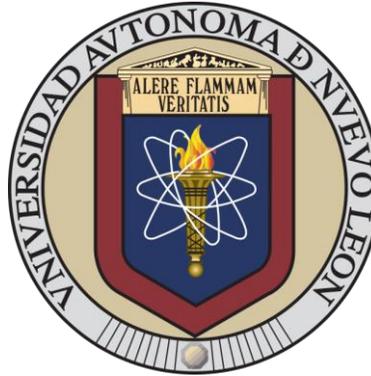


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



CUANTIFICACIÓN DASOMÉTRICA DE *Neltuma glandulosa* (Torr.)
Britton & Rose EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO, COAHUILA

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

ING. LUIS MIGUEL TORIBIO FERRER

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

CUANTIFICACIÓN DASOMÉTRICA DE *Neltuma glandulosa* (Torr.)

Britton & Rose EN EL MUNICIPIO DE SAN PEDRO, COAHUILA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

ING. LUIS MIGUEL TORIBIO FERRER

COMITÉ DE TESIS

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón
Director

Dr. Javier Jiménez Pérez
Asesor

Dr. Eduardo Alanís Rodríguez
Asesor

M.C. Eulalia Edith Villavicencio Gutiérrez
Codirectora externa

DEDICATORIA

A mi hija Camila Toribio Morán y mi esposa Ana Lucia Morán Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por brindarme la beca de posgrado durante mis estudios en la Maestría en Ciencias Forestales en la FCF, UANL.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi comité de tesis interno: Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, Dr. Javier Jiménez Pérez y Dr. Eduardo Alanís Rodríguez. Su valiosa guía y acompañamiento a lo largo de este proceso han sido invaluable. Aprecio enormemente sus observaciones, comentarios y sugerencias, que han contribuido significativamente al desarrollo óptimo de mi proyecto de tesis y a mi crecimiento profesional continuo.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesora externa, MC. Edith Eulalia Villavicencio Gutiérrez, por su inestimable disposición y orientación en la realización de este trabajo de tesis.

Quiero agradecer sinceramente a la Consultoría Forestal TF Estudios y Proyectos SA de CV y a la empresa de Ceras Coahuiltecas SA de CV por su invaluable apoyo durante el levantamiento de datos en campo. Su respaldo incondicional a lo largo de mi maestría ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de la maestría, con quienes compartí momentos inolvidables y un valioso intercambio de conocimientos, les agradezco por contribuir a una experiencia educativa enriquecedora y memorable. Su apoyo y camaradería fueron esenciales para culminar exitosamente nuestras materias.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. HIPÓTESIS	3
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. ANTECEDENTES	4
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	5
3.1.1. Descripción del área de estudio	5
3.1.2. Características físicas y biológicas del área de estudio	5
3.2. METODOLOGÍA.....	6
3.2.1. Diseño de muestreo	6
3.2.2. Criterio para toma de los datos	6
3.2.3. Variables de medición	7
3.2.4. Determinación y cálculo del volumen comercial.....	8
3.2.5. Determinación y cálculo de la biomasa	9
3.2.6. Determinación y cálculo de contenido de carbono	9
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	9
3.3.1. Ajuste de modelos alométricos para el volumen de <i>Neltuma glandulosa</i> ... 9	
3.3.2. Ajuste de modelos alométricos para la biomasa y carbono para <i>Neltuma glandulosa</i>	10
3.3.3. Criterios para la selección del modelo alométrico ajustado para el volumen, biomasa y carbono	11
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
4.1. RESULTADOS.....	13
4.1.1. Estadísticas descriptivas básicas de <i>Neltuma glandulosa</i>	13

