

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Ecuaciones De Predicción De Volumen Para Mangle Rojo (*Rhizophora mangle* L.) En Soto
La Marina, Tamaulipas

Por:

JOSE JONATHAN FLORES FLORES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Ecuaciones De Predicción De Volumen Para Mangle Rojo (*Rhizophora mangle* L.) En Soto
La Marina, Tamaulipas

Por:

JOSE JONATHAN FLORES FLORES

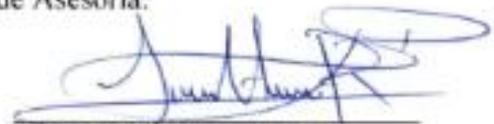
TESIS

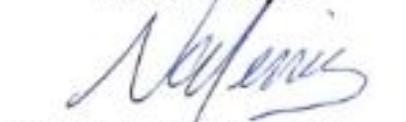
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

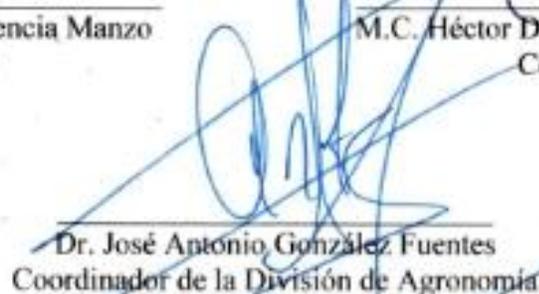
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Celestino Flores López
Asesor Principal


M.C. Adrián Hernández Ramos
Asesor Principal Externo


M.C. Salvador Valencia Manzo
Coasesor


M.C. Héctor Darío González López
Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2021



El presente estudio de tesis ha sido apoyado y financiado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave 38111-425103001-2175. Proyecto que pertenece al Departamento Forestal, a cargo del profesor investigador Dr. Celestino Flores López.

DEDICATORIA

A mis padres:

Francisca Flores Guerrero y Jenaro Flores Vázquez, por darme su admiración, cariño y apoyo en todo momento, me han dado lo mejor, pusieron su confianza en mí y me forjaron con principios y valores, gracias por todos sus consejos, por ser mi ejemplo a seguir y demostrarme que nunca hay que rendirse, les dedico este logro de todo corazón por haber luchado para que pudiera cumplir mis metas, sin ustedes esto no sería posible, nunca terminare de agradecerles.

A mi hermana:

María Fernanda Flores Flores, por ser mi motivación de seguir adelante, gracias por las palabras de cariño y apoyo que me has brindado sin importar el tiempo y la distancia, siempre serás la clave de mi felicidad.

A mi compañera incondicional:

Wendy Lizeth Mendoza Salas, por todo el apoyo que me has dado en cada decisión e incitarme a luchar por lo que deseo, tu confianza, alegría, felicidad, pero sobre todo la paciencia que me has tenido, son la esencia para hoy concluir esta meta que compartiré siempre contigo.

A mi tía:

María Lucía Flores Guerrero, por apoyarme y aconsejarme en cada punto de mi vida indicándome que la familia es lo más importante, aun cuando el destino nos lleve por rumbos diferentes.

En memoria de mis abuelitos:

Policarpo Flores Cruz, Zenaida Guerrero Arista y Encarnación Vázquez Reyes, por ser un punto esencial en mi vida y compartirme su sabiduría con buenos consejos, los llevare siempre en mi mente y corazón.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por este logro tan importante que me permite demostrar el fruto de tanto esfuerzo, agradezco que sea mi guía en este camino de la vida y que en momentos de debilidad haya sido mi sustento.

A mi *ALMA MATER* la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por darme la oportunidad de formarme profesionalmente y permitirme representarla dejándome experiencias inolvidables.

A mis asesores, el Dr. Celestino Flores L., el M.C. Adrián Hernández R., al M.C. Salvador Valencia M. y al M.C. Héctor Darío González L. por haber compartido sus conocimientos, tiempo y paciencia para culminar este proyecto.

A mis padres, por todo el esfuerzo físico que han dedicado y el apoyo moral que me han dado, principalmente por darme la oportunidad de estudiar y concluir una carrera profesional.

A mi hermana, por compartir horas de su tiempo en la captura de datos, que a pesar de ser estresante y aburrido hubo espacios de diversión y alegría.

A mi güerita, por tener la perseverancia de lidiar conmigo en las buenas y malas, por guiarme y estar a mi lado en cada paso difícil, y algo importante, por ser estricta dándome esos golpes de cabeza para que ya concluyera este proyecto.

A la Familia Mendoza Salas, por la confianza, hospitalidad y apoyo que me han brindado durante el tiempo de conocernos.

A mis amigos Fernando Tovilla, Roberto Flores y Arlley Gómez, por su apoyo en el levantamiento de datos y sobre todo por su gran amistad a lo largo de los años compartiendo buenos recuerdos.

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

Firma y Nombre

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos e hipótesis	6
2 MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1 Descripción del área de estudio	7
2.2 Diseño de muestreo	9
2.3 Selección y tamaño de la muestra	9
2.4 Medición de variables	10
2.5 Registro de datos	11
2.6 Cálculo del volumen individual por tipos dendrométricos	11
2.6.1 Volumen del tocón	11
2.6.2 Volumen del fuste	12
2.6.3 Volumen de la punta	13
2.6.4 Volumen de las ramas	13
2.7 Modelos de regresión utilizados	14
2.8 Análisis estadístico	16
2.9 Elección del modelo	16
2.10 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen	17
2.11 Construcción de la tabla de predicción de volumen	19
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20

3.1	Ajuste y selección de modelos para estimar volumen del fuste total y volumen total árbol	20
3.2	Validación de ecuaciones de volumen.....	29
3.3	Tablas de predicción de volumen a partir del mejor modelo para <i>Rhizophora mangle</i>	30
4	CONCLUSIONES	32
5	RECOMENDACIONES.....	33
6	LITERATURA CITADA	34
	APÉNDICE	44

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Frecuencia de árboles por categoría diamétrica y altura para <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	10
Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	14
Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación... ..	15
Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación... ..	16
Cuadro 3. Parámetros de las modelos de regresión para volumen fuste total de <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	20
Cuadro 4. Parámetros de las modelos de regresión para volumen total árbol de <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	20
Cuadro 5. Comparación de estadísticos de las mejores ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	22
Cuadro 6. Comparación de estadísticos de las mejores ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	26
Cuadro 7. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los mejores cinco modelos para volumen fuste total en <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	29

Cuadro 8. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los mejores cinco modelos para volumen total árbol en <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	30
Cuadro 9. Tabla de predicción de volumen fuste total (m ³) para <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	31
Cuadro 10. Tabla de predicción de volumen total árbol (m ³) para <i>Rhizophora mangle</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio para <i>Rhizophora mangle</i> L. en la localidad La Pesca de Soto La Marina, Tamaulipas.	8
Figura 2. Comparación gráfica de volumen estimado contra volumen observado de los mejores modelos para volumen fuste total.	24
Figura 3. Comparación gráfica de volumen estimado contra volumen observado de los mejores modelos para volumen total árbol.	28

RESUMEN

El mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.) es una de las especies con mayor importancia económica y ambiental para la localidad de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Por ende, es importante tener herramientas como ecuaciones para predecir el volumen y poder dar un buen manejo y conservación de la especie. Se seleccionaron 125 árboles para diferentes categorías diamétricas y de alturas, para cada uno se calculó el volumen aplicando tipos dendrométricos en función a la forma del árbol o rama.

Se utilizaron 16 modelos de predicción de volúmenes, analizados a través del programa estadístico Statistical Analysis System (SAS 9.4) y con el procedimiento Proc Model. Los criterios de selección de ajuste de los modelos fueron el coeficiente de determinación R^2 , el coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} , el cuadrado medio del error (CME) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME). Los resultados estadísticos indican que el mejor modelo para volumen sin ramas fue el M9 (Takata) con valor de $R^2_{aj}= 0.94$ y más bajo en RCME= 0.00286, mientras que para volumen total con ramas el mejor fue M8 (Honner), con valores superiores a 0.90 en R^2_{aj} y menores valores en la RCME=0.00498. Además, los supuestos de regresión se cumplieron y se justificaron. En la validación de modelos se obtuvieron valores entre 0.003316 y 0.004555 para la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) y de 0.001277 a 0.000817 en el error medio absoluto (EMA), contemplando estos resultados y el valor de la diferencia agregada en porcentaje (DA%) los modelos subestiman al volumen observado entre 7.9% y 9.2% referente a la media de los datos observados.

La obtención de volúmenes es efectiva para *Rhizophora mangle* a través de los modelos ajustados.

Palabras clave: *Rhizophora mangle*, tipos dendrométricos, tabla de volúmenes, modelos de predicción.

ABSTRACT

The red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) is one of the species with the greatest economic and environmental importance for the town of La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Therefore, it is important to have tools such as equations to predict the volume and to be able to give good management and conservation of the species. 125 trees were selected for different diameter and height categories, for each one the volume was calculated by applying tree stem classical geometries based on the shape of the tree or branch.

16 volume prediction models were used, analyzed through the statistical program Statistical Analysis System (SAS 9.4) and with the Proc Model procedure. The selection criteria for fitting the models were the determination coefficient (R^2), the adjusted determination coefficient of (adjusted R^2), the mean square of the error (MSE) and the root of the mean square of the error (RMSE). The statistical results indicate that the best model for volume without branches was M9 (Takata) with a value of adjusted $R^2 = 0.94$ and lower in $RMSE = 0.00286$, while for total volume with branches the best was M8 (Honner), with higher values at 0.90 in adjusted R^2 and lower values in the $RMSE = 0.00498$. Furthermore, the regression assumptions were met and justified. In the model validation, values between 0.003316 and 0.03004555 were obtained for the square root of the mean square error (Root MSE) and from 0.001277 to 0.000817 in the mean absolute error (MAE), considering these results and the value of the added difference in percentage (AD%) the models underestimate the observed volume between 7.9% and 9.2% referring to the mean of the observed data.

Obtaining volumes is effective for *Rhizophora mangle* through fitted models.

Keywords: *Rhizophora mangle*, tree stem classical geometries, table of volumes, prediction models.

1 INTRODUCCIÓN

En el mundo existen diferentes ecosistemas, dentro de los cuales el manglar es uno de los más importantes, este ecosistema cubre aproximadamente 14 millones de hectáreas, lo cual representa casi el 1% de toda la superficie terrestre. Estos ecosistemas son el resultado de la interacción de la superficie terrestre y marina, y están ubicados en las costas inundables por oleajes. A pesar de ser un ecosistema con especies arbóreas y arbustivas su distribución está determinada por los rangos latitudinales, delimitado entre 30° de latitud norte y 30° latitud sur por todo el mundo (Giri *et al.*, 2011; Kauffman *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2018).

Los ecosistemas de manglar a pesar de que representan poca superficie a nivel mundial, cuentan en promedio con 68 especies de mangle distribuidos en dos regiones, la primera que es el centro de diversidad de los manglares en el mundo, se conoce como Indo-Pacífica, esta región cuenta con 52 especies de mangle entre los cuales sólo 42 se consideran como verdaderos; y la segunda cubre la región Atlántico y Pacífico Oriental con un total de 11 especies, y todas éstas pueden tener una asociación con más 200 especies de otros géneros (Villalba, 2005; Giesen *et al.*, 2006; Clough, 2013). En el continente americano sólo se encuentran 11 de las especies de mangles de todo el mundo; México abarca el cuarto lugar con mayor superficie de manglar por debajo de Indonesia, Brasil y Australia (Spalding *et al.*, 1997; Yáñez-Arancibia y Lara-Domínguez, 1999; Valderrama *et al.*, 2017).

En particular, para el continente americano están presentes las especies de *Acrostichum aureum* L., *Avicennia bicolor* Standl., *Avicennia germinans* (L.) L., *Avicennia schaueriana* Stapf y Leechm. ex, *Conocarpus erectus* L., *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f., *Nypa fruticans* Wurmb., *Pelliciera rhizophorae* Triana y Planch., *Rhizophora harrisonii* L., *Rhizophora mangle* L. y *Rhizophora racemosa* G. Mey., las cuales son consideradas como especies de mangles verdaderos (FAO, 2007). Por el contrario, algunas de las especies del género *Rhizophora*, *Avicennia* y *Laguncularia*, son mucho más comunes por la importancia de servicios ambientales y el beneficio económico que brindan, ya que se aprovechan para la venta de pilotes, leña y la producción de carbón (Travieso-Bello, 2006; CONABIO, 2008).

Sin embargo, para México sólo se tienen cinco de todas las especies de mangle existentes que son: *R. mangle* (mangle rojo), *R. harrisonii* (mangle caballero), *A. germinans* (mangle negro), *L. racemosa* (mangle blanco) y *C. erectus* (mangle botoncillo); cabe señalar que esta

última especie puede encontrarse en los listados como un mangle verdadero, pero por las características morfológicas y fisiológicas que el grupo de los estrictos o verdaderos mangles presentan, éste se considera un falso mangle (Tomlinson, 1986; López y Ezcurra, 2002; Villalba, 2005; Tomlinson, 2016).

Los manglares son importantes en el aspecto ambiental, esto deriva de que tienen una buena productividad en la cantidad de nutrientes; generalmente la mayoría de estos son exportados a las franjas litorales cercanas a la costa, para terminar en fijación por algas y pastos marinos, formando una cadena trófica en beneficio a otras especies como los peces. De igual manera los manglares amortiguan el impacto de los sedimentos que son arrastrados del interior de la superficie terrestre, por efecto de las corrientes de ríos y arroyos, teniendo menos daños sobre los arrecifes de coral, además el sistema radicular de éstos tiene la función natural de servir como filtro biológico, procesan contaminantes presentes, nutrientes en exceso, degradan la materia orgánica y metales pesados como el cadmio, plomo y zinc (Villalba, 2005; CONABIO, 2008; Naranjo-Sánchez y Troncoso-Olivo, 2008; Uribe y Urrego, 2009).

También en el ámbito biológico los manglares juegan un papel importante dentro del ciclo del carbono, ya que son uno de los principales sumideros de CO₂ (Duke *et al.*, 2007; De la Peña *et al.*, 2010; Kauffman *et al.*, 2013). Además, estos ecosistemas proporcionan hábitat a una gran infinidad y variedad de especies, entre ellos mamíferos, aves, reptiles, insectos, peces, moluscos y diferentes microorganismos; e igual constituyen sitios con las principales áreas de anidación, reproducción y alimentación para la fauna silvestre (Dahdouh-Guebas *et al.*, 2005; Alongi, 2008; Uribe y Urrego, 2009; Rodríguez-Zúñiga *et al.*, 2013).

