboles urbanos ($R^2=0.98$ y $RECM=0.359$ m), mientras que en árboles de un bosque plantado la R^2 fue de 0.99 y el $RECM$ de 0.462 m. No se identificó algún estudio en el que se hayan estimado mediante algún dispositivo móvil (*LiDAR* móvil, *AR* o algún otro sensor) los parámetros *DC* y *FL*.

Una de las principales ventajas de los sistemas de escaneo láser personales y móviles, como ha sido demostrado en el presente estudio y otros estudios (Bobrowski *et al.*, 2022; Brach *et al.*, 2023; Çakir *et al.*, 2021; Gollob *et al.*, 2021; Tatsumi *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022) es el tiempo rápido de escaneo, la alta precisión ($RECM<1$ cm), pero sobre todo, el costo del dispositivo, ya que el PLS (*GeoSLAM ZEB HORIZON*) utilizado por Gollob *et al.* (2021) tiene un costo aproximado de 50 000 dólares. Otra ventaja del *iPad Pro*® es que está disponible una amplia variedad de apps de escaneo láser para la construcción de modelos y nubes de puntos 3D.

Los TLS convencionales tienen un alcance de entre 100 y 2 000 m (Hernández, 2020; Tomaščík *et al.*, 2017) dependiendo de la marca; por lo tanto, pueden proporcionar mediciones para diámetros mayores, alturas totales de árboles grandes y formas diversas de copas. En contraste, el sensor *LiDAR* del *iPad Pro*® solo proporciona mediciones para una distancia máxima de 5 m. Por lo tanto, una de sus principales desventajas es su alcance limitado, el cual hace que sea casi imposible derivar otra información más allá de la posición del fuste y el *DAP*,

además de algunas características del sotobosque. Sin embargo, los escaneos con el *iPad Pro*[®] no requieren de posproceso y es tan preciso como un TLS midiendo *DAP*, con una precisión de ± 1 cm según el fabricante (Apple Inc., 2022; Calders, 2015; Hernández, 2020). El *LiDAR* del *iPad Pro*[®] en combinación con la tecnología *AR* también funciona para estimar la *AT* (Kuželka et al., 2020).

En este estudio, se usó la combinación referida, así el sensor *LiDAR* del *iPad Pro*[®] se aplicó para medir los *DAP* y las ubicaciones geográficas respectivas, información que puede ser muy útil para estudios como modelos de competencia o biodiversidad. En tanto, las alturas de los árboles y sus métricas de copa se midieron con la tecnología de *AR*. Dai et al. (2019) utilizaron una combinación similar, quienes fusionaron nubes de puntos obtenidas mediante TLS y ALS para medir la *AT* y las métricas de copa.

Con base en Gollob et al. (2021), Piermattei et al. (2019) y Tomaščík et al. (2017), se identifica como una desventaja del escaneo láser que el porcentaje de detección de árboles sería menor en bosques naturales, donde la densidad y el número de estratos vegetales podrían representar problemas para visualizar la altura a la que se mide el *DAP*, debido a obstrucciones por herbáceas o arbustivas. En este sentido, se deben realizar más estudios en condiciones diferentes; por ejemplo, con especies arbóreas tropicales con presencia de herbáceas y arbustivas en el sotobosque, y en condiciones de altas densidades o pendientes pronunciadas.

Comparación con otros estudios

En el Cuadro 5 se presenta para propósitos de comparación resultados de otros estudios que usaron dispositivos móviles, *LiDAR* o fotogrametría. Se enfatiza en investigaciones recientes que han utilizado equipo de bajo costo para medir

automáticamente las variables de inventario forestal. Se identifican diferentes estudios sobre medición de parámetros de inventarios forestales (principalmente *DAP* y *AT*) mediante nubes de puntos derivadas de fotogrametría o sensores *LiDAR*.

Cuadro 5. Listado de estudios que han usado dispositivos móviles para registrar parámetros del arbolado para inventario forestal.