4.1.2.	Tendencia de los datos de <i>Neltuma glandulosa</i>	13
4.1.3.	Ecuaciones para la cuantificación del volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i>	16
4.1.4.	Validación del modelo de Sloboda para el volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i>	18
4.1.5.	Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar el volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i>	20
4.1.6.	Ecuaciones para la cuantificación de la biomasa total de <i>Neltuma glandulosa</i>	21
4.1.7.	Validación del modelo de Sloboda para la biomasa de <i>Neltuma glandulosa</i>	23
4.1.8.	Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar la biomasa total de <i>Neltuma glandulosa</i>	23
4.1.9.	Ecuaciones para la cuantificación del contenido de carbono total de <i>Neltuma glandulosa</i>	24
4.1.10.	Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar el contenido de carbono total de <i>Neltuma glandulosa</i>	24
4.1.11.	Ecuaciones para la cuantificación del volumen por secciones de <i>Neltuma glandulosa</i>	26
4.1.12.	Ecuaciones para la cuantificación de la biomasa por secciones de <i>Neltuma glandulosa</i>	31
4.1.13.	Ecuaciones para la cuantificación del contenido de carbono por secciones de <i>Neltuma glandulosa</i>	33
4.2.	DISCUSIÓN	35
4.2.1.	Estadísticas descriptivas	35
4.2.2.	Modelos para la cuantificación del volumen, biomasa y contenido de carbono de <i>Neltuma glandulosa</i>	35
4.2.3.	Modelos para la cuantificación de biomasa y captura de carbono	37
5.	CONCLUSIÓN	38
6.	RECOMENDACIONES	39
7.	BIBLIOGRAFÍAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las áreas de estudio.	5
Figura 2. Toma de las variables independientes de <i>Neltuma glandulosa</i> en campo.	7
Figura 3. Representación gráfica de los diferentes puntos de medición en el árbol de mezquite.	8
Figura 4. Relación del diámetro basal - altura y diámetro de copa de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.....	14
Figura 5. Porcentaje de componentes de volumen en árboles de <i>Neltuma glandulosa</i> del municipio de San Pedro, Coahuila.....	15
Figura 6. Tendencia porcentual de volumen en <i>Neltuma glandulosa</i> en relación con el diámetro basal del municipio de San Pedro, Coahuila.	15
Figura 7. Distribución del volumen con relación al diámetro basal y altura en el municipio de San Pedro, Coahuila.....	16
Figura 8. A) distribución de la autocorrelación de los residuales y B) gráfica de residuales del modelo alométrico de Sloboda para el volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	19
Figura 9. A) Histograma de residuales y B) Normalidad Q-Q Plot de los residuales del modelo alométrico de Sloboda para el volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.....	19
Figura 10. A) Residuales vs valores estimados y B) Residuales estandarizados vs valores estimados del modelo Sloboda para el volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	20
Figura 11. Representación gráfica del volumen estimado con relación al diámetro basal y altura de <i>Neltuma glandulosa</i> para el municipio de San Pedro, Coahuila.....	21
Figura 12. Representación gráfica de la biomasa estimado con relación al diámetro basal y altura de <i>Neltuma glandulosa</i> para el municipio de San Pedro, Coahuila.....	23
Figura 13. Representación gráfica del contenido de carbono estimado con relación al diámetro basal y altura de <i>Neltuma glandulosa</i> para el municipio de San Pedro, Coahuila.	24
Figura 14. Pruebas de heterocedasticidad, distribución normal y autocorrelación del modelo para volumen del fuste de <i>Neltuma glandulosa</i> : A) modelo (1) con heterocedasticidad y B) modelo (1) corregido por MCP.....	29
Figura 15. Volumen observado y estimado de ramas, fuste y total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.....	30
Figura 16. Biomasa observado y estimado de ramas, fuste y total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.....	32
Figura 17. Contenido de carbono observado y estimado de ramas, fuste y total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	34
Figura 18. Comparación del volumen total de <i>Neltuma glandulosa</i> con el volumen de diferentes autores y especies de <i>Prosopis</i>	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Modelos alométricos empleados para cuantificar el volumen comercial de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	10
Tabla 2. Modelos alométricos empleados para cuantificar la biomasa y carbono de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	11
Tabla 3. Estadísticas descriptivas de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	13
Tabla 4. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen comercial total de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	17
Tabla 5. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación de la biomasa de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	22
Tabla 6. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación de contenido de carbono de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	25
Tabla 7. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen comercial del fuste principal de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	27
Tabla 8. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen de las ramas comerciales de <i>Neltuma glandulosa</i> en el municipio de San Pedro, Coahuila.	28
Tabla 9. Estadísticas de ajustes obtenidas del modelo (1) corregido por MCP para el volumen del fuste principal de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	29
Tabla 10. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) por MCO para la biomasa del fuste principal de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	31
Tabla 11. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) corregido por MCP para la biomasa del fuste principal de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	31
Tabla 12. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (8) para la biomasa de las ramas comerciales de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	32
Tabla 13. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) corregido por MCP para el contenido de carbono del fuste principal de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	33
Tabla 14. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (8) para el contenido de carbono de las ramas comerciales de <i>Neltuma glandulosa</i> en San Pedro, Coahuila.	33