A pesar de la importancia de los manglares, ya mencionada, en el mundo existe una gran presión sobre éstos; en la década 1990 estuvieron desapareciendo severamente a una tasa aproximada del 1% a 2% anual, donde, en 26 de los 121 países con este ecosistema había condiciones al borde de la extinción, partiendo del año 2000 a la fecha, la tasa de deforestación ha bajado considerablemente dando una pérdida máxima de 0.39% anualmente (Wilkie y Fortuna, 2003; Hamilton y Casey, 2016); estudios realizados afirman que las principales causas de amenaza de los manglares son el cambio climático, el desarrollo urbano, el cambio de uso de suelo y la sobreexplotación del recurso, asimismo gran parte de la destrucción de estos ecosistemas se debe a los múltiples beneficios que ofrece, en particular los que dejan recursos económicos a los pobladores (Duke *et al.*, 2007; Gaxiola, 2011).

Aunque en México se encuentran áreas de protección que reciben apoyo del gobierno y dependencias privadas, se determinó que la cobertura de los bosques de manglar estuvo disminuyendo consecutivamente a una tasa del 2.5% anual a finales del siglo XX, no obstante estudios recientes demuestran que la tasa de deforestación a nivel nacional disminuyó a 0.42% por año. De antemano la situación de los manglares mexicanos sigue siendo alarmante, ya que las especies de mangle en México están sujetas a protección especial en categoría de “Amenazadas” por la Norma NOM-059-SEMARNAT-2010, a excepción de *R. harrisonii*, pero la pérdida de este ecosistema aún sigue dando cifras positivas (INE, 2005; Rodríguez-Zúñiga *et al.*, 2013).

Con base en Rodríguez-Zúñiga *et al.*, (2013), México alberga una gran distribución de bosques de manglar en 17 de los estados costeros, siendo el límite los situados en Sonora por la región del Océano Pacífico y por el Golfo de México los manglares de la Laguna Madre del estado de Tamaulipas. Genéricamente la cobertura de manglar en “Guerrero y Baja California Sur” manifiestan la mayor pérdida con 1,448 ha (17.8%) y 117 ha (0.4%); mientras que Sinaloa con 4,296 ha (5.6%), Quintana Roo 1,854 ha (1.4%) y Yucatán con 1,823 ha (2.0%) obtuvieron una ganancia neta en la cobertura total de manglar (Valderrama *et al.*, 2017).

Como se ha mencionado, los manglares de humedales estuarinos, presentan características en el aspecto ambiental y biológico que benefician al ambiente; pero también su formación leñosa y densa, que puede formar árboles del estrato arbustivo y arbóreo superando los 25 m de altura, hacen posible su aprovechamiento para el uso humano (Rzedowski, 2006; Moreno-Casasola e Infante, 2016). La deforestación de manglares por tala inmoderada para el consumo humano, ha sido una fuente principal en la pérdida de estos ecosistemas; ahora bien, gracias a la Norma NOM-022-SEMARNAT-2003, que brinda especificaciones para el aprovechamiento y restauración de los humedales en zonas de manglar, el ajuste de modelos para estimar volúmenes, son una solución al manejo forestal, con base a la cuantificación, aprovechamiento sustentable y preservación de los mismos (Navarro-Martínez *et al.*, 2002; Tapia y Návar, 2011; Fierro-Cabo *et al.*, 2013).

El manejo forestal es una de las actividades más importantes en la forestaría, dentro del cual, cuantificar las existencias maderables de un sitio, rodal o bosque es muy importante para la toma de decisiones (Aguilar y Velarde, 2001; Corral-Rivas y Návar-Cháidez, 2009; Tapia y Návar, 2011). La estimación del volumen generalmente se realiza con modelos de regresión,

pero, la forma más común de utilizarlos, es mostrarlos en forma tabular en las llamadas “tablas de volumen”, donde se muestra el volumen promedio de árboles en pie con un determinado diámetro y altura, facilitando el cálculo a una sola lectura (Schumacher y Hall, 1933; Aguilar y Velarde, 2001; Costas *et al.*, 2006; Montes *et al.*, 2008; Da Cunha *et al.*, 2009)

Las ecuaciones de predicción de volumen, también llamadas tablas de volumen pueden construirse con métodos matemáticos o gráficos, utilizando el mejor modelo que se ajuste a la forma real del árbol, y en relación a lo que se pretende mostrar pueden obtenerse de volumen total (V_t), volumen comercial (V_c) y con o sin corteza (V_{cc} , V_{sc}); igual, dependiendo del número de parámetros a evaluar, pueden ser de una entrada o dos, llegando a utilizar el coeficiente mórfo como una tercera variable (Lema, 1979; Montes *et al.*, 2008);

En México los estudios dendrométricos, que dan como resultado funciones y ecuaciones de predicción de volumen, se han enfocado principalmente a especies de zonas templadas y tropicales, por mencionar algunas especies, están: *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. en la Sierra Madre Oriental (Tapia y Návar, 1998); *P. oocarpa* Schiede ex Schlechtendal. en el Bosque La Primavera, Jalisco (Rodríguez *et al.*, 2009); *P. arizonica* Engelm, *P. durangensis* Ehren, *P. engelmanni* Carr., *P. leiophylla* Schl. y Cham., *Q. rugosa* Neé y *Q. sideroxylla* Humb. y Bonpl. en Unidad de Manejo Forestal 08-05 San Juanito, Chihuahua (UMAFOR San Juanito A.C., 2013); *P. lawsonii* Roetzl. y *P. oocarpa* en la Sierra Purépecha, Michoacán (Ramos-Uvilla *et al.*, 2014); *Quercus spp.* en la región noroeste de Chihuahua, México (Pompa y Solis, 2008); *Peltogyne mexicana* MARTÍNEZ, en Guerrero, México (Navarro-Martínez *et al.*, 2002); *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Roseen en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca (Galán *et al.*, 2008).

Dando continuación, es importante señalar que en las zonas áridas y semi áridas del país, se encuentran especies que se usan con fines maderables, a las cuales se les han generado ecuaciones de volumen en atribución al manejo forestal, como: *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de México (Silva-García *et al.*, 2018). Por otro lado, es muy escaso y limitado encontrar tablas y ecuaciones de volumen para las especies de manglares mexicanos o particularmente son pocas las áreas con bosques de manglar a los que se les ha dado importancia por los bienes y servicios que ofrecen, entre los cuales se encuentra el trabajo para: *R. mangle* en el estero palo verde, Laguna de Cuyutlán, Colima (Téllez-García y Valdez-Hernández, 2012).

Uno de los estudios más completos con resultados únicamente para los ecosistemas de manglar, es el que presenta INRENARE-OIMT (1997); aunque no es un trabajo para los manglares de México, contiene información sobre una tabla de volúmenes “con corteza y altura comercial” para las especies de *Rhizophora spp*, realizada con datos específicos del Inventario Nacional Forestal de manglares en la zona de Chiriquí, Panamá; por otra parte, se muestran diferentes funciones de predicción volumétrica con una y dos variables para (altura total y altura comercial) en las especies de *Rhizophora spp.*, *P. rhizophorae*, *A. germinans*, *A. bicolor* y *L. racemosa*, en las zonas de Chiriquí, Azuero y Chame (INRENARE-OIMT, 1997).

Tomando en cuenta que los modelos de regresión son la fuente de construcción para las ecuaciones de predicción de volumen, la mayoría de los estudios sólo ejecutan funciones de volumen, como en los trabajos para especies de *R. mangle*, *R. harrizonii*, *L. racemosa* y *A. germinans*, en los manglares de América Central (Ammour, 1999; Marmillod *et al.*, 2001; Paniagua *et al.*, 2001). Y para las especies de *L. racemosa* y *R. mangle* en Nayarit y Colima, México (Valdez, 2004 y Téllez-García y Valdez-Hernández, 2012).

Las ecuaciones de predicción de volumen representan una de las mejores herramientas para la silvicultura, pero, anteriormente eran muy generalizadas abarcando especies del mismo género, lo que provocó que se dejaron de utilizar; por lo que, en 1997 se reformó la Ley Forestal y su reglamento, para establecer que los programas de manejo muestren la información dasométrica a nivel especie evitando la sobreestimación de los recursos; en especial porque no todas las especies presentan las mismas características durante su desarrollo, además las condiciones de clima, suelo y la ubicación geográfica son muy diferentes entre zonas forestales, aunque se trate de la misma especie (Melchor *et al.*, 2010).

En La Pesca de Soto La Marina, Tamaulipas, se descubrieron condiciones donde los manglares se desarrollan en temperaturas mínimas por debajo de los 0° C, (entre -5° C y -2° C) como reporte de temperatura mínima diaria durante la temporada invernal, mientras que en otras regiones del Pacífico y Golfo de México, los manglares no radican en temperaturas inferiores a los 14° C, por lo que es primordial establecer alternativas para su preservación, procurando el aprovechamiento de éstos manglares a base de tablas de volumen específicamente para cada especie (López y Ezcurra, 2002; Lira, 2010).

El propósito de este estudio fue generar una ecuación de predicción de volumen para *R. mangle*, en Soto La Marina, Tamaulipas, para determinar la aportación del volumen de ramas al volumen total del árbol, y definir si este es representativo.

1.1 Objetivos e hipótesis

Elaborar ecuaciones de predicción de volúmenes a partir de las variables diámetro y altura, para estimar el volumen del fuste total y volumen total árbol, aplicando el mejor modelo que asemeje el volumen real en fuste total árbol y ramas para *Rhizophora mangle* L., en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Objetivos específicos

Ajustar 16 ecuaciones para estimar el volumen del fuste total y volumen total árbol de la especie *Rhizophora mangle* en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Seleccionar el mejor modelo a partir de la comparación de sus estadísticos, que estimen el volumen del fuste total y volumen total árbol de *Rhizophora mangle*.

Validar las dos ecuaciones de volumen de la especie en estudio, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Obtener dos ecuaciones de volumen, una para fuste total y otra para volumen total árbol para *Rhizophora mangle*.

Generar dos tablas de volúmenes con las ecuaciones seleccionadas, una para volumen fuste total y otra para volumen total árbol.

Hipótesis

Ho: La ecuación seleccionada para la predicción de volumen fuste total y de las ramas de *Rhizophora mangle*, no se ajusta a un nivel de significancia del 95% para el modelo.

H1: La ecuación seleccionada para la predicción de volumen fuste total y de ramas de *Rhizophora mangle*, se ajusta a un nivel de significancia del 95% a los datos observados.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la localidad de La Pesca, municipio de Soto La Marina, ubicado en las orillas y desembocadura del Río Soto La Marina y Laguna Morales, del estado de Tamaulipas, geográficamente se encuentra entre las coordenadas 23°44'31.02" y 23°47'32.64" de latitud Norte y 97°44'24.00" y 97°49'35.04" de longitud Oeste, a una altitud entre cero y 10 msnm (Figura 1). El clima característico de la región, está dominado por el tipo (A)C(w0) que corresponde a un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura máxima media anual oscila en los 31.2°C, mientras que la temperatura media mínima es de 17.3°C, aunque en periodos invernales se han registrado temperaturas de 5°C bajo cero, donde se estiman precipitaciones de 677 mm anuales con una máxima de 187 mm en periodos de 24 horas (García, 1998; INEGI, 2001a; Vargas *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2007; INEGI, 2008).

Fisiográficamente el área de estudio, está ubicada en la provincia "Llanura Costera del Golfo Norte" formada por la subprovincia "Llanura Costera Tamaulipeca", donde la forma del terreno da origen a llanuras aluviales inundables geológicamente cubiertas por suelo de la era cenozoica; en las áreas de sierras bajas aledañas se puede encontrar parte de la unidad cronoestratigráfica donde las rocas son del tipo lutita-arenisca y arenisca-conglomerado, ambas de la clase sedimentaria correspondientes a la era cenozoica (INEGI, 1989; INEGI, 2001b).

Las características edafológicas del lugar son muy específicas donde, el tipo de suelo vertisol pélico se encuentra como tipo de suelo primario y xerosol háplico como suelo secundario, el tipo de textura es fina con una fase química salina, la clave correspondiente se interpreta como: "Vp+Xh/3/s". En las áreas cercanas a la zona de estudio también se identifican otros tipos de suelo como: rendzina, castañozem, gleysol y regosol (INEGI, 2006). Dentro de las condiciones hidrológicas el área de estudio y en general todo el municipio forma parte de la región hidrográfica RH25 "San Fernando-Soto La Marina" que abarca a las cuencas "A-Laguna de San Andrés-Laguna Morales y B-Río Soto La Marina" y las subcuencas "Af-Laguna de Morales y Ba-Río Soto La Marina" ambas con desembocadura al Río Soto La Marina (INEGI, 2010).

