

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Tabla de Volúmenes para Mangle Negro (*Avicennia germinans* L.) en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Por:

DALIA JAZMÍN MAGDALENO LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Tabla de Volúmenes para Mangle Negro (*Avicennia germinans* L.) en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Por:

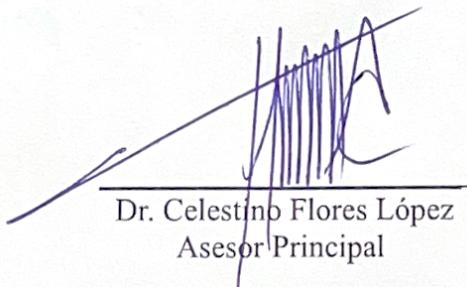
DALIA JAZMÍN MAGDALENO LÓPEZ

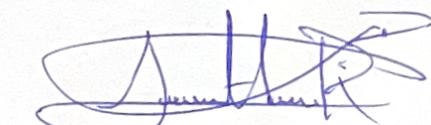
TESIS

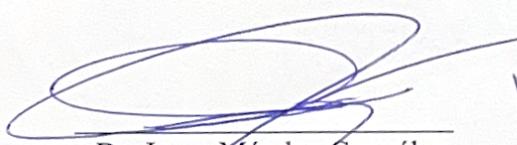
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

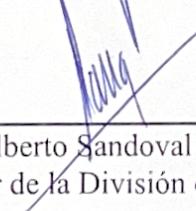
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Celestino Flores López
Asesor Principal


M.C. Adrián Hernández Ramos
Asesor Principal Externo


Dr. Jorge Méndez González
Coasesor


M.C. Salvador Valencia Manzo
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Range
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2025

El presente estudio de tesis fue financiado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave 38111-425103001-2175 denominado Diversidad y Estructura de Bosques Tropicales en el Occidente y Sureste de México. Proyecto a cargo del Dr. Celestino Flores López, Profesor-Investigador del Departamento Forestal.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primero a **Dios**, porque nunca me ha dejado sola aún en los momentos más complicados de mi vida y por darme siempre la fuerza para seguir adelante.

A la **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**, por haber sido una segunda casa para mí, por todas sus oportunidades y servicios durante mi formación, por haberme permitido estudiar y cumplir una meta de mi vida, el cursar la carrera de Ingeniero Forestal.

Al **Departamento Forestal**, por darme la oportunidad de aprender de los mejores maestros, por sus clases impartidas y prácticas que me ayudaron en mi formación personal y académica durante esta etapa de mi vida.

Al **Dr. Celestino Flores López**, por ser un gran maestro, por su apoyo y paciencia durante este proceso de titulación y haberme dado la oportunidad de realizar tesis con él. A mis asesores el **M.C. Adrián Hernández, al Dr. Jorge Méndez y al M.C. Salvador Valencia**, por su paciencia, apoyo y su gran aportación en mi vida académica y a mi tesis.

A mis padres **Elizabeth López de la Cruz y Benjamín Magdaleno Castillo**, principalmente por darme la vida, por su educación y siempre alentarme a seguir cumpliendo mis objetivos.

A mis **hermanos**, por su apoyo en cada momento de mi preparación en una de las mejores universidades de México y nunca dejarme sola aun en los momentos más difíciles.

A mis **amigos y compañeros** de la carrera, por acompañarnos durante esta etapa y hacernos los días más amenos.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios. Le doy gracias por cuidarme siempre, darme fuerzas cuando sentí que no podía más y por acompañarme en cada paso hasta llegar a este momento tan especial en mi vida.

A mis padres, Elizabeth López de la Cruz y Benjamín Magdaleno Castillo. A quienes les agradezco su amor infinito, su entrega y sus consejos que siempre me han guiado. Por los valores que me dieron y por enseñarme que los sueños se alcanzan con perseverancia y humildad. Cada esfuerzo suyo está reflejado en este logro, que no es solo mío, sino también de ustedes. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en los que yo dudaba.

A mis hermanos: Julio Enrique, Coraquetzali, Xicoténcatl y Atahualpa. Gracias por su apoyo incondicional, por ser mi ejemplo y mi motivación. Por cada momento compartido y por enseñarme a mantenerme firme, los llevo conmigo en cada meta alcanzada.

A mi gemela Caro, mi mejor amiga. Gracias por tu cariño, tu paciencia y por celebrar cada paso conmigo. Gracias por nunca dudar de mí y ser mi inspiración para ser mejor persona cada día.

A mis cuñadas, por su cariño, su compañía y por ser más que familia. Y a mis sobrinitos, que con su presencia y alegría llenan mi corazón, los amo profundamente.

A mis amigas y amigos: Renata, Miriam, Priscila, Marco, Agustín y a todas las niñas del fútbol. Gracias por su compañía, por ser mi familia lejos de casa. Cada recuerdo con ustedes hizo esta etapa inolvidable.

Finalmente, a todas las personas que de alguna manera se cruzaron en mi camino durante este proceso. Este logro también les pertenece.

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

La autora, quien es la responsable directa, 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 (autoplagio); comprar, robar o pedir prestados 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, gráficas, 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 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



Dalia Jazmín Magdaleno López

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos e hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Ecosistema del manglar.....	5
2.2 <i>Avicennia germinans</i> L	6
2.3 <i>Avicennia germinans</i> L. en Tamaulipas	6
2.4 Dasometría y tablas de volumen	7
2.5 Importancia de las tablas de volumen	7
2.6 Tipos de tablas de volumen.....	11
2.7 Proceso para generar una tabla de volúmenes.....	11
2.8 Criterios de información	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1 Área de estudio.....	14
3.2 Diseño de muestreo y colecta de datos	16
3.3 Selección y tamaño de la muestra	16
3.4 Medición de variables	16
3.5 Estimación del volumen individual del fuste según tipos dendrométricos	17
3.5.1 Volumen del tocón	18
3.5.2 Volumen del fuste	18
3.5.3 Volumen de la punta.....	19
3.5.4 Volumen de las ramas	19
3.6 Modelos de regresión utilizados.....	19
3.7 Análisis estadístico.....	20

3.8 Criterios de elección del modelo.....	20
3.9 Validación de los modelos	22
3.10 Construcción de la tabla de predicción de volumen.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1 Ajuste y selección de los modelos	24
4.2 Ajuste y selección de los 5 mejores modelos.....	25
4.2.1 Ecuaciones de volumen de fuste.....	25
4.2.2 Ecuaciones de volumen total árbol.....	32
4.3 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen	38
4.4 Tablas de predicción de volumen.....	41
4.4.1 Tabla de predicción de volumen de fuste para <i>Avicennia germinans</i> L.....	41
4.4.2 Tabla de predicción de volumen total árbol para <i>Avicennia germinans</i> L	41
CONCLUSIONES	43
6 RECOMENDACIONES.....	44
LITERATURA CITADA.....	45
8 APÉNDICE.....	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen de dos entradas para especies de manglares y tropicales.....	8
Cuadro 2. Aspectos ecológicos de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	14
Cuadro 3. Número de individuos por categoría diamétrica y altura total de <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	17
Cuadro 4. Modelos ajustados para la predicción de volumen de <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	20
Cuadro 5. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen de fuste en <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	24
Cuadro 6. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen total árbol en <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	24
Cuadro 7. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen de fuste, utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	27
Cuadro 8. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	33
Cuadro 9. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos con una muestra de 45 árboles para volumen de fuste utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca Soto La Marina Tamaulipas.....	39
Cuadro 10. Sistema de calificación de modelos para volumen de fuste utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	39
Cuadro 11. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos con una muestra de 45 árboles para volumen total árbol utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca Soto La Marina Tamaulipas.....	40
Cuadro 12. Sistema de calificación de modelos para volumen total árbol utilizadas para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	40

Cuadro 13. Tabla de estimación de volumen de fuste para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Takata $V = (D^2At) / (24434.43 + (873.7786(D)))$	41
Cuadro 14. Tabla de estimación de volumen total árbol para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Schumacher y Hall $V = 0.000107 (D^{2.080652} At^{0.56929})$	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio y de los sitios de muestreo de <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.	15
Figura 2. Comparación gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen de fuste total para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	31
Figura 3. Comparación gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen total árbol para <i>Avicennia germinans</i> L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.....	37

RESUMEN

Los manglares brindan servicios ecosistémicos clave como captura de carbono, protección costera y soporte a la biodiversidad. La especie *Avicennia germinans* L. presenta una morfología de altura baja lo que hace necesario el desarrollo de modelos locales para estimar su volumen. El objetivo de este estudio fue ajustar modelos de regresión para estimar el volumen de fuste (VF) y el volumen total árbol (VTA) de *A. germinans* en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas. Se evaluaron 147 individuos mediante un muestreo dirigido, registrando diámetro a la base (D) y altura total (At), de estos 102 (70% de la muestra) se usaron para el ajuste de modelos y 45 para su validación (30% de la muestra). Se ajustaron diez modelos de volumen lineales y no lineales empleando PROC MODEL en SAS. La selección de los modelos se basó en el mayor R^2 aj y los valores menores en RCME, AIC, BIC y pruebas de supuestos mediante Shapiro-Wilk, White y Durbin-Watson. Además, la validación se realizó utilizando RCME, EMA, E y DA%, siguiendo una metodología de puntuación.

El modelo de Takata presentó el mejor ajuste para VF, con un R^2 aj = 0.93 y los valores más bajos de RCME = 0.0089m³, el mejor desempeño en el análisis gráfico y en la validación. Para el VTA, el modelo de Schumacher y Hall tuvo un buen desempeño con un R^2 aj = 0.87 y buenos indicadores de error (RCME 0.03m³), además, destacó por su simplicidad y robustez estadística y tuvo mejores resultados en su validación con la puntuación más baja. En la prueba de White ambos modelos presentaron problemas de heterocedasticidad, sin embargo, hay autores que señalan que la heterocedasticidad es inherente a los modelos volumétricos y no invalida su uso para estimaciones prácticas de volumen.

Ambos modelos fueron consistentes durante la validación, por lo que se desarrollaron tablas de volumen de dos entradas (D y At) para su aplicación en campo.

Palabras clave: Ajuste estadístico, Manejo forestal, Modelos alométricos, Servicios ecosistémicos, Volumen maderable.

ABSTRACT

Mangroves provide key ecosystem services such as carbon sequestration, coastal protection, and support for biodiversity. The species *Avicennia germinans* L. exhibits a low-height growth form, which makes the development of local models necessary to estimate its volume. The objective of this study was to fit regression models to estimate stem volume (SV) and total tree volume (TTV) of *A. germinans* in La Pesca, Soto la Marina, Tamaulipas. A total of 147 trees were evaluated using purposive sampling, recording basal diameter (D) and total height (H); of these, 102 trees (70 % of the sample) were used for model fitting and 45 (30 %) for validation. Ten linear and non-linear volume models were fitted using PROC MODEL in SAS. Model selection was based on the highest adjusted R^2 , and the lowest values of RMSE, AIC, BIC, along with diagnostic tests for the assumptions via Shapiro–Wilk, White, and Durbin–Watson tests. In addition, model validation was carried out using RMSE, mean error (ME), bias (E), and percent agreement (DA %), following a scoring methodology.

The Takata model showed the best fit for SV, with an adjusted $R^2 = 0.93$, the lowest RMSE = 0.0089 m³, the best performance in graphical analysis, and the most favorable validation results. For TTV, the Schumacher & Hall model performed well, with an adjusted $R^2 = 0.87$ and favorable error indicators (RMSE 0.03 m³); moreover, it stood out for its simplicity and statistical robustness and achieved the lowest score in validation. In the White test both models showed issues of heteroscedasticity; however, several authors note that heteroscedasticity is inherent to volume models and does not invalidate their practical use for volume estimation.

Both models remained consistent during validation; therefore, two-way volume tables (D and H) were developed for field application.

Keywords: Statistical fitting, Forest management, Allometric models, Ecosystem services, Merchantable volume.

1. INTRODUCCIÓN

Los manglares son ecosistemas costeros ubicados en zonas tropicales y subtropicales, destacan como ecosistemas de gran productividad biológica, con un valor ecológico y socioeconómico fundamental; estos ecosistemas habitan en zonas salobres, con suelos anegados y carentes de oxígeno, donde sus adaptaciones esenciales les permiten prosperar a pesar de la extrema salinidad, como raíces aéreas y semillas flotantes. (Kauffman *et al.*, 2013; Herrera Silveira *et al.*, 2020).

Entre los principales servicios ecológicos que generan los manglares se encuentra la mitigación de fenómenos meteorológicos extremos (huracanes y tormentas), la captura y almacenamiento de carbono, la prevención de la erosión costera y la depuración natural del agua y el soporte directo a comunidades locales dedicadas a actividades de perca, apicultura y otros aprovechamientos locales (Kauffman *et al.*, 2013). Sin embargo, su permanencia se ve afectada por múltiples presiones como el cambio climático, la expansión urbana y la degradación ambiental.

En México se encuentran cuatro especies principales: mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.), mangle negro (*Avicennia germinans* L.), mangle blanco (*Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn.) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus* L.) (Friess *et al.*, 2020; Zamora-Tovar *et al.*, 2024b). Estas cuatro especies están listadas en la Norma Oficial Mexicana (la NOM-059-SEMARNAT-2010) donde se les cataloga como amenazadas y un artículo en la Ley General de la Vida Silvestre en 2007 (60 TER), el cual prohíbe cualquier cambio que afecte la integralidad del ecosistema (Santiago García *et al.*, 2020; Velázquez Salazar *et al.*, 2020a; Basáñez Muñoz *et al.*, 2021; Sol Sánchez *et al.*, 2022; Capella, 2024; Zamora Tovar *et al.*, 2024a).

Específicamente en el estado de Tamaulipas hay una limitada disponibilidad de información científica sobre manglares, a pesar de que la región alberga múltiples zonas decretadas como prioritarias para la conservación (nueve sitios prioritarios para la conservación, un sitio Ramsar y tres áreas naturales protegidas) (Zamora Tovar *et al.*, 2024). En particular, el municipio de Soto La Marina alberga comunidades monoespecíficas de *A. germinans*, que es la especie de mangle más utilizada en esas zonas en proyectos de restauración ecológica debido a que sobrevive en condiciones extremas de salinidad, además de que tiene un valor socioeconómico por su potencial en la captura de carbono, la producción de miel a partir de su floración y al estabilizar los suelos ante la erosión (Kennedy *et al.*, 2020; Zamora Tovar *et al.*, 2024a). Debido a esto, su estudio resulta fundamental para establecer estrategias de conservación y restauración.

En este contexto, la medición de parámetros forestales es fundamental para la gestión de bosques y la planificación ambiental, ya que proporciona información cuantitativa, tanto a nivel árboles como de rodales, clave para estimar volúmenes con base en mediciones accesibles como el diámetro a la base y la altura total (Navarro *et al.*, 2002). Sin embargo, en *A. germinans* del municipio de Soto La Marina, existe una carencia de modelos dasométricos específicos que describan la estructura y el volumen de la especie. Esta limitación impide que se generen estimaciones precisas del volumen y biomasa, que son fundamentales para la evaluación de recursos forestales y de servicios ambientales (Manzanares y Guadalupe, 2019).

