

INF VS SIBIFOR EN LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN PARA BOSQUES DE SAN JUAN QUIAHIJE, OAXACA, MÉXICO

INF VS SIBIFOR ON VOLUME ESTIMATION FOR FORESTS OF SAN JUAN QUIAHIJE, OAXACA, MEXICO

Juan Carlos Guzmán-Santiago^{1,4*}, Héctor Manuel De los Santos-Posadas¹, Benedicto Vargas-Larreta²,
Martín Gómez-Cárdenas^{3,4}, Miriam del Sol Hernández-Mendoza⁴ y Gregorio Morales-Reyes⁴

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado en Ciencias Forestales, Texcoco, Estado de México, México. ²Tecnológico Nacional de México, Campus El Salto. Tecnológico No 101, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Uruapan, Uruapan, Michoacán, México. ⁴Centro de Investigación, Divulgación y Asesoría Técnica Forestal y Agropecuaria, Tlaxiaco, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia (guzmansa.forest22@gmail.com)

RESUMEN

Los inventarios forestales dependen de las ecuaciones de cubicación que se utilizan para la cuantificación del volumen o biomasa de los árboles en los rodales; los resultados variarán dependiendo del tipo de ecuación, así como de su capacidad predictiva. El objetivo de esta investigación fue comparar las estimaciones de volúmenes en pie cuando se utilizan las ecuaciones del Inventario Nacional Forestal (INF) vs las del Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor) para los diferentes componentes arbóreos de 25 especies de clima templado de San Juan Quiahije, Oaxaca, México. Se establecieron 450 sitios de 1000 m² donde se recopiló información de 16,863 árboles de los géneros *Pinus* y *Quercus*, siguiendo el manual recomendado por el Sistema de Planeación Forestal de Bosque Templado (SiPlaFor). Como criterio discriminante se utilizó la prueba de hipótesis con t-Student ($P \leq 0.05$) para determinar el mejor sistema de cubicación, así como un 10 % de las ramas para calcular el volumen total árbol (Vta) de cada especie con el INF. A través del volumen ha⁻¹ promedio por especie se evidencia que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos sistemas al traslaparse los intervalos de confianza de ambos sistemas; sin embargo, el SiBiFor es más conservador en la estimación del volumen. Esto estimula a utilizar las ecuaciones alométricas del SiBiFor para la elaboración de programas de manejo forestal maderable bajo el enfoque de sustentabilidad en el área de estudio.

Palabras clave: *Pinus*, *Quercus*, ecuaciones de volumen, inventario forestal, t-Student, volumen.

SUMMARY

Forest inventories depend on the cubication equations used to quantify the volume or biomass of trees in stands; results will vary depending on the equation type, as well as on its predictive ability. The objective of this research was to compare estimates of standing volumes when using the equations of the National Forest Inventory (NFI) vs those of the Forest Biometric System (SiBiFor) for volume estimation of the different tree components for 25 temperate climate species of San Juan Quiahije, Oaxaca, Mexico. Four hundred and fifty sites of 1000 m² were established where information was collected on 16,863 trees of the genera *Pinus* and *Quercus* following the manual recommended by the Temperate Forest Planning System (SiPlaFor). As a discriminant criterion the hypothesis test with t-Student ($P \leq 0.05$) was used to determine the best cubication system, as well as 10 % of the branches to calculate the total tree volume (Ttv) of each species with the NFI. By using

the average volume ha⁻¹ per species it was shown that there are no statistically significant differences between the two systems as the confidence intervals overlap; however, SiBiFor is more conservative in volume estimate. This encourages the use of SiBiFor allometric equations for the development of forest management programs under the sustainability approach in the study area.

Index words: *Pinus*, *Quercus*, forest inventory, t-Student, volume, volume equations.

INTRODUCCIÓN

La información volumétrica de las masas forestales se obtiene con frecuencia a través de inventarios forestales en los cuales las ecuaciones alométricas permiten estimar el volumen de interés de manera indirecta con algunas variables, como el diámetro normal y altura total del árbol en pie (Diéguez *et al.*, 2003), y constituyen una base científica imprescindible para el manejo del bosque con enfoque de sustentabilidad (Hernández-Cuevas *et al.*, 2018), lo cual es útil para los productores forestales.

A nivel de rodal, el volumen frecuentemente se calcula mediante el establecimiento de sitios de muestreo de dimensiones fijas, obteniendo así la suma de los volúmenes estimados de los árboles individuales (Sharma, 2021). Esta es la metodología más utilizada en la elaboración de los programas de manejo forestal maderable en México (Martínez-Ángel *et al.*, 2019). Si los errores de medición se consideran despreciables, entonces la estimación del volumen debería ser precisa y permitiría una aproximación adecuada, no solo del volumen, sino también de la biomasa y el carbono (Temesgen *et al.*, 2015); sin embargo, en estas operaciones se debe comprobar la precisión de las ecuaciones utilizadas en los procesos de cálculo para que sean válidas, ya que siempre existe la posibilidad de que la ecuación seleccionada no sea la mejor (Snee, 1977; Yang

et al., 2004); es decir, debe tener una consistencia biológica (Rykiel, 1996) para poder ser utilizada por los usuarios.