RESUMEN

El presente estudio ajustó un conjunto de modelos alométricos para la cuantificación del volumen, biomasa y contenido de carbono en los fustes, ramas principales y árbol completo de la especie de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila. Para la determinación de las variables independientes se realizaron muestreos dirigidos no destructivos en los meses de mayo-agosto de 2023 en ocho poblaciones naturales de la especie, en donde se midieron: altura total (m), diámetro basal (cm), diámetro de copa (m), diámetro inicial y final de las ramas > 5 cm diámetro (cm) y diámetro inicial y final del fuste principal (cm). Posteriormente se determinó el volumen de las diferentes secciones de los árboles mediante la fórmula de cubicación de Smalian; la biomasa se obtuvo multiplicando el volumen por la densidad básica de la madera (0.70 g/cm^3) y el contenido de carbono mediante el producto de la biomasa y el porcentaje de carbono en mezquite (48.86 %). Con los datos obtenidos en campo y las variables dependientes se ajustaron 13 modelos alométricos para cuantificar el volumen (10 modelos lineales y 3 no lineales) y se emplearon otras 10 ecuaciones para estimar la biomasa y el contenido de carbono. El modelo de Sloboda, que considera como variables predictivas el diámetro basal y la altura, presentó los estadísticos de ajuste más sobresalientes para la estimación del volumen, biomasa y contenido de carbono del árbol total, con una R^2 ajustada de 83.14 % y un coeficiente de variación (CV) del 29.21 %. Para las ramas, este modelo logró una R^2 ajustada de 75.20 % con un CV de 33.56 %. En cuanto al fuste, el modelo combinado propuesto por Spurr y ajustado mediante el método de Mínimos Cuadrados Ponderados demostró ser el más adecuado para la estimación del volumen, biomasa y carbono en la sección al obtener una R^2 ajustada de 80.49 % con un CV de 46.47 %.

Palabras clave: Biomasa, contenido de carbono, mezquite, modelos alométricos, volumen.

ABSTRACT

The present study adjusted a set of allometric models for the quantification of volume, biomass, and carbon content in the trunks, main branches, and whole trees of the *Neltuma glandulosa* species in the municipality of San Pedro, Coahuila. For the determination of the independent variables, targeted non-destructive sampling was conducted from May to August 2023 in eight natural populations of the species. The following measurements were taken: total height (m), basal diameter (cm), crown diameter (m), initial and final diameter of branches > 5 cm in diameter (cm), and initial and final diameter of the main trunk (cm). Subsequently, the volume of the different sections of the trees was determined using Smalian's cubic formula; biomass was obtained by multiplying the volume by the basic wood density (0.70 g/cm³), and carbon content was calculated by multiplying the biomass by the carbon percentage in mesquite (48.86 %). Based on the field data and dependent variables, 13 allometric models were adjusted to quantify volume (10 linear models and 3 nonlinear models), and another 10 equations were used to estimate biomass and carbon content. The Sloboda model, which considers basal diameter and height as predictive variables, showed the most outstanding adjustment statistics for estimating the total tree volume, biomass, and carbon content, with an adjusted R² of 83.14 % and a coefficient of variation (CV) of 29.21 %. For the branches, this model achieved an adjusted R² of 75.20 % with a CV of 33.56 %. Regarding the trunk, the combined model proposed by Spurr and adjusted using the Weighted Least Squares method proved to be the most suitable for estimating volume, biomass, and carbon in this section, obtaining an adjusted R² of 80.49 % with a CV of 46.47 %.