El uso de modelos lineales y no lineales de volumen, permite ajustar ecuaciones predictivas que facilitan el cálculo del volumen de los árboles, y su comparación con diferentes componentes del fuste (Santiago García *et al.*, 2020). Es por ello que la generación de tablas de volumen de dos entradas para el volumen de fuste y el volumen total árbol son una herramienta esencial para estimar las existencias en volumen y biomasa total, mejorando la precisión de los inventarios forestales, además, dichas tablas aportan información técnica útil para el manejo sostenible del manglar, la planificación de restauraciones ecológicas y la valoración de su contribución al ciclo de carbono (Ávila Pérez *et al.*, 2022).

Por lo tanto, la presente investigación se justifica en la necesidad de generar información dasométrica confiable sobre *A. germinans*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, a través del ajuste de modelos alométricos de volumen. Además, esta información servirá como base para el manejo forestal sostenible, la restauración ecológica y la conservación de los manglares del noreste de México, fortaleciendo así las acciones de protección y manejo de este ecosistema prioritario.

1.1 Objetivos e hipótesis

Objetivo general

Estimar el volumen de fuste (VF) y el volumen total árbol (VTA) para *Avicennia germinans* L. mediante ecuaciones de predicción ajustadas con modelos de regresión lineal y no lineal, en la localidad de La Pesca, municipio de Soto La Marina, Tamaulipas.

Objetivos específicos

- Ajustar y comparar modelos de regresión lineal y no lineal para determinar el de mejor ajuste en la estimación del volumen de fuste (VF) y el volumen total árbol (VTA) de *Avicennia germinans* L. con base en indicadores estadísticos de precisión y ajuste, en la localidad de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.
- Elaborar dos tablas de volumen de dos entradas para el volumen de fuste (VF) y el volumen total árbol (VTA) de *Avicennia germinans* L. en la localidad de La Pesca, Soto la Marina, Tamaulipas.

Hipótesis

H_0 : Las variables estructurales de *Avicennia germinans* L., como el diámetro a la base y la altura total, no presentan una alta relación alométrica con el volumen, lo que no permite estimar este parámetro con precisión mediante técnicas estadísticas de regresión.

H_1 : Las variables estructurales de *Avicennia germinans* L., como el diámetro a la base y la altura total, presentan una alta relación alométrica con el volumen, lo que permite estimar este parámetro con precisión mediante técnicas estadísticas de regresión.

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Ecosistema del manglar

Los manglares constituyen comunidades costeras donde especies arbóreas y arbustivas se desarrollan en las franjas intermareales, además, son interfaces entre el mar y el suelo y presentan una biodiversidad adaptada a suelos salinos e hipóxicos (Travieso Bello, 2006; Sol Sánchez *et al.*, 2022).

Generan diversos servicios ecosistémicos, económicos y sociales como la pesca, la apicultura, el ecoturismo, la leña y el carbón, entre otros, fundamentales para las comunidades costeras (Cornejo *et al.*, 2005). Sus estructuras radiculares (incluyendo raíces aéreas y neumatóforos), incrementan la firmeza del litoral y reducen la fuerza del oleaje, lo que contribuye a disminuir la erosión costera y el impacto de eventos meteorológicos extremos. Diversos estudios indican que, por unidad de área, los manglares almacenan carbono en cantidades superiores (hasta cuatro veces más) a las de muchos bosques terrestres, lo que los convierte en elementos clave para la mitigación del cambio climático (Ong, 2002; Moreno, 2006; Travieso Bello, 2006; Carmona Escalante *et al.*, 2011).

De las especies de mangle presentes en México, en la zona de estudio se encuentran: el mangle rojo (*R. mangle*), mangle negro (*A. germinans*), mangle blanco (*L. racemosa*) y mangle botoncillo (*C. erectus*) (Hernández, 2022). Estas cuatro están listadas bajo la categoría de amenazadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010, se encuentra también en la NOM-022-SEMARNAT-2003, en los artículos 60 TER y 99 de la Ley General de Vida Silvestre, lo cual es preocupante ya que podrían llegar a encontrarse en peligro de extinción o extinguirse a un plazo no tan largo (Velázquez Salazar *et al.*, 2020a).

2.2 *Avicennia germinans* L

Se presenta como un arbusto o árbol perenne, que en condiciones favorables alcanza 8 a 15 m de altura y diámetros de hasta 20 a 40 cm. Sus hojas opuestas de aspecto coriáceo miden de 3 a 15 cm de longitud y glándulas salinas foliares son adaptaciones para la regulación osmótica; las inflorescencias axilares y la viviparidad de las semillas facilitan la colonización en ambientes intermareales (Martínez Hernández, 2020). Esta especie se caracteriza por tener raíces respiratorias (neumatóforos) que le permiten sobrevivir en suelos anóxicos, así como por su capacidad de tolerar extremas concentraciones de sal, lo que les otorga una ventaja competitiva frente a otras especies de manglar (Cobacho *et al.*, 2024).

En México, el mangle negro se distribuye en cinco grandes regiones biogeográficas: Pacífico Norte, Pacífico Centro, Pacífico Sur, Golfo de México y Península de Yucatán. Cada una de estas zonas presenta condiciones particulares de clima, suelo y relieve. Esta especie suele predominar en sitios con elevada salinidad y limitada aportación de agua dulce (Carmona Escalante *et al.*, 2011; Romero Berny *et al.*, 2024). En el estado de Tamaulipas, su presencia en marismas salinas y lagunas costeras juega un papel fundamental en la retención de sedimentos, el almacenamiento de carbono y la provisión de hábitat para la fauna silvestre (Cobacho *et al.*, 2024; Zamora Tovar *et al.*, 2024).

La información dasométrica disponible es limitada, pues existen pocos modelos volumétricos desarrollados localmente para *A. germinans*. Por ello, resulta fundamental generar modelos específicos que permitan estimar con mayor precisión su volumen y biomasa aérea, información clave para la conservación y el manejo sostenible de este recurso (Cornejo *et al.*, 2005; CONABIO-CONANP, 2009).

2.3 *Avicennia germinans* L. en Tamaulipas

La presencia y extensión de los manglares dependen principalmente de factores climáticos, entre ellos, las bajas temperaturas en invierno desempeñan un papel crucial, ya que los registros bajos durante esta estación limita su expansión hacia las zonas más septentrionales del Golfo de México (Portillo *et al.*, 2002). El Trópico de Cáncer representa el límite natural para la distribución de *R. mangle* y *L. racemosa*, mientras que para *A. germinans* y *C. erectus*

pueden extenderse más allá de este paralelo (Zamora Tovar *et al.*, 2024). En la región costera tamaulipecana se presentan inviernos con temperaturas que ocasionalmente descenden bajo los 0° C, lo que condiciona el crecimiento de manglares bajos, mayormente conocidos como “manglares chaparros”, característicos de áreas con menor precipitación y mayor exposición a eventos fríos (Moreno, 2006). A pesar de estas limitaciones, ha habido una expansión progresiva de los manglares hacia latitudes más al norte, debido al aumento de las temperaturas medias y la reducción de severas heladas, lo que se puede asumir como consecuencia del cambio climático (Judd *et al.*, 2023; Zamora Tovar *et al.*, 2024).

2.4 Dasometría y Tablas de volumen

Husch *et al.*, (1982), define una tabla de volumen como una representación matemática organizada en forma de cuadro, mediante la cual se determina el volumen de los árboles a partir de variables diamétricas de fácil medición, como el diámetro normal (Dn) y la altura (At). En diversos estudios realizados en manglares, así como en bosques tropicales y templados, los modelos más comúnmente empleados para estimar el volumen forestal se presentan en el Cuadro 1. Dentro de ellos los modelos que incorporan dos variables predictoras principales que son los más frecuentes y permiten generar estimaciones del volumen más precisas (Da Cunha y Guimarães Finger, 2009).

2.5 Importancia de las tablas de volumen

Las ecuaciones y tablas de volumen constituyen herramientas fundamentales dentro del manejo forestal, ya que permiten calcular de manera precisa el volumen maderable de árboles, bosques o plantaciones utilizando variables sencillas de medir, como el Dn y la At. Si bien Husch *et al.* (1982) destacaban que estas tablas constituían la base para estudios de restauración ecológica, captura de carbono y planificación de inventarios, su importancia persiste en la actualidad, ahora como complemento de tecnologías modernas de medición forestal. Sobre todo, en ecosistemas de manglares como *A. germinans* su aplicación es muy relevante para evaluar su potencial en la proporción de servicios ecosistémicos y así poder apoyar estrategias de restauración y conservación (Alvarado Chay, 2003; Romahn de la Vega *et al.*, 2010; Silva García, 2017).

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen de dos entradas para especies de manglares y tropicales.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
1	Schumacher y Hall	$V = b_0(D^{b_1}At^{b_2})$	Guzmán Santiago <i>et al.</i> , (2020). Estimación de volumen de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. y Cham. en diferentes entidades federativas de México. 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. Vargas Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México. Ramos Uvilla <i>et al.</i> , (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de <i>Pinus</i> de la Sierra Purhépecha, Michoacán. Hernández Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>E. urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México. Melchor <i>et al.</i> , (2010). <i>P. chiapensis</i> . Veracruz y Puebla.
2	Spurr Variable Combinada 1	$V = b_0(D^2At)^{b_1}$	Chandra <i>et al.</i> (2011). <i>Rhizophora apiculata</i> Blume. En Lawas, Sarawak, Malaysia. Muñoz Flores <i>et al.</i> (2021). <i>Cedrela odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. Prestegui Santos (2014). Tablas de volúmenes para tres especies de mangle en Barra de Tecoanapa, Marquelia, Guerrero.
3	Meyer	$V = b_0(D)^{b_1} (D^2At)^{b_2}$	Hernández Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>E. urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México. Moret <i>et al.</i> (1998). <i>Tectona grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela.
4	Takata	$V = (D^2At) / (b_0 + (b_1(D)))$	Gama <i>et al.</i> , (2015). <i>Stryphnodendron adstringens</i> (Mart.) Coville. Minas Gerais, Brasil. Argueta Garnica (2025). Ecuaciones de predicción de volumen para <i>Conocarpus erectus</i> L. Soto la Marina, Tamaulipas, México. Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>Pinus durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
5	Spurr Variable Combinada 2	$V = b_0 + b_1(D^2At)$	Valdez Hernández (2004). <i>L. racemosa</i> (L.) C.F. Geartn. Nayarit. Téllez García y Valdez Hernández (2012). <i>R. mangle</i> . Laguna de Cuyutlán, Colima. Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>P. durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
6	Newnham	$V = b_0 + b_1(D)^{b_2}(At)^{b_3}$	Moret <i>et al.</i> (1998). <i>T. grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela. Torrubiano, C., y Salinas, H. (2019). Predicting stem volume tools for Douglas fir (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb) Franco) Valdivia.

Donde: V: Volumen (m^3); Log: Logaritmo natural; b_0 , b_1 , b_2 y b_3 : Coeficientes de regresión; Exp: Exponencial; D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen de dos entradas para especies de manglares y tropicales.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
7	Thornber	$V = b_0(At/D)^{b^1} (D^2At)$	Vargas Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México. Muñoz Flores <i>et al.</i> (2021). <i>C. odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. Rueda Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>T. grandis</i> L. f. plantaciones del centro-occidente de México. Gama <i>et al.</i> , (2015). <i>S. adstringens</i> (Mart.) Coville. Minas Gerais, Brasil. Guzmán Santiago, <i>et al.</i> (2020). Estimación de volumen de <i>A. religiosa</i> (Kunth) Schltdl. y Cham. en diferentes entidades federativas de México.
8	Honer	$V = D^2 / (b_0 + b_1(1/At))$	Hernández Ramos <i>et al.</i> , (2017). <i>E. urophylla</i> . Huimanguillo, Tabasco, México. Hernández Ramos <i>et al.</i> , (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de <i>S. macrophylla</i> King. Quintana Roo, México. Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>P. durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México.
9	Australiano	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(At) + (b_3(D^2At))$	Vargas Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México. Flores Flores (2021). Ecuaciones de predicción de volumen para <i>R. mangle</i> L. en Soto La Marina, Tamaulipas Melchor <i>et al.</i> , (2010). <i>P. chiapensis</i> . Veracruz y Puebla. Moret <i>et al.</i> (1998). <i>T. grandis</i> L. f. Estado Barinas–Venezuela.
10	Schumacher y Hall 2	$\text{Log}10 V = b_0 + b_1 \log D + b_2 \log At$	Picard N <i>et al.</i> , (2012). anual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles Prestegui Santos (2014). Tablas de volúmenes para tres especies de mangle en Barra de Tecoanapa, Marquelia, Guerrero.
11	Stoate (1945)	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^3) + b_3(DAt)$	Gómez G <i>et al.</i> (2018). <i>Hevea brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México. Gama <i>et al.</i> , (2015). <i>S. adstringens</i> (Mart.) Coville. Minas Gerais, Brasil. Gómez G <i>et al.</i> (2018). <i>H. brasiliensis</i> Müell Arg. Tabasco México.
12	Korsun	$V = b_0(D+1)^{b^1}(At)^{b^2}$	Montes <i>et al.</i> , (2008). <i>P. durangensis</i> . Las Flechas, Durango, México. Muñoz Flores <i>et al.</i> (2021). <i>C. odorata</i> L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. Rueda Sánchez <i>et al.</i> (2020). <i>T. grandis</i> L. f. plantaciones del centro-occidente de México.

Donde: V: Volumen (m^3); Log: Logaritmo natural; b_0 , b_1 , b_2 y b_3 : Coeficientes de regresión; Exp: Exponencial; D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

Cuadro 1. Ecuaciones de predicción de volumen de dos entradas para especies de manglares y tropicales.

No.	Nombre	Modelo	Autor (es)/Año/Especie/Lugar
13	Sin nombre 1	$V = b_0 + b_1(D) + b_2(At)$	Piedra y Carreón (1984). <i>Gmelina arborea</i> Roxb (L.). Escarcega, Campeche. Prestegui Santos (2014). Tablas de volúmenes para tres especies de mangle en Barra de Tecoaanapa, Marquelia, Guerrero.
14	Exponencial 2	$V = \exp(b_0 + b_1 \log(D) + b_2 \log(At))$	Hernández Santiago (2013). <i>C. odorata</i> L. (Cedro rojo). San José, Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Moret <i>et al.</i> (1998). <i>T. grandis</i> L. f. Barinas, Venezuela.
15	Variable combinada logarítmica	$\ln V = b_0 + b_1 \ln(D^2 At)$	Moras y Vallejos Barra (2013). <i>Eucalyptus globulus</i> Labill. ssp. <i>globulus</i> . En la región sur de Uruguay Schlaegel (1984). <i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh. Mississippi, Estados Unidos. Aminu <i>et al.</i> , (2019). <i>Populus deltoides</i> in india.
16	Sin nombre 2	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(At)$	INRENARE-OIMT, (1997). <i>Rhizophora spp. Polliciera rhizophorae, L. racemosa, A. germinans</i> y <i>Avicennia bicolor</i> . Panamá Flores Flores (2021). Ecuaciones de predicción de volumen para <i>R. mangle</i> L. En Soto La Marina, Tamaulipas
17	Meyer Modificado	$V = b_0 + b_1(D^2) + b_2(D^2 At)$	Drake <i>et al.</i> , (2003). <i>Prosopis tamarugo</i> . Reserva Nacional Pampa del Tamarugal. Flores Flores (2021). Ecuaciones De Predicción De Volumen Para <i>R. mangle</i> L. En Soto La Marina, Tamaulipas Tapia y Návar. (1998). <i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. en bosques de pino, Nuevo León México.
18	Naslund Slobada	$V = b_0 + b_1(At) + b_2(DAt) + b_3(D^2At)$	De Oca Cano <i>et al.</i> (2008). <i>P. durangensis</i> M. en la comunidad Las Flechas, Durango, México. Argueta Garnica (2025). Ecuaciones de predicción de volumen para <i>C. erectus</i> L. Soto la Marina, Tamaulipas, México.
19	Variable combinada generalizada incompleta	$V = b_0 + b_1(At) + b_2(D)^2(At)$	Guzmán Santiago <i>et al.</i> (2020). <i>A. religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. Vargas Larreta <i>et al.</i> (2021). Cinco especies de pino en el estado de Durango, México
20	Schumacher y Hall 3	$\ln V = b_0 + b_1 \ln D + b_2 \ln At$	Prestegui Santos (2014). Tablas de volúmenes para tres especies de mangle en Barra de Tecoaanapa, Marquelia, Guerrero. Cuadrado Hidalgo (1985). <i>G. arborea</i> Roxb (L.). En Florencia de Turrialba, Costa Rica.