Durante décadas, en Oaxaca, México las existencias volumétricas de los bosques bajo manejo y aprovechamiento se han estimado utilizando las ecuaciones de volumen del Inventario Nacional Forestal (INF) (SARH, 1985). Éstas han estado disponibles en formato de tabla de volumen de fuste limpio y rollo total por árbol en grupos de especies por tipo botánico, en el que no se considera el volumen de ramas y en el que, no obstante el alto potencial de sesgo esperado por la heterogeneidad morfológica entre especies, se resta importancia a las diferencias naturales, entre ellas respecto a la precisión de las estimaciones. Estas ecuaciones fueron generadas con un enfoque de gran escala y para el diseño de políticas públicas estatales y regionales y no fueron ajustadas para la elaboración de planes de manejo a nivel local, debido a que eran las únicas disponibles.

Lo anterior motivó a investigadores de distintas instituciones de México a construir un Sistema Biométrico Forestal (CONAFOR, 2017), para el cual se desarrollaron ecuaciones a nivel de Unidad de Manejo Forestal Regional (UMAFOR) y especie para estimar el volumen de fuste (rollo total) y ramas (que sumados dan el volumen total árbol) (Vargas-Larreta *et al.*, 2017). En este contexto, el SiBiFor constituye una estrategia con enfoque de sustentabilidad para el aprovechamiento y manejo de los bosques y permite cumplir con la ley forestal que marca que los volúmenes deben ser reportados por especie (Santiago-García *et al.*, 2020). Desde la construcción del SiBiFor, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en algunos estados promueve que los prestadores de servicios técnicos o personas relacionadas con el ámbito forestal utilicen las ecuaciones del sistema biométrico para la elaboración de programas de manejo (SEMARNAT, 2018).

La importancia de las especies en la comunidad de Quiahije es mayor, por lo que incluso se conservan zonas con vegetación intacta, en las que existe un reservorio biológico amplio, de alta diversidad, apropiada tanto para la investigación básica, como para la investigación forestal aplicada. La vegetación bien conservada es poco común y constituye la condición idónea para el cálculo del volumen y la estimación de los potenciales máximos de producción antes de realizar el aprovechamiento a través de un plan de manejo forestal. El objetivo de la presente investigación fue comparar las diferencias en las estimaciones de volumen maderable en pie obtenido con las ecuaciones del INF y el SiBiFor en las especies de clima templado en San Juan Quiahije, Oaxaca, México con la hipótesis de que estadísticamente no existen diferencias significativas entre ambos sistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de San Juan Quiahije, al suroeste del estado de Oaxaca, México; pertenece a la región Costa, y de acuerdo al Registro Agrario Nacional (RAN), posee una extensión territorial de 24,914 ha. Se ubica dentro de las coordenadas extremas 16° 17' 46" a 16° 21' 33" latitud norte y 97° 17' 54" a 97° 25' 53" longitud oeste. El intervalo altitudinal del municipio va de los 680 a los 1970 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de Santiago Minas y Santa Cruz Zenzontepec, al sur con Santa Catarina Juquila y San Miguel Panixtlahuca, al este con Santa Catarina Juquila y al oeste con Tataltepec de Valdés (INEGI, 2023a). De acuerdo con información ambiental de INEGI (2023b), la orografía es accidentada, con pendientes elevadas, de 15 a 60 %. Los suelos son delgados con prevalencia de Litosoles, Cambisoles y Regosoles, con materia orgánica variable pero predominantemente de 1 a 5 % y localizada mayormente en el horizonte más superficial de 5-25 cm. La vegetación corresponde a bosques de pino y de pino-encino en las partes más elevadas y a ecotonales de selvas subperennifolias y subcaducifolias en las partes de menor altitud (INEGI, 2023b).

Obtención de los datos con el sistema SiPlaFor

Los datos fueron recolectados en 2021-2022 en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 2012, donde se establecieron 450 sitios circulares de 1000 m², distribuidos completamente al azar en una superficie de 3043.09 ha, de acuerdo con lo recomendado en el manual de Sistema de Planeación Forestal de Bosque Templado (CONAFOR, 2015).

En cada sitio se midieron la altura total (At, m) y el diámetro de los árboles mayores o iguales a 7.5 cm de diámetro normal (Dn). La At se midió con una pistola (Haga®, Nuremberg, Alemania) y el Dn (cm) se midió con una cinta diamétrica (Forestry Suppliers, Inc., Jackson, Mississippi, EUA) La muestra total fue de 16,863 árboles, correspondientes a 25 especies.