Key words: Biomass, carbon content, mesquite, allometric models, volume.

1. INTRODUCCIÓN

En las regiones semidesérticas y desérticas de México el mezquite (*Neltuma* spp.) tiene importancia ecológica, económica y social (Gómez, 2008); desde tiempos antiguos, ha tenido una estrecha conexión con los pobladores de las regiones áridas y semiáridas (Villanueva *et al.*, 2004; Gómez, 2008); esta especie es muy apreciada por su madera resistente y duradera (Meza y Osuna, 2003), que se considera ideal para la elaboración del carbón vegetal de alta calidad (Villanueva *et al.*, 2004; Ríos *et al.*, 2011), también se emplea en el ámbito farmacéutico (Lewis y Elvin, 1997) y su madera dura es excelente para material de construcción y cercado (Meza, 2002).

En términos ecológicos los mezquiales juegan un papel crucial en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas desérticos (Meza, 2002), funge como hábitat para la fauna silvestre y doméstica (Carrillo *et al.*, 1999). Debido a su elevado contenido de proteínas, ofrecen una solución a los desafíos alimentarios durante periodos críticos de sequía (Hermosillo *et al.*, 2008). La relevancia ecológica de esta especie reside en su función como planta fijadora de nitrógeno, enriqueciendo el suelo y fomentando el crecimiento de matorrales que coexisten con ella (Rodríguez *et al.*, 2014). Villanueva *et al.* (2004) subrayan la importancia del mezquite como combustible para uso doméstico, destacándolo como el principal uso de la especie.

El estado de Coahuila está compuesto por 39 municipios y 26 cuentan con poblaciones de mezquiteras. Trucíos *et al.* (2011) estimaron que las poblaciones de mezquite del municipio de San Pedro representan el 1.3 % de la superficie. El aprovechamiento del mezquite es una actividad que complementa los ingresos familiares y ha sido la principal fuente de ingresos para varios ejidos en la región en los últimos años (Villanueva *et al.*, 2004). Los bosques almacenan carbono como biomasa en sus fustes y ramas, sin embargo, esto varía con base a su composición, edad y densidad (Méndez *et al.*, 2006).

Actualmente, la industria forestal está profundamente comprometida con las técnicas no destructivas para cuantificar el recurso (Rodríguez y Fernández, 2009). Esto se realiza

mediante las variables de fácil medición como la altura total, diámetro basal, diámetro normal y diámetro de copa (Acosta y Carillo, 2008), posteriormente se calcula el volumen del árbol a través de un modelo matemático (Cruz *et al.*, 2016). El análisis alométrico a base de ecuaciones matemáticas ha sido útil para cuantificar el volumen absoluto y comercial de diversas especies maderables (Tapia y Návar, 2011).

Las investigaciones sobre la cuantificación de la biomasa y el volumen de los árboles son cruciales para comprender el alcance de los recursos forestales para la contención del carbono y la disminución de dióxido de carbono en el medio, lo que contribuye significativamente a combatir el cambio climático (Návar *et al.*, 2001). En las zonas semiáridas de México se han realizado pocos estudios dirigidos a cuantificar la biomasa áreas de las especies maderables mediante modelos alométricos (Acosta *et al.*, 2002).