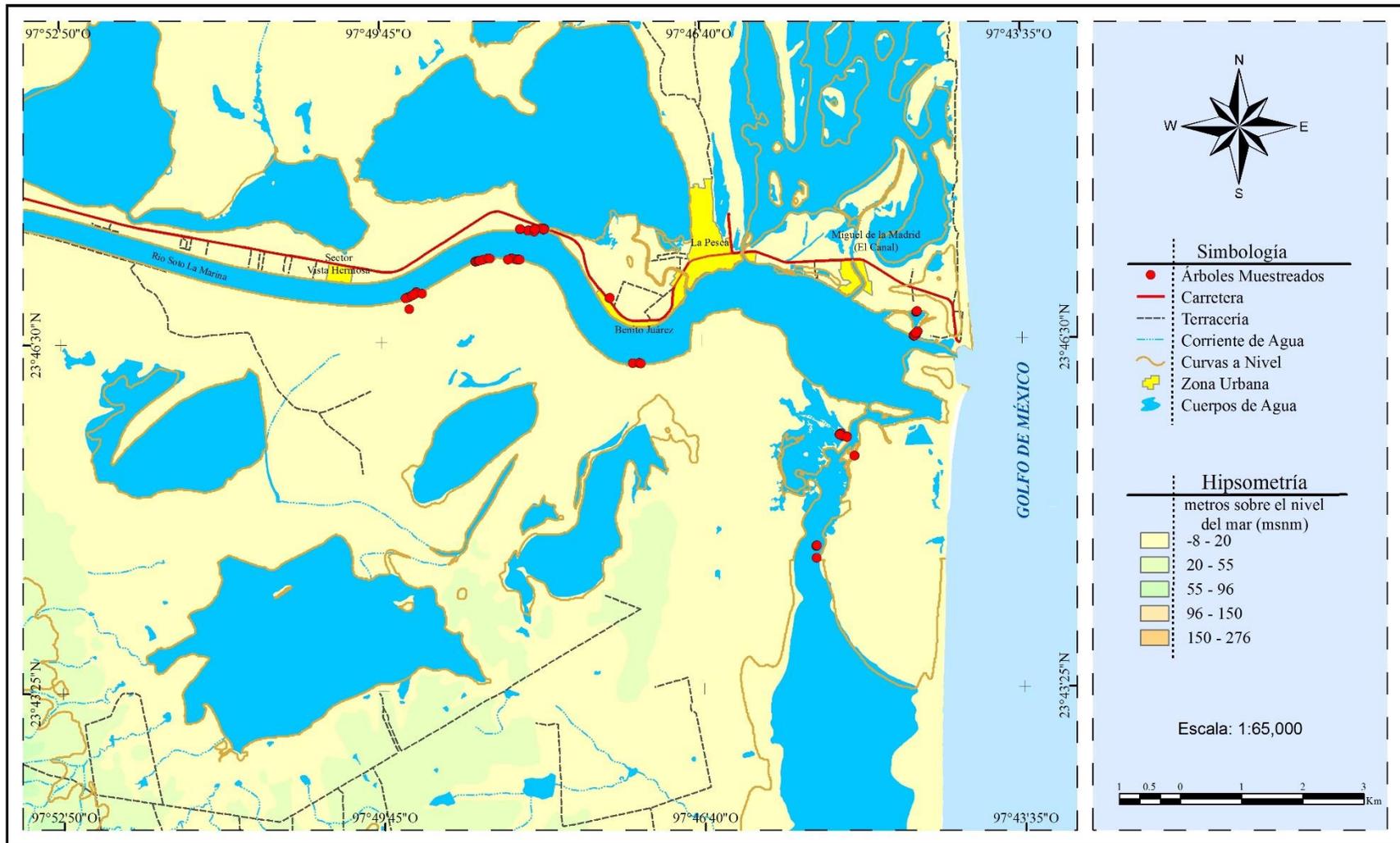


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio para *Rhizophora mangle* L. en la localidad La Pesca de Soto La Marina, Tamaulipas.

La vegetación de bosques de manglar en la localidad La Pesca que se distribuyen alrededor de las lagunas costeras y en las desembocaduras de los ríos, están formados por: *R. mangle*, *A. germinans*, *L. racemosa* y *C. erectus*, especies reconocidas como halófitas facultativas debido a que toleran concentraciones elevadas de salinidad, y ocupan áreas donde se mezcla el agua de mar con el agua dulce procedente de los ríos (PMC, 2011).

En áreas cercanas y como continuidad de los bosques de manglares, domina la vegetación halófila hidrófila y vegetación de dunas costeras que se desarrolla sobre sustratos arenosos inestables por encima del límite superior de la marea a lo largo del litoral, estos lugares presentan un relieve suave que no sobrepasa los tres metros de altura; también en la mayoría de las desembocaduras de los ríos, bahías costeras, estuarios, lagunas costeras y llanuras costeras bajas, los marismas salados se encuentran en porciones de tierra sometidas a periodos de inundación, cubiertas por una vegetación herbácea o arbustiva (INEGI, 2013; Treviño y Valiente, 2014).

2.2 Diseño de muestreo

Para el presente estudio se realizó un muestreo selectivo donde se eligieron los individuos, en este caso, árboles con las mejores condiciones fenotípicas que cumplieran con los parámetros de evaluación. Para iniciar con un muestreo selectivo puede ser con base en un criterio humano, donde se buscan sitios que representen las mejores condiciones medias dentro un bosque; en este caso para este trabajo se recurrió a la segunda opción un muestreo selectivo para elegir de la población aquellos individuos que proporcionaran la información esencial, esto por el hecho de que se encuentran áreas cuya ubicación no obedece a los criterios humanos en forma directa (Villa y Caballero, 1976).

2.3 Selección y tamaño de la muestra

Para la selección de la muestra se tomó como criterio específico el diámetro de cada árbol para representar las categorías mínimas y máximas encontradas, considerando que fueran de buena conformación en fuste y copa, sin presencia de plagas, enfermedad, malformación y ningún tipo de daño (Garrido *et al.*, 2018). Se evaluaron en total 125 árboles divididos en

diferentes categorías diamétricas (0, 5, 10 y 15) con un promedio de 31 árboles por categoría, para que esta fuera estadísticamente representativa (Cuadro 1) (Vargas, 2008).

Cuadro 1. Frecuencia de árboles por categoría diamétrica y altura para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Categoría diamétrica (cm)	Categoría en altura (m)			Total
	0	5	10	
0	29 (7)	2		31
5	18 (5)	14 (4)		32
10	1	30 (8)		31
15		27 (7)	4	31
Total	50	71	4	125

*Entre paréntesis los individuos utilizados para la validación.

2.4 Medición de variables

Durante la obtención de variables se empleó el método de medición en árboles en pie, anotando los datos en un formato previamente diseñado, con información de: municipio, estado, localidad o área donde se muestreó, propiedad en caso de presentarse, nombre de la especie, coordenadas UTM por árbol, número de árbol, categoría diamétrica (CD), diámetro (D) por sección para fuste total (Ft) y ramas y altura total (Ht).

En la toma de datos se utilizó una cinta diamétrica para medir el diámetro a diferentes secciones del fuste, en la mayoría de los árboles se midió la longitud del fuste y de sus ramas con una cinta métrica de 30 m, gracias a la fácil accesibilidad, y en casos especiales se empleó la pistola Haga para estimar la altura total y para definir las coordenadas se utilizó un GPS-Garmin.

La medición se realizó dividiendo los árboles en dos tipos “árboles chicos y grandes”; y, considerando que el mangle rojo tiene raíces aéreas, la primera medición se realizó en el base justo después de la última raíz (Cailliez, 1980; Rodríguez *et al.*, 2018).

Los árboles chicos (CH) fueron todos aquellos con un diámetro menor o igual a 2.5 cm para representar a la categoría diamétrica cero, en los cuales, el diámetro se midió en secciones de 0.20 m incluyendo el de la base y a 0.30 m. En los árboles grandes (G) cuyo diámetro fue mayor a 2.5 cm, la medición diamétrica se secciono cada 0.50 m partiendo de la medición a 0.30 m e incluyendo el diámetro de la base.

Para las ramas se midieron únicamente las más representativas, “primarias y secundarias” con diámetros mayores o iguales a la categoría diamétrica de 5; donde se dividió el largo de ramas en secciones de 0.50 m para medir sus diámetros, abordando la medición del diámetro de la base para cubrir la longitud total.

2.5 Registro de datos

Para procesar las variables se capturaron en Excel versión 2013, donde se separaron los datos específicos para fuste total árbol y otro para ramas, incluyendo la clasificación por árboles grandes (G) y árboles chicos (CH). Todas las variables de diámetro normal y altura se ordenaron por categoría diamétrica (CD) iniciando con la CD de 0 y sucesivamente hasta 15 cm. Además, para el tipo de ramas se indicó si fueron primarias (P) o secundarias (S) y cuantas hubo por cada árbol evaluado.

2.6 Cálculo del volumen individual por tipos dendrométricos

La forma que presentan los árboles es muy similar a los tipos dendrométricos, en este caso el fustes y ramas de los árboles muestreados se dividieron en secciones para el cálculo del volumen individual; utilizando las fórmulas del neiloide truncado, el cono, el cono truncado y la fórmula de Smalian (Loetsch *et al.*, 1973; Lema, 1979; Cailliez, 1980; Prodan *et al.*, 1997; Romahn y Ramírez, 2010).

2.6.1 Volumen del tocón

Dada la similitud y al patrón que esta sección sigue, se utilizó el tipo dendrométrico del neiloide truncado para calcular el volumen del tocón (Fórmula 1), en árboles de categoría

diamétrica mayor o igual a cinco; además, por ser la más recomendada y utilizadas en trabajos relacionados para especies tropicales y de coníferas (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Pompa-García *et al.*, 2011; García *et al.*, 2017).

$$V_{NT} = \frac{L}{4} * [S_0 + S_1 + \sqrt[3]{S_0 * S_1} * (\sqrt[3]{S_0} + \sqrt[3]{S_1})] \text{ Fórmula (1)}$$

Dónde:

V_{NT} = Volumen del neiloide truncado en (m³).

L = Longitud de la troza en (m).

S_0 = Área del diámetro de la base en (m²).

S_1 = Área del diámetro superior en (m²).

2.6.2 Volumen del fuste

Excluyendo el tocón, la punta y los árboles de la categoría diamétrica de cero, el fuste tiene forma similar a un paraboloides, que al ser seccionado en trozas más pequeñas este tipo dendrométrico cambia a un paraboloides truncado; para lo cual el cálculo volumétrico de estas trozas se hizo con la fórmula (2) de Smalian por ser de las más precisas cuando se tienen dos diámetros (inferior y superior), con un error nulo al modelar la forma del Paraboloides truncado (Lema, 1979; Cailliez, 1980; Romahn y Ramírez, 2010).

$$V_T = \frac{\pi}{8} * [D_0^2 + D_1^2] * L \text{ Fórmula (2)}$$

Dónde:

V_T = Volumen de la Troza en (m³).

Π = 3.1416.

D_0 = Diámetro inferior de la troza en (m).

D_1 = Diámetro superior de la troza en (m).

L = Longitud de la troza en (m).

2.6.3 Volumen de la punta

El volumen en esta última sección del fuste y para la punta de las ramas, se calculó con la fórmula (3) del cono, basándose en que se obtuvieron medidas de longitud total de la punta del fuste y de las ramas en todos los árboles muestreados (Romahn y Ramírez, 2010).

$$V_C = \frac{S_0 * L}{3} \text{ Formula (3)}$$

Dónde:

V_C = Volumen del cono en (m³).

S_0 = Área del diámetro de la base en (m²).

L = Longitud de la troza en (m).

2.6.4 Volumen de las ramas

Las ramas no presentan con exactitud la forma original que tiene un fuste, específicamente en la base donde estas dan inicio, lo que también es muy similar en los árboles que están dentro de la categoría diamétrica de cero, por ser árboles en su primera etapa de desarrollo. Tomando en cuenta esta característica y por su similitud, el volumen para las ramas y árboles de la categoría de cero se determinó con la fórmula (4) del cono truncado por ser la más exacta, partiendo desde la base hasta la penúltima sección, puesto que la última se calculó con la fórmula del cono antes mencionado (Cailliez, 1980).

$$V_{CT} = \frac{\pi}{12} * [D_1^2 + D_2^2 + (D_1 * D_2)] * L \text{ Fórmula (4)}$$

Dónde:

V_{CT} = Volumen del cono truncado en (m³).

Π = 3.1416.

D_1 = Diámetro inferior de la troza en (m).

D_2 = Diámetro superior de la troza en (m).

L = Longitud de la troza en (m).

2.7 Modelos de regresión utilizados

Antes de elaborar las ecuaciones de predicción de volumen se buscó en la literatura los modelos de regresión más utilizados de doble entrada; por el origen de las variables evaluadas (D y H). Los modelos seleccionados fueron utilizados para especies de manglar, de zonas áridas, templadas y tropicales, con el propósito de diversificar las formas de crecimiento fustal a las que se aplicaron los modelos, la información se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Denominación	Modelo de Regresión	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
1	Spurr Potencial	$V = b_0(DH^{b_1})$	Silva-García <i>et al.</i> , (2018). <i>Lysiloma divaricata</i> (Jacq.). En el Noreste de México.
2	Spurr de la Variable Combinada	$V = b_0(D^2H)^{b_1}$	Aguilar y Velarde (2001). <i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus michoacana</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Pinus leiophylla</i> . Uruapan, Michoacán. Hernández-Ramos <i>et al.</i> , (2018). <i>Swietenia macrophylla</i> King. Quintana Roo, México. Ross <i>et al.</i> , (2001). <i>Avicennia germinans</i> <i>Laguncularia racemosa</i> y <i>Rhizophora mangle</i> . Parque Nacional Biscayne, Florida, USA.
3	Spurr 1	$V = b_0(D^2) (H)$	Ammour <i>et al.</i> , (1999). <i>Rhizophora mangle</i> . América Central. Drake <i>et al.</i> , (2003). <i>Gevuina avellana</i> . Reserva Nacional Valdivia. Lee <i>et al.</i> , (2017). <i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus koraiensis</i> , and <i>Larix kaempferi</i> in South Korea. Marmillod <i>et al.</i> , (2001). <i>Rhizophora x harrizonii</i> . Costa Pacífica Norte de Nicaragua.
4	Geométrico de Schumacher y Hall (1933)	$V = b_0(D^{b_1}H^{b_2})$	Corral-Rivas y Návar-Cháidez (2009). <i>Pinus cooperi</i> , <i>Pinus durangensis</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus leiophylla</i> y <i>Pinus herrerae</i> . Durango, México. Galán <i>et al.</i> , (2008). <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia Donnell-smithii</i> Rose. Pochutla, Oaxaca. Hernández-Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>Eucalyptus urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México. Melchor <i>et al.</i> , (2010). <i>Pinus chiapensis</i> . Veracruz y Puebla. Tsega <i>et al.</i> , (2018). <i>Cupressus lusitanica</i> in Gerged Forest, Ethiopia. UMAFOR A.C. (2013). <i>Pinus arizonica</i> , <i>Pinus durangensis</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus leiophylla</i> , <i>Quercus rugosa</i> y <i>Quercus sideroxylla</i> . San Juanito, Chihuahua.

Dónde: V= Volumen del árbol; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = Parámetros a estimar; D= Diámetro basal (cm); H= Altura total (m).

Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación...