Inventario Nacional Forestal (INF) vs Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor)

Para conocer los intervalos de las diferencias en precisión que se obtiene entre ecuaciones de volumen pasadas y ecuaciones nuevas que representan a especies individuales, se optó por realizar un análisis comparativo entre las ecuaciones de los sistemas de cubicación del INF y del SiBiFor. Para el primer caso se tomaron

en consideración las ecuaciones utilizadas en el INF para el estado de Oaxaca, las cuales se expresan en las ecuaciones 1 a 4, mientras que las ecuaciones del SiBiFor son de 5 a 7. Para el cálculo del volumen de ramas (Vram) se agregó el 10 % [3].

INF

$$Vrta = \exp[\beta_0 + \beta_1 \times \ln(Dn) + \beta_2 \times \ln(At) + e] \quad \text{Ec. 1}$$

$$Vrta = \exp[\beta_0 + e] \times Dn^{\beta_1} \times At^{\beta_2} \quad \text{Ec. 2}$$

$$Vram = 0.10 \times Vrta \quad \text{Ec. 3}$$

$$Vta = 1.1 \times \exp[\beta_0 + e] \times Dn^{\beta_1} \times At^{\beta_2} \quad \text{Ec. 4}$$

SiBiFor

$$Vrta = \beta_0 \times Dn^{\beta_1} \times At^{\beta_2} + e_{Vrta} \quad \text{Ec. 5}$$

$$Vram = \beta_3 \times Dn^2 + e_{Vram} \quad \text{Ec. 6}$$

$$Vta = \beta_0 \times Dn^{\beta_1} \times At^{\beta_2} + \beta_3 \times Dn^2 + e_{Vta} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde: Vrta es el volumen rollo total árbol con corteza (m³), Vram es el volumen de ramas con corteza (m³), Vta el volumen total árbol con corteza (m³), Dn el diámetro normal (cm), At es la altura total (m) y β_i son los parámetros estimados.

En el Cuadro 1 se muestran los parámetros estadísticos que permitieron calcular el volumen de madera (Vrta + Vram = Vta) de todos los árboles muestreados.

Análisis estadístico

Se realizó una prueba t-Student con los volúmenes por ha estimados del INF y SiBiFor para verificar si las diferencias entre sistemas por especie eran estadísticamente significativas. Como hipótesis se asumió que la diferencia de los volúmenes obtenidos entre ambos grupos de ecuaciones es igual a cero, donde para cada prueba se obtuvo la probabilidad de rechazo (P ≤ 0.05). Para cada especie la diferencia se estimó a partir de sus respectivos valores individuales en forma directa y en porcentaje. El procedimiento anterior se realizó en el software R (R Development Core Team, 2023).

Dado que los datos utilizan un marco de muestreo simple al azar (MSA), se usaron estos estimadores para calcular el promedio y los intervalos de confianza Vrta y Vta para SiBiFor e INF. Se determinó de manera práctica si los intervalos del 95 % se traslapaban. Finalmente, se

consideró que la diferencia entre sistemas biométricos no es estadísticamente significativa al 0.05 de probabilidad de rechazo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

INF vs SiBiFor en volúmenes totales por ha (Vrta y Vta)

Una de las primeras dudas al utilizar las ecuaciones es si los resultados globales al acumular el total de especies por sitio generan diferencias en la estimación total. Esto es relevante, ya que la Ley general de Desarrollo Forestal Sustentable establece un límite del error de muestreo máximo del 10 % con una confiabilidad mínima del 95 %.

El Cuadro 2 presenta los estimadores de MSA para los volúmenes de madera usando cada sistema biométrico.

Al calcular los intervalos de confianza es posible ver que cuando se calcula el Vrta ambos sistemas ofrecen resultados estadísticamente iguales (0.05), pero SiBiFor es ligeramente más conservador en la estimación del volumen; es decir, ofrece la posibilidad de aprovechar el bosque de manera sustentable (Figura 1). Es el mismo caso cuando se comparan los resultados del Vta.

INF vs SiBiFor en volumen rollo total árbol (Vrta) y volumen total árbol (Vta) por especie

Las especies arbóreas del género *Pinus* resultaron con mayor volumen promedio por hectárea, siendo *P. maximinoi* (93.29, 102.62 m³ ha⁻¹) el caso más evidente, seguida por *P. oocarpa* (60.94, 67.04 m³ ha⁻¹) y *P. douglasiana* (25.03, 27.53 m³ ha⁻¹); en contraste, *P. devoniana* y *P. lawsonii* presentaron un volumen menor, oscilando de 0.23 a 0.25 m³ y de 0.19 a 0.21 m³ ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 3).