Donde: V: Volumen (m^3); Log: Logaritmo natural; b_0 , b_1 , b_2 y b_3 : Coeficientes de regresión; Exp: Exponencial; D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

2.6 Tipos de tablas de volumen

Las tablas de volumen se clasifican principalmente por el número de variables que utilizan. Las tablas de una entrada se basan únicamente en el D_n , lo que las hace prácticas en inventarios rápidos o cuando la información es limitada, sin embargo, su precisión es menor ya que no incorporan variaciones en altura ni otras variables (Huich *et al.*, 1982). En cambio, las tablas de dos entradas incorporan más variables como el D_n y A_t , lo que beneficia la precisión de las estimaciones, debido a que el volumen de un árbol no solo está en función de su diámetro, sino también de otras variables como la altura; por lo que estas tablas son fundamentales en estudios forestales donde las condiciones de crecimiento y la morfología del fuste de los árboles pueden variar mucho incluso dentro de una misma población, como es en el caso de los manglares (Huich *et al.*, 1982; Romahn de la Vega *et al.*, 2010).

De acuerdo con estos criterios, las tablas de volumen pueden clasificarse según su escala de aplicación: las locales, elaboradas con datos de campo de un área determinada, resultan especialmente útiles cuando se busca una estimación precisa del volumen en condiciones particulares (Phuntsho *et al.*, 2023)

En contraste, las tablas generales utilizan datos de amplias zonas geográficas y diferentes condiciones ambientales; aunque sirven para estimaciones a gran escala, suelen tener menor exactitud cuando se aplican a sitios concretos (Sebrala *et al.*, 2022).

De acuerdo con lo expuesto, en este estudio se optó por ajustar ecuaciones a las condiciones específicas del ecosistema de manglar, con el fin de mejorar la estimación del volumen maderable. Esto contribuye al entendimiento de otros servicios ecosistémicos, como la captura de carbono, y a la formulación de estrategias de manejo sostenible adaptadas a la ecología del área de estudio. Asimismo, este enfoque permite generar tablas locales de volumen con mayor precisión.

2.7 Proceso para generar una tabla de volúmenes

La creación de una tabla de volumen implica varias etapas fundamentales: a) definición de objetivos para determinar la metodología y el tipo de información requerida; b) selección de la muestra representativa que contemple todas las clases diamétricas; c) toma de datos en

campo, tanto en árboles en pie como derribados, registrando variables como Dn y At y otros datos de relevancia y d) elaboración de la tabla volumétrica sustentada en modelos estadísticos que pueden ser lineales y no lineales que se ajustan mediante el método de mínimos cuadrados (Romahn de la Vega *et al.*, 2010).

2.8 Criterios de información

Se consideraron criterios de información como Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC), que penalizan la complejidad del modelo por el número de parámetros, ayudando a seleccionar modelos de alta calidad y menos complejos (Burnham *et al.*, 2011).

El criterio de información de Akaike (AIC) constituye una métrica para la comparación de modelos estadísticos, está orientado a identificar aquel que optimiza el ajuste a los datos minimizando su complejidad. Valores más bajos de AIC indican una relación más favorable entre ajuste y parsimonia del modelo (Aho y Peterson, 2014). Su cálculo se basa en la siguiente ecuación:

$$AIC = -2\ln(L) + 2k$$

L= función de verosimilitud.

K= número de parámetros estimados.

Ln= logaritmo natural.

El criterio de información bayesiano (BIC), propuesto por Schwarz (1978), añade un factor de corrección vinculado al tamaño muestral, lo que implica una penalización más fuerte a la complejidad del modelo en presencia de un mayor número de parámetros (Hernández, 2023). Su cálculo se basa en la siguiente ecuación:

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n).$$

L= función de verosimilitud.

K= número de parámetros estimados.

Ln= logaritmo natural.

N= número de observaciones.

Por lo tanto, la relación entre ambos criterios es fundamental, ya que cada uno aporta información distinta pero complementaria ya que, en muestras pequeñas el BIC, tiende a escoger modelos más conservadores en comparación que el AIC, lo que puede reducir la capacidad predictiva, aunque mejora la claridad interpretativa del modelo (Montesinos López, 2011).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El estudio se desarrolló en la zona costera de la comunidad La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas, México (Figura 1). El sitio se localiza en las coordenadas centrales 23.79° N y 97.77° O, con altitudes que varían entre los 0 y 6 msnm y una población de 1,760 habitantes (INEGI, 2010; Saenz Aguilar *et al.*, 2017). En el Cuadro 2, se mencionan los aspectos ecológicos del área.

Cuadro 2. Aspectos ecológicos de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Categoría	Descripción
Clima	El área presenta un clima semicálido subhúmedo tipo (A)C(wo) del grupo C según la literatura de Köppen modificada por García, caracterizado por temperaturas medias anuales superiores a 18 °C y máximos estivales mayores a 22 °C. Las lluvias se concentran en verano, mientras que el mes más seco registra precipitaciones inferiores a 40 mm y un aporte invernal entre 5 y 10 %.
Edafología	En la zona de estudio predominan los suelos vertisoles (96.8 %) que se caracterizan por su alta fertilidad y un contenido de arcillas superior al 30% hasta los 50 cm de profundidad y también los suelos solonchak (2.4 %); los cuales presentan elevadas concentraciones de sales. En proporciones menores se presentan los suelos regosol, arenosol, gleysol, castañozem y redzina.
Hidrología	El área forma parte de la Región Hidrográfica RH25 “San Fernando–Soto La Marina”, que abarca las cuencas “Laguna de San Andrés–Laguna Morales” y “Río Soto La Marina”, así como las subcuencas “Laguna de Morales” y “Río Soto La Marina”, todas con desembocadura en este río.
Vegetación	La vegetación principal corresponde a bosques de manglar con especies <i>R. mangle</i> , <i>A. germinans</i> , <i>L. racemosa</i> y <i>C. erectus</i> , halófitas facultativas que toleran alta salinidad. Alrededor se desarrollan comunidades halófilas, hidrófilas, de dunas costeras y marismas saladas con vegetación herbácea y arbustiva.

Fuente: (Sotelo *et al.*, 2008; García Soriano *et al.*, 2009; Vázquez Lule *et al.*, 2009; Fierro Cabo 2009; INEGI, 2010; Mata Fernández *et al.*, 2014; Flores Flores 2021).

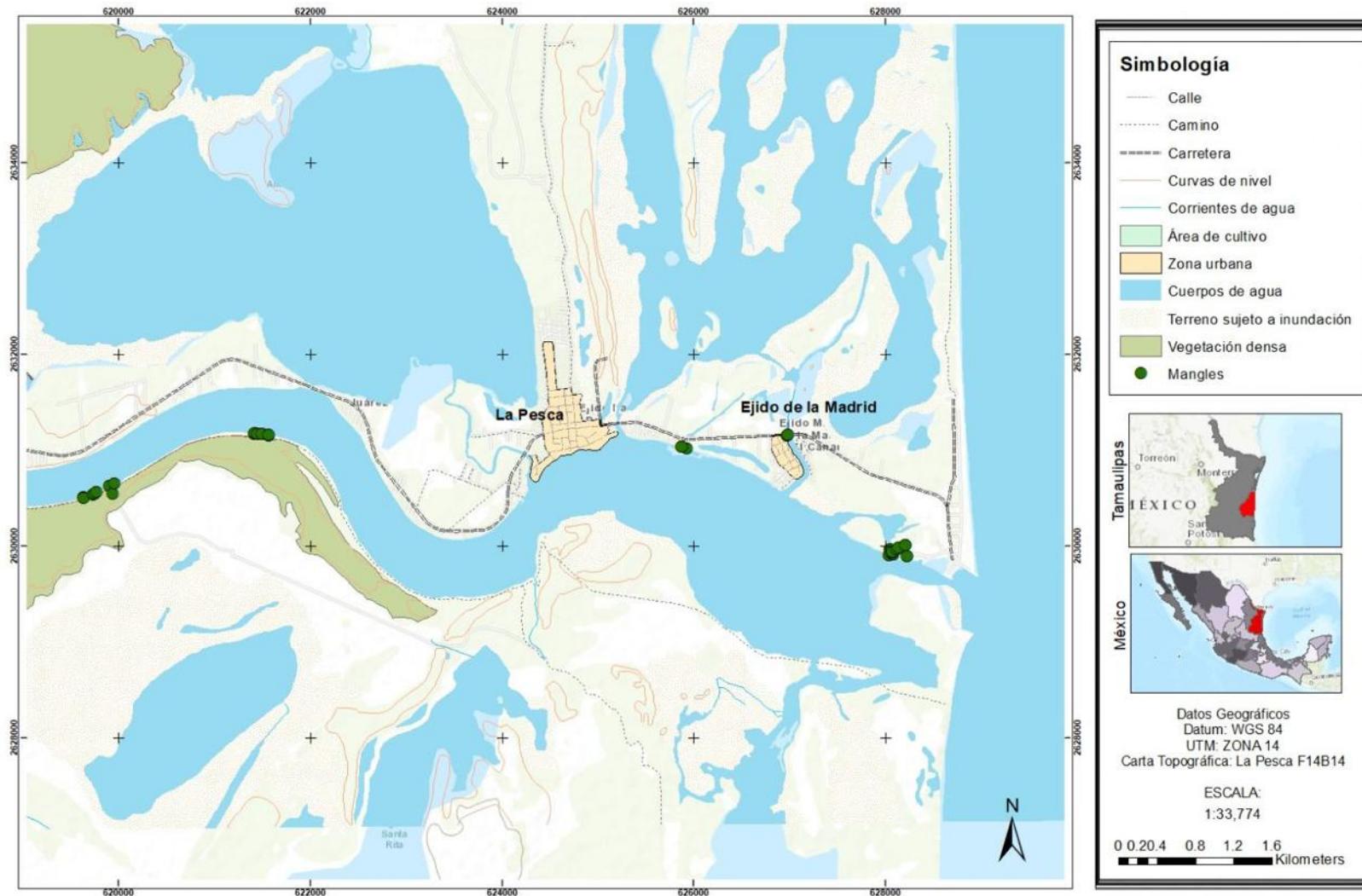


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de los sitios de muestreo de *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

3.2 Diseño de muestreo y colecta de datos

Para este estudio se aplicó un muestreo dirigido, ya que permitió seleccionar los mejores individuos de *A. germinans*, lo que permitió capturar la mayor cantidad de categorías diamétricas de la especie y de esta manera tener una mayor variabilidad y representación de la estructura horizontal de la población (McRoberts *et al.*, 1992).

3.3 Selección y tamaño de la muestra

Para la selección de la muestra se tomó en cuenta el diámetro de los árboles, además se buscó que los individuos tuvieran buena conformación del fuste y de la copa, por otro lado, se buscó que los árboles no presentaran algún daño por alguna enfermedad, plaga o tuvieran alguna mal formación (Garrido *et al.*, 2018). Se evaluaron un total de 147 árboles de diferentes categorías diamétricas (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30); con un promedio de 21 árboles por categoría diamétrica (Cuadro 3), para que la muestra fuera estadísticamente representativa (Vargas, 2008).

3.4 Medición de variables

Los materiales empleados para la toma de datos fueron: una tabla de apoyo de los formatos de campo, un GPS-Garmin map ® 65 (con resolución de 5 m) para la toma de las coordenadas de cada árbol, una cinta diamétrica para medir el diámetro de los árboles y sus ramas, una cinta métrica de 30 m para medir el DC, la longitud de los árboles y las ramas y una pistola Haga para determinar la At de los árboles.

Para la medición de las variables se procedió a realizar mediciones de los árboles en pie (no destructivo) (Apéndice 1). En un formato de campo se registró la información del área de estudio (localidad, fecha, observaciones) y de cada árbol: el número de árbol, nombre de la especie, coordenadas UTM por árbol, categoría diamétrica (CD; cm), diámetro de copa (DC; m), diámetro a la base (D; cm), diámetro normal (Dn) y diámetro de ramas en diferentes secciones, mediciones de la corteza en diferentes secciones (a la base, a 0.3 m y a 1.3 m), altura total de los árboles (At; m) y longitudes totales de las ramas (m).

La medición del diámetro del fuste fue en secciones, empezando a 0.3 m y a 1.3 m y de ahí cada 0.5 m hasta abarcar toda la longitud del fuste. El criterio utilizado para la medición de las ramas consistió en medir las ramas primarias y secundarias, que tuvieran un diámetro igual o mayor de 5 cm. La longitud de las ramas se dividió en secciones de 0.5 m, para medir sus diámetros; empezando por la base y así sucesivamente hasta abarcar toda su longitud.

El registro de los datos se llevó a cabo en Microsoft Excel 2013, donde se procedió a categorizar los datos de las variables de los árboles por su CD correspondiente (Cuadro 3) y las ramas, asignándoles si eran primarias o secundarias de forma en que se pudiera procesar su información para obtener el volumen total del árbol (VTA; m³) y el volumen de fuste (VF; m³).

Cuadro 3. Número de individuos por categoría diamétrica y altura total de *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

CD (cm)	Categoría en altura (m)			Total
	0	5	10	
0	26 (8)	0	0	26
5	15 (5)	14 (4)	0	29
10	0	27 (10)	1	28
15	0	23 (8)	7 (2)	30
20	0	14 (5)	11 (3)	25
25	0	5	1	6
30	0	1	2	3
Total	41	84	22	147

*Los individuos entre paréntesis se emplearon para validar el modelo.

3.5 Estimación del volumen individual del fuste por tipo dendrométrico

La estructura de los árboles es semejante a algunos modelos dendrométricos; por ello, los troncos y ramas de las muestras se dividieron en partes para determinar su volumen individual. Para esto, se emplearon las fórmulas de volumen para el neiloide truncado, el cono, el cono truncado, y paraboloide truncado (Lema, 1979; Romahn de la Vega *et al.*, 2010).