No.	Denominación	Modelo de Regresión	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
5	Meyer	$V = b_0(D)^{b_1} (D^2H)^{b_2}$	Aguilar y Velarde (2001). <i>Pinus montezumae</i> , <i>Pinus michoacana</i> , <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Pinus leiophylla</i> . Uruapan, Michoacán. Hernández-Ramos <i>et al.</i> , (2018). <i>Swietenia macrophylla</i> King. Quintana Roo, México.
6	Thornber	$V = b_0(H/D)^{b_1} (D^2H)$	Hernández-Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>Eucalyptus urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México. Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>Pinus durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
7	Spurr Combinada	Variable $V = b_0 + b_1(D^2H)$	Aminu <i>et al.</i> , (2019). <i>Populus deltoides</i> in India. Da Cunha y Guimarães. (2009). <i>Pinus taeda</i> L. En el sur de Brasil. Dugarjav and Pandey. (2009). <i>Eucalyptus</i> in India. Drake <i>et al.</i> , (2003). <i>Nothofagus betuloides</i> . Tierra del fuego Rio Condor. Lee <i>et al.</i> , (2017). <i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus koraiensis</i> , and <i>Larix kaempferi</i> in South Korea. Navarro-Martínez <i>et al.</i> , (2002). <i>Peltogyne mexicana</i> MARTÍNEZ. Guerrero, México. Téllez-García y Valdez-Hernández (2012). <i>Rhizophora mangle</i> . Laguna de Cuyutlán, Colima. Tewari and Kishan. (2001). <i>Dalbergia sissoo</i> in the desert of India. Valdez (2004). <i>Laguncularia racemosa</i> Marismas Nacionales, Nayarit.
8	Honner	$V = D^2 / (b_0 + b_1(1/H))$	Da Gama <i>et al.</i> , (2015). <i>Stryphnodendron adstringens</i> (Mart.) Coville. Minas Gerais, Brasil. Hernández-Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>Eucalyptus urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México.
9	Takata	$V = (D^2H) / (b_0 + (b_1(D)))$	Da Gama <i>et al.</i> , (2015). <i>Stryphnodendron adstringens</i> (Mart.) Coville. Minas Gerais, Brasil. Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>Pinus durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
10	Sin nombre 1	$V = b_0 + b_1(D) + b_2(H)$	Dugarjav and Pandey. (2009). <i>Eucalyptus</i> in India. INRENARE-OIMT, (1997). <i>Rhizophora spp. Polliciera rhizophorae, Laguncularia racemosa, Avicennia germinans</i> y <i>Avicennia bicolor</i> . Panamá.
11	Sin nombre 2	$V = b_0 + b_1(D) + b_2(H^2)$	INRENARE-OIMT, (1997). <i>Rhizophora spp. Polliciera rhizophorae, Laguncularia racemosa, Avicennia germinans</i> y <i>Avicennia bicolor</i> . Panamá.

Dónde: V= Volumen del árbol (m³); b₀, b₁, b₂, b₃= Parámetros a estimar; D= Diámetro basal (cm); H= Altura total (m).

Cuadro 2. Modelos utilizados para la generación de ecuaciones de predicción de volumen de la especie *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación...

No.	Denominación	Modelo de Regresión	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
12	Sin nombre 3	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(H)$	Aminu <i>et al.</i> , (2019). <i>Populus deltoides</i> in india. INRENARE-OIMT, (1997). <i>Rhizophora spp.</i> <i>Polliciera rhizophorae</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> , <i>Avicennia germinans</i> y <i>Avicennia bicolor</i> . Panamá. Drake <i>et al.</i> , (2003). <i>Drimys winteri</i> y <i>Persea lingue</i> . Juaja Cordillera de la costa.
13	Meyer Modificado	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^2H)$	Drake <i>et al.</i> , (2003). <i>Prosopis tamarugo</i> . Reserva Nacional Pampa del Tamarugal.
14	Naslund Slobada Modificada	$V = b_0 + b_1(H) + b_2(D^2H) + b_3(DH^2)$	Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>Pinus durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
15	Naslund Slobada de tres parametros	$V = b_0 + b_1(H) + b_2(DH) + b_3(D^2H)$	Tapia y Návar. (2011). <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México.
16	Australiano	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(H) + b_3(D^2H)$	Rodríguez <i>et al.</i> , (2009). <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlechtendal. Bosque la Primavera Jalisco.

Dónde: V= Volumen del árbol; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 = Parámetros a estimar; D= Diámetro Basal (cm); H= Altura Total (m).

2.8 Análisis estadístico

Para el análisis de las variables (D, H, VFT y VTA) se utilizó el procedimiento Proc Univariate Plot de Statistical Analysis System (SAS) para identificar puntos aberrantes fuera de lo normal.

El análisis de datos para la selección del mejor modelo de regresión se hizo con el programa Statistical Analysis System (SAS 9.4), empleando el procedimiento de programación Proc Model tanto para los modelos lineales y modelos no lineales.

2.9 Elección del modelo

Para elegir un modelo es decir una ecuación de predicción de volumen, fue necesario tomar en cuenta diferentes criterios del análisis de varianza, estos fueron: el coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}) con “valores más altos cercanos a uno”, la raíz del cuadrado medio del error, (RCME) siendo mejor aquel con un

“valor menor”, sólo cuando se comparan dos o más modelos con unidad de medida igual en la variable dependiente, y por último el cuadrado medio del error (CME) el mejor modelo para la estimación de volumen será aquel con el CME “más bajo” (Barrena *et al.*, 1986; Da Cunha *et al.*, 2009; Da Cunha y Guimarães, 2009).

A manera de justificar la calidad de la predicción de la ecuación seleccionada, se aplicaron los test para el cumplimiento de los supuestos:

Test de White de chi-cuadrado (X^2), se usó para determinar la homogeneidad (homocedasticidad) de varianza en los residuos, en el cual, si el valor de “p” es muy pequeño, menor al nivel de confianza demuestra que la varianza es heterocedastica (Telles *et al.*, 2018).

Test de Durbin-Watson (DW), éste determinó la independencia de los residuos, donde; valores aproximados a dos indica independencia, de lo contrario si el valor es cercano a cero hay correlación positiva o correlación negativa cuando se aproxima a cuatro (Da Cunha *et al.*, 2009).

Test de Shapiro-Wilk, aplicado para la normalidad de la distribución de los residuos, en el cual si el valor de “p” es menor al nivel de confiabilidad representa una respuesta normal en la distribución de los residuales (Hernández-Ramos *et al.*, 2019).

2.10 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen

Con base en una muestra aleatoria del 25% tomada de los 125 árboles, se validó la ecuación con mejor predicción del volumen; donde en promedio, se utilizaron ocho árboles de cada categoría diamétrica 0, 5, 10 y 15 cm, los cuales no se incluyeron en la prueba estadística para la selección del modelo. Para la cubicación de los árboles muestra, se implementó el mismo criterio que en la muestra de selección, utilizando los tipos dendrométricos ajustados a la forma del fuste; una vez obtenido el volumen con las fórmulas para cada sección individual, se seleccionó la función de volumen con mejor estimación.

La validación de las ecuaciones de volumen fue con indicadores recomendados por Prodan *et al.* (1997), los cuales permiten medir la exactitud de los valores observados derivados del modelo, además se predijo el nivel de sesgo con la ecuación implementada por Hernández-Ramos *et al.*, (2019).

- Raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC).

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum(O_1 - E_i)^2}{n}}$$

- Error medio absoluto (EMA).

$$EMA = \sum |O_1 - E_i| / n$$

- Diferencia agregada en porcentaje (DA%).

$$DA\% = \left(\frac{EMA}{\bar{O}_1}\right) * 100$$

Dónde:

Σ = Sumatoria.

O_1 = Valor observado.

\bar{O}_1 = Media de la variable dependiente

E_i = Valor estimado.

n = Número total de observaciones.

La ecuación ideal para la construcción de los cuadros de predicción de volumen, fue aquella que presentó una diferencia agregada cercana a cero, de lo contrario si los valores resultantes de la suma de residuales son menor o mayor a cero la función de volumen tiende a sobrestimar o subestimar, catalogándose como inexacta. Así mismo los valores obtenidos para los estadísticos (REMC y EMA) fueron los más bajos para toda la muestra, indicando ecuaciones predictivas de volumen más precisas (Salas *et al.*, 2005).

2.11 Construcción de la tabla de predicción de volumen

Considerados los criterios estadísticos antes mencionados, se seleccionó el mejor modelo de regresión, el cual permitió la construcción de tablas de predicción de volumen de doble entrada (diámetro y altura), para volumen fuste total y volumen total árbol, asemejándose al volumen real de *R. mangle*, específicamente en los manglares de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ajuste y selección de modelos para estimar volumen del fuste total y volumen total árbol

Para la estimación del volumen fuste total y volumen total árbol se probaron 16 modelos de regresión lineal y no lineal considerando como variables independientes el diámetro basal (D) y la altura total (H), se presentan los estadísticos de regresión en el Apéndice 3 y 4. De estos modelos sólo se presentan en el Cuadro 3 y 4 los que obtuvieron los mejores valores de ajuste, interpretando la ecuación con los parámetros obtenidos. El total de modelos con cada parámetro se muestran en el Apéndice 1 y 2.

Cuadro 3. Parámetros de las modelos de regresión para volumen fuste total de *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Ecuación de predicción de volumen	Pr > F
VFT	M9	$VFT = (D^2H) / (19049.71 + (1973.494(D)))$	< 0.0001
	M4	$VFT = 0.000096(D^{1.477576}H^{0.938775})$	< 0.0001
	M5	$VFT = 0.000096(D)^{-0.39994} (D^2H)^{0.938744}$	< 0.0001
	M2	$VFT = 0.000078(D^2H)^{0.821527}$	< 0.0001
	M3	$VFT = 0.000022(D^2) (H)$	< 0.0001

Dónde: VFT= Volumen fuste total, D= Diámetro a la base, D²= Diámetro de la base al cuadrado, H= Altura total, H²= Altura total al cuadrado.

Cuadro 4. Parámetros de las modelos de regresión para volumen total árbol de *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Ecuación de predicción de volumen	Pr > F
VTA	M8	$VTA = D^2 / (2219.052 + 20593.45(1/H))$	< 0.0001
	M5	$VTA = 0.000061(D)^{0.840628} (D^2H)^{0.582559}$	< 0.0001
	M4	$VTA = 0.000061(D^{2.005617}H^{0.582472})$	< 0.0001
	M13	$VTA = -0.00044 + 0.000079(D^2) + 0.000016(D^2H)$	< 0.0001
	M16	$VTA = -0.00092 + 0.000082(D^2) + 0.000209(H) + 0.000015(D^2H)$	< 0.0001

Dónde: VTA= Volumen total árbol, D= Diámetro a la base, D²= Diámetro de la base al cuadrado, H= Altura total, H²= Altura total al cuadrado.

El modelo que mejor resultado obtuvo para VFT estadísticamente fue el M9 “Takata” con un $R^2= 0.9427$ mientras que el $R^2_{aj}= 0.9421$, además fue el modelo con menor CME= 0.000008183 y RCME= 0.00286. Cabe resaltar que los modelos con mejor ajuste son aquellos con un R^2 y R^2_{aj} más altos cercanos a uno, mientras que para el CME y RCME entre más bajo sea el valor mejor será el modelo.

Por el contrario, los modelos M4 y M5 obtuvieron valores altamente significativos siendo muy similares al modelo M9 en los valores estadísticos, R^2 , R^2_{aj} , CME y RCME, incluso el M4 Geométrico de Schumacher y Hall (1933) puede considerarse como mejor al ser más práctico y uno de los modelos más utilizados en la predicción volumétrica en gran variedad de especies. Por ejemplo, en los estudios de Aguilar y Velarde (2001) para especies de *Pinus spp.* en Durango se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9705 y cuadrado medio del error de 0.00353, también en el trabajo de Galán *et al.* (2008) el modelo presentó una $R^2= 0.9946$ y un CME= 0.000022 para la especie *C. odorata* L. y *T. Donnell-smithii* en Pochutla, Oaxaca.

Haciendo contraste al estudio de Da Gama *et al.* (2015) quienes trabajaron con el modelo de Takata, encontraron que los modelos de Spurr y Husch en su forma logarítmica obtuvieron los mejores ajustes para el volumen total con corteza, sin corteza y de la corteza en *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville con una R^2_{aj} de 0.9741 y 0.9558 en volumen total con corteza (VTcc), 0.9725 y 0.9523 para volumen total sin corteza (VTsc) y 0.9727 y 0.9577 en volumen de la corteza (Vc). En el presente estudio el modelo mejor ajustado fue el de Takata que está levemente por encima del modelo Geométrico de Schumacher y Hall y el modelo de Meyer; pero el cual se ha seleccionado para romper los paradigmas de utilizar los modelos comunes, dado que es un modelo muy poco utilizado y que en este estudio interpreta buenos resultados.

Siendo estrictos en la selección del mejor modelo, se puede observar dentro de los estadísticos obtenidos para cada modelo del Cuadro 5, los parámetros estimados ($b_0...b_n$) fueron significativos al 95% de confiabilidad lo cual determina que estos son altamente significativos siendo el M9 el mejor ajustado en comparación al M4 y M5.

Cuadro 5. Comparación de estadísticos de las mejores ecuaciones de volumen fuste total, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	RCME	White Chi-Cuadrado (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W)	
									Estadístico	Probabilidad		Valor	Probabilidad
Fuste Total	M9	b ₀	19049.71	0.0004	0.9427	0.9421	0.000008183	0.00286	29.59	<0.0001	1.8431	0.78	<0.0001
		b ₁	1973.494	<0.0001									
	M4	b ₀	0.000096	0.0014	0.9429	0.9417	0.000008242	0.00287	31.1	0.0003	1.7936	0.8	<0.0001
		b ₁	1.477576	<0.0001									
	M5	b ₂	0.938775	<0.0001	0.9429	0.9417	0.000008242	0.00287	31.1	0.0003	1.7936	0.8	<0.0001
		b ₀	0.000096	0.0014									
	M2	b ₁	-0.39994	0.0266	0.9398	0.9392	0.000008595	0.00293	32.23	<0.0001	1.7022	0.82	<0.0001
		b ₂	0.938744	<0.0001									
	M3	b ₀	0.000078	0.0013	0.9295	0.9295	0.000009960	0.00316	29.38	<0.0001	1.5633	0.83	<0.0001
		b ₁	0.821527	<0.0001									
	M3	b ₀	0.000022	<0.0001	0.9295	0.9295	0.000009960	0.00316	29.38	<0.0001	1.5633	0.83	<0.0001
		b ₁	0.821527	<0.0001									

Dónde: R²= Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, CME= Cuadrado medio del error, RCME= Raíz del cuadrado medio del error.

Como parte de la elección del mejor modelo, se observa en el Cuadro 5 que los supuestos de regresión del modelo seleccionado “M9” en la prueba de heteroscedasticidad White $p= <0.0001$ se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad, por lo tanto, el modelo tiene problemas de heterocedasticidad, aunque por la naturaleza de los datos que provienen de diferentes secciones de un mismo árbol los resultados son aceptables (Coenders y Saez 2000; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2018).

Para el test de Durbin-Watson (DW) que determina la independencia de los residuos con una buena distribución, se obtuvo un valor de $DW= 1.8431$ por lo cual, con base en Arranz y Zamora (s/f) se determina que no existe autocorrelación ya que el resultado es aproximado a dos. Por otra parte, para la prueba de normalidad el valor del estadístico de Shapiro-Wilk es cercano a uno $W= 0.78$, $p= <0.0001$ asegurando que los datos asumen a una distribución normal.