En lo referente al género *Quercus*, se distinguen *Q. scytophylla* (9.56, 10.52 m³ ha⁻¹), seguido por *Q. acutifolia* (5.34, 5.87 m³ ha⁻¹) y *Q. elliptica*, con valores de 4.77, 5.25 m³ ha⁻¹, mientras que *Q. martinezii* registró volúmenes considerablemente más bajos (0.04, 0.05 m³ ha⁻¹), incluso comparando con *Arbutus xalapensis* (0.20, 0.22 m³ ha⁻¹) y *Clethra mexicana* (3.00, 3.30 m³ ha⁻¹).

Las especies previamente mencionadas presentaron resultados similares al calcular su volumen con las ecuaciones propuestas por SiBiFor, evidenciando escasas diferencias significativas y un traslape efectivo de los intervalos de confianza.

En este contexto, es relevante destacar las diferencias de volumen promedio (ha) en Vrta y Vta para cada especie, al comparar los datos obtenidos de INF vs SiBiFor (Cuadro 3).

Cuadro 1. Parámetros de las ecuaciones del INF (1985) vs SibFor (2017) para el estado de Oaxaca.

Especie	INF				SibFor			BA		
	$\exp(-\beta_0)$	β_1	β_2	R^2	β_0	β_1	β_2	β_3	REMC	R^2
<i>Pinus pseudostrabus</i> var. <i>apulcensis</i>	-9.7544	1.82089	1.03604	0.99	0.000048	1.99676	0.907928	0.0000482	0.29	0.97
<i>Pinus douglasiana</i>	-9.7544	1.82089	1.03604	0.99	0.0000449	2.08092	0.850263	0.0000648	0.26	0.99
<i>Pinus maximinoi</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.0000394	2.00896	0.958365	0.0000616	0.15	0.99
<i>Pinus montezumae</i>	-9.7544	1.82089	1.03604	0.99	0.0000377	1.87353	1.104706	0.0000539	0.39	0.97
<i>Pinus ayacahuite</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.0000597	1.93095	0.904159	0.0000397	0.19	0.99
<i>Pinus oocarpa</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.000035	1.9033	1.099488	0.0000514	0.14	0.98
<i>Pinus devoniana</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.0000375	1.99265	1.004279	0.0000937	0.11	0.98
<i>Pinus lawsonii</i>	-9.6268	1.78704	1.06618	0.98	0.0000501	1.9492	0.948578	0.0000618	0.25	0.98
<i>Pinus pringlei</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.000037	1.85893	1.150489	0.0000712	0.21	0.96
<i>Pinus teocote</i>	-9.9996	1.91126	1.05269	0.99	0.000048	1.91711	0.993241	0.0000726	0.14	0.98
<i>Quercus acutifolia</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus candicans</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus castanea</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus conspersa</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus crassifolia</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000325	1.83624	1.211783	0.0001626	0.16	0.92
<i>Quercus elliptica</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus frutex</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus laeta</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus magnoliifolia</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus martinzii</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus occoteifolia</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Quercus rugosa</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000675	1.84015	0.914584	0.0001362	0.19	0.87
<i>Quercus scytophylla</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000384	1.87307	1.085998	0.0001691	0.20	0.91
<i>Arbutus xalapensis</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000844	1.66019	1.029328	0.0001319	0.12	0.90
<i>Clethra mexicana</i>	-9.4121	1.70376	1.09456	0.92	0.0000289	1.77772	1.344946	0.0000634	0.1483	0.98

INF: Inventario Nacional Forestal en Oaxaca, SibFor: Sistema Biométrico Forestal, BA: bondad de ajustes, REMC: raíz del error medio cuadrático, R^2 : coeficiente de determinación, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 : parámetros estimados.

Cuadro 2. Estimadores poblacionales bajo MSA para Vta y Vrta (m³ totales ha⁻¹).

Sistema	Parámetro	VtaHa	VrtaHa
INF	Promedio	273.4	248.6
	VarS	25395.1	20987.7
	VarMed	64.0	52.9
	EM 95 %	5.75 %	5.75 %
SiBiFor	Promedio	258.80	232.21
	VarS	22395.77	19024.75
	VarMed	56.41	47.92
	EM 95 %	5.71 %	5.86 %

MSA: muestreo simple al azar, VarS: varianza de la muestra, VarMed: varianza de la media, EM 95 %: error de muestreo, VtaHa: volumen total por hectárea, VrtaHa: volumen rollo total por hectárea.