3.5.1 Volumen del tocón

Debido a la semejanza en su forma y composición, se utilizó el modelo dendrométrico del neiloide truncado, para realizar el cálculo del volumen del tocón del árbol (Pompa García *et al.*, 2011; Monárrez González *et al.*, 2024).

Fórmula:

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

Donde:

V_{NT} = volumen del neiloide truncado en (m^3).

L = longitud de la troza en (m).

S_0 = área del diámetro de la base en (m^2).

S_1 = área del diámetro superior en (m^2).

3.5.2 Volumen del fuste

Excluyendo el tocón y la punta, para las siguientes secciones del fuste se utilizó la fórmula de Smalian, ya que el fuste tiene una forma similar a un paraboloide truncado. La fórmula de Smalian es muy precisa al disponer de dos diámetros (inferior y superior), ofreciendo un error prácticamente mínimo en su resultado (Romahn de la Vega *et al.*, 2010; Monárrez González *et al.*, 2024).

Fórmula:

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

Donde:

V_T = volumen de la troza en (m^3).

$\pi = 3.1416$.

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).

3.5.3 Volumen de la punta

El cálculo del volumen de esta última parte del fuste y de las puntas de las ramas, se obtuvo usando la fórmula del cono, ya que se midieron las longitudes totales del fuste y de las ramas (Romahn de la Vega *et al.*, 2010).

Fórmula:

$$V_C = \frac{S_0 * L}{3}$$

Donde:

V_C = volumen del cono en (m^3).

S_0 = área del diámetro de la base en (m^2).

L = longitud de la troza en (m).

3.5.4 Volumen de las ramas

Debido a que las ramas no mantienen exactamente la forma original del fuste, específicamente en la base donde comienzan, se determinó su volumen con la fórmula del cono truncado, ya que es la más precisa en este caso, desde la base hasta la penúltima sección; la punta se calculó con la fórmula del cono (Monárez González *et al.*, 2024).

Fórmula:

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

Dónde:

V_{CT} = volumen del cono truncado en (m^3).

$\pi = 3.1416$.

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).

3.6 Modelos de regresión utilizados

Las ecuaciones de dos entradas para la predicción del volumen fueron seleccionadas de la literatura por ser más utilizadas, estar en función de las variables evaluadas (D; cm y la altura

total At; m) y por presentar resultados adecuados al emplearse en predecir el volumen de especies de manglares y de coníferas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Modelos ajustados para la predicción de volumen de *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Nombre	Modelo
1	Schumacher y Hall	$V = b_0(D^{b1}At^{b2})$
2	Spurr variable combinada 1	$V = b_0(D^2At)^{b1}$
3	Spurr variable combinada 2	$V = b_0 + b_1(D^2At)$
4	Meyer	$V = b_0(D)^{b1} (D^2At)^{b2}$
5	Takata	$V = (D^2At) / (b_0 + (b_1(D)))$
6	Honer	$V = D^2 / (b_0 + b_1(1/At))$
7	Korsun	$V = b_0(D+1)^{b1}(At)^{b2}$
8	Sin nombre 2	$V = b_0+b_1(D^2) + b_2 (At)$
9	Meyer modificado	$V = b_0+b_1(D^2) + b_2 (D^2At)$
10	Sin nombre 1	$V = b_0+b_1(D) + b_2 (At)$

Donde: V: Volumen (m^3); b_0 , b_1 , b_2 b_3 : coeficientes de regresión; D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

3.7 Análisis estadístico

Para examinar las variables (D, At, VF y VTA), se aplicó el procedimiento Proc Univariate Plot de Statistical Analysis System (SAS), con el objetivo de identificar valores atípicos o fuera de lo normal. Y en cuanto al procesamiento de los datos para seleccionar el mejor modelo de regresión, se realizó igualmente en SAS, utilizando el procedimiento Proc Model.

3.8 Criterios de elección del modelo

Para seleccionar el modelo adecuado para predecir el volumen, se evaluaron distintos indicadores estadísticos. Entre ellos se incluyeron el coeficiente de determinación (R^2) y su versión ajustada (R^2_{aj}), donde valores cercanos a uno reflejan un mejor desempeño del modelo. Asimismo, se analizó la raíz del cuadrado medio del error (RCME), siendo deseable obtener un valor bajo, especialmente cuando se comparan modelos que utilizan la misma

unidad de medida para la variable dependiente. También se consideró el cuadrado medio del error (CME), buscando siempre el modelo que presentara el valor más reducido. Otro indicador incluido fue el error estándar de la estimación (SEE), el cual mide la precisión del modelo; cuanto menor es este valor, mayor es la capacidad del modelo para estimar el volumen con exactitud (Barrena *et al.*, 1986; Montgomery *et al.*, 2021). Para el ajuste de los modelos tanto lineales como no lineales, se empleó el procedimiento PROC MODEL en el software estadístico SAS.

Con el fin de realizar una elección más integral del modelo, se incorporaron otros criterios como el criterio de información de Akaike (AIC), el cual balancea la calidad del ajuste con la complejidad del modelo, penalizando aquellos con mayor número de parámetros, ya que un AIC más bajo indica un modelo más eficiente (Akaike, 1974; Burnham *et al.*, 2011; Aho y Peterson, 2014). Del mismo modo, se utilizó el criterio de información bayesiano (BIC), que penaliza aún con mayor rigurosidad el número de parámetros, favoreciendo aquellos modelos con menor complejidad y alto rendimiento, reflejado en valores bajos de este indicador (Hernández, 2023).

Para validar la calidad predictiva de la ecuación seleccionada, se aplicaron diversas pruebas estadísticas para el cumplimiento de los supuestos:

- 1) Heterocedasticidad: Se empleó la prueba de White para comprobar si los errores presentaban varianza constante. Un valor de p inferior a 0.05 indica que no se cumple el supuesto de homocedasticidad (White, 1980; Telles *et al.*, 2018).
- 2) Autocorrelación: La prueba de Durbin-Watson permitió evaluar la independencia de los residuos. Valores dentro del rango de 1.5 a 2.5 sugieren ausencia de autocorrelación; fuera de este intervalo, se interpreta como autocorrelación positiva o negativa (Durbin y Watson, 1992; Da Cunha *et al.*, 2009).
- 3) Normalidad: La prueba de Shapiro-Wilk se utilizó para determinar si los residuos seguían una distribución normal. Un p -valor menor a 0.05 indica desviación de la normalidad (Shapiro y Wilk, 1965; Hernández Ramos *et al.*, 2019).

3.9 Validación de los modelos

Se utilizó un 30 % del total de los árboles muestreados, lo que equivale a 45 ejemplares. La selección de los individuos se realizó de forma intencionada, seleccionando diferentes árboles con diferentes categorías diamétricas (CD) con el objetivo de no dejar algunas CD sin árboles. Cabe destacar que estos 45 árboles no se incluyeron en los análisis estadísticos para la selección del modelo.

Para la elección adecuada de las ecuaciones de volumen no depende únicamente de los criterios de ajuste, sino también de una validación estadística. De acuerdo con Prodan *et al.* (1997): indicadores como la raíz cuadrada del error medio (RCME), el error medio absoluto (EMA), el sesgo (E), y la diferencia agregada tanto en valor absoluto como en porcentaje (DA y DA%), son fundamentales para evaluar el rendimiento del modelo. Se eligieron las ecuaciones de volumen que mostraron mejores resultados con estos indicadores (valores bajos o cercanos a cero), además los que mantuvieron un buen resultado en los estadísticos obtenidos en el proceso (Hernández Ramos *et al.*, 2019).

Fórmulas empleadas:

Raíz cuadrada del error medio cuadrático (RCME).

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}}$$

Error medio absoluto (EMA).

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

Sesgo (E).

$$E = \sum (O_i - E_i) / n$$

Diferencia agregada en porcentaje (DA%).

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

Donde:

\sum = Sumatoria.

O_i = Valor observado.

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

E_i = Valor estimado.

n = Número total de observaciones.

En cuanto a la metodología a seguir, se asignaron valores que iban del 1 al 5 a los estadísticos de validación: REMC, EMA, E, DA y DA%. 1 indica el mejor desempeño y 5 el menor; la suma de los valores asignados de cada modelo indica que la menor puntuación se asocia al modelo con mejor ajuste (Tamarit *et al.*, 2014).

3.10 Construcción de la tabla de predicción de volumen

Con el modelo de regresión seleccionado como el mejor se construyeron tablas de predicción de volumen de doble entrada, empleando el de diámetro a la base (D; cm) y altura total (At; m). Cabe destacar que estas tablas permiten estimar el volumen de fuste (VF; m³) y el volumen total del árbol (VTA; m³), con resultados que se aproximan al volumen real de *A. germinans* en los manglares de La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ajuste y selección de los modelos

Cuadro 5. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen de fuste en *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Ecuación de predicción de volumen fuste total	P> F
1	$V = 0.000075 (D^{1.594388} At^{1.033738})$	<0.0001
2	$V = 0.000085(D^2At)^{0.838521}$	<0.0001
3	$V = 0.002728 + 0.000022(D^2At)$	<0.0001
4	$V = 0.000075(D)^{-0.47307} (D^2At)^{1.033724}$	<0.0001
5	$V = (D^2 At) / (24434.43 + (873.7786(D)))$	<0.0001
6	$V = D^2 / (440.6096 + 40266.07(1/At))$	<0.0001
7	$V = 44115(D+1)^{0.0001}(At)^{0.0001}$	<0.0001
8	$V = -0.01099 + 0.000133(D^2) + 0.003274(At)$	<0.0001
9	$V = 0.002266 + 0.000017(D^2) + 0.00002(D^2At)$	<0.0001
10	$V = -0.0199 + 0.003828(D) + 0.001176(At)$	<0.0001

Donde: V: Volumen de fuste (m^3); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

Cuadro 6. Parámetros de las ecuaciones de predicción de volumen total árbol en *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

No.	Ecuación de predicción de volumen total árbol	P> F
1	$V = 0.000107 (D^{2.080652} At^{0.56929})$	<0.0001
2	$V = 0.000089(D^2At)^{0.948387}$	<0.0001
3	$V = -0.00119 + 0.000059(D^2At)$	<0.0001
4	$V = 0.000107(D)^{0.942071} (D^2At)^{0.569291}$	<0.0001
5	$V = (D^2 At) / (15758 + (64.35087(D)))$	<0.0001
6	$V = D^2 / (998.8638 + 9844.523(1/At))$	<0.0001
7	$V = 108757(D+1)^{0.0001}(At)^{0.0001}$	<0.0001
8	$V = -0.01633 + 0.000421(D^2) + 0.0018(At)$	<0.0001
9	$V = -0.00627 + 0.000192(D^2) + 0.000034(D^2At)$	<0.0001
10	$V = -0.04437 + 0.01226(D) + 0.00522(At)$	<0.0001

Donde: V: Volumen de fuste (m^3); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total (m).

4.2 Ajuste y selección de los cinco mejores modelos

4.2.1 Ecuaciones de volumen de fuste

El modelo que mejor estima el volumen de fuste (VF) fue el de Takata (M5), con el mejor ajuste y desempeño en general con un R^2_{aj} de 0.9297, (resaltando que los modelos que tienen valores con R^2 y R^2_{aj} más altos cercanos a uno, son los que tienen mejor ajuste), lo que significa que explica el 92.97% de la variación del VF en función del diámetro a la base y la altura total. Además, este modelo obtuvo los valores más bajos de error (SSE = 0.00792, CME = 0.000079, RCME = 0.0089), esta respuesta es favorable ya que indica una baja variabilidad residual y una buena precisión en la predicción de volumen (Cuadro 7). En cuanto a los criterios de información, el M5 presentó valores de AIC (-671.79) y BIC (-666.54), lo que demuestra un buen equilibrio entre ajuste y simplicidad ya que cuenta con dos parámetros, lo que indica que es un modelo eficiente y estable (Myung *et al.*, 2003). Cabe resaltar que ambos parámetros del modelo resultaron estadísticamente significativos ($p < 0.0001$), reforzando así la validez del ajuste obtenido.

El buen desempeño del modelo de Takata para estimar el VF, concuerda con múltiples artículos comparativos de fuste irregular. Estudios como el de Barbosa *et al.* (2023) sobre híbridos de *Eucalyptus* y sistemas tropicales en São Paulo, Brasil, donde el modelo de Takata fue el de mejor ajuste con un $R^2_{aj} = 0.93$ (similares a los de este estudio) y menores errores residuales que otros modelos. Mientras que Garate Quispe *et al.* (2023), en un estudio de la especie *Apuleia leiocarpa*, en la Amazonía peruana, demostraron que en bosques con fustes más irregulares (low-hill) el modelo de Takata supera al modelo de Spurr y otros modelos.

No obstante, para especies de coníferas con un fuste más regular, Valerio Hernández *et al.* (2024), selecciona a Schumacher–Hall como el más adecuado. Esto confirma que la morfología de *A. germinans* (achaparrada e irregular), se favorecen a una ecuación como la de Takata ya que tiene un mejor ajuste en especies tropicales y subtropicales que presentan condiciones irregulares en el fuste en comparación con las especies de coníferas.

Por otro lado, en el cumplimiento de los supuestos estadísticos, el modelo de Takata presentó una ligera autocorrelación positiva (rango de 1.5 a 2.5), ya que obtuvo un valor de Durbin-Watson (DW) = 1.7168, lo que refleja que tiene dependencia de los residuos y presencia de autocorrelación, lo cual es común en datos dendrométricos debido a la naturaleza de las mediciones y a la estructura poblacional de los árboles; además de que los valores dentro de este rango permiten afirmar que las estimaciones del modelo siguen siendo estables y confiables para fines de predicción volumétrica (Quiñones *et al.* 2018) lo que reafirma la robustez operativa del modelo de Takata.

Sin embargo, la prueba de White se detectó que el modelo tuvo problemas de heterocedasticidad, es importante destacar que ninguno de los modelos pasó la prueba de White, tanto para VF como para VTA (Cuadro 7 y 8), ya que en todos los casos el valor de *p* fue menor a 0.05, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad y confirma que la varianza de los residuos no es constante a los valores ajustados. La presencia de heterocedasticidad en modelos volumétricos es un comportamiento esperado en especies tropicales o de morfología irregular, como es el caso de *A. germinans* ya que existe gran variabilidad en diámetros, alturas y formas del fuste y eso genera variaciones naturales en los errores de estimación.

Este patrón ha sido ampliamente documentado por Oliveira *et al.* (2018) y Ramírez Martínez *et al.* (2018), que señalan que la heterocedasticidad es común en ecuaciones volumétricas aplicadas a especies tropicales y subtropicales y, aunque afecta la inferencia clásica, no compromete la utilidad predictiva del modelo bajo contextos operativos.

Sin embargo, este hallazgo puede afectar en la precisión de pruebas estadísticas tradicionales, tal como menciona Wooldridge. (2010), que en presencia de heterocedasticidad los estimadores de los parámetros del modelo mantienen sus propiedades de consistencia, lo que significa que el modelo sigue siendo adecuado para fines de predicción del volumen, sin embargo, este problema si afectará para inferencia estadística, ya que invalida las pruebas de *t* y *F*, porque incrementa el riesgo de obtener conclusiones erróneas, como detectar efectos inexistentes (error tipo I) o no detectar efectos reales (error tipo II). Asimismo, la incertidumbre asociada a las predicciones deja de ser constante, de modo que las predicciones en rangos con mayor varianza son menos confiables.