Mediante el análisis gráfico que indica la relación entre los estimados y los observado para volumen fuste total (Figura 2) se determina que la ecuación seleccionada “M9” es funcional para la estimación volumétrica en árboles de *R. mangle* teniendo una buena correlación con tendencia a una línea recta y una $R^2= 0.9427$; si se comparan los coeficientes de determinación que presentan las gráficas para cada uno de los modelos se observa que el modelo M4 y M5 con $R^2= 0.9433$ obtuvieron mejor resultado que el modelo seleccionado, dicho de otra manera, las ecuaciones derivadas de estos modelos estiman el volumen fustal de manera precisa, pero al contrario del M9 los estadísticos de ajuste (Cuadro 5) son ligeramente menos significativos.

La comparación gráfica de todos los modelos es la forma de cotejar que la ecuación seleccionada representa un buen resultado independientemente de la prueba estadística, así como en los estudios de García-Cuevas *et al.* (2016), Hernández-Ramos *et al.* (2018) y Hernández-Ramos *et al.* (2019). De esta forma se asume que todas las ecuaciones predicen el volumen fustal en árboles de *R. mangle* con una distribución dentro de lo normal, con valores estadísticos y gráficos significativos, pero a manera de dar un resultado concreto y de mejor precisión se seleccionó el mejor en ambos casos “estadístico y gráfico”.

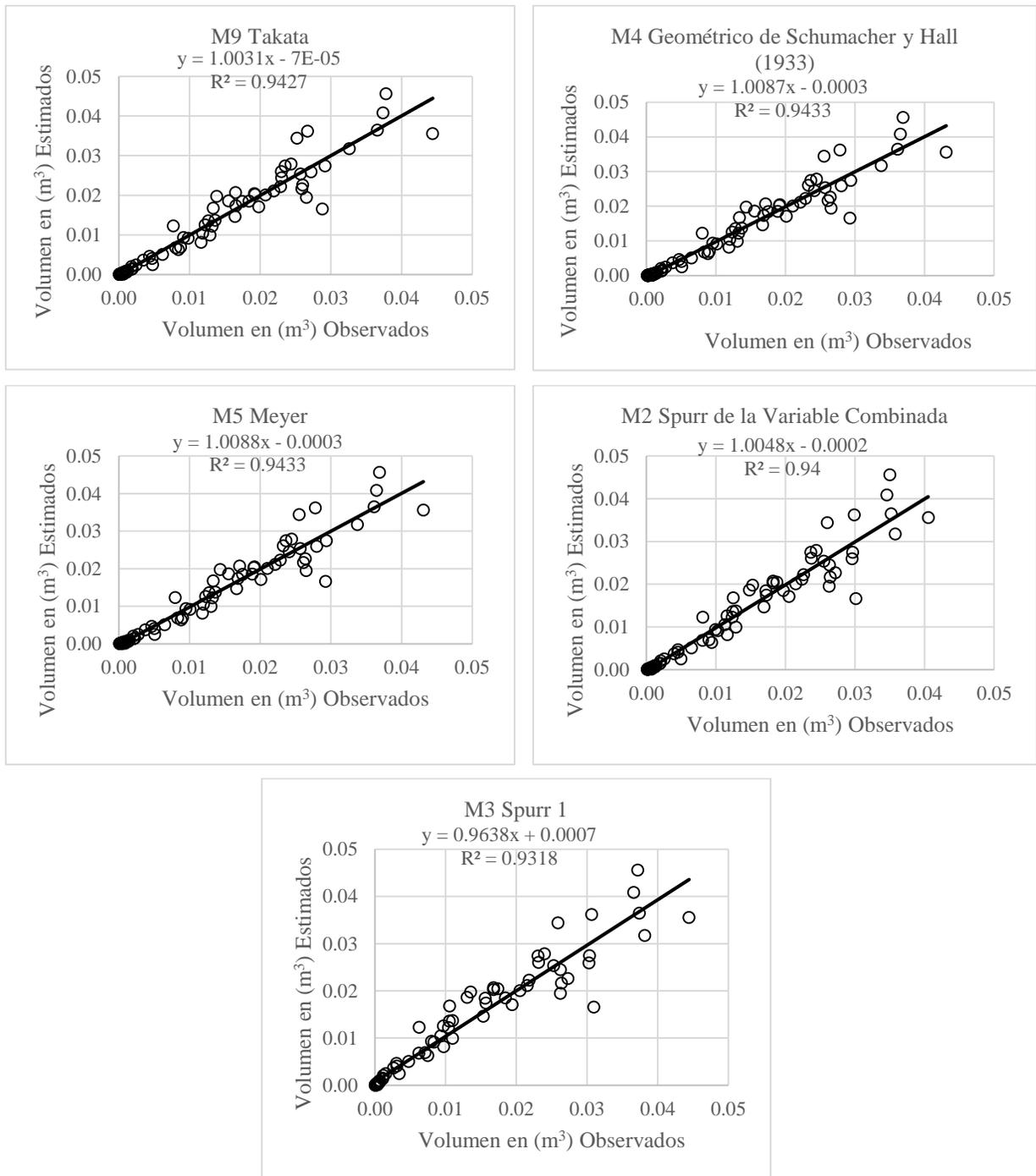


Figura 2. Comparación gráfica de volumen estimado contra volumen observado de los mejores modelos para volumen fuste total.

En el Cuadro 6 se observa que, para estimar el volumen total árbol el mejor modelo ajustado es el de “Honner” (M8), con estadísticos buenos de $R^2= 0.9021$ y $R^2_{aj}= 0.901$, más representativos comparados con los modelos “Meyer” (M5) y “Geométrico de Schumacher y Hall (1933)” (M4) que tienen tres parámetro, además de resultados iguales en $R^2= 0.9025$ y $R^2_{aj}= 0.9004$, por consecuencia los modelos de “Meyer Modificado” (M13) y el modelo “Australiano” (M16) con $R^2= 0.9026$ y 0.9028 y $R^2_{aj}= 0.9005$ y 0.8996 , respectivamente, quedarían en última posición.

Tomando en cuenta los valores del CME y la RCME (Cuadro 6) se puede decidir cuál de los modelos es mejor para la estimación del volumen, ya que son unos de los indicadores importantes en especial la RCME que evalúa la precisión de las estimaciones. Basándose en los resultados el modelo M8, M5 y M4 que presentan el CME igual $CME= 0.000025$ por lo cual los tres modelos son buenos, sin embargo, el modelo M8 sigue siendo el mejor por tener la $RCME= 0.00498$ inferior al obtenido en los modelos M5 y M4. Haciendo relevancia a los resultados de los modelos M13 y M16 se puede observar significancia en sus parámetros ($p= <0.05$), mientras que el M16 resultó con el error estándar más alto en los parámetros b_0 ($p= 0.4918$) y b_2 ($p= 0.6712$), y el M13 en el parámetro b_0 ($p= 0.5417$). Con estos resultados el modelo “Honner” M8 resalta en los estadísticos de ajuste por la probabilidad de los parámetros ($p= <0.0001$) inferiores al 0.05.

Asumiendo que los resultados estadísticos no difieren entre los modelos M8, M5 y M4, éstos se pueden utilizar para elaboración de la ecuación de predicción de volúmenes, e incluso se le podría dar más importancia al modelo de Geométrico de Schumacher y Hall (1933) por estar entre los modelos más utilizados dentro de la literatura, interpretando buen ajuste estadístico para la predicción del volumen en casi cualquier tipo de especie, ejemplo de esto son los estudios de: Tewari and Kishan (2001) en la especie *Dalbergia sissoo*, Corral-Rivas y Nívar-Cháidez (2009) quienes ajustaron el modelo para diferentes especies de *Pinus*, Melchor *et al.* (2010) en *Pinus chiapensis*; Hernández-Ramos *et al.* (2017) en *Eucalyptus urophylla*, Silva-García *et al.* (2018) en *Prosopis articulata* S. Watson. y Tsega *et al.* (2018) para *Cupressus lusitanica*.

Cuadro 6. Comparación de estadísticos de las mejores ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	Raíz CME	White Chi-Cuadrado (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W)	
									Estadístico	Probabilidad		Valor	Probabilidad
Total Árbol	M8	b ₀	2219.052	<0.0001	0.9021	0.901	0.000025	0.00498	22.08	<0.0001	1.9949	0.77	<0.0001
		b ₁	20593.45	<0.0001									
	M5	b ₀	0.000061	0.0263	0.9025	0.9004	0.000025	0.005	34.39	<0.0001	1.9869	0.77	<0.0001
		b ₁	0.840628	0.0007									
		b ₂	0.582559	<0.0001									
	M4	b ₀	0.000061	0.0263	0.9025	0.9004	0.000025	0.005	34.4	<0.0001	1.9868	0.77	<0.0001
		b ₁	2.005617	<0.0001									
		b ₂	0.582472	<0.0001									
	M13	b ₀	-0.00044	0.5417	0.9026	0.9005	0.000025	0.005	24.47	<0.0001	1.9822	0.78	<0.0001
		b ₁	0.000079	<0.0001									
		b ₂	0.000016	<0.0001									
	M16	b ₀	-0.00092	0.4918	0.9028	0.8996	0.000025	0.00502	27.86	0.0005	1.9793	0.79	<0.0001
		b ₁	0.000082	<0.0001									
		b ₂	0.000209	0.6712									
			b ₃	0.000015	0.0003								

Dónde: R²₌ Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, RCME= Raíz del cuadrado medio del error, CME= Cuadrado medio del error.

Si bien, el modelo Honner M8 obtuvo los mejores resultados estadísticos en general (Cuadro 6) por el origen de los datos; las variables medidas diámetro y altura provienen de la especie *R. mangle* que en la zona de estudio son considerados árboles chaparros. De esta manera la forma del fuste permitió que además de los modelos convencionales el modelo M8 interpreta buenos resultados para estimar el VTA, aun cuando en otros estudios los estadísticos son muy bajos, por ejemplo, Da Gama *et al.* (2015) ajustaron 16 modelos de regresión de doble entrada para estimar el volumen total con corteza para *S. adstringens* donde el modelo Honner obtuvo un R^2_{aj} de 0.9229 que comparado con el de mejor ajuste para el estudio, el modelo Spurr obtuvo el coeficiente de determinación ajustada igual a 0.9741, determinando que el modelo Honner estaba con menores valores en el mismo estadístico.

Por el contrario, las pruebas para determinar si los supuestos de regresión se cumplen (Cuadro 6), indican que los residuos de cada modelo M8, M5 y M4 rechazan los criterios de homocedasticidad, la prueba de White arroja una probabilidad de $p= 0.0001$ para los tres modelos por lo que la varianza tiende a ser heterocedastica a un 95% de confiabilidad (Álvarez-González *et al.*, 2007). Así mismo el test de Durbin-Watson indica que el modelo “Honner” (M8) con valor $DW= 1.9949$ es un poco mejor por aproximarse a dos, pero sin dejar atrás los modelos de “Meyer” (M5) con valor $DW= 1.9869$ y “Geométrico de Schumacher y Hall (1933)” (M4) con $DW= 1.9868$, dado que los tres presentan independencia de los residuos por estar en el rango 1.5-2.5 de no autocorrelación (Ayyangar, 2007).

La prueba de SW que indica la normalidad en la distribución de los residuos confirma que los tres modelos presentan una respuesta normal ya que tienen un resultado del estadístico con valor de 0.77 acercándose a uno y probabilidad $p= <0.0001$ inferior al 0.05 admitido.

Del análisis gráfico (Figura 3) se obtuvo que de los cinco modelos de mejor ajuste el M13 y M16 se descartan por no cumplir con el valor de la probabilidad inferior a 0.05 en algunos de sus parámetros (Cuadro 6), como se mencionó anteriormente. De esta manera la relación de los volúmenes estimados contra los observados para el M8, M5 y M4 son altamente significativos acercándose a una línea recta en los tres casos, también los coeficientes de determinación de 0.9026 para el M5 y M4 y de 0.9021 para Honner, señalan que hay una predicción precisa del volumen total árbol para *R. mangle*, de los tres modelos el M8 por tener los mejores valores estadísticos se seleccionó como resultado final para la elaboración de la ecuación de predicción de volumen total árbol.

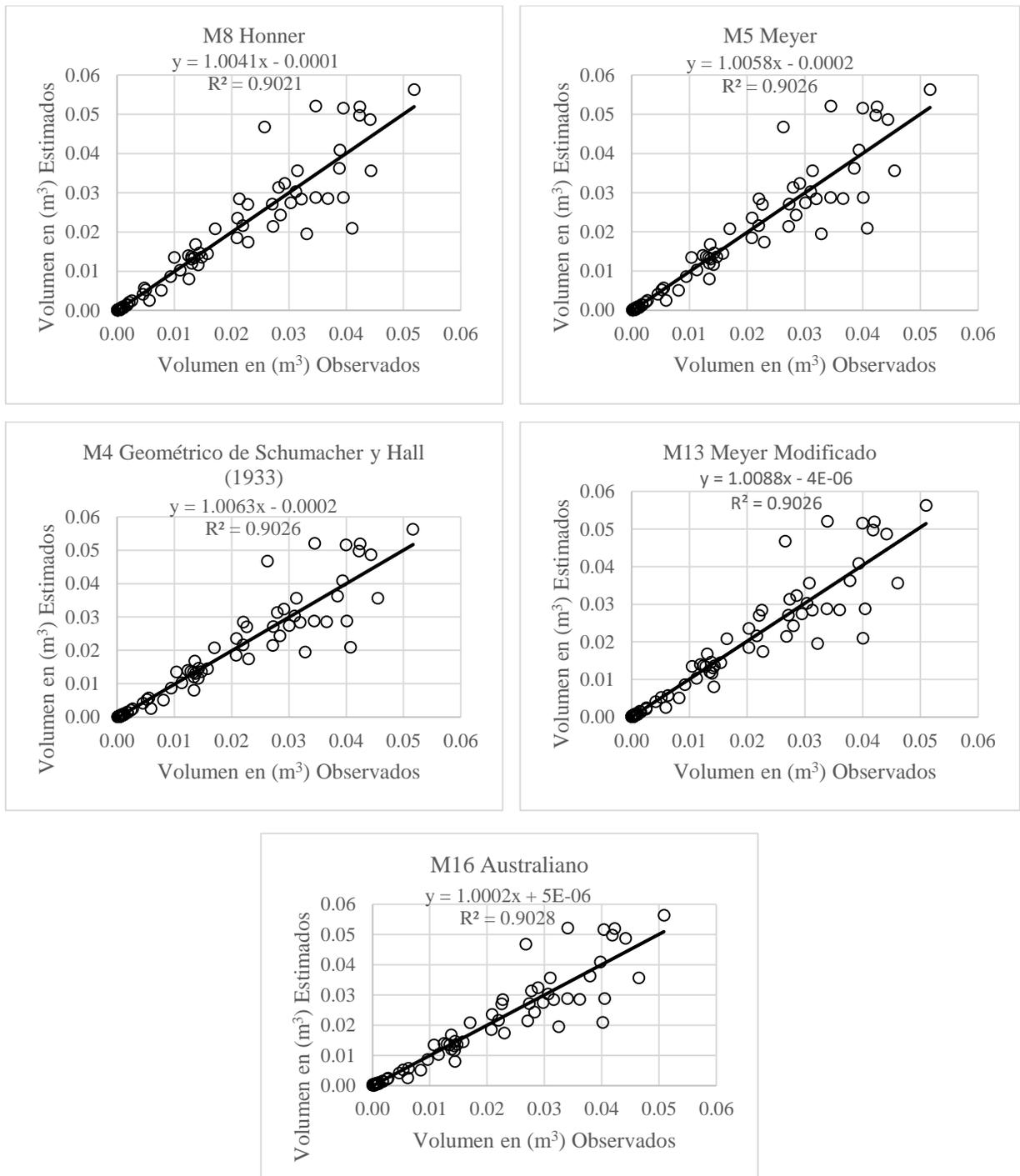


Figura 3. Comparación gráfica de volumen estimado contra volumen observado de los mejores modelos para volumen total árbol.