La cuantificación del volumen y la biomasa en cualquier sección de un árbol se obtiene mediante un análisis directo o indirecto. Las ecuaciones alométricas, son métodos indirectos eficaces al cuantificar el volumen y la biomasa en especies maderables y no maderables (Acosta *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2010). Para estimar la biomasa mediante el método indirecto se multiplica la densidad básica de la especie por su volumen (Schlegel, 2001) y para calcular la biomasa del árbol completo se utiliza el factor de expansión (Segura y Andrade, 2008). Días *et al.* (2007) mencionan que el contenido de carbono en los árboles es equivalente de 43 a 58 % de su biomasa total; de manera similar, Rodríguez *et al.* (2009) puntualizan que el peso de carbono en biomasa se obtiene multiplicando la biomasa por un valor constante de 0.50.

La utilización de ecuaciones alométrica generadas en diversas regiones se encuentra restringida debido a las condiciones específicas que influyen el desarrollo de los árboles, tales como su genética, el clima y las características del suelo (Álvarez, 2008). El presente estudio tuvo la finalidad de ajustar un conjunto de modelos alométricos para cuantificar el volumen, biomasa y contenido de carbono de ramas comerciales y fuste principal, así como del árbol completo de la especie en el municipio de San Pedro, Coahuila.

1.1. HIPÓTESIS

Los modelos alométricos de *Neltuma glandulosa* generados mediante el método no destructivo describen con alto grado de confiabilidad estadística el volumen, biomasa y el contenido de carbono de la especie en el municipio de San Pedro, Coahuila.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Generar modelos matemáticos para la cuantificación volumétrica, biomasa aérea y carbono almacenado de mezquite (*Neltuma glandulosa*), a través de un método no destructivo y con variables de fácil medición en el municipio de San Pedro, Coahuila.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar la relación alométrica que presentan las variables dendrométricas (diámetro basal, diámetro de copa total, altura total, longitud de tallos, diámetro de ramas inicial y final, longitud de las ramas).
2. Evaluar modelos alométricos de cuantificación volumétrica, biomasa y captura de carbono.
3. Seleccionar el modelo de predicción que mejor se ajuste a los parámetros estadísticos: coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$), error estándar (S_{xy}), la suma de cuadrados de residuales (SSE), raíz del error cuadrático medio (RCME) y el coeficiente de variación más bajo (CV %); además de la significancia de sus parámetros ($P \leq 0.05$).
4. Validar el modelo alométrico mediante los test de confirmación: Durbin-Watson, Kolmogórov-Smirnov y Prueba de White.

2. ANTECEDENTES

En los últimos años se han realizado diversos estudios dasométricos orientados hacia la cuantificación volumétrica, la biomasa y el contenido de carbono para el género *Neltuma* (ex *Prosopis*) (Meza y Osuna, 2003; Méndez *et al.*, 2006; Manzano *et al.*, 2007; Ríos *et al.*, 2011); Existen dos enfoques metodológicos para la determinación del volumen real de un árbol en el campo: el método directo y el método indirecto. El método directo implica el derribo completo del árbol, seguido de su división en componentes que son posteriormente medidos y cuantificados. Este proceso se lleva a cabo utilizando instrumentos especializados llamados xilómetros, los cuales se basan en el principio de Arquímedes para calcular el volumen a través del desplazamiento de agua (Cancino, 2006). Por otro lado, el método indirecto se basa en la utilización de la fórmula de Smalian; este método implica la medición del diámetro inferior y superior de un trozo de madera, así como su longitud, con el propósito de estimar el volumen aproximado de dicho trozo (Chinchilla y Gómez, 2005).