Cuadro 7. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen de fuste, utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk		
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad	
	b ₀	0.000075	<.0001													
M1	b ₁	1.594388	<.0001	0.0081	0.0001	0.0090	0.929	0.9276	-667.75	-659.87	76.71	<.0001	1.72	0.81	<.0001	
	b ₂	1.033738	<.0001													
M2	b ₀	0.000085	<.0001		0.0083	0.0001	0.0091	0.927	0.9263	-666.97	-661.72	52.27	<.0001	1.71	0.78	<.0001
	b ₁	0.838521	<.0001													
M3	b ₀	0.002728	0.1659		0.0095	0.0001	0.0098	0.9163	0.9155	-653.02	-647.77	40.10	<.0001	1.77	0.75	<.0001
	b ₁	0.000022	<.0001													
	b ₀	0.000075	<.0001													
M4	b ₁	-0.47307	<.0001	0.0081	0.0001	0.0090	0.929	0.9276	-667.75	-659.87	76.72	<.0001	1.72	0.81	<.0001	
	b ₂	1.033724	<.0001													
M5	b ₀	24434.43	<.0001		0.0079	0.0001	0.0089	0.9304	0.9297	-671.79	-666.54	44.61	<.0001	1.72	0.81	<.0001
	b ₁	873.7786	<.0001													

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar m³; CME: Cuadrado medio del error m³; RCME: Raíz del cuadrado medio del error m³; R²: Coeficiente de determinación; R² _{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 7. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen de fuste, utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
M6	b ₀	440.6096	0.2372	0.0099	0.0001	0.0100	0.9127	0.9118	-648.69	-643.44	45.09	<.0001	1.81	0.74	<.0001
	b ₁	40266.07	<.0001												
	b ₀	44115.45	sesgad												
M7	b ₁	0.0001	sesgad	0.0146	0.0001	0.0120	0.8713	0.8713	-607.108	-599.233	20.91	<.0001	1.54	0.83	<.0001
	b ₂	0.0001	sesgad												
	b ₀	-0.01099	0.0018												
M8	b ₁	0.000133	<.0001	0.0112	0.0001	0.0106	0.9014	0.8994	-634.292	-626.417	39.34	<.0001	1.60	0.84	<.0001
	b ₂	0.003274	<.0001												
	b ₀	0.002266	0.2953												
M9	b ₁	0.000017	0.1075	0.0095	0.0001	0.0098	0.9169	0.9152	-651.736	-643.861	48.89	<.0001	1.77	0.75	<.0001
	b ₂	0.00002	<.0001												
	b ₀	-0.0199	<.0001												
M10	b ₁	0.003828	<.0001	0.0188	0.0002	0.0138	0.8345	0.8311	-581.414	-573.539	26.81	<.0001	1.49	0.88	<.0001
	b ₂	0.001176	0.1277												

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar m³; CME: Cuadrado medio del error m³; RCME: Raíz del cuadrado medio del error m³; R²: Coeficiente de determinación; R² _{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

Por lo anterior, para garantizar una inferencia estadística es importante aplicar correcciones robustas que corrijan la heterocedasticidad, entre las alternativas más utilizadas se encuentran los métodos de mínimos cuadrados ponderados (WLS) y las transformaciones logarítmicas (White, 1980; García, 1995).

Por último, en la prueba de Shapiro-Wilk, se obtuvo un valor de $W= 0.81$, con $p<0.000$, lo que indica que los residuos no siguen una distribución normal, por lo que se rechaza la hipótesis nula ($P<0.0001$) en todos los modelos, ya que ninguno cumple con el supuesto de que los residuos sigan una distribución normal (Cuadro 7). La ausencia de la normalidad puede hacer que las pruebas de significancia (t y F) pierdan precisión, no obstante, este incumplimiento no afecta la consistencia de los estimadores.

El segundo mejor modelo, después del Takata, que tuvo un buen ajuste fue el de Schumacher y Hall (M1), con un $R^2aj = 0.9276$, $RCME = 0.00903$, y los valores más bajos de AIC (-667.74) y BIC (-659.87). Lo que muestra una tendencia similar al M5 con una ligera menor precisión, siendo una muy buena alternativa para predicción por su practicidad y debido a que es uno de los modelos más utilizados en estudios de predicción volumétrica en varias especies.

Posteriormente, los modelos de Spurr Variable Combinada 1 (M2), Meyer (M4) y Spurr Variable Combinada 2 (M3), tuvieron buen ajuste de R^2aj ($M2 = 0.9263$, $M4= 0.9276$ y $M3= 0.9155$). Y niveles bajos de error ($RCME$ entre 0.0091, 0.0090 y 0.0098).

Diversos estudios respaldan un buen desempeño del modelo de Schumacher y Hall en la estimación de volumen, sobre todo en especies con fustes rectos y regulares, como es el caso de las coníferas; por ejemplo, Valerio Hernández *et al.* (2024), muestran que este modelo es más frecuente para este tipo de especies debido a su capacidad de ajuste. De igual manera Ramos Uvilla *et al.* (2014), reportaron que el modelo de Schumacher–Hall reflejó el mejor desempeño en dos especies de *Pinus* en la Sierra Purépecha, Michoacán con un $R^2 aj = 0.996$ y un $CME = 0.00572$, además los autores asignan este resultado a la transformación logarítmica del modelo, lo cual mejoró su ajuste.

No obstante, Da Gama *et al.* (2009), en dos estudios orientados en generar un modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza para *Pinus taeda*, identificaron al modelo de Spurr (uno en su forma logarítmica), como el más adecuado y además su mayor simplicidad operativa. Por otro lado, Telles *et al.* (2018), encontraron que el modelo de Meyer fue el de mejor ajuste para la predicción del volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Michoacán, con R^2 aj= 0.8246 y valores bajos de error (RCME = 0.0179).

Por otro lado, los modelos de menor ajuste fueron Sin nombre 2 y 1 (M8 y M10), en comparación con los demás modelos evaluados ya que no todas sus variables son significativas y con valores de R^2 aj de 0.8994 y 0.8311, y mayores errores (RCME = 0.0106 y 0.0138), lo que indica menor capacidad predictiva (Cuadro 7). Los modelos de Honer (M6), Meyer Modificado (M9) y Sin nombre 1 (M10) tienen variables o intercepto no significativos. Y sobre todo el modelo de Kurson (M7) se descarta automáticamente, ya que sus resultados son inválidos o sesgados ("sesgad").

Adicionalmente, Sáenz *et al.* (2020) encontraron que el modelo de Variable Combinada fue el más adecuado para *Tabebuia rosea* en la región occidente del país, frente a otras alternativas como Schumacher, Korsun y Thornber. Además, Guzmán *et al.* (2020) demostraron que el modelo Spurr Potencial puede ser altamente eficiente, alcanzando un R^2 aj superior al 93% en *A. religiosa*.

Los resultados gráficos respaldan la elección del modelo M5, con un mayor coeficiente de determinación de R^2 aj= 0.9297, y una distribución residual más compacta en comparación con los otros modelos, lo que indica buena relación entre el entre el volumen observado y el volumen estimado (Figura 2). Además, se observa que el M3 obtuvo un R^2 = 0.9163, lo cual fue el valor de R^2 más bajo, por otro lado, en los demás modelos (M1, M2 y M4), se observa que tuvieron valores de R^2 = 0.92, lo que indica un buen desempeño y una alta capacidad predictiva de los cinco modelos para estimar el VF de la especie.

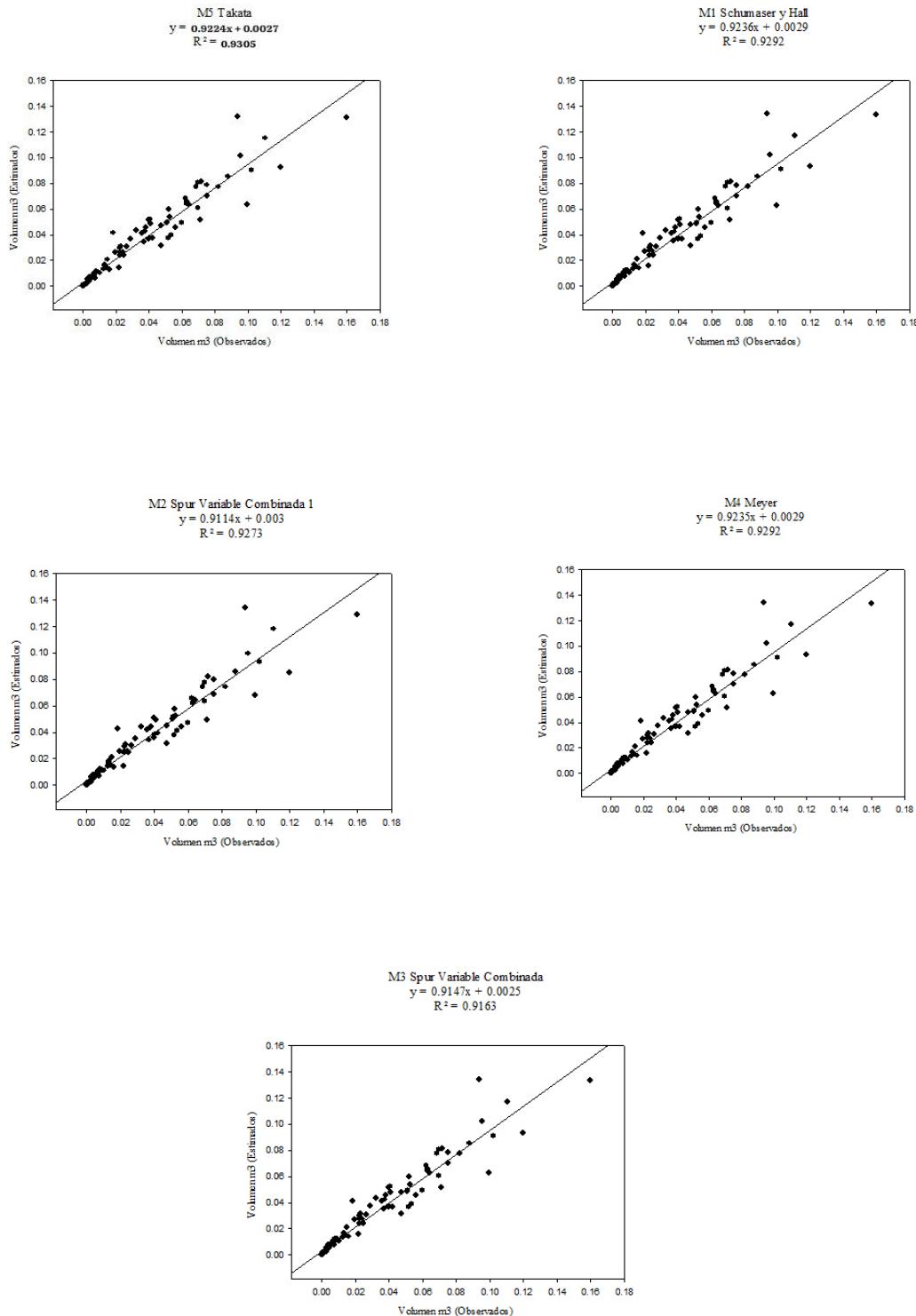


Figura 2. Comparación gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen de fuste total para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

4.2.2 Ecuaciones de volumen total árbol

Para la estimación de volumen total árbol (VTA), el modelo que presentó mejor ajuste fue el de Honer (M6), con un R^2_{aj} de 0.8675, además este modelo presentó los valores mínimos para los estadísticos de error (SSE de 0.1125, CME de 0.00113 y una RCME de 0.0335), lo que indica alta capacidad predictiva y baja variación residual. Cabe destacar que todos sus parámetros no son complejos, además mostró los valores más bajos de AIC (-401.12) y BIC (-395.88), pero el M6 no cumple dos de los tres supuestos (Heterocedasticidad y Normalidad), y marginalmente Durbin-Watson (DW = 1.486), que está justo por debajo del límite de 1.5, lo que indica autocorrelación negativa. (Cuadro 8).

Sin embargo, los modelos de Schumacher y Hall (M1) y Meyer (M4), presentaron valores similares al M6, con un R^2_{aj} de 0.8655, SSE de 0.1131, CME de 0.00114 y una RCME de 0.0338 (Cuadro 8). Aunque el M6 presentó ligeramente mayor R^2_{aj} que los M1 y M4, aunque la diferencia es marginal estadísticamente, el M1 destaca por su menor número de parámetros, lo que convierte en una opción más robusta y operativa ya que es más utilizado en literatura para el cálculo volumétrico (Myung *et al.*, 2003).

Por otro lado, en cuanto a los criterios del M1, presentó un valor de AIC = -398.63 y BIC = -390.75, ligeramente mayor al M6, y en la prueba DW = 1.508 confirmó independencia de residuos, cabe mencionar que los modelos M1, M2, M3, M4, M5, y M9 son los únicos que cumplen con el supuesto de Autocorrelación (Cuadro 8).

Sin embargo, en la prueba de White ($p < 0.0001$) todos los modelos presentaron problemas de heterocedasticidad (como ya se mencionó en el VF, es un supuesto que ningún modelo cumplió) esta respuesta es consistente con la variabilidad estructural, característica de datos dendrométricos ya que son de diferentes secciones de la especie, por lo que la presencia de heterocedasticidad no compromete la aplicabilidad predictiva del modelo (Quiñones *et al.*, 2018) y en la prueba de Shapiro-Wilk, se obtuvo un valor de 0.84 ($p < 0.0001$), resaltando que los residuos no siguen una distribución normal, un supuesto que ningún modelo cumplió.