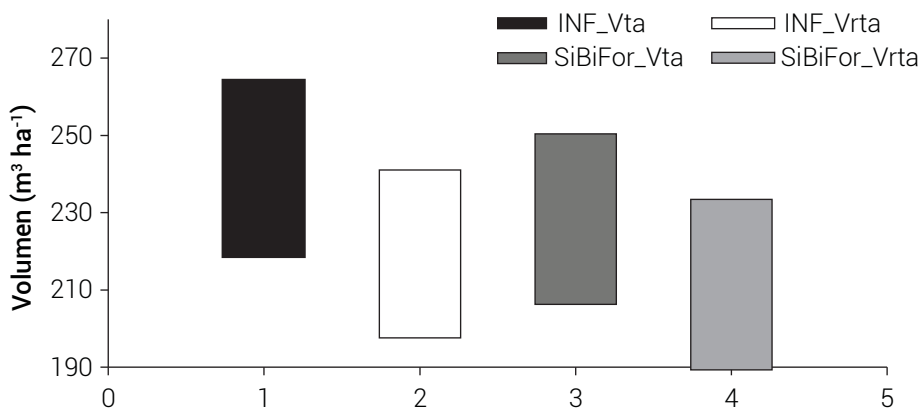


Figura 1. Intervalos de confianza en el cálculo de volumen total por hectárea de todas las especies.

Los resultados indican que en las 25 especies no se aprecian diferencias estadísticas significativas, enfatizando que las ecuaciones del INF tienden a sobrestimar ligeramente los valores de volumen en comparación con SiBiFor; sin embargo, es importante destacar que *P. oocarpa* fue la única especie en la que se observó una notoria diferencia absoluta de 8.47 (Vrta) y 10.29 (Vta) m³ ha⁻¹ entre ambos sistemas, aunque ésta no es estadísticamente significativa. En todos los casos, el SiBiFor se destaca como un enfoque más conservador para la estimación del volumen de los árboles dentro de los rodales.

Los resultados del Vta, en particular para el género *Quercus*, son en general más optimistas cuando se usa el SiBiFor. En este caso hay que destacar que las ecuaciones del INF son muy generales y todas las especies usan una sola ecuación Vrta, con la que después se calcula el Vta; además, los resultados podrían haber sido diferentes si se

hubiese empleado el mismo porcentaje de ramas que se utiliza en la actualidad en algunos municipios del estado de Puebla (20 % para *Pinus*, 25 % para *Abies* y 30 % para *Quercus* y otras hojosas para obtener el Vta) (Cuadro 3). En el caso de Oaxaca, asignar 10 % parece razonable siendo que el SiBiFor estima un porcentaje aproximado entre 4 y 7 % para pinos y otras coníferas.

Dado que las ecuaciones utilizadas por el INF carecen de un parámetro (b_p) destinado a estimar el volumen de las ramas de los árboles, se ha observado una sobrestimación del volumen total del árbol (Vta) de algunas especies maderables (SEMARNAT, 2008). En contraste, las ecuaciones empleadas por el SiBiFor sí incorporan esta variable, por lo que los resultados son más conservadores y, en consecuencia, posibilitan su aplicación en planes de manejo forestal enfocados en la sustentabilidad (Vargas-Larreta et al., 2017). En este

Cuadro 3. Resumen del valor promedio del volumen por hectárea de los dos sistemas.