3.2 Validación de ecuaciones de volumen

La ecuación seleccionada para la predicción del volumen fuste total se validó mediante una muestra de 31 árboles de *R. mangle* no incluida en la muestra original, este mismo procedimiento se hizo con los modelos con mejores resultados estadísticos y gráficos, para generar un panorama de comparación.

En el Cuadro 7 se muestra que para el estadístico de exactitud los valores son mayores en el modelo seleccionado M9, REMC=0.003316 y EMA=0.000817 cuando deberían ser menores acercándose a cero, tal y como lo establece Prodan *et al.*, (1997). A diferencia del resultado obtenido por las pruebas los modelos M4, M5, M2, M3 y M9 no difieren de la exactitud, y aunque el seleccionado tenga los valores más altos, en la prueba estadística es el mejor (Cuadro 5).

Con los resultados de la DA para el sesgo, se puede asumir que cualquier modelo se puede utilizar, esto significa que en promedio las cinco ecuaciones subestiman el volumen observado en un 7.07% transformando la DA a porcentaje, y aunque el modelo M9 es de los más altos en subestimación se seleccionó para la construcción de la ecuación de predicción de volumen fuste total dado que en las diferencias entre los observados y lo estimado son mínimas, y como se mencionó estadísticamente es el mejor.

Cuadro 7. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los mejores cinco modelos para volumen fuste total en *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de Estimación	Modelo	Muestra	REMC	EMA	DA
VFT	M9	31	0.003316	0.000817	0.079404
	M4		0.003234	0.000561	0.054538
	M5		0.003235	0.000562	0.054652
	M2		0.003125	0.000482	0.046867
	M3		0.003151	0.001215	0.118132

Dónde: REMC=Raíz cuadrada del error medio cuadrático, EMA=Error medio absoluto y DA=Diferencia agregada.

Para la estimación del volumen total árbol la ecuación seleccionada obtuvo buenos resultados (Cuadro 8). El valor de los estadísticos de exactitud demuestra que para el modelo

M8 es el más bajo aproximándose a cero “REMC= 0.004555”, además haciendo la comparación con los valores de los demás modelos éstos no tienen una variación significativa. Lo mismo sucede con el EMA para los cinco modelos el rango está entre 0.001178 m³ y 0.001430 m³ de subestimación. Para identificar en qué porcentaje se subestima el volumen se transformó la DA a DA%, con esto se obtiene que, los modelos M8= 9.15%, M5=9.44% y M4=8.48% son los mejores con un porcentaje de error mínimo entre sí, por lo tanto, los tres modelos se pueden aplicar, más sin embargo estadísticamente el M8 es el mejor ajustado con variación mínima, por lo que se seleccionó para generar la ecuación de predicción de volumen.

Cuadro 8. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los mejores cinco modelos para volumen total árbol en *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de Estimación	Modelo	Muestra	REMC	EMA	DA
VTA	M8	31	0.004555	0.001277	0.091574
	M5		0.004600	0.001178	0.084457
	M4		0.004606	0.001184	0.084883
	M13		0.004785	0.001430	0.102586
	M16		0.004788	0.001328	0.095218

Dónde: REMC=Raíz cuadrada del error medio cuadrático, EMA=Error medio absoluto y DA=Diferencia agregada.

3.3 Tablas de predicción de volumen a partir del mejor modelo para *Rhizophora mangle*

La tabla de predicción de volumen de doble entrada elaborada para estimar el volumen fuste total de árboles de *R. mangle* se muestra en el Cuadro 9, utilizando el modelo de mejor estimación “M9 Takata” con las variables diámetro basal (expresado en cm) tomado por encima de la última raíz y altura total (expresada en m).

Tomando en cuenta las diferencias mínimas que obtuvieron los modelos “M4 Geométrico de Schumacher y Hall (1933)” y “M5 Meyer” contra el seleccionado “M9 Takata” en los resultados estadísticos, gráficos y de validación, se procedió a generar las tablas de predicción de volumen de doble entrada para dichos modelos, los resultados correspondientes se muestran en el Apéndice 5 y 6.

Cuadro 9. Tabla de predicción de volumen fuste total (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VFT = (D^2H) / (19049.71 + (1973.494(D)))$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0043226898	0.0086453797	0.0129680695	0.0172907593
10	0.0128916981	0.0257833963	0.0386750944	0.0515667925
15	0.0231233500	0.0462467000	0.0693700501	0.0924934001
20	0.0341765894	0.0683531788	0.1025297682	0.1367063576
25	0.0456957793	0.0913915586	0.1370873379	0.1827831172

Dónde: VFT=Volumen fuste total, D= Diámetro basal, D²=Diámetro basal al cuadrado y H=Altura total del fuste.

Tomando el criterio de mejor modelo, la tabla de predicción de volúmenes de doble entrada para estimar el volumen total árbol a partir del diámetro basal en (expresado en cm) partiendo de la última raíz y altura total (expresado en m) se construyó con el modelo “M8 Honner” (Cuadro 10). Como complemento para obtener una diversificación de resultados y tener más posibilidad de datos se construyeron tablas de predicción de volumen total árbol con los modelos de “M4 y M5” (Apéndice 7 y 8).

Cuadro 10. Tabla de predicción de volumen total árbol (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VTA = D^2 / (2219.052 + 20593.45(1/H))$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0039446225	0.0058433100	0.0069600104	0.0076953278
10	0.0157784902	0.0233732400	0.0278400415	0.0307813112
15	0.0355016029	0.0525897901	0.0626400934	0.0692579503
20	0.0631139608	0.0934929601	0.1113601661	0.1231252450
25	0.0986155637	0.1460827502	0.1740002595	0.1923831953

Dónde: VTA=Volumen total árbol, D²=Diámetro basal al cuadrado y H=Altura total del árbol.

4 CONCLUSIONES

Los modelos de mejor ajuste para volumen fuste total fueron Takata, Geométrico de Schumacher y Hall (1933) y Meyer, pero el seleccionado con mejor resultado fue el de Takata $V = (D^2H) / (b_0 + b_1(D))$.

El volumen para árboles con ramas se estima mejor con los modelos de Honner, Meyer y Geométrico de Schumacher y Hall (1933), sin embargo, el modelo estadístico más confiable es Honner $V = D^2 / (b_0 + b_1(1/H))$.

De acuerdo al procedimiento de exactitud y sesgo los valores de la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC), el Error medio absoluto (EMA) y la diferencia agregada (DA) determinan que cualquiera de los tres modelos mencionados puede utilizarse para estimar el volumen fustal con resultados precisos, determinando como mejor el modelo Takata.

Para la interpretación del volumen total árbol el modelo Honner es el mejor, con un valor inferior en la raíz cuadrada del error medio cuadrático (REMC) si se compara con los modelos Meyer y Geométrico de Schumacher y Hall (1933), mientras que en el valor del error medio absoluto (EMA) y la diferencia agregada (DA) no hay variación significativa entre modelos, exponiendo que los tres son precisos.

Con un 95% de confiabilidad la ecuación de Takata estima el volumen fustal y la ecuación de Honner el volumen total para los árboles de *Rhizophora mangle* por lo cual en ambos casos se rechaza la hipótesis H0 y por tanto se considera la hipótesis alterna (H1) de que las ecuaciones seleccionadas predicen el volumen en cada condición de manera significativa.

5 RECOMENDACIONES

Con base a las pruebas estadísticas y gráficas los modelos utilizados tienen una buena respuesta para estimar el volumen fuste total y volumen total árbol, y ya que los supuestos de regresión son aceptables, se recomienda utilizara las ecuaciones de predicción de volumen con y sin ramas en la zona de estudio y alrededores, como complemento al buen manejo de la especie *Rhizophora mangle*.

Como complemento, para este estudio, se pueden utilizar más ecuaciones para cada interpretación de volumen (Apéndice 5, 6, 7 y 8). Se encuentran tablas de predicción de volumen que se recomiendan para estimar el volumen fustal y total del árbol con ecuaciones que tienen la confiabilidad de ser certeras en el resultado.

Para estimar el volumen en trabajos de campo se recomienda utilizar el diámetro basal por encima de la última raíz aérea, porque el origen de los datos para el presente estudio así se trabajó con base en lo recomendado en la literatura, de esta manera los resultados serán confiables.

6 LITERATURA CITADA

- Aguilar R, M. y J. C. Velarde R. 2001. Tablas de volúmenes para la estimación del volumen forestal. Nava V., L. y C. González S. (eds.). INIFAP-SAGARPA. Uruapan, Michoacán. 48 p.
- Alongi D. M. 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76:1-13.
- Álvarez-González J. G., R. Rodríguez-Soalleiro y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 23:35-42.
- Aminu S. A., S. Daniel and I. Yakubu. 2019. Tree volume equation for *Populus deltoides* (Poplar), tree under agroforestry based. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8:1470-1475.
- Ammour T., A. Imbach, D. Suman y N. Windevoxhel. 1999. Manejo productivo de manglares en América Central. Ammour, T., A. Imbach, D. Suman y N. Windevoxhel. (eds). CATIE, Turrialba, Costa Rica. 364 p.
- Arranz J. M. y M. M. Zamora. s/f. Análisis de autocorrelación. 35 p. <https://www.ciberconta.unizar.es/leccion/autocorrelacion/analisis%20de%20autocorrelacion.PDF> (Fecha de consulta: 09 de junio de 2021).
- Ayyangar L. 2007. Skewness, multicollinearity, heteroskedasticity - you name it, cost data have it! solutions to violations of assumptions of ordinary least squares regression models using SAS®. Health Economics Resource Center (HERC) VA Palo Alto Health Care System Menlo Park, CA. *SAS Global Forum 2007*, 1-7.
- Barrena A, V., J. Dance C. y D. Sáenz Y. 1986. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*, 13:1-10.
- Cailliez F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Estimación del volumen (Tomo 1). FAO. Montes. Roma, Italia. 1:92 p.

- Clough B. 2013. Continuing the journey amongst mangroves. H.T. Chan. ISME Mangrove Educational Book Series No. 1. International Society for Mangrove Ecosystems (ISME), Okinawa, Japan, and International Tropical Timber Organization (ITTO), Yokohama, Japan. City Reprographic Services, Kuala Lumpur, Malaysia. 86 p.
- Coenders G. and M. Saez. 2000. Collinearity, heteroscedasticity and outlier diagnostics in regression. Do they always offer what they claim? Girona, Spain. pp: 79-94.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad). 2008. Manglares de México. México. 35 p.
- Corral-Rivas S. y J. de 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.
- Costas R., N. Vera, D. Loran, L. López C., I. Fosco y J. González. 2006. Funciones de volumen para especies de bosque secundario de la reserva guaraní. Misiones, Argentina. *FCA UNCuyo*, 38:49-57.
- Da Cunha T. A. y C. A. Guimarães F. 2009. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Kurú*, 6:1-15.
- Da Cunha T. A., J. O. Vargas M. y M. Escalier H. 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. López, R. (ed.). Proyecto FOMABO/ESFOR-UMSS. Cochabamba, Bolivia. 28 p.
- Da Gama T, A., C. Dias C., M. Rodrigues M. y M. V. Santana L. 2015. Estimativas volumétricas y hipsométricas para el Barbatimão en el Norte de Minas Gerais, Brasil. *Floresta e Ambiente*, 22:483-493.
- Dahdouh-Guebas F., L. P. Jayatissa, D. Di Nitto, J. O. Bosire, D. Lo Seen and N. Koedam. 2005. How effective were mangroves as a defense against the recent tsunami? *Current Biology*, 15:443-447.
- De la Peña A., C. Augusto R. y M. De la Peña. 2010. Valoración económica del manglar por el almacenamiento de carbono, Ciénaga Grande de Santa Marta. pp: 133-150.
- Díaz-Franco R., F. Carrillo-Anzures, M. Acosta-Mireles, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala, J.D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13:25-34.

- Drake A, F., P. Emanuelli A. y E. Acuña C. 2003. Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo. Santiago de Chile. 197 p.
- Dugarjav D. and R. Pandey. 2009. Modelling and validation for volume estimation of *Eucalyptus*. Statistical Branch, Forest Research Institute, Dehra Dun (India). pp: 231-238.
- Duke N. C., J.-O. Meynecke, S. Dittmann, A. M. Ellison, K. Anger, U. Berger, S. Cannicci, K. Diele, K. C. Ewel, C. D. Field, N. Koedam, S. Y. Lee, C. Marchand, I. Nordhaus y F. Dahdouh-Guebas. 2007. A world without mangroves? *Science*, 317:41-42.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2007. The world's mangroves 1980-2005. FAO, Roma. 153:82 p.
- Fierro-Cabo A., R. García-Soriano, F. González-Medrano, C. Zamora-Tovar y A. D. Vázquez-Lule. 2013. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Caracterización del sitio de manglar La Pesca. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 18 p.
- Galán L, R., H. M. de los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14:65-82.
- García C, X., J. Hernández R., A. Hernández R., G. Quiñonez B., J. C. Tamarit U. y G. G. García E. 2017. Predicción del diámetro normal, altura y volumen a partir del diámetro del tocón en especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8:89-116.
- García E. 1998. Climas (Clasificación de Köeppen, modificado por García) Escala 1:1000,000. CONABIO, México.
- García-Cuevas X., V. Herrera-Ávila, J. Hernández-Ramos, J. de J. García-Magaña, A. Hernández-Ramos. 2016. Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7:95-104.
- Garrido R, R., S. Hernández C. y J. A. Aparicio H. 2018. Tópicos tecnológicos, científicos y ambientales. Red de colaboración del Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla y el Instituto Tecnológico Superior de Huauchinango. 2:226 p.