Referencia	Dispositivo/tecnología aplicada	Núm. de árboles	Tipo de bosque	Detección (%)	R ²	RECM (cm)
Este estudio	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>ForestScanner</i> ®	446	Plantado Coníferas	100	<i>DAP</i> =0.99	<i>DAP</i> =0.657
					<i>AT</i> =0.98	<i>AT</i> =0.369
	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>Arboreal</i> ®			100	<i>DC</i> =0.95	<i>DC</i> =0.341
					<i>FL</i> =0.97	<i>FL</i> =0.208
Guenther et al. (2024)	<i>iPad Pro</i> ®	203	Natural Mixto	100	<i>DAP</i> =0.98	<i>DAP</i> =1.550
Ahamed et al. (2023)	Smartphon e/fotogrametría	414	Urbano Mixto	100	<i>DAP</i> =0.98	<i>DAP</i> =1.550
Gülci et al. (2023)	<i>iPhone Pro</i> ®	105	Plantado Mixto	100	<i>DAP</i> =0.89	<i>DAP</i> =2.330
Brach et al. (2023)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>Lumentum</i>	776	Natural Mixto	100	<i>DAP</i> =0.990	<i>DAP</i> =5.340
Bobrowski et al. (2022)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>Abound Capture</i>	100	Urbano Mixto	100	<i>PAP</i> =0.90	<i>PAP</i> =7.410
	TLS/ <i>FARO FOCUS 3D X130</i>				<i>PAP</i> =0.91	<i>PAP</i> =6.510
McGlade et al. (2022)	<i>Azure Kinect/regular laptop single</i>	502	Plantado Mixto			<i>DAP</i> =8.430
Wang et al. (2022)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>Zappcha</i>	150	Plantado Coníferas	90	<i>DAP</i> =0.52	<i>DAP</i> =5.200
Çakir et al. (2021)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>Forge</i>	62	Natural Coníferas	100	<i>DAP</i> =0.98	<i>DAP</i> =0.590
	TLS/ <i>FARO Focus M70</i>				<i>DAP</i> =0.99	<i>DAP</i> =0.560
Gollob et al. (2021)	<i>iPad</i> ®/ <i>3D Scanner App</i>	424	Natural Mixto	97.33		<i>DAP</i> =3.640
	<i>iPad</i> ®/ <i>Polycam</i> ®			90.65		<i>DAP</i> =4.510
	<i>iPad</i> ®/ <i>SiteScape</i> ®			94.68		<i>DAP</i> =3.130
	PLS/ <i>GeoSLAM ZEB HORIZON</i>			99.52		<i>DAP</i> =1.590
Tatsumi et al. (2021)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>ForestScanner</i>	672	Natural y plantado	100	<i>DAP</i> =0.96	<i>DAP</i> =2.270
Mokroš et al. (2021)	<i>iPad Pro</i> ®/ <i>3D Scanner App</i>	74	Natural Latifoliadas	77.24	<i>DAP</i> =0.97	<i>DAP</i> =3.140
Liu et al. (2020)	MLS/ <i>Velodyne VLP-16</i>	180	Urbano Mixto	100	<i>DAP</i> =0.97	<i>DAP</i> =2.500
Zhou et al. (2019)	MLS/ <i>Velodyne VLP-16</i>	71	Urbano Latifoliadas	100	<i>DAP</i> =0.99	<i>DAP</i> =0.700

Heo et al. (2019)	<i>MLS/SLAM</i>	39	Urbano Latifoliadas	100	<i>DAP</i> =0.91 <i>AT</i> =0.98	<i>DAP</i> =3.77 <i>AT</i> =0.359
Piermattei et al. (2019)	<i>CRP/Nikon® D800</i>	140	Natural Mixto	84.25		<i>DAP</i> =3.090
	<i>TLS/Riegl VZ-2000</i>			93.75		<i>DAP</i> =1.780
Tomaščík et al. (2017)	<i>Tango®/Lenovo® Phab 2 Pro</i> multiple	118	Natural Coníferas			<i>DAP</i> =1.150
	<i>CRP/Canon® EOS 5D Mark II</i> multiple					<i>DAP</i> =1.830
Hyyppä et al. (2018)	<i>Tango®/Lenovo® Phab 2 Pro</i> single	240	Natural Coníferas			<i>DAP</i> =0.730
	<i>Kinect/regular computer</i> single					41
Bauwens et al. (2016)	<i>MLS/ZEB1</i>	331	Natural Mixto	91	<i>DAP</i> =0.99	<i>DAP</i> =1.110
Brouwer (2013)	<i>Kinect/regular laptop multiple</i>	150	Natural Mixto	83.75		<i>DAP</i> =1.300
	<i>TLS/Riegl VZ-400 multiple</i>			91.75		<i>DAP</i> =0.740

DAP = Diámetro a la altura del pecho; *PAP* = Perímetro a la altura del pecho; *AT* = Altura total; *DC* = Diámetro de copa; *FL* = Altura de fuste limpio.