Cuadro 8. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
	b ₀	0.000107	0.0038												
M1	b ₁	2.080652	<.0001	0.1131	0.00114	0.0338	0.8681	0.8655	-398.62	-390.75	72.78	<.0001	1.51	0.84	<.0001
	b ₂	0.56929	<.0001												
M2	b ₀	0.000089	0.0045												
	b ₁	0.948387	<.0001	0.1196	0.0012	0.0346	0.8605	0.8591	-394.88	-389.63	46.49	<.0001	1.58	0.83	<.0001
M3	b ₀	-0.00119	0.8867												
	b ₁	0.000059	<.0001	0.1207	0.00121	0.0347	0.8593	0.8579	-393.99	-388.74	49.17	<.0001	1.64	0.81	<.0001
	b ₀	0.000107	0.0038												
M4	b ₁	0.942071	0.0034	0.1131	0.00114	0.0338	0.8681	0.8655	-398.62	-390.75	72.78	<.0001	1.51	0.84	<.0001
	b ₂	0.569291	<.0001												
M5	b ₀	15758.8	<.0001												
	b ₁	64.35087	0.4313	0.1203	0.0012	0.0347	0.8598	0.8584	-394.33	-389.08	63.2	<.0001	1.61	0.82	<.0001

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar m³; CME: Cuadrado medio del error m³; RCME: Raíz del cuadrado medio del error m³; R²: Coeficiente de determinación; R² _{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

Cuadro 8. Comparación de estadísticos de ajuste de las ecuaciones de volumen total árbol, utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Modelo	Parámetros	Estimación	P > t	SSE	CME	RCME	R ²	R ² _{aj}	Akaike (AIC)	Bayesiano (BIC)	White (X ²)		Durbin-Watson (DW)	Shapiro-Wilk	
											Estadístico	Probabilidad		Estadístico	Probabilidad
M6	b ₀	998.8638	<.0001	0.1125	0.00113	0.0335	0.8688	0.8675	-401.13	-395.88	50.07	<.0001	1.48	0.85	<.0001
	b ₁	9844.523	<.0001												
M7	b ₀	108757.5	Sesgad	0.2162	0.00214	0.0463	0.7479	0.7479	-332.50	-324.62	25.65	<.0001	1.45	0.82	<.0001
	b ₁	0.0001	Sesgad												
	b ₂	0.0001	Sesgad												
M8	b ₀	-0.01633	0.3151	0.1256	0.00127	0.0356	0.8535	0.8505	-387.86	-379.99	44.36	<.0001	1.37	0.92	<.0001
	b ₁	0.000421	<.0001												
	b ₂	0.0018	0.4893												
M9	b ₀	-0.00627	0.5601	0.1126	0.00114	0.0337	0.8686	0.866	-399.01	-391.13	51.45	<.0001	1.53	0.86	<.0001
	b ₁	0.000192	0.0016												
	b ₂	0.000034	<.0001												
M10	b ₀	-0.04437	0.0047	0.1954	0.00197	0.0444	0.7721	0.7875	-342.82	-334.95	33.12	<.0001	1.27	0.95	<.0001
	b ₁	0.01226	<.0001												
	b ₂	-0.00522	0.1318												

Donde: P<|t|: Probabilidad estadística; SSE: Error estándar m³; CME: Cuadrado medio del error m³; RCME: Raíz del cuadrado medio del error m³; R²: Coeficiente de determinación; R² _{aj}: Coeficiente de determinación ajustado.

La ausencia de normalidad puede deberse a la presencia de valores extremos asociados a la amplia dispersión en diámetros y alturas, mientras que la heterocedasticidad surge porque los errores tienden a incrementarse conforme aumentan el tamaño del árbol y el volumen estimado, fenómeno común en relaciones alométricas no lineales; para corregir estas desviaciones y asegurar una inferencia confiable, es recomendable emplear técnicas robustas como la estimación por mínimos cuadrados ponderados y transformaciones logarítmicas que estabilizan la varianza y linealizan las relaciones alométricas, los cuales permiten obtener estimaciones de varianza consistentes aun en presencia de heterocedasticidad (White, 1980; García, 1995).

Hay varios estudios que justifican la efectividad del modelo de Schumacher y Hall, por ejemplo, Barrios *et al.* (2014) identificaron este modelo como el más adecuado para *E. grandis*, mientras que Guerra *et al.* (2008) reportaron que su versión logarítmica presentó el mejor ajuste para *Guazuma crinita* en Perú ($R^2 = 98.3\%$). De igual manera, Pece *et al.* (2002) observaron un gran desempeño del modelo de Schumacher–Hall ponderado en álamos en Argentina ($R^2_{aj} = 98.82\%$), lo que justifica que incluso al modificar su estructura el modelo no pierde su precisión, sino al contrario, mejora sus resultados (Barrio *et al.*, 2004), así mismo Muñoz *et al.* (2012), confirman este hallazgo para estimar volúmenes en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. Este comportamiento se explica porque la forma logarítmica del modelo tiende a estabilizar la varianza de los residuos, reduciendo la influencia de los valores extremos y corrigiendo parcialmente la heterocedasticidad típica de las relaciones alométricas, ya que, al transformar las variables mediante logaritmos, las relaciones no lineales entre diámetro, altura y volumen se vuelven más lineales y proporcionan errores más homogéneos, lo que mejora el ajuste y la precisión del modelo (Muñoz *et al.*, 2012).

Por otro lado, hay casos donde otros modelos han demostrado tener un mejor ajuste, como el de Martínez *et al.* (2018) quienes indicaron que el modelo de Honer fue el más adecuado para estimar volumen total y fustal en *P. greggii* var. *australis* en Querétaro, con un R^2_{aj} de 0.9666. De manera similar, Oliveira *et al.* (2025) encontraron que los modelos de Honer y Schumacher y Hall presentan precisión similar, aunque resaltaron la ventaja del modelo de Honer por su parsimonia y homocedasticidad. Sin embargo, los resultados encontrados por

Hernández Ramos *et al.* (2018) para *S. macrophylla*, donde el modelo de Honner presentó el menor ajuste con un R^2 aj de 0.8249, mostrando que su desempeño varía según la especie.

El M9, explican un porcentaje muy similar al del M6, con un R^2 aj de 0.866 y $RCME=0.0337$, lo que indica un ajuste de alta calidad, sin embargo, su número de parámetros lo vuelve impráctico en comparación con el M1 o M6. En contraste, los modelos de Korsun (M7) y Sin nombre 1 (M10), presentaron los valores más bajos de ajuste indicando autocorrelación positiva entre los residuos. El M7 con un R^2 aj= 74.79, y un $RCME= 0.0473$ (valor más alto) y valores de estimación como "Sesgad", lo que indica un problema en el proceso de ajuste clasificándolo automáticamente como el peor modelo en términos de integridad y fiabilidad. Y el M10 con R^2 aj= 78.75 con un $RCME= 0.0444$ (el segundo valor más alto después del M7), lo que implica que una parte sustancial de la variación observada no es capturada por la estructura de estos modelos. Sus valores de AIC y BIC son los más altos (menos negativos).

EL M3 tiene un ajuste ligeramente mejor que los dos anteriores, pero su falta de significancia en el intercepto también se descarta. De igual forma que en el estudio de Sáenz *et al.* (2020) se demostró que el modelo de Korsun y otros, también tuvieron el menor desempeño.

Se puede observar en la Figura 3, del análisis gráfico que compara el volumen observado con el volumen estimado, para los cinco modelos con mejor ajuste en la estimación de VTA, se determina que el M6 obtuvo el valor más alto de $R^2 = 0.8706$, seguido del M1 y M4 con $R^2 = 0.8691$ (en ambos modelos), el valor del M1 fue ligeramente menor, pero por su practicidad y porque no hay una diferencia estadística entre estos dos modelos, el M1 se sigue considerando como el mejor para la estimación del VTA. Por otro lado, los modelos con menor coeficiente de determinación fue el M2 y M9, (con un R^2 de 0.8686 y 0.8615). Además, el M9 muestra problemas ya que tuvo valores negativos en el volumen estimado específicamente en los diámetros a la base y altura total más chicos, por ello se descarta este modelo para la estimación de VTA para *A. germinans*.

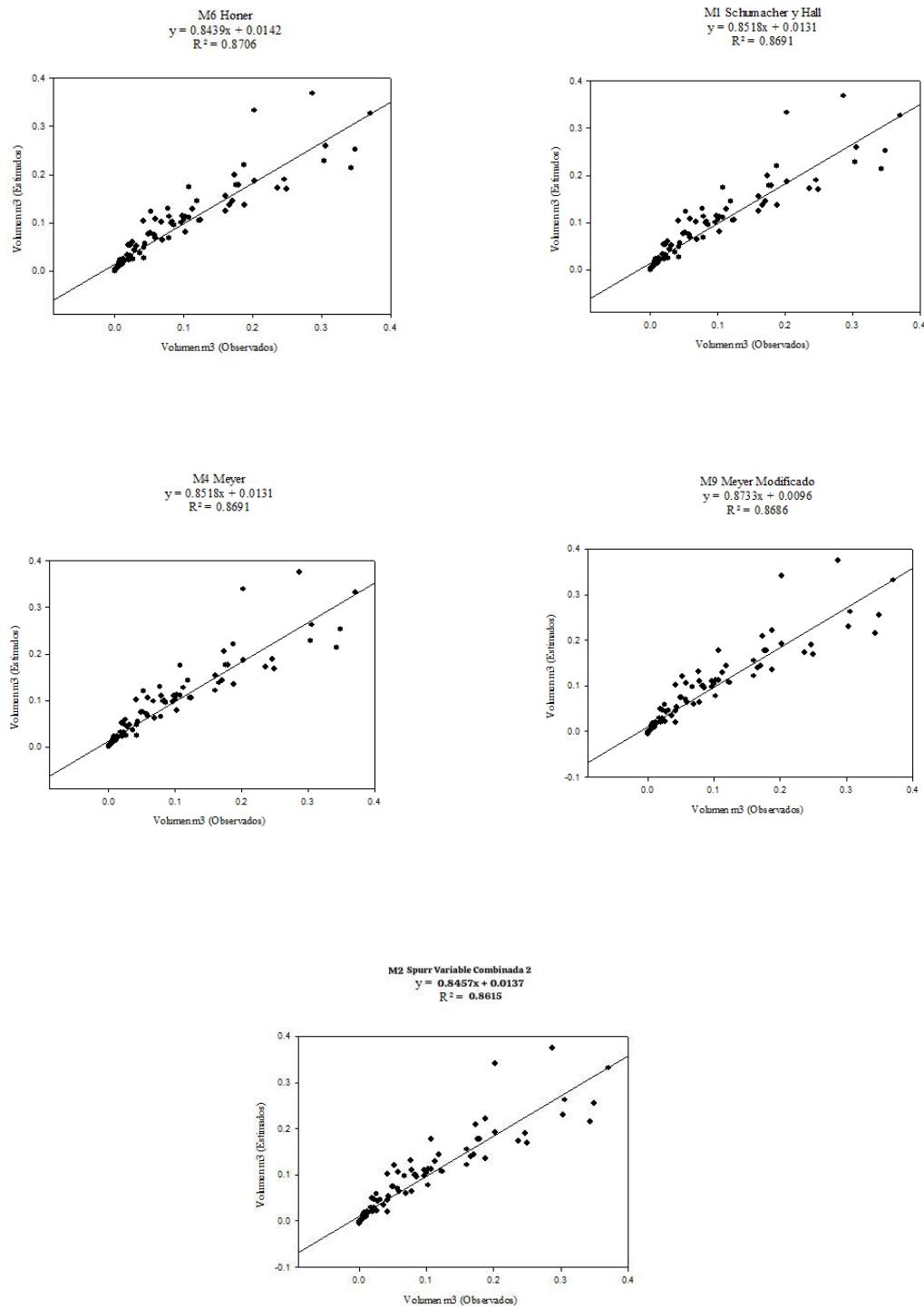


Figura 3. Comparación gráfica de volumen observado contra volumen estimado de los cinco mejores modelos para volumen total árbol para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

4.3 Validación de las ecuaciones de predicción de volumen

En el Cuadro 9, se observan los estadísticos de validación y de acuerdo con los resultados obtenidos de estos, los coeficientes cercanos a cero en RCME y EMA fueron del modelo M1, con $RCME = 0.004848$ y $EMA = 0.002922$, lo que evidencia una adecuada precisión en la estimación del volumen. No obstante, a pesar de que el modelo M5 presentó valores ligeramente superiores ($RCME = 0.005518$; $EMA = 0.003255$), demostró un ajuste más estable y un análisis gráfico mejor entre los valores observados y estimados, así como un mejor R^2 ajustado en un análisis general, lo que justifica su selección final para la estimación del VF para *A. germinans*.

Todos los modelos tuvieron proximidad a cero en el estadístico E, lo que indica ausencia de sesgo relevante del volumen; resaltando que el modelo M2 presentó el valor más bajo ($E = -0.000242$), seguido de M5 ($E = -0.000646$), ambos con una tendencia a subestimar el modelo. Por otro lado, los valores de DA y DA% resaltan lo dicho: los cinco modelos subestimaron el volumen real en proporciones menores al 4%, siendo Takata el de mayor subestimación ($DA\% = -3.38\%$), aunque dentro de un rango aceptable (Cuadro 9).

Cabe resaltar que, aunque los modelos M1 y M2, obtuvieron ligeramente mejores resultados en los indicadores de validación, el M2 no tuvo todos sus parámetros estadísticamente significativos por lo que se rechazó desde un inicio, el M5 mantiene el mejor ajuste, estabilidad y desempeño predictivo lo que fundamenta su selección como modelo óptimo para la estimación del VF de *A. germinans*, en La Pesca Soto la Marina Tamaulipas.

Con el objetivo de complementar la validación de los modelos y así seleccionar el modelo más eficiente para estimar el VF, se aplicó una matriz de evaluación a cada modelo, asignando una calificación (del 1 al 5) en función de su desempeño (Cuadro 10). Con base a los resultados el M5 y M2 obtuvieron la menor puntuación (una menor puntuación indica una mejor respuesta predictiva), pero en un análisis general el M5 destacó por sus resultados en los diferentes criterios de evaluación ya que tuvo una alta precisión y simplicidad; lo que es práctico en estudios forestales.

Cuadro 9. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos con una muestra de 45 árboles para volumen de fuste utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca Soto La Marina Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	RCME	EMA	E	DA	DA %
VF	(M1)	0.004848	0.002922	-0.000439	-0.023009	-2.300941
	(M2)	0.005034	0.003137	-0.000242	-0.012695	-1.269482
	(M3)	0.005656	0.004205	0.000345	0.018055	1.805538
	(M4)	0.004848	0.002923	-0.000438	-0.022956	-2.295587
	(M5)	0.005518	0.003255	-0.000646	-0.033854	-3.385381

Donde: VF: Volumen de fuste (m^3); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

Cuadro 10. Sistema de calificación de modelos para volumen de fuste utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	Promedio	Total
VF	Schumacher y Hall, 1993 (M1)	45	4	1	4	5	4	14
	Spurr Variable Combinada 1 (M2)		5	2	2	3	3	12
	Spurr Variable Combinada 2 (M3)		5	5	3	4	4	17
	Meyer(M4)		4	2	4	5	4	15
	Takata (M5)		4	1	3	4	3	12

Donde: VF: Volumen de fuste (m^3); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

La validación de los cinco modelos para la estimación del VTA, indica que el M2 mostró resultados favorables, mostrando los valores más bajos en DA% (-0.640086 %) en comparación con los otros modelos, lo que indica buena precisión y bajo sesgo en las estimaciones (Cuadro 11). Sin embargo, aunque el M1, tuvo un DA% ligeramente mayor, presentó mejores resultados en los estadísticos de validación $RCME = 0.020231$, $EMA = 0.009675$ y $E = 0.001758$. Además, de acuerdo con los análisis estadísticos y gráficos previamente analizados, el modelo de Schumacher y Hall por su R^2aj (0.8655), valores bajos de $AIC = -398.63$ y $BIC = -390.75$, y sus parámetros significativos, lo que confirma su simplicidad y su mejor ajuste para la estimación del VTA para *A. germinans*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Cuadro 11. Comparación de estadísticos utilizados para determinar la exactitud y sesgo de los cinco mejores modelos con una muestra de 45 árboles para volumen total árbol utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca Soto La Marina Tamaulipas

Tipo de estimación	Modelo	RCME	EMA	E	DA	DA %
VTA	(M1)	0.020231	0.009675	0.001758	0.038407	3.840659
	(M2)	0.020499	0.011107	-0.000293	-0.006401	-0.640086
	(M4)	0.020231	0.009860	0.001758	0.038402	3.840226
	(M6)	0.020317	0.010395	0.000943	0.020606	2.060626
	(M9)	0.019947	0.010721	0.004241	0.092628	9.262845

Donde: VTA: Volumen total árbol (m^3); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

También se complementó la validación del VTA como la del VF, bajo el mismo sistema de calificación, con el objetivo de seleccionar el modelo más eficiente y de mejor desempeño para estimar el VTA. En el Cuadro 12, se muestran los modelos con sus respectivas calificaciones, donde se puede observar que el M1 obtuvo la puntuación más baja (8), por lo que se reafirma un desempeño más consistente entre el volumen observado y estimado, mostrando un mejor ajuste gráfico y menor sesgo, por lo que se considera el mejor modelo para la estimación del VTA en el presente estudio para *A. germinans*, en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Cuadro 12. Sistema de calificación de modelos para volumen total árbol utilizadas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.