- Gaxiola D, J. M. 2011. Una revisión sobre los manglares: características, problemáticas y su marco jurídico. Importancia de los manglares, el daño de los efectos antropogénicos y su marco jurídico: Caso Sistema Lagunar de Topolobampo. *Ra Ximhai*, 7:355-369.
- Giesen W., S. Wulffraat, M. Zieren y L. Scholten. 2006. Mangrove guidebook for Southeast Asia. Dharmasarn Co., Ltd. Bangkok, Thailand. 769 p.
- Giri C., E. Ochieng, L. L. Tieszen, Z. Zhu, A. Singh, T. Loveland, J. Masek and N. Duke. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20:154-159.
- Hamilton S. E. and D. Casey. 2016. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Global Ecology and Biogeography*, 25:729-738.
- Hernández-Ramos J., A. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, J. C. Tamarit-Urias, L. Martínez-Ángel y J. García-Magaña. 2018. Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21:34-46.
- Hernández-Ramos J., H. M. De los Santos-Posadas, J. R. Valdéz-Lazalde, J. C. Tamarit-Urias, G. Ángeles-Pérez, A. Hernández-Ramos, B. Méndez-López y A. Peduzzi. 2017. Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*, 51:561-580.
- Hernández-Ramos, A., A. Cano-Pineda, C. Flores-López, J. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, M. Martínez-Salvador, y L. Martínez Á. 2019. Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25:1-13.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2005. Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. INE-SEMARNAT. México. 21 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1989. Conjunto de datos geológicos vectoriales. Escala 1:250 000. Serie I México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2001a. Carta topográfica E14B14 (La Pesca). Escala 1:50 000. México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2001b. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. (Continuo Nacional). Escala 1:1 000 000. Serie I (Subprovincias fisiográficas) México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2006. Conjunto de datos vectorial Edafológico. (Continuo Nacional). Escala 1:250 000 serie II. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas. (Continuo Nacional). Escala 1:1 000 000. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010. Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición: 2.0, Subcuenca Hidrográfica RH25Af L. Morales /Cuenca L. De San Andrés - L. Morales /R.H. San Fernando - Soto La Marina Y Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición: 2.0, Subcuenca Hidrográfica RH25Ba R. Soto La Marina /Cuenca R. Soto La Marina /R.H. San Fernando - Soto La Marina México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación. (Conjunto Nacional). Escala 1:250 000 serie V. México.
- INRENARE-OIMT (Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables-Organización Internacional de Maderas Tropicales). 1997. Plan de ordenamiento de manglares de Panamá, énfasis en las áreas de Chame, Chiriquí y Azuero. Goevaluaciones, S.A. (Informe de Consultoría). Novoa, O. (ed.). Proyecto de Manejo, Conservación y Desarrollo de los Manglares de Panamá. Proyecto PD 128/91. 106 p.
- Kauffman J. B., D. C. Donato y M. F. Adame. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Kauffman J. B. y Donato D. C. (eds.). CIFOR, Bogor, Indonesia. 37 p.
- Lee D., Y. Seo and J. Choi. 2017. Estimation and validation of stem volume equations for *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, and *Larix kaempferi* in South Korea. *Forest Science and Technology*, 13:77-82.
- Lema T, A. 1979. Introducción a la dasométrica. Universidad nacional, biblioteca ciencias agrícolas, Medellin, Colombia. 191 p.
- Lira C, R. 2010. Estaciones climatológicas en Google Earth. CONAGUA-SMN. 17 p.
- Loetsch F., F. Zohrer, K. E. Haller, 1973. Forest inventory. Vol. II B.L.V. Verlagsgesellschaft. Munich. 469 p.

- López P, J. y E. Ezcurra. 2002. Los manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques*, 8:27-51.
- Marmillod D., O. Cajina, C. Paniagua y E. Sediles. 2001. Elementos técnicos, económicos y sociales para el manejo forestal de los manglares de la Costa Pacífica Norte de Nicaragua. CATIE-IDR. Turrialba, Costa Rica. 109 p.
- Melchor M, J. I., A. E. Romero H., M. Rodríguez A. y J. G. Salazar G. 2010. Tablas de volumen para *Pinus chiapensis*. Pérez L., E. (ed.) CIR-Golfo Centro. INIFAP, Veracruz. 23 p.
- Montes de O, C. E., S. Corral R. y J. A. Nájera L. 2008. Ajuste de ecuaciones de volumen en *Pinus durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, México. *InterSedes*, 9:73-180.
- Moreno-Casasola P. y D. M. Infante M. 2016. Conociendo los manglares, las selvas inundables y los humedales herbáceos. INECOL - OIMT - CONAFOR. Instituto Literario de Veracruz, S.C. 128 p.
- Naranjo-Sánchez Y. A. y W. Troncoso-Olivo. 2008. Contenidos de cadmio, cobre, zinc y plomo en órganos de *Rhizophora mangle* de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37:107-129.
- Navarro-Martínez J., A. Borja-de la Rosa, M. Á. Musalem-Santiago, H. Ramírez-Maldonado y D. Granados-Sánchez. 2002. Ecuaciones y tablas de volúmenes comerciales con y sin corteza para *Peltogyne mexicana* Martínez, una especie amenazada del estado de Guerrero, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8:133-139.
- Paniagua C., O. Cajina y Marmillod, D. 2001. Primer caso de manejo forestal comunitario en manglares de Nicaragua: Experiencias de la cooperativa 28 de julio. CATIE-IDR. Turrialba, Costa Rica. 102 p.
- PMC (Programa Mexicano del Carbono). 2011. Manual de referencia para el muestreo semicuantitativo del inventario forestal estatal cuantitativo: Vegetación hidrófila. México, D.F. 54 p.
- Pompa G, M. y R. Solís M. 2008. Ecuación de volumen para el género *Quercus* en la región noroeste de Chihuahua, México. *Quebracho*, 16:84-93.

- Pompa-García M., H. M. de los Santos-Posadas, M. E. Zepeda-Bautista y J. J. Corral-Rivas. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia*, 45:379-387.
- Prodan M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura forestal. Instituto Internacional de Cooperación para la Agricultura (IICA), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. San José, Costa Rica. 586 p.
- Ramos-Uvilla J. A., J. J. García-Magaña, J. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, J. C. Velarde-Ramírez, H. J. Muñoz-Flores y G. G. García-Espinoza. 2014. Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5:92-109.
- Rodríguez R, A., T. Escoto G., S. G. Díaz R., G. Iñiguez C. y J. I. Manríquez C. 2009. Desarrollo de tabla de volumen (con corteza) para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schlechtendal como herramienta para la evaluación ambiental y forestal en el Bosque La Primavera, Jalisco. In: II Foro de investigación y conservación del “Bosque la Primavera” Zapopan, Jalisco 2009. pp: 199-205.
- Rodríguez Z, M. T., E. Villeda C., A. D. Vázquez-Lule, M. Bejarano, M. I. Cruz L., M. Olguín, S. A. Villela G. y R. Flores. 2018. Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: Un Enfoque espacial multiescala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad., Ciudad de México. 272 p.
- Rodríguez-Zúñiga M. T., C. Troche-Souza, A. D. Vázquez-Lule, J. D. Márquez-Mendoza, B. Vázquez- Balderas, L. Valderrama-Landeros, S. Velázquez-Salazar, M. I. Cruz-López, R. Ressler, A. Uribe-Martínez, S. Cerdeira-Estrada, J. Acosta-Velázquez, J. Díaz-Gallegos, R. Jiménez-Rosenberg, L. Fueyo-Mac Donald, y C. Galindo-Leal. 2013. Manglares de México/ Extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 128 p.
- Romahn de la V, C. F., y H. Ramírez M. 2010. Dendrometría. Edición digital corregida y aumentada. Chapingo, Mex. 394 p.
- Ross M. S., P. L. Ruiz, G. J. Telesnicki and J. F. Meeder. 2001. Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (U.S.A.). *Wetlands Ecology and Management*, 9:27-37.

- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 p.
- Salas C., L. Nieto y A. Irisarri. 2005. Modelos de volumen para *Pinus pinaster* Ait. En la Comarca del Baixo Miño, Galicia, España. *Quebracho*, 12:11-22.
- Schumacher F. X. and F. Dos S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of agricultural Research*, 47:719-734.
- Silva S, M. M., G. Medina G., J. A. Ruíz C., V. Serrano A., G. Díaz P. y M. A. Cano G. 2007. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Tamaulipas. Castillo T., H. (ed.) INIFAP, Rio Bravo, Tamaulipas, México. 316 p.
- Silva-García J. E., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez y M. A. Gonzáles-Tagle. 2018. Ecuaciones de volumen para *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F. Macbr. en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias forestales*, 9:1-21.
- Spalding M., F. Blasco, and C. Field. 1997. World mangrove atlas. The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, Japan. 178 p.
- Tapia J. y J. Návar. 1998. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la sierra madre oriental. *Ciencias e Investigación Forestal-Instituto Forestal/Chile*, 12:5-23.
- Tapia J. y J. Návar. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana*, 13:19-28.
- Telles A., R. Gómez C., M., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., y Jiménez Pérez, J. 2018. Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 24:1-12.
- Téllez-García C. P. y J. I. Valdez-Hernández. 2012. Caracterización estructural del manglar en el estero Palo Verde, Laguna de Cuyutlán, Colima. *Revista Chapingo Series Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18:395-408.
- Tewari V. P. and V. S. Kishan K. 2001. Construction and validation of tree volume functions for *Dalbergia sissoo* grown under irrigated conditions in the hot desert of India. *Journal of Tropical Forest Science*, 13:503-511.

- Tomlinson P. B. 1986. The botany of mangroves. Cambridge: Cambridge University Press. 413 p.
- Tomlinson P. B. 2016. The botany of mangroves. 2nd edn. Cambridge: Cambridge University Press. 418 p.
- Travieso-Bello A. C. 2006. Manglares. In: Estrategia para el manejo costero integral: El enfoque municipal. P. Moreno C., E. Peresbarbosa R., y A. C. Travieso-Bello (eds.) Instituto de Ecología, A. C, Xalapa, Veracruz, México. pp: 183-204.
- Treviño C, J. y A. Valiente B. 2014. La vegetación de Tamaulipas y sus principales asociaciones vegetales. In: Biodiversidad Tamaulipeca. Correa S., A., J. V. Horta V., J. García V. y L. Barrientos L. (eds.) Instituto Tecnológico de Cd. Victoria. pp: 22-46.
- Tsega M., A. Guadie, Z. Lakew T., Y. Belayneh and D. Niu. 2018. Development and validation of a stem volume equation for *Cupressus lusitanica* in Gerged Forest, Ethiopia. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 81:79-84.
- UMAFOR San Juanito A. C. (Unidad de Manejo Forestal San Juanito A. C.). 2013. Sistema biométrico UMAFOR 08-05 San Juanito, Chihuahua. 78 p.
- Uribe P, J. y L. E. Urrego G. 2009. Gestión ambiental de los ecosistemas de manglar. *Gestión y Ambiente*, 12:57-72.
- Valderrama L, L. H., M. T. Rodríguez Z., C. Troche S., S. Velázquez S., E. Villeda C., J. A. Alcántara M., B. Vázquez B., M. I. Cruz L. y R. Ressler. 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema 27 de monitoreo 1970/1980–2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. 128 p.
- Valdez H, J. I. 2004. Manejo forestal de un manglar al sur de Marismas Nacionales, Nayarit. *Madera y Bosques*, 10:93-104.
- Vargas B, R. 2008. Estadística II. Programa administración pública territorial. Escuela Superior de administración pública. Bogotá D.C. Colombia. 88 p.
- Vargas T, V., M. E. Hernández R., J. Gutiérrez L., C. J. Placido D. y A. Jiménez C. 2007. Clasificación climática del estado de Tamaulipas, México. *CienciaUAT*, 2:15-19.
- Villa S, A. B. y M. Caballero D. 1976. Técnicas de muestreo usadas en México en inventarios forestales. Desarrollo histórico: In: *Ciencia Forestal*, 2:3-30.

- Villalba M, J. C. 2005. Los manglares en el mundo y en Colombia. Costa Caribe Colombia. 22 p.
- Wilkie M. L. and S. Fortuna. 2003. Status and trends in mangrove area extent worldwide. Forest Resources Assessment Working Paper No. 63. Forest Resources Division. FAO, Rome, Italy. 123 p.
- Yáñez-Arancibia A. y A. L. Lara-Domínguez. 1999. Los manglares de América Latina en la encrucijada. In: Ecosistemas de manglar en América Tropical. Yáñez Arancibia A. y A. L. Lara-Domínguez (eds.). Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. pp: 9-16.

APÉNDICE

Apéndice 1. Compendio de ecuaciones para volumen fuste total con los parámetros calculados.