La aplicación del sensor *LiDAR* del *iPad Pro®* es un método relativamente reciente por lo que puede considerarse novedoso, ha sido utilizado por Bobrowski et al. (2022), Brach et al. (2023), Çakir et al. (2021), Gollob et al. (2021), Guenther et al. (2024), Gülci et al. (2023), Mokroš et al. (2021), Tatsumi et al. (2021) y Wang et al. (2022), y solo para medir el *DAP*. En este estudio, se usó el *iPad Pro®*, el cual para México representa el primer dispositivo móvil a nivel personal con un sensor *LiDAR* integrado combinado con la tecnología *AR*, para medir los parámetros *DAP*, *AT*, *FL* y *DC* relevantes para inventarios forestales. Los otros estudios se pueden agrupar según las siguientes tecnologías: *Google Tango®* (Hyyppä et al., 2018; Tomaščík et al., 2017), *Microsoft Kinect®* (Hyyppä et al., 2018; McGlade et al., 2022) y fotogrametría (Piermattei et al., 2019; Tomaščík et al., 2017).

Con respecto al *RECM* en la estimación del *DAP*, en comparación con otros estudios, en este estudio los valores fueron mejores y similares a los que obtuvieron Bobrowski et al. (2022), Brach et al. (2023), Çakir et al. (2021), Guenther et al.

(2024) y Gülci *et al.* (2023) que utilizaron *iPad Pro*[®], así como a los de Hyypä *et al.* (2018) y Zhou *et al.* (2019) que usaron *Google Tango*[®] y *Kinect*[®], fotogrametría y *MLS/Velodyne VLP-16*, respectivamente (Cuadro 5).

Se resalta que el conjunto completo de parámetros de los árboles que se midieron (ubicación, *DAP*, *AT*, *DC* y *FL*), no se estimaron en los estudios que se consignan en el Cuadro 5, pues la mayoría solo estimaron *DAP*. Una evaluación comparativa de los parámetros medidos en los diferentes estudios se dificulta por que se usaron tecnologías diferentes bajo distintas estructuras y tipos de bosque.

Esta contribución podrá coadyuvar a que se aumente el uso o adopción de la metodología de referencia para mediciones con tecnología *LiDAR* y *AR* integrados en dispositivos móviles personales, tales como el *iPad Pro*[®] (o cualquier otro dispositivo *LiDAR* móvil de bajo costo), la cual a futuro se vislumbra con alto potencial de uso operativo en comparación con otras metodologías alternativas bajo el contexto de inventario forestal en bosques plantados.

Conclusiones

Se demuestra que para determinar los parámetros forestales: diámetro a la altura del pecho, altura total, altura de fuste limpio y diámetro de copa, las aplicaciones y el flujo de trabajo de la combinación *LiDAR+AR* requieren menos tiempo y personal, en comparación con los instrumentos de medición forestal convencionales. Esta estrategia y método sencillo puede reducir significativamente los costos para realizar el inventario forestal en bosques plantados.

La presente contribución apoya a futuros usuarios del sensor *LiDAR iPad Pro*[®], para tomar una decisión informada sobre cómo usar esta reciente técnica de percepción remota incorporada en dispositivos móviles comerciales. Se han demostrado sus

ventajas (lo puede aplicar una sola persona y el almacenamiento de datos es automático y digital), también se han identificado sus limitaciones, así como la configuración y aplicaciones que se pueden utilizar para el inventario de parcelas forestales o sitios de muestreo. Esta novedosa tecnología *LiDAR* móvil en dispositivos personales, representa el siguiente nivel (después de las tecnologías TLS, MLS y PLS) orientada hacia una metodología de inventario forestal asequible y eficiente.

Futuros estudios deberán enfocarse en evaluar el rendimiento de *LiDAR* móvil en dispositivos personales bajo condiciones diferentes a la de bosques plantados, como bosque natural tropical de latifoliadas y otros ecosistemas forestales, además de la comparación con dispositivos *LiDAR* terrestre y aerotransportado.

Agradecimientos

Al Programa de Becas Posdoctorales en la UNAM (POSDOC) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, por el financiamiento al primer autor para realizar estancia posdoctoral. Al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México, por las facilidades otorgadas para realizar la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones por autor

José Antonio Hernández-Moreno: planteamiento, registro y análisis de los datos, elaboración de gráficas y redacción del manuscrito; Diego Rafael Pérez-Salicrup: planteamiento, seguimiento de los resultados, revisión y corrección del manuscrito; Alejandro Velázquez-Martínez: seguimiento de los resultados, revisión y corrección del manuscrito.