La biomasa forestal se refiere al peso de materia orgánica presente en un ecosistema forestal, tanto sobre como bajo el suelo, y se suele medir en toneladas por hectárea de peso seco (Schlegel, 2001). Los sistemas forestales son capaces de acumular carbono en diversas formas, distribuidas en cuatro componentes principales, estos componentes incluyen la biomasa sobre el suelo, que abarca tanto la biomasa leñosa como el estrato herbáceo, la hojarasca, los sistemas radiculares y el carbono orgánico contenido en el suelo (Ríos *et al.*, 2011).

Los modelos alométricos han surgido como herramientas sumamente útiles para respaldar la toma de decisiones en el manejo forestal en México. En años recientes, estos modelos han encontrado una aplicación extendida en el contexto del cambio climático, ya que permiten cuantificar el equivalente de dióxido de carbono que los árboles son capaces de capturar. Según Pompa y Yerena (2014), la concentración de carbono se estima en aproximadamente el 50 % de la biomasa del árbol, aunque esta proporción puede variar significativamente dependiendo de la edad del mismo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1. Descripción del área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo en cuatro ejidos (La Jococa, N.C.P.A. Nuevo San Pedro, Malanoche y Arracadas y Puerto Ventanillas) del municipio de San Pedro, Coahuila (Figura 1). Con base al sistema geodésico WGS 84 los mezquiales evaluados se encuentran entre las coordenadas geográficas 25°59'0.00" latitud norte y 102°30'0.00" longitud oeste. El municipio colinda de lado norte y este con el municipio de Cuatro Ciénegas, en el lado sur con los municipios de Parras, Viesca y Matamoros y en la parte oeste se limita con el municipio de Francisco I. Madero (INEGI, 2022).