Tipo de estimación	Modelo	Muestra	RCME	EMA	E	DA	Promedio	Total
VTA	Schumacher y Hall, 1993 (M1)		2	1	2	3	2	8
	Spurr Variable Combinada 1 (M2)		4	5	1	1	3	11
	Meyer(M4)	45	2	2	2	4	3	10
	Honer (M6)		3	4	1	2	3	10
	Meyer Modificado(M9)		1	5	4	5	4	15

Donde: VTA: Volumen total árbol (m^3); RCME: Raíz cuadrada del error medio cuadrático; EMA: Error medio absoluto; E: Sesgo; DA: Diferencia agregada.

4.4 Tablas de predicción de volumen

4.4.1 Tabla de predicción de volumen de fuste para *Avicennia germinans* L

Para la estimación del volumen fuste total se empleó el modelo de Takata, el cual está en función de las variables del diámetro a la base (cm) y la altura total (m), permitiendo así la construcción de una tabla de volúmenes de doble entrada. En la elaboración de la tabla de volúmenes se incorporaron dos categorías de altura y tres diamétricas, adicionales de las que ya se habían registrado en campo, con el objetivo de ampliar el rango de aplicación del modelo, además se presenta la ecuación correspondiente al modelo (Cuadro 13).

Cuadro 13. Tabla de estimación de volumen de fuste para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Takata $V = (D^2At) / (24434.43 + (873.7786(D)))$.

Diámetro a la base (cm)	Altura total (m)			
	5	10	15	20
5	0.0043	0.0087	0.0130	0.0174
10	0.0151	0.0301	0.0452	0.0603
15	0.0300	0.0599	0.0899	0.1199
20	0.0477	0.0954	0.1432	0.1909
25	0.0675	0.1351	0.2026	0.2701
30	0.0888	0.1777	0.2665	0.3554
35	0.1113	0.2227	0.3340	0.4453
40	0.1347	0.2694	0.4041	0.5389
45	0.1588	0.3176	0.4764	0.6352

Donde: V: Volumen de fuste (m^3); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total del fuste (m). El sombreado de las categorías indica las que fueron encontradas en campo.

4.4.2 Tabla de predicción de volumen total árbol para *Avicennia germinans* L

Para la estimación del volumen total árbol se empleó el modelo de Schumacher y Hall, el cual está en función de las variables del diámetro a la base (cm) y la altura total (m), permitiendo así la construcción de una tabla de volúmenes de doble entrada, a la cual se le incorporaron dos categorías de altura y tres diamétricas, además se presenta la ecuación obtenida (Cuadro 14).

Cuadro 14. Tabla de estimación de volumen total árbol para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas con el modelo Schumacher y Hall $V = 0.000107 (D^{2.080652} At^{0.56929})$.

Diámetro a la base (cm)	Altura total (m)			
	5	10	15	20
5	0.0076	0.0113	0.0142	0.0168
10	0.0322	0.0478	0.0602	0.0709
15	0.0749	0.1111	0.1399	0.1648
20	0.1362	0.2021	0.2546	0.2999
25	0.2167	0.3216	0.4051	0.4772
30	0.3167	0.4699	0.5920	0.6973
35	0.4365	0.6477	0.8158	0.9610
40	0.5763	0.8551	1.0771	1.2688
45	0.7363	1.0925	1.3762	1.6211

Donde: V: Volumen total árbol (m^3); D: Diámetro a la base (cm); At: Altura total del fuste (m). El sombreado de las categorías indica las que fueron encontradas en campo.

CONCLUSIONES

Se logró su objetivo general de ajustar modelos de regresión para estimar el volumen de fuste (VF; m^3) y el volumen total árbol (VTA; m^3) de *A. germinans*, en La Pesca, Soto la Marina, Tamaulipas.

El modelo de Takata fue el que tuvo un mejor ajuste para estimar el VF, ya que destacó por su precisión y estabilidad estadística. Para VTA, el modelo de Schumacher y Hall fue el de mejor desempeño y ajuste por su precisión, simplicidad y desempeño global en el proceso de validación.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, al demostrarse que al menos un modelo de los modelos lineales y no lineales evaluados demostraron que las variables estructurales de *A. germinans* específicamente el diámetro a la base y la altura total, mantienen una fuerte relación alométrica con el volumen total.

Finalmente, se construyeron tablas volumétricas de dos entradas (diámetro a la base y altura total) tanto para VF y VTA, cumpliendo así los objetivos específicos y proporcionando herramientas técnicas de gran utilidad para estimaciones dendrométricas y actividades de manejo forestal para *A. germinans*, en La Pesca, Soto la Marina, Tamaulipas.

6 RECOMENDACIONES

Se sugiere aplicar estas ecuaciones (Takata y Schumacher y Hall) para la estimación del volumen para *A. germinans* únicamente dentro de los rangos de diámetro y altura registrados en este estudio, para evitar subestimaciones o sobreestimaciones en la estimación volumétrica.

A demás, se sugiere el seguir empleando modelos volumétricos de dos entradas que integren el diámetro basa y la altura total, debido a que se mostró un buen desempeño y mayor estabilidad estadística por parte de este tipo de ecuaciones al momento de la estimación del volumen para *A. germinans*.

La presencia de heterocedasticidad en los modelos no lo invalida para fines de predicción, sin embargo, se recomienda que para fines de inferencia estadística se apliquen correcciones robustas, como la transformación de las variables a su forma logarítmica o la implementación de mínimos cuadrados ponderados.

Finalmente, se recomienda seguir impulsando y darles seguimiento a estudios de modelación volumétrica en manglares, ya que se proporcionan herramientas fundamentales para comprender la dinámica estructural y así facilitar el realizar un mejor manejo de las especies.

7 LITERATURA CITADA

- Aho, K. Derryberry, D. y Peterson, T. (2014). Model selection for ecologists: The worldviews of AIC and BIC. *Ecology*, 95(3), 631–636. <https://doi.org/10.1890/13-1452.1>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705
- Alvarado Chay, G. E. (2003). *Tablas de volumen local para Santa María (Calophyllum brasiliense Camb.) y malerio colorado (Aspidosperma megalocarpum Muell.) en la unidad de manejo Las Ventanas, Zona de Usos Múltiple de la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala
- Aminu Suleiman, A. Sameer, D. y Yakubu, I. (2019). Tree volume equation for *Populus deltoides* (Poplar), tree under agroforestry based. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 1470-1475. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.170>
- Argueta Garnica, M. A. (2025). *Ecuaciones de predicción de volúmenes para Conocarpus erectus L. en Soto La Marina, Tamaulipas*. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/50465>
- Ávila Pérez, H. Nava Navva, A. y Fierros Mateo, R. (2022). Ajuste de modelos de fuste y elaboración de tablas de volumen en el predio Almolonga municipio de Tecpan de Galeana, Gro. *Foro de estudios sobre guerrero*, 9(2), 123–132. <https://revistafesgro.cocytieg.gob.mx/index.php/revista/article/view/64>
- Basáñez Muñoz, A de J. Jordán Garza, A. G. Serrano, A. Capistran Barradas, A. Naval Ávila, C. y Cuervo López, L. (2021). Estructura poblacional del árbol *Avicennia germinans* (Acanthaceae) en un manglar alterado del Golfo de México. *Revista de Biología Tropical*, 69(4), 1264–1275. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i4.47353>

- Barrena, V. Dance, J. y Sáenz, D. (1986). Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*, 13, 1-10. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49721457004>
- Barrios, A. López, A. M. y Nieto, V. (2014). Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia forestal*, 17(2), 137-149. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a01>
- Barrio Anta, M. Álvarez González, J. G. y Díaz-Maroto Hidalgo, I. J. (2004). Elaboración de una tarifa con clasificación de productos para "Quercus robur" L. en Galicia basada en un modelo de volumen porcentual. Investigación agraria. *Sistemas y recursos forestales*, 13(3), 506-517.
- Barbosa Borges, W. L. Freitas, R. S. Da Silva, G. S. y de Moraes Silvestre, M. A. Teixeira de Moraes, M. L. (2023). Volumetric models for quantifying the wood volume of two eucalyptus hybrids in an agrosilvipastoral system. *Australian Journal of Crop Science*, 17(4), 332-342. doi:10.21475/ajcs.23.17.04.p3679
- Burnham, K. P. Anderson, D. R. y Huyvaert, K. P. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: Some background, observations, and comparisons. *Behavioral ecology and sociobiology*, 65(1), 23–35. DOI:10.1007/s00265-010-1084-z
- Capella, A. (2024). Más que bosques un ecosistema polifacético: los manglares. *Endémika*, (2), 40-51. <https://bvearmb.do/handle/123456789/4369>
- Carmona Escalante, A. Castillo Domínguez, S. y Escamilla Rivera, V. (2011). Estructura e importancia de los manglares en la Península de Yucatán (Campeche, Yucatán y Quintana Roo). *JAINA Boletín Informativo*, 22(1), 55.
- Chandra, I. Seca, G. y Hena, M. A. (2011). Aboveground Biomass Production of Rhizophora apiculata Blume in Sarawak Mangrove Forest. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6(4), 469-474. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2011.469.474>
- Cobacho, S. P. Janssen, S. A. Brekelmans, M. A. Van de Leemput, I. A., Holmgren, M. y Christianen, M. J. (2024). High temperature and eutrophication alter biomass allocation of black mangrove (*Avicennia germinans* L.) seedlings. *Marine environmental research*, 193, 106291. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106291>

- Cornejo, R. H. Koedam, N. Luna, A. R. Troell, M. y Dahdouh-Guebas, F. (2005). Remote sensing and ethnobotanical assessment of the mangrove forest changes in the Navachiste-San Ignacio-Macapule lagoon complex, Sinaloa, Mexico. *Ecology and Society*, 10(1). <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art16/>
- Cuadrado Hidalgo, M. F. (1985). Tabla de volumen para *Gmelina arborea* Roxb. en Florencia Norte de Turrialba, Costa Rica. CATIE, Departamento de Recursos Naturales Renovables. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4164>
- Da Cunha, T. A. y Guimarães Finger, C. A. (2009). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kuru*, 6(16), ág-26. <https://hdl.handle.net/2238/8189>
- Da Cunha, T. A. Vargas Muñoz, J. O. y Escalier Hinojosa, M. (2009). Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Proyecto FOMABO/ESFOR-UMSS (28 p.). Cochabamba, Bolivia.
- De Oca Cano, M. E. Corral Rivas, S. y Nájera Luna, J. A. (2008). Ajuste de ecuaciones de volumen en *Pinus durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, México. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, 9 (17), 173-180. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66615066012>
- Drake A, Fernando. Emanuelli A, Patricio. Acuña Carmona, E. A. (2003). *Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo*. CONAF. Universidad de Concepción. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29456>
- Durbin, J. y Watson, G. S. (1992). Testing for serial correlation in least squares regression. I. In S. Kotz & N. L. Johnson (Eds.), *Breakthroughs in statistics: Methodology and distribution*, 237-259. Springer.
- Fierro Cabo, A. García Soriano, R. González Medrano, F. Zamora Tovar, C. y Vázquez Lule, A. D. (2009). Caracterización del sitio de manglar La Pesca. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO.
- Flores Flores, J. J. (2021). *Ecuaciones de predicción de volumen para Mangle Rojo (Rhizophora mangle L.) en Soto La Marina, Tamaulipas* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

- Friess, D. A. Yando, E. S. Alemu, J. B. Wong, L.-W. Soto, S. D. y Bhatia, N. (2020). Ecosystem services and disservices of mangrove forests and salt marshes. *Oceanography and marine biology: An Annual Review*, 58, 107-142.
- Gama, A. T. D. Cabacinha, C. D. Meira, M. R. y Leite, M. V. S. (2015). Estimativas volumétricas y hipsométricas para el barbatimão en el norte de Minas Gerais. *Floresta e Ambiente*, 22, 483-493. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.090314>
- Garate Quispe, J. S. y Florez Castillo, L. (2023). Morphic coefficient of *Apuleia leiocarpa* (Vogel) JF Macbr. according to forest type, Peruvian Amazon. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(78), 4-33. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1336>
- García Soriano, R. González Medrano, F. Zamora Tovar, C. y Vázquez Lule, A. D. (2009). Caracterización del sitio de manglar Laguna de Morales. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO.
- García O. (1995). *Apuntes de mensura forestal I: Estática*. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. doi:[10.13140/RG.2.2.23813.50400](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23813.50400)
- Garrido Rosado, R. Hernández Corona, S. y Aparicio Hernández, J. A. (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*. Palibrio.
- Gómez González, J. P. Domínguez Domínguez, M. Martínez Zurimendi, P. y Ramírez Valverde, G. (2018). Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. En plantaciones de etapas adulta y vejez. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421867>
- Guerra, W. Soudre Zambrano, M. y Chota, M. (2008). Tabla de volumen comercial de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) de las plantaciones experimentales de Alexander Von Humboldt, Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, 17(1-2), 47-58. doi:[10.24841/fa.v17i1-2.266](https://doi.org/10.24841/fa.v17i1-2.266)
- Guzmán Santiago, J. C. Aguirre Calderón, O. A. Jiménez Pérez, J. y Vargas Larreta, B. (2020). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia Forestal*, 23(2), 99–113. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15557>

- Hernández Hernández, E. (2022). El carbono azul y su contribución a la conservación de los manglares en México. *Diversidad*, 23, 65–79.
- Hernández, F. J. Simental Serrano, L. A. Hernández Díaz, J. C. Wehenkel, C. A. Prieto Ruíz, J. Á. y Nájera Luna, J. A. (2023). Ecuaciones de razón de volumen para *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltl. del estado de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 117-140. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1330>
- Hernández Ramos, A. Cano Pineda, A. Flores López, C. Hernández Ramos, J. García Cuevas, X. Martínez Salvador, M. y Martínez, Á. (2019). Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25 (2) 1-13. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521806>
- Hernández Ramos, J. Santos Posadas, H. M. Valdés Lazalde, J. R. Tamarit Urias, J. C. Ángeles Pérez, G. Hernández Ramos, A. Méndez Lopez, B. y Peduzzi, A. (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*, 51(5), 561-580. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952017000500561&lng=es&tlng=es
- Hernández Ramos, J. Hernández Ramos, A. García Cuevas, X. Tamarit Urias, J.C. Martínez Ángel, L. y García Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46 DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201X.11965>
- Hernández Santiago, N. (2013). *Tablas de volúmenes para cedro rojo (Cedrela odorata L.) en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. <http://repositorio.aaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1055>
- Herrera Silveira, J. Teutli, C. Gómez Ruiz, P. y Comín, F. (2020). Restauración ecológica de manglares de México. Gobernanza y manejo de las costas y mares ante la incertidumbre, una guía para tomadores de decisiones. Universidad Autónoma de Campeche. 649–674. doi 10.26359/epomex.0120
- Husch, B. Beers, T. W. y Miller, C. I. (1982). *Forest mensuration*. Nueva York: J. Wiley.
- Instituto Nacional de Recursos Naturales Renovables y Organización Internacional de Maderas Tropicales. (1997). *Plan de ordenamiento de manglares de Panamá, énfasis*