Referencias

- Ahamed, A., Foye, J., Poudel, S., Trieschman, E. & Fike, J. (2023). Measuring tree diameter with photogrammetry using mobile phone cameras. *Forests*, 14(10), 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>
- Apple Inc. (2022, April 11). *Store. Gift magic this holiday*. Apple store. <https://www.apple.com/store>
- Arboreal AB. (2022, March 22). *Arboreal-Tree* (3.5) [Aplicación móvil]. Apple Store. <https://apps.apple.com/us/app/arboreal-tree/id1444138299>
- Ayrey, E. & Hayes, D. J. (2018). The use of three-dimensional convolutional neural networks to interpret LiDAR for forest inventory. *Remote Sensing*, 10(4), 649. <https://doi.org/10.3390/rs10040649>
- Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K. & Lejeune, P. (2016). Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests*, 7(6), 127. <https://doi.org/10.3390/f7060127>
- Bobrowski, R., Winczek, M., Silva, L. P., Cuchi, T., Szostak, M. & Wezyk, P. (2022). Promising uses of the iPad Pro point clouds: The case of the trunk flare diameter estimation in the urban forest. *Remote Sensing*, 14(18), 4661. <https://doi.org/10.3390/rs14184661>

- Brach, M., Tracz, W., Krok, G. & Gasior, J. (2023). Feasibility of low-cost lidar scanner implementation in forest sampling techniques. *Forests*, 14(4), 706. <https://doi.org/10.3390/f14040706>
- Brouwer, T. 2013. Low budget ranging for forest management. A microsoft kinect study [Master's Thesis, Wageningen University]. <https://edepot.wur.nl/309838>
- Çakir, G. Y., Post, C. J., Mikhailova, E. A. & Schlautman, M. A. (2021). 3D LiDAR Scanning of urban forest structure using a consumer tablet. *Urban Science*, 5(4), 88. <https://doi.org/10.3390/urbansci5040088>
- Calders, K. (2015). *Terrestrial laser scanning for forest monitoring* [Doctoral's Thesis, Wageningen University]. Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/271212221_Terrestrial_laser_scanning_for_forest_monitoring
- Ciesielski, M. & Sterenczak, K. (2019). Accuracy of determining specific parameters of the urban forest using remote sensing. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 12(6), 498-510. <https://doi.org/10.3832/ifor3024-012>
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques*. John Wiley & Sons. https://fsapps.nwcg.gov/gtac/CourseDownloads/IP/Cambodia/FlashDrive/Supporting_Documentation/Cochran_1977_Sampling%20Techniques.pdf
- Comisión Nacional Forestal. (2014). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo. Versión 1.2. Muestreo 2014*. Comisión Nacional Forestal. www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodologicos/2014/A_nexo_procedimientos_muestreo_2014.pdf
- Dai, W., Yang, B., Liang, X., Dong, Z., Huang, R., Wang, Y. & Li, W. (2019). Automated fusion of forest airborne and terrestrial point clouds through canopy density analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156, 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.008>

- Elsherif, A., Gaulton, R. & Mills, J. (2018). Estimation of vegetation water content at leaf and canopy level using dual-wavelength commercial terrestrial laser scanners. *Interface Focus*, 8(2), Article 29503721. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0041>
- Estornell, J., Velázquez-Martí, A., Fernández-Sarría, A., López-Cortés, I., Martí-Gavilá J. & Salazar, D. (2017). Estimation of structural attributes of walnut trees based on terrestrial laser scanning. *Revista de Teledetección*, (48), 67-76. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7429>
- Fan, Y., Feng, Z., Mannan, A., Khan, T. U., Shen, C. & Saeed, S. (2018). Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile Phone with RGB-D SLAM. *Remote Sensing*, 10(11), 1845. <https://doi.org/10.3390/rs10111845>
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A. & Nothdurft, A. (2021). Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13(16), 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Guenther, M., Heenkenda, M. K., Morris, D. & Leblon, B. (2024). Tree diameter at breast height (DBH) estimation using an iPad Pro LiDAR scanner: A case study in boreal forests, Ontario, Canada. *Forests*, 15(1), 214. <https://doi.org/10.3390/f15010214>
- Gülci, S., Yurtseven, H., Akay, A. O. & Akgul, M. (2023). Measuring tree diameter using a LiDAR-equipped smartphone: a comparison of smartphone-and caliper-based DBH. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, Article 678. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11366-8>
- Heo, H. K., Lee, D. K., Park, J. H. & Thorne, J. H. (2019). Estimating the heights and diameters at breast height of trees in an urban park and along a street using mobile LiDAR. *Landscape and Ecological Engineering*, 15, 253-263. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00379-6>
- Hernández M., J. A. (2020). *Desarrollo de un método biométrico, mediante escáner láser terrestre, aplicado a bosques mixtos, en la Reserva de la Biosfera Mariposa*