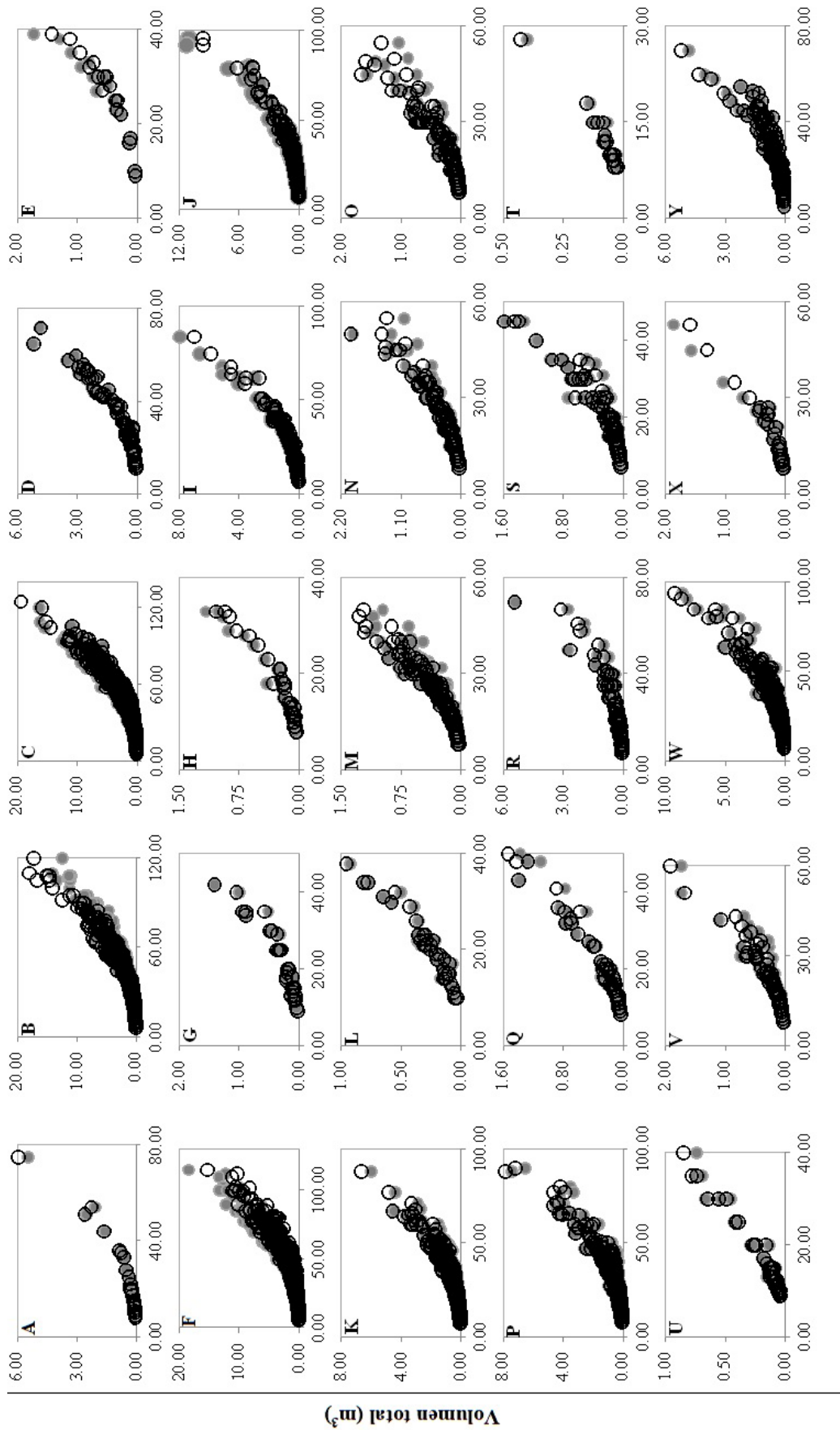
Especies	INF (m ³ ha ⁻¹)		SIBIFOR (m ³ ha ⁻¹)		Diferencias (m ³ ha ⁻¹) (%)		P ≤ 0.05 (m ³ ha ⁻¹)	
	Vrta	Vta	Vrta	Vta	Vrta %	Vta %	Vrta	Vta
<i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i>	0.35	0.38	0.38	0.42	-8.59	-9.88	0.90	0.88
<i>Pinus douglasiana</i>	25.03	27.53	29.82	32.07	-16.07	-14.16	0.33	0.39
<i>Pinus maximinoi</i>	93.29	102.62	87.79	94.93	6.27	8.10	0.48	0.36
<i>Pinus montezumae</i>	1.69	1.86	1.67	1.79	1.10	3.78	0.98	0.94
<i>Pinus ayacahuite</i>	0.22	0.24	0.20	0.21	9.60	13.48	0.94	0.92
<i>Pinus oocarpa</i>	60.94	67.04	52.47	56.74	16.16	18.14	0.18	0.13
<i>Pinus devoniana</i>	0.23	0.25	0.22	0.26	4.65	-4.18	0.92	0.93
<i>Pinus lawsonii</i>	0.19	0.21	0.17	0.19	11.80	12.44	0.88	0.87
<i>Pinus pringlei</i>	2.82	3.10	2.55	2.81	10.26	10.22	0.80	0.80
<i>Pinus teocote</i>	6.30	6.93	5.72	6.39	10.19	8.44	0.74	0.78
<i>Quercus acutifolia</i>	5.34	5.87	4.48	6.34	19.18	-7.33	0.47	0.74
<i>Quercus candicans</i>	0.21	0.23	0.17	0.24	26.49	-0.46	0.80	0.99
<i>Quercus castanea</i>	1.02	1.12	0.83	1.26	23.20	-11.16	0.48	0.69
<i>Quercus conspersa</i>	0.83	0.92	0.68	1.00	21.92	-8.34	0.49	0.75
<i>Quercus crassifolia</i>	0.87	0.96	0.71	1.08	22.87	-11.33	0.55	0.72
<i>Quercus elliptica</i>	4.77	5.25	4.10	5.66	16.36	-7.19	0.53	0.75
<i>Quercus frutex</i>	0.34	0.37	0.28	0.39	22.12	-4.57	0.65	0.91
<i>Quercus laeta</i>	0.84	0.92	0.69	1.07	21.81	-13.99	0.45	0.56
<i>Quercus magnoliifolia</i>	0.50	0.55	0.40	0.58	24.37	-6.02	0.57	0.87
<i>Quercus martinezii</i>	0.04	0.05	0.03	0.32	37.88	-84.96	0.82	0.20
<i>Quercus ocoteifolia</i>	0.29	0.32	0.05	0.23	477.61	42.15	0.78	0.20
<i>Quercus rugosa</i>	0.43	0.47	0.37	0.52	16.92	-9.37	0.70	0.64
<i>Quercus scytophylla</i>	9.56	10.52	8.01	10.72	19.37	-1.88	0.27	0.27
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.20	0.22	0.15	0.20	33.32	9.84	0.58	0.85
<i>Clethra mexicana</i>	3.00	3.30	2.75	3.06	9.21	7.78	0.68	0.72