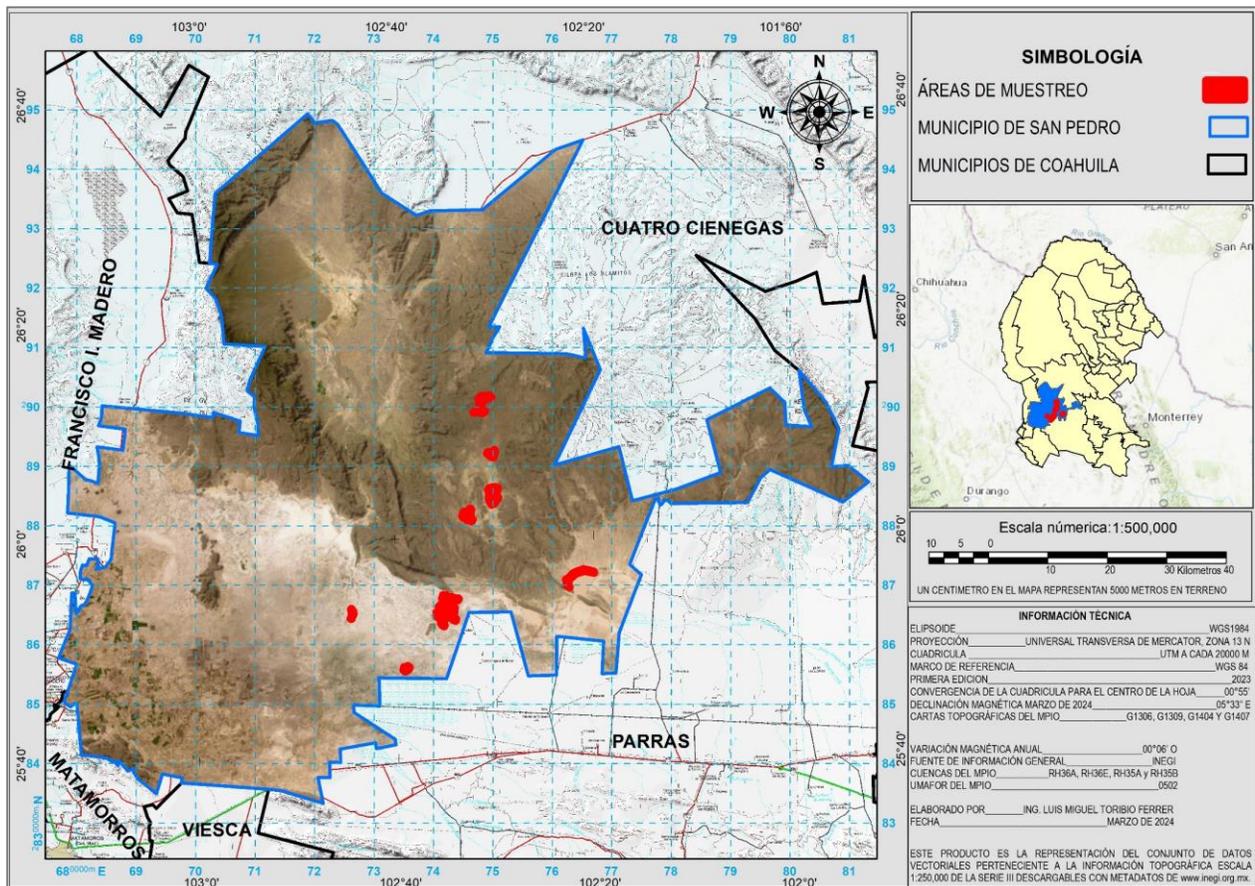


Figura 1. Localización de las áreas de estudio.

3.1.2. Características físicas y biológicas del área de estudio

Las áreas de estudio están ubicadas dentro de la región hidrológica (35) Mapimí, cuenca (A) Valle del Hundido, subcuenca (a) El Hundido y en la región hidrológica (36) Nazas-

Aguanaval, cuenca (E) Laguna de Mayrán y Viesca, subcuenca (b) Laguna de Mayrán (INEGI, 2010). Con base a INEGI (2006) el tipo de suelo dominante es Litosol (I) de textura media sin problema de salinidad, este tipo de suelo se caracteriza por su profundidad menor de 10 cm. En el terreno se distribuye dos tipos de climas bien marcados, las cuales son: BWhw muy árido, semicálido, con una temperatura promedio de 28 °C durante todo el año y BSohw árido, semicálido, temperatura media anual entre 18 y 22 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C (INEGI, 2008). La vegetación predominante en la zona corresponde a matorral desértico rosetófilo, seguido del matorral desértico micrófilo, en los valles predomina la vegetación Halófila (INEGI, 2018).

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Diseño de muestreo

Se identificaron los principales mezquiales dentro de los ejidos que han tenido un programa de manejo autorizado por la SEMARNAT en el municipio de San Pedro, Coahuila y en dichos programas se recabaron la información de la distribución diamétrica de la especie en la región. Posteriormente en campo se aplicó un muestreo dirigido hacia los árboles que entran en la categoría comercial (diámetro basal > 5 cm), para una mejor distribución de los datos se seleccionaron los individuos con base la categoría diamétrica y altura total.

Para la medición de los datos dendrométricos se aplicó un muestreo no destructivo en 60 individuos (de diferentes dimensiones), que consistió en medir los árboles en pie por secciones considerando fustes y ramas > 5 cm de diámetro inicial.

3.2.2. Criterio para toma de los datos

En este estudio se consideraron los criterios de Ríos *et al.* (2011) para la toma de datos:

- Si un árbol se ramificaba a más de 10 cm de su base, se clasificó como un solo árbol con varios tallos. Pero si se bifurcaba por debajo de ese umbral, se etiquetó a cada tallo como árboles diferentes. En tales casos, cada tallo se analizó por separado y se midieron las variables requeridas para cada uno.

- Cualquier diámetro basal por debajo de 5 cm se descartó debido que no entra en el rango del volumen comercial y, por lo tanto, no es relevante para este estudio.