Monarca [Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo].
Researchgate.

https://www.researchgate.net/publication/357229317_Desarrollo_de_un_metodo_biométrico_mediante_escaner_laser_terrestre_aplicado_a_bosques_mixtos_en_la_RBMM?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InByb2ZpbGUiLCJwYXVwIjoicHJvZmlsZSI6InBvc2l0aW9uIjoicGFnZUNvbnRlbnQifX0

Hyyppä, J., Virtanen, J. P., Jaakkola, A., Yu, X., Hyyppä, H. & Liang, X. (2018). Feasibility of Google Tango and kinect for crowdsourcing forestry information. *Forests*, 9(1), 6. <https://doi.org/10.3390/f9010006>

Infante G., S. y Zárata de L., G. P. (2012). *Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario*. Editorial del Colegio de Postgraduados.

Ko, C., Lee, S., Yim, J., Kim, D. & Kang, J. (2021). Comparison of forest inventory methods at plot-level between a backpack personal laser scanning (BPLS) and conventional equipment in Jeju Island, South Korea. *Forests*, 12(3), 308. <https://doi.org/10.3390/f12030308>

Kuželka, K., Slavík, M. & Surový, P. (2020). Very high-density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. *Remote Sensing*, 12(8):1236. <https://doi.org/10.3390/rs12081236>

Liang, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., Yu, X., Jaakkola, A. & Wang, Y. (2014). Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors*, 14(1), 1228-1248. <https://doi.org/10.3390/s140101228>

Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>

Liang, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Pfeifer, N., Holopainen, M., Brolly, G., Francesco, P., Hackenberg, J., Huang, H., Jo, H.-W., Katoh, M., Liu, L., Mokroš, M., Morel, J., Olofsson, K., Poveda-Lopez, J., Trochta, J.,

- ... & Wang, Y. (2018). International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *144*, 137-179. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
- Liu, T., Chang, L., Niu, X. & Liu, J. (2020). Pole-like object extraction and pole-aided GNSS/IMU/LiDAR-SLAM system in urban area. *Sensors*, *20*(24), 7145. <https://doi.org/10.3390/s20247145>
- MAPRY Co. Ltd. (2022, April 20). *ForestScanner* (1.0.2) [Aplicación móvil]. Apple store. <https://apps.apple.com/bo/app/forestscanner/id1599055402>
- McGlade, J., Wallace, L., Reinke, K. & Jones, S. (2022). The potential of low-cost 3D imaging technologies for forestry applications: Setting a research agenda for low-cost remote sensing inventory tasks. *Forests*, *13*(2), 204. <https://doi.org/10.3390/f13020204>
- Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A., Tomaščík, J., Chudá, J., Wężyk, P., Kuželka, K., Surový, P., Klimánek, M., Zięba-Kulawik, K., Bobrowski, R. & Liang, X. (2021). Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *104*, Article 102512. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102512>
- Musálem, M. A. (2006). *Silvicultura de plantaciones forestales comerciales*. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. https://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/silvicultura_plantaciones_forestales_comerciales_2006.pdf
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B. & Danson, F. M. (2015). Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, *1*, 239-251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- Piermattei, L., Karel, W., Wang, D., Wieser, M., Mokroš, M., Surový, P., Koreň, M., Tomaščík, J., Pfeifer, N. & Hollaus, M. (2019). Terrestrial structure from motion photogrammetry for deriving forest inventory data. *Remote Sensing*, *11*(8), 950. <https://doi.org/10.3390/rs11080950>

Ritter, T., Schwarz, M., Tockner, A., Leisch, F. & Nothdurft, A. (2017). Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests*, 8(8), 265. <https://doi.org/10.3390/f8080265>

Tatsumi, S., Yamaguchi, K. & Furuya, N. (2021). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(7), 1603-1609. <https://doi.org/10.1101/2021.12.11.472207>

Tomaščík, J., Saloň, Š., Tunák, D., Chudý, F. & Kardoš, M. (2017). Tango in forests—An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>

Wang, F., Heenkenda, M. K. & Freeburn, J. T. (2022). Estimating tree diameter at breast height (DBH) using an iPad Pro LiDAR sensor. *Remote Sensing Letters*, 13(6), 568-578. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2051635>

West, P. W. (2009). *Tree and forest measurement* (2nd Edition). Springer Berlin.

Zhou, S., Kang, F., Li, W., Kan, J., Zheng, Y. & He, G. (2019). Extracting diameter at breast height with a handheld mobile LiDAR system in an outdoor environment. *Sensors*, 19(14), 3212. <https://doi.org/10.3390/s19143212>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.