INF: Inventario Nacional Forestal en Oaxaca, SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal, Vrta: volumen rollo total árbol, Vta: volumen total árbol, %: porcentaje de diferencias de ambos sistemas.

contexto, es relevante mencionar que la idoneidad de la ecuación de Schumacher y Hall, recomendada por el SiBiFor para la estimación de volúmenes de ramas ha sido respaldada por la investigación llevada a cabo por Guzmán-Santiago *et al.* (2020), quienes obtuvieron resultados favorables en el caso de *Abies religiosa* en 21 UMAFORs en ocho estados de la República Mexicana, lo que fortalece la confiabilidad y aplicabilidad de dicha ecuación en el ámbito de la silvicultura y el manejo sostenible de los recursos forestales. Para una mejor comprensión del comportamiento de ambos sistemas

proyectaron los volúmenes con respecto al diámetro de cada árbol y por especie, tal como se ilustra en la Figura 2.

Aunque las diferencias en el volumen promedio por ha entre ambos sistemas no resultaron estadísticamente significativas (se puede usar cualquier sistema o una combinación entre sistemas de manera confiable), el SiBiFor representa una valiosa oportunidad para los prestadores de servicios técnicos especializados en la elaboración de programas de manejo forestal, así como para personas interesadas sobre el tema (estudiantes o



Diámetro normal (cm)
 ● INF_Vta ○ SIBiFor_Vta

Figura 2. Comparación del volumen de ambos sistemas: A: *Pinus pseudostrobus*, B: *P. douglasiana*, C: *P. maximinoi*, D: *P. montezumae*, E: *P. ayacahuite*, F: *P. oocarpa*, G: *P. devoniana*, H: *P. lawsonii*, I: *P. pringlei*, J: *P. teocote*, K: *Quercus acutifolia*, L: *Q. candicans*, M: *Q. castanea*, N: *Q. conspersa*, O: *Q. crassifolia*, P: *Q. elliptica*, Q: *Q. frutex*, R: *Q. laeta*, S: *Q. magnoliifolia*, T: *Q. martinezii*, U: *Q. ocoteifolia*, V: *Q. rugosa*, W: *Q. scytophylla*, X: *Arbutus xalapensis*, Y: *Clethra mexicana*.

investigadores de la rama). Al adoptar este sistema se logra un aprovechamiento forestal sostenible, respaldado por una herramienta silvícola cuantitativa de alta confiabilidad (Santiago-García *et al.*, 2015).

Los hallazgos presentados corroboran la pertinencia de la ecuación de Schumacher y Hall, tal como fue sugerido por Vargas-Larreta *et al.* (2017) al abordar la caracterización del volumen (V_{rta} - V_{ta}) de 97 especies arbóreas de bosques templados y tropicales, donde obtuvieron coeficientes de determinación ajustados superiores al 90 %.

Esta ecuación en particular ha mostrado buenos resultados en estudios similares, tal como lo corroboran los hallazgos de Simental-Cano *et al.* (2017) al analizar 12 especies forestales, entre ellas especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. Es importante destacar que esta notable capacidad predictiva también ha sido observada en la investigación de Guzmán-Santiago *et al.* (2020), quienes obtuvieron resultados aceptables en cuanto a V_{rta} , V_{rma} y V_{ta} para *Abies religiosa*, evaluados en 21 UMAFORs correspondientes a ocho estados de la República Mexicana.

Este estudio es valioso para los núcleos ejidales y comunales involucrados en la gestión forestal, dado que hasta la fecha se carece de investigaciones referente al tema (INF vs SiBiFor) para la mayoría de las localidades de Oaxaca; por ende, este estudio adquiere un carácter referencial en el ámbito forestal, instando a la generación de futuras investigaciones con el propósito de enriquecer el conocimiento en esta área.

En diversos estudios, se ha constatado que la ecuación propuesta por Schumacher y Hall (1933) ha demostrado su precisión para estimar el volumen de diversas especies, tanto de climas templados como tropicales, basándose en criterios estadísticos respaldados por trabajos como los de Bailey (1994) y Corral-Rivas y Návar-Cháidez (2009), entre otros autores.

Un ejemplo destacado de esta confirmación lo proporciona el estudio de Vargas-Larreta *et al.* (2017) donde se generó el SiBiFor para diversas especies en 11 estados de la República Mexicana. Es relevante destacar que el SiBiFor, en general, presenta resultados más conservadores, especialmente en la cubicación del V_{rta} , en comparación con el INF para la mayoría de las especies bajo análisis.