- en las áreas de Chame, Chiriquí y Azuero* (Informe de Consultoría). Geoevaluaciones, S.A. En O. Novoa (Ed.). *Proyecto de manejo, conservación y desarrollo de los manglares de Panamá* (Proyecto PD 128/91).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: Soto la Marina, Tamaulipas. INEGI.
- Judd, F. W. Tunnell, J. W. Chapman, B. R. y Withers, K. (2023). *The Laguna Madre of Texas and Tamaulipas*, 36, 198–226. Texas A&M University Press.
- Kauffman, J. B. Donato, D. C. y Adame, M. F. (2013). *Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares* (Documento de trabajo) 117, 1-36. CIFOR.
- Kennedy, J. P. Preziosi, R. F. Rountree, J. K. y Feller, I. C. (2020). Is the central-marginal hypothesis a general rule? Evidence from three distributions of an expanding mangrove species, *Avicennia germinans* (L.) L. *Molecular Ecology*, 29(4), 704–719. doi: 10.1111/mec.15365
- Lema, T. A. (1979). *Introducción a la dasométrica* (Documento de trabajo) 191. Universidad Nacional, Biblioteca Ciencias Agrícolas, Medellín, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2111>
- Manzanares Ibarra, A. G. (2019). *Ajuste de funciones compatibles de ahusamiento-volumen para mangle blanco (Laguncularia racemosa C.F. Gaertn) en cuatro localidades de Colima* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/46169>
- Martínez Cruz, C. (2022). *Tablas de volúmenes para pinus greggi var. australis en la región el Madroño, Landa de Matamoros, Querétaro* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- Martínez Hernández, I. A. (2020). *Laguncularia racemosa (Combretaceae), Avicennia germinans (Acanthaceae), bacterias y hongos micorrílicos arbusculares asociados medio siglo después de la contaminación con petróleo* (Tesis de maestría). Colegio de postgraduados, Cardenas, Tabasco, Mexico. <http://hdl.handle.net/10521/4772>

- Mata Fernández, I. Rodríguez Gamiño, M. López Blanco, J. y Vela Correa, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, 1(5), 26–35.
- Melchor Marroquín, J. I. Romero Hernández, A. E. Rodríguez Acosta, M. y Salazar García, J. G. (2010). *Tabla de volumen para Pinus chiapensis* (Folleto técnico). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (50), 31.
- McRoberts, R. Tomppo, E. O. y Czaplewski, R. (1992). *Diseños de muestreo de las Evaluaciones Forestales Nacionales*. Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. FAO.
- Monárrez González, J. C. Márquez Linares, M. A. López Hernández, J. A. Pérez Verdín, G. Quiñonez Barraza, G. y García Cuevas, X. (2024). Ecuaciones de volumen fustal-total y ahusamiento para especies maderables del ecosistema templado en Puebla, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 15(84), 4-28. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1440>
- Montesinos López, A. (2011). *Estudio del AIC y BIC en la selección de modelos de vida con datos censurados* (Tesis de maestría). Centro de investigación en matemáticas, Guanajuato, Guanajuato, Mexico.
- Montes de Oca Cano, E. Corral Rivas, S. y Nájera Luna, J. A. (2008). Ajuste de ecuaciones de volumen en *Pinus durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, México. InterSedes: *Revista de las Sedes Regionales*, 9 (17), 173-180. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66615066012>
- Montgomery, D. C. Peck, E. A. y Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (5 ed). John Wiley & Sons.
- Moras, G. y Vallejos Barra, O. S. (2013). Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia*, 17(2), 11-24. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S230115482013000200002&lng=es&tlng=es.
- Moreno Casasola, P. (2006). Entornos veracruzanos: la costa de la Mancha. Instituto de ecología, A.C., Xalapa, Ver. México, 576 pp.

- Moret, A. Y. Jerez, M. y Mora, A. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* Lf.) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas–Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(1), 41-50.
- Muñoz Flores, H. J. Castillo Quiroz, D. Sáenz Reyes, J. T. Rueda Sánchez, A. Castillo Reyes, F. y García García, D. A. (2021). Tablas de volumen de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales en Colima, Jalisco y Nayarit, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 17(2), 40-48.
- Muñoz Flores, H. J. Velarde Ramírez, J. C. García Magaña, J. J. Sáenz Reyes, J. Olvera Delgadillo, E. H. y Hernández Ramos, J. (2012). Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(14), 11-22.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322012000600002&lng=es&tlng=es.
- Myung, J. Pitt, M. A. Kim, W. (2003). Model evaluation, testing and selection. *Handbook of Cognition*. 45, doi:10.4135/9781848608177.n19
- Navarro, J. Borja, A. Musálem, M. Ramírez, H. y Granados, D. (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(2), 133–139.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62980207>
- Oliveira, L. Z. Klitzke, A. R. Fantini, A. C. Uller, H. F. Correia, J. y Vibrans, A. C. (2018). Robust volumetric models for supporting the management of secondary forest stands in the Southern Brazilian Atlantic Forest. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(04), 3729-3744. <http://dx.doi.org/10.1590/00013765201820180111>
- Oliveira, L. Z. y Cysneiros, V. C. (2025). Comparación empírica entre los modelos volumétricos de Honer (1965) y Schumacher y Hall (1933) utilizando datos de bosques plantados y nativos. *VII MENSUFLOR-Universidade Federal de Lavras Lavras/MG-2025*.

- Ong, J. E. (4 de junio de 2002). *The hidden costs of mangrove services: Use of mangroves for shrimp aquaculture*. International Science Roundtable for the Media, Bali, Indonesia.
- Pece, M. Gillard, C. Galindez, M. y Ríos, N. (2002). Tabla de volumen de doble entrada para álamos de la zona de riego de Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho*, 9, 95-105. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48100909>
- Phuntsho, Y. Tshering, L. y Wangdi, D. (2023). Local Volume Equations and Tables for two Forest Management Units in Bhutan: An Attempt to Provide FMU Specific Estimate of Timber Volume for Sustainable Forest Management. *Bhutan Journal of Natural Resources and Development*, 7(2), 62–74. <https://doi.org/10.17102/bjnr.v7i2.54>
- Picard N. Saint André L. Henry M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) y el centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), 223 p.
- Piedra O, R. M. Carreón M. (1984). Tabla de volumen para la especie *Gmelina arborea* Roxb (L.) en plantaciones del C.E.F. “Ing. Eduardo Sangri Serrano”. *Revista Ciencia Forestal* 48(09):37-38.
- Pompa García, M. de los Santos Posadas, H. M. Zepeda Bautista, M. E. y Corral Rivas, J. J. (2011). Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia*, 45(3), 379-387. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952011000300010&lng=es&tlang=es
- Portillo, J. L. y Ezcurra, E. (2002). Los manglares de México: Una revisión. *Madera y bosques*, 8(1), 27–51. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61709802>
- Préstegui Santos, A. (2014). *Tablas de volúmenes para tres especies de manglares en Barra de Tecoanapa, Marquelia, Guerrero* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. <http://repositorio.aaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1097>
- Prodan, M. Peters, R. Cox, F. y Real, P. (1997). Mensura forestal. *Serie investigación y educación en desarrollo sostenible*, 586 p. <https://hdl.handle.net/11324/15038>.

- Quiñonez Barraza, G. García Espinoza, G. G. y Aguirre Calderón, O. A. (2018). ¿Cómo corregir la heterocedasticidad y autocorrelación de residuales en modelos de ahusamiento y crecimiento en altura? *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 28-59. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.151>
- Ramos Uvilla, J. A. García Magaña, J. J. Hernández Ramos, J. García Cuevas, X. Velarde Ramírez, J. C. Muñoz Flores, H. J. y García Espinoza, G. G. (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de Pinus de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(23), 92-109. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322014000300008&lng=es&tlang=es.
- Romahn de la Vega, C. y Ramírez Maldonado, H. (2010). *Dendrometría*. Universidad Autónoma de Chapingo. División de ciencias forestales.
- Romero Berny, E. I. Tovilla Hernández, C. Carbajal Evaristo, S. S. Velázquez López, Y. N. Toledo Solís, F. J. y López Vila, J. M. (2024). Patrones estructurales de los manglares en geoformas y regiones del Pacífico sur mexicano. *Botanical Sciences*, 102(4), 1165–1183. <https://doi.org/10.17129/botsci.3560>
- Rueda Sánchez, A. de Dios Benavides Solorio, J. García García, D. A. Sáenz Reyes, J. T. Castillo Quiroz, D. y García Mosqueda, G. E. (2020). Tablas de volumen para *Tectona grandis* Lf. en plantaciones del centro-occidente de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1(3). 12.
- Sáenz Aguilar. Y. V. (2017). *Sistema de Información Geográfica del Delta del Río Soto la Marina, Tamaulipas* (Reporte técnico No. 2). Universidad Tecnologica del Mar de Tamaulipas Bicentenario, La Pesca, Soto a Marina, Tamaulipas, Mexico.
- Sáenz Reyes, J. T. Rueda Sánchez, A. Castillo Quiroz, D. de Dios Benavides Solorio, J. Muñoz Flores, H. J. y García García, D. (2020). Tablas de volumen en plantaciones de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. para Colima, Jalisco y Nayarit. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 16(3). <https://doi.org/1033154/rln.2020.03.03>
- Santiago García, W. Ángeles Pérez, G. Quiñonez Barraza, G. de los Santos Posadas, H. M. y Rodríguez Ortiz, G. (2020). Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la

- planeación forestal en México. *Madera y bosques*, 26(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622004>
- Schlaegel, B. E. (1984). Green ash volume and weight tables. *US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station*, 206. DOI: <https://doi.org/10.2737/SO-RP-206>
- Sebrala, H. Amsalu, A. Negash, M. Asrat, Z. y Lojka, B. (2022). Ecuaciones alométricas de árboles para estimar la biomasa y el volumen de los bosques etíopes y establecer una base de datos: Revisión. *Árboles, Bosques y Gente*, 9, 100314. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100314>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo. DOF.
- Shapiro, S. S. y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Silva García, J. E. (2017). *Elaboración de un sistema volumétrico en la UMAFOR 303 Sierra la Laguna, para mezquite (Prosopis articulata) y mauto (Lysiloma divaricata)* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ciencias Forestales. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/15931>
- Sol Sánchez, A. Hernandez Melchor, G. I. Hernández Hernández, M. y Toruño, P. (2022). Desarrollo bioeconómico y manglares en América Latina. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 2007–2017. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15162>
- Sotelo, R. Gutiérrez, C. Cruz, B. Ortiz, S. y Segura, C. (2008). Historia y desarrollo de la clasificación de vertisoles en el Sistema FAO y la taxonomía. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 325–332. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792008000400005&lng=es&tlang=es.
- Tamarit Urias, J. C. De los Santos Posadas, H. M. Aldrete, A. Valdez Lazalde, J. R. Ramírez, Maldonado, H. y Guerra de la Cruz, V. (2014). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de

- ahusamiento-volumen. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(21), 58-74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711322014000100005&lng=es&tlang=es.
- Tapia, J. y Návar, J. (1998). Ajuste de modelos de volumen y funciones ahusamiento para *Pinus teocote* en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental. *Facultad de Ciencias Forestales, UANL*, Volumen 12. Número 1, 7-23pp.
- Telles Antonio, R. Gómez Cardenas, 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. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431544>
- Téllez García, C. P. y Valdez Hernández, J. I. (2012). Caracterización estructural del manglar en el estero Palo Verde, laguna de Cuyutlán, Colima. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 395-408. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.101>
- Torrubiano, C. y Salinas, H. (1998). Predecir herramientas de volumen de tallo para el abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) ubicada en la zona de Valdivia. *Bosque*, 19(2), 11–21. <https://www.revistabosque.org/index.php/bosque/article/view/1254>
- Travieso Bello, A. (2006). Manglares. Estrategias para el manejo costero integral: el enfoque municipal. Veracruz, México, Instituto de ecología, AC, CONANP y gobierno del estado de Veracruz, 1, 183–204.
- Valdez Hernández, J. I. (2016). Manejo forestal de un manglar al sur de Marismas Nacionales, Nayarit. *Madera y Bosques*, 10 (3), 93-104. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1031269>
- Valerio Hernández, L. A. Campos Vanegas, W. A. Cruz Tórrez, L. E. Peña Ortiz, J. A. y Vargas Larreta, B. (2024). Mejora de las ecuaciones de volumen y biomasa para *Pinus oocarpa* en Nicaragua. *Bosques*, 15(2), 309. <https://doi.org/10.3390/f15020309>
- Vargas Barrera, R. (2008). *Estadística II: Programa Administración Pública Territorial*. Escuela Superior de Administración Pública. http://www.esap.edu.co/portal/wp-content/uploads/2015/08/6_estadistica_ii.pdf

- Vargas Larreta, B. Aguirre Calderón, C. E. Aguirre Calderón, C. G. y Hernández, F. J. (2021). Factores de forma y ecuaciones de volumen comercial para cinco especies de pino en el estado de Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (84). <https://doi.org/10.33064/iycuaa2021842815>
- Vázquez Lule, A. Santos González, P. y Adame, M. (2009). Caracterización del sitio de manglar Nichupté, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO.
- Velázquez Salazar, S. Rodríguez Zúñiga, M. T. Alcántara Maya, J. A. Villeda Chávez, E. Valderrama Landeros, L. Troche Souza, C. Vázquez Balderas, B. Pérez Espinosa, I. Cruz López, M. I. Ressl, R. De la Borbolla, V. G. Paz, O. Aguilar Sierra, V. Hruby, F. y Muñoa Coutiño, J. H. (2020). *Manglares de México: Extensión, distribución y monitoreo*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- White, H. (1980). A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48 (4), 817-838. <https://www.jstor.org/stable/1912934>
- Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. The MIT Press. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt5hhcfr>
- Zamora Tovar, C. Fierro Cabo, A. y Requena Lara, G. N. (2024). Agenda de investigación para el manejo sustentable del manglar en Tamaulipas, México. *Madera y bosques*, 30(spe), e3042615. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3042615>

8 APÉNDICE

Apéndice 1. Medición del fuste y de ramas para *Avicennia germinans* L. en La Pesca, Soto La Marina, Tamaulipas.



A)



B)



C)

A) y B) Medición del fuste y ramas por secciones, C) Mediciones en pie de *Avicennia germinans* L.