Tipo de Ecuación	Modelo	Denominación	Ecuación de Predicción de Volumen	Pr > F
VFT	M1	Spurr Potencial	$VFT = 0.00028(DH^{1.014775})$	< 0.0001
	M2	Spurr de la Variable Combinada	$VFT = 0.000078(D^2H)^{0.821527}$	< 0.0001
	M3	Spurr 1	$VFT = 0.000022(D^2)(H)$	< 0.0001
	M4	Geométrico de Schumacher y Hall (1933)	$VFT = 0.000096(D^{1.477576}H^{0.938775})$	< 0.0001
	M5	Meyer	$VFT = 0.000096(D)^{-0.39994} (D^2H)^{0.938744}$	< 0.0001
	M6	Thornber	$VFT = 0.000023(H/D)^{0.070984} (D^2H)$	< 0.0001
	M7	Spurr Variable Combinada	$VFT = 0.000736 + 0.000021(D^2H)$	< 0.0001
	M8	Honner	$VFT = D^2 / (334.096 + 43393.02(1/H))$	< 0.0001
	M9	Takata	$VFT = (D^2H) / (19049.71 + (1973.494(D)))$	< 0.0001
	M10	Sin nombre 1	$VFT = -0.00783 + 0.001306(D) + 0.002208(H)$	< 0.0001
	M11	Sin nombre 2	$VFT = -0.00499 + 0.00144(D) + 0.000227(H^2)$	< 0.0001
	M12	Sin nombre 3	$VFT = -0.00491 + 0.000079(D^2) + 0.00234(H)$	< 0.0001
	M13	Meyer Modificado	$VFT = 0.000656 + 0.000005222(D^2) + 0.00002(D^2H)$	< 0.0001
	M14	Naslund Slobada Modificada	$VFT = -0.00141 + 0.001031(H) + 0.000018(D^2H) + -0.00000231(DH^2)$	< 0.0001
	M15	Naslund Slobada de tres parámetros	$VFT = 0.000415 + -0.00085(H) + 0.00029(DH) + 0.000004655(D^2H)$	< 0.0001
	M16	Australiano	$VFT = -0.00178 + 0.000021(D^2) + 0.001072(H) + 0.000014(D^2H)$	< 0.0001

Dónde: VFT= Volumen fuste total, D= Diámetro a la base, D2= Diámetro de la base al cuadrado, H= Altura total, H²= Altura total al cuadrado.

Apéndice 2. Compendio de ecuaciones para volumen total árbol con los parámetros calculados.

Tipo de Ecuación	Modelo	Denominación	Ecuación de Predicción de Volumen	Pr > F
VTA	M1	Spurr Potencial	$VTA = 0.000583(DH^{0.752436})$	< 0.0001
	M2	Spurr de la Variable Combinada	$VTA = 0.000097(D^2H)^{0.826132}$	< 0.0001
	M3	Spurr 1	$VTA = 0.000028(D^2)(H)$	< 0.0001
	M4	Geométrico de Schumacher y Hall (1933)	$VTA = 0.000061(D^{2.005617}H^{0.582472})$	< 0.0001
	M5	Meyer	$VTA = 0.000061(D)^{0.840628}(D^2H)^{0.582559}$	< 0.0001
	M6	Thornber	$VTA = 0.000022(H/D)^{-0.31258}(D^2H)$	< 0.0001
	M7	Spurr Variable Combinada	$VTA = 0.000771 + 0.000027(D^2H)$	< 0.0001
	M8	Honner	$VTA = D^2 / (2219.052 + 20593.45(1/H))$	< 0.0001
	M9	Takata	$VTA = (D^2H) / (39847.01 + (-317.952(D)))$	< 0.0001
	M10	Sin nombre 1	$VTA = -0.00961 + 0.002437(D) + 0.001218(H)$	< 0.0001
	M11	Sin nombre 2	$VTA = -0.00792 + 0.002415(D) + 0.000154(H^2)$	< 0.0001
	M12	Sin nombre 3	$VTA = -0.00424 + 0.000145(D^2) + 0.001553(H)$	< 0.0001
	M13	Meyer Modificado	$VTA = -0.00044 + 0.000079(D^2) + 0.000016(D^2H)$	< 0.0001
	M14	Naslund Slobada Modificada	$VTA = -0.00102 + 0.000768(H) + 0.000035(D^2H) + -0.00002(DH^2)$	< 0.0001
	M15	Naslund Slobada de tres parámetros	$VTA = 0.002842 + -0.00163(H) + 0.000181(DH) + 0.000021(D^2H)$	< 0.0001
	M16	Australiano	$VTA = -0.00092 + 0.000082(D^2) + 0.000209(H) + 0.000015(D^2H)$	< 0.0001

Dónde: VTA= Volumen total árbol, D= Diámetro a la base, D²= Diámetro de la base al cuadrado, H= Altura total, H²= Altura total al cuadrado.

Apéndice 3. Comparación de estadísticos de las ecuaciones para volumen fuste total, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	RCME	White Chi-Cuadrado (X2) Estadístico	Probabilidad	Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W) Valor	Probabilidad
Fuste Total	1	b0	0.00028	<0.0001	0.9291	0.9283	0.000010000	0.00318	29.81	<0.0001	1.4764	0.85	<0.0001
		b1	1.014775	<0.0001									
	2	b0	0.000078	0.0013	0.9398	0.9392	0.000008595	0.00293	32.23	<0.0001	1.7022	0.82	<0.0001
		b1	0.821527	<0.0001									
	3	b0	0.000022	<0.0001	0.9295	0.9295	0.000009960	0.00316	29.38	<0.0001	1.5633	0.83	<0.0001
		b0	0.000096	0.0014									
	4	b1	1.477576	<0.0001	0.9429	0.9417	0.000008242	0.00287	31.1	0.0003	1.7936	0.8	<0.0001
		b2	0.938775	<0.0001									
		b0	0.000096	0.0014									
	5	b1	-0.39994	0.0266	0.9429	0.9417	0.000008242	0.00287	31.1	0.0003	1.7936	0.8	<0.0001
		b2	0.938744	<0.0001									
	6	b0	0.000023	<0.0001	0.9305	0.9297	0.000009930	0.00315	30.54	<0.0001	1.6689	0.81	<0.0001
		b1	0.070984	0.2583									
	7	b0	0.000736	0.0825	0.9318	0.931	0.000009742	0.00312	29.12	<0.0001	1.5867	0.83	<0.0001
		b1	0.000021	<0.0001									
	8	b0	334.096	0.4797	0.9299	0.9291	0.000010000	0.00316	29.15	<0.0001	1.5301	0.83	<0.0001
		b1	43393.02	<0.0001									
	9	b0	19049.71	0.0004	0.9427	0.9421	0.000008183	0.00286	29.59	<0.0001	1.8431	0.78	<0.0001
		b1	1973.494	<0.0001									
	10	b0	-0.00783	<0.0001	0.8865	0.884	0.000016000	0.00405	23.07	0.0003	1.1005	0.96	0.0039
b1		0.001306	<0.0001										
b2		0.002208	<0.0001										

Dónde: R²= Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, RCME= Raíz del cuadrado medio del error, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 3. Comparación de estadísticos de las ecuaciones para volumen fuste total, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación...

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	RCME	White Chi-Cuadrado (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W)	
									Estadístico	Probabilidad		Valor	Probabilidad
Fuste Total	11	b0	-0.00499	<0.0001	0.9211	0.9194	0.000011000	0.00337	26.01	<0.0001	1.1914	0.94	0.0002
		b1	0.00144	<0.0001									
		b2	0.000227	<0.0001									
	12	b0	-0.00491	<0.0001	0.917	0.9151	0.000012000	0.00346	25.32	0.0001	1.4686	0.94	0.0004
		b1	0.000079	<0.0001									
		b2	0.00234	<0.0001									
	13	b0	0.000656	0.1523	0.9319	0.9304	0.000009825	0.00313	30.17	<0.0001	1.5674	0.83	<0.0001
		b1	0.000005	0.6412									
		b2	0.00002	<0.0001									
	14	b0	-0.00141	0.0880	0.9393	0.9373	0.000008858	0.00298	29.26	0.0006	1.8027	0.86	<0.0001
		b1	0.001031	0.0029									
		b2	0.000018	<0.0001									
		b3	-0.000002	0.4549									
	15	b0	0.000415	0.6394	0.943	0.9411	0.000008315	0.00288	32.02	<0.0001	1.8362	0.79	<0.0001
		b1	-0.00085	0.2478									
		b2	0.00029	0.0126									
		b3	0.000005	0.3807									
	16	b0	-0.00178	0.0241	0.9411	0.9392	0.000008593	0.00293	29.2	0.0003	1.7683	0.87	<0.0001
		b1	0.000021	0.0701									
		b2	0.001072	0.0003									
		b3	0.000014	<0.0001									

Dónde: R²= Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, RCME= Raíz del cuadrado medio del error, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 4. Comparación de estadísticos de las ecuaciones para volumen total árbol, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	RCME	White Chi-Cuadrado (X2)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W)	
									Estadístico	Probabilidad		Valor	Probabilidad
Total Árbol	1	b0	0.000583	<0.0001	0.845	0.8433	0.000039	0.00627	33.07	<0.0001	1.3282	0.75	<0.0001
		b1	0.752436	<0.0001									
	2	b0	0.000097	0.0206	0.8895	0.8883	0.000028	0.00529	22.08	0.0005	1.9552	0.75	<0.0001
		b1	0.826132	<0.0001									
	3	b0	0.000028	<0.0001	0.8799	0.8799	0.000030	0.00549	19.87	<0.0001	2.0714	0.73	<0.0001
		b0	0.000061	0.0263									
	4	b1	2.005617	<0.0001	0.9025	0.9004	0.000025	0.005	34.4	<0.0001	1.9868	0.77	<0.0001
		b2	0.582472	<0.0001									
	5	b0	0.000061	0.0263	0.9025	0.9004	0.000025	0.005	34.39	<0.0001	1.9869	0.77	<0.0001
		b1	0.840628	0.0007									
	6	b2	0.582559	<0.0001	0.8975	0.8963	0.000026	0.0051	26.12	<0.0001	1.9502	0.76	<0.0001
		b0	0.000022	<0.0001									
	7	b1	-0.31258	0.0002	0.8813	0.8801	0.000030	0.00548	19.84	<0.0001	2.0491	0.73	<0.0001
		b0	0.000771	0.2974									
	8	b1	0.000027	<0.0001	0.9021	0.901	0.000025	0.00498	22.08	<0.0001	1.9949	0.77	<0.0001
		b0	2219.052	<0.0001									
	9	b1	20593.45	<0.0001	0.8803	0.879	0.000030	0.00551	25.26	<0.0001	2.0721	0.73	<0.0001
		b0	39847.01	<0.0001									
	10	b1	-317.952	0.5489	0.8391	0.8355	0.003750	0.000041	30.67	<0.0001	1.2724	0.92	<0.0001
		b0	-0.00961	<0.0001									
		b1	0.002437	<0.0001									
		b2	0.001218	0.0138									

Dónde: R²= Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, RCME= Raíz del cuadrado medio del error, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 4. Comparación de estadísticos de las ecuaciones para volumen total árbol, utilizadas para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Continuación...

Tipo de ecuación	Modelo	Parámetros	Estimación	P<t	R ²	R ² _{aj}	CME	RCME	White Chi-Cuadrado (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk (W)	
									Estadístico	Probabilidad		Valor	Probabilidad
Total Árbol	11	b0	-0.00792	<0.0001	0.8539	0.8507	0.000037	0.00612	33.71	<0.0001	1.2865	0.9	<0.0001
		b1	0.002415	<0.0001									
		b2	0.000154	0.0001									
	12	b0	-0.00424	0.0001	0.8875	0.885	0.000029	0.00537	28.16	<0.0001	1.7556	0.89	<0.0001
		b1	0.000145	<0.0001									
		b2	0.001553	<0.0001									
	13	b0	-0.00044	0.5417	0.9026	0.9005	0.000025	0.005	24.47	<0.0001	1.9822	0.78	<0.0001
		b1	0.000079	<0.0001									
		b2	0.000016	<0.0001									
	14	b0	-0.00102	0.4658	0.8996	0.8963	0.000026	0.0051	27	<0.0001	2.0189	0.79	<0.0001
		b1	0.000768	0.1859									
		b2	0.000035	<0.0001									
	15	b3	-0.000020	0.0002	0.8839	0.88	0.000030	0.00549	26.41	0.0009	2.0212	0.79	<0.0001
		b0	0.002842	0.0944									
		b1	-0.00163	0.2411									
	16	b2	0.000181	0.4069	0.9028	0.8996	0.000025	0.00502	27.86	0.0005	1.9793	0.79	<0.0001
		b3	0.000021	0.0354									
		b0	-0.00092	0.4918									
		b1	0.000082	<0.0001	0.9028	0.8996	0.000025	0.00502	27.86	0.0005	1.9793	0.79	<0.0001
		b2	0.000209	0.6712									
		b3	0.000015	0.0003									

Dónde: R²= Coeficiente de determinación, R²_{aj}= Coeficiente de determinación ajustado, RCME= Raíz del cuadrado medio del error, CME= Cuadrado medio del error.

Apéndice 5. Tabla de volumen fuste total (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VFT = 0.000096(D^{1.477576}H^{0.938775})$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0046905968	0.0089914045	0.0131564163	0.0172356224
10	0.0130623946	0.0250393029	0.0366380461	0.0479978371
15	0.0237799544	0.0455837921	0.0666991843	0.0873795664
20	0.0363762140	0.0697295608	0.1020297921	0.1336645880
25	0.0505835616	0.0969636241	0.1418792588	0.1858695611

Dónde: VFT=Volumen fuste total, D= Diámetro basal y H=Altura total del fuste.

Apéndice 6. Tabla de volumen fuste total (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VFT = 0.000096(D)^{-0.39994} (D^2H)^{0.938744}$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0046901514	0.0089903576	0.0131547191	0.0172332452
10	0.0130609008	0.0250359014	0.0366326086	0.0479902857
15	0.0237769650	0.0455770824	0.0666885283	0.0873648273
20	0.0363713481	0.0697187354	0.1020126699	0.1336409651
25	0.0505764794	0.0969479649	0.1418545629	0.1858355508

Dónde: VFT=Volumen fuste total, D= Diámetro basal, D²=Diámetro basal al cuadrado y H=Altura total del fuste.

Apéndice 7. Tabla de volumen total árbol (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VTA = 0.000061(D)^{0.840628} (D^2H)^{0.582559}$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0039307678	0.0058863370	0.0074546743	0.0088148080
10	0.0157858184	0.0236393121	0.0299376966	0.0353999434
15	0.0356009380	0.0533125153	0.0675169354	0.0798356576
20	0.0633952635	0.0949346043	0.1202286837	0.1421648653
25	0.0991821875	0.1485256343	0.1880983403	0.2224175993

Dónde: VTA=Volumen total árbol, D= Diámetro basal, D²=Diámetro basal al cuadrado y H=Altura total del fuste.

Apéndice 8. Tabla de volumen total árbol (m³) para *Rhizophora mangle* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

$$VTA = 0.000061(D^{2.005617}H^{0.582472})$$

Diámetro Basal en (cm)	Altura Total en (m)			
	5	10	15	20
5	0.0039294016	0.0058839362	0.0074513710	0.0088106815
10	0.0157789206	0.0236275578	0.0299217550	0.0353802077
15	0.0355835206	0.0532832195	0.0674774537	0.0797869753
20	0.0633618966	0.0948789155	0.1201539188	0.1420729033
25	0.0991271312	0.1484342360	0.1879759590	0.2222673261

Dónde: VTA=Volumen total árbol, D= Diámetro basal y H=Altura total del fuste.