3.2.3. Variables de medición

Las variables que se midieron en los 60 árboles fueron las siguientes: diámetro basal (DB , cm), altura total (H , m), diámetro promedio de copa (DC , m), diámetro inicial y final del fuste principal (Df , cm), longitud del fuste principal (Lf , m), diámetro inicial y final de todas las ramas > 5 cm de diámetro (Dr , cm) y longitud de todas las ramas > 5 cm de diámetro (Lr , m), las ramas < 5 cm de diámetro se midieron su diámetro promedio y su longitud, sin embargo, en el presente estudio no se incluyeron por carecer de interés comercial (Figura 2). Para la medición de altura y diámetro de copa se utilizó el flexometro y una regla de madera estandarizada, para el diámetro basal y de las ramas se emplearon forcípula Mantax Blue 500 mm y cinta diamétrica Modelo 283D/5 m (160 cm diámetro).



Figura 2. Toma de las variables independientes de *Neltuma glandulosa* en campo.

3.2.4. Determinación y cálculo del volumen comercial

Existen diferentes formas para determinar el volumen verdadero de las ramas y fuste, sin embargo, las más comunes son los métodos de desplazamiento de agua (xilómetro) y las fórmulas de cubicación; para el presente estudio la cubicación de cada sección del árbol, desde el tallo hasta las ramas comerciales, se realizó mediante la fórmula de Smalian, en donde se requirieron la longitud y los diámetros extremos de las secciones de ramas y el fuste; para las ramas no comerciales se aplicó la fórmula de Huber, en la Figura 3 se muestran cómo se cubicaron cada trozo del árbol.

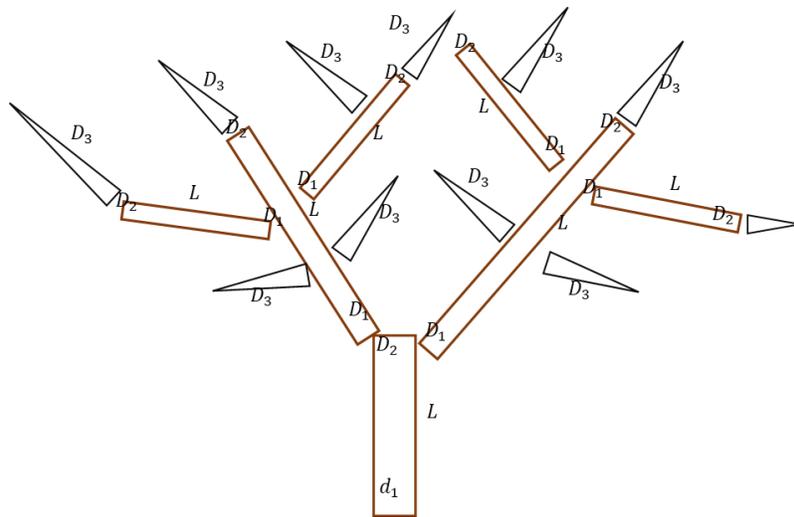


Figura 3. Representación gráfica de los diferentes puntos de medición en el árbol de mezquite.

A continuación, se presenta la fórmula de Smalian utilizada para la cubicación de las secciones comerciales.

$$V = \left(\frac{(0.7854 * D_1^2) + (0.7854 * D_2^2)}{2} \right) L$$

Donde:

V = volumen de la sección (m^3)

D_1 = diámetro mayor (m),

D_2 = diámetro menor (m)

L = longitud de la sección (m).

Para las ramas no comerciales se utilizó la fórmula de Huber:

$$V = \left((0.7854 * D_3^2) \right) L$$

V = volumen de la sección (m³)

D_3 = diámetro de la mitad de la rama (m)

L = longitud de la sección (m).

El volumen total por individuo se obtuvo mediante la suma total de los volúmenes de cada sección.

3.2.5. Determinación y cálculo de la biomasa

La biomasa de los fustes y ramas comerciales fueron determinadas mediante la multiplicación del volumen en m³ de cada sección por la densidad de la madera. De acuerdo con Ordoñez *et al.* (2015) la densidad de la