CONCLUSIONES

No existen diferencias estadísticas significativas entre ambos sistemas volumétricos (INF vs SiBiFor) para las 25 especies evaluadas; sin embargo, se constató que

el SiBiFor es el más indicado para la estimación de los volúmenes. La congruencia de las ecuaciones del Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor) con los datos observados en las diferentes especies forestales demuestra su validez y utilidad como herramienta para calcular el volumen de los diferentes tipos de árboles, subrayando así su relevancia en el ámbito.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHcyT) por la beca de la estancia postdoctoral en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. A las autoridades agrarias de la comunidad de San Juan Quiahije, Juquila, así como a los colegas, Ing. Gregorio Morales y la Biol. María del Sol, por su apoyo en el levantamiento de datos en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Bailey R. L. (1994) A compatible volume-taper model based on the Schumacher and Hall generalized constant form factor volume equation. *Forest Science* 40:303-313, <https://doi.org/10.1093/forestscience/40.2.303>
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2015) SiPlaFor, Sistema de Planeación Forestal de Bosque Templado. Manual de usuario. Versión 2.0. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. <http://siplafor.cnf.gob.mx/siplafor/inicio/index.php> (Octubre 2023).
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2017) SiBiFor. Biblioteca digital del sistema biométrico para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. <http://fcfposgrado.ujed.mx/sibifor/inicio/> (Octubre 2023).
- Corral-Rivas S. y J. J. Návar-Cháidez (2009) Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15:5-13.
- Diéguez A. U., M. Barrio A., F. Castedo D., A. D. Ruiz G., M. F. Álvarez T., J. G. Álvarez G. y A. Rojo A. (2003) Dendrometría. Mundi-Prensa. Madrid, España. 327 p.
- Guzmán-Santiago J. C., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez y B. Vargas-Larreta (2020) Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia Forestal* 23:99-113, <https://doi.org/10.14483/2256201X.15557>
- Hernández-Cuevas M., W. Santiago-García, H. M. De los Santos-Posadas, P. Martínez-Antúnez y F. Ruiz-Aquino (2018) Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Agrociencia* 52:437-453.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023a) División por entidad federativa con base en el marco geoestadístico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México. www.inegi.gob.mx/geo/informaciongeografica/oaxaca (Octubre 2023).
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023b) Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Ciudad de México. www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/default.aspx?ag=202130001 (Octubre 2023).
- Martínez-Ángel L., H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, F. Cruz-Cobos y G. Quiñonez-Barraza (2019) Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. *Agrociencia* 53:381-401.
- R Development Core Team (2022) R. A Language and environment for

- statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/> (Octubre 2023).
- Rykiel Jr. E. J. (1996) Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229-244, [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00152-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00152-2)
- Santiago-García W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, J. J. Corral-Rivas, G. Rodríguez-Ortiz y E. Santiago-García (2015) Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 21:95-110, <https://doi.org/10.21829/myb.2015.213459>
- Santiago-García W., G. Ángeles-Pérez, G. Quiñonez-Barraza, H. M. De los Santos-Posadas y G. Rodríguez-Ortiz (2020) Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. *Madera y Bosques* 26:e2622004, <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622004>
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1985) Inventario Forestal del Estados de Oaxaca, México. Número Especial 58. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D. F. 157 p.
- Schumacher F. X. and F. S. Hall (1933) Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47:719-734.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2008) NORMA Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006, Que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Diario Oficial de la Federación. Edición 17 de octubre 2008. México, D. F. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5064731&fecha=17/10/2008#gsc.tab=0 (Marzo 2024).
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018) Requerimiento Programa de manejo maderable, bitácora 21/C9-0523/03/18. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México.
- Sharma M. (2021) Total and merchantable volume equations for 25 commercial tree species grown in Canada and the Northeastern United States. *Forests* 12:1270, <https://doi.org/10.3390/f12091270>
- Simental-Cano B., C. A. López-Sánchez, C. Wehenkel, B. Vargas-Larreta, J. G. Álvarez-González and J. J. Corral-Rivas (2017) Species-specific and regional volume models for 12 forest species in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23:155-171, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.01.004>
- Snee R. D. (1977) Validation of regression models: methods and examples. *Technometrics* 19:415-428, <https://doi.org/10.1080/00401706.1977.10489581>
- Temesgen H., D. Affleck, K. Poudel, A. Gray and J. Sessions (2015) A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30:326-335, <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114>
- Vargas-Larreta B., J. J. Corral-Rivas, O. A. Aguirre-Calderón, J. O. López-Martínez, H. M. De los Santos-Posadas, F. J. Zamudio-Sánchez, ... y C. G. Aguirre-Calderón (2017) SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23:437-455, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Yang Y., R. A. Monserud and S. Huang (2004) An evaluation of diagnostic tests and their roles in validating forest biometric models. *Canadian Journal of Forest Research* 34:619-629, <https://doi.org/10.1139/x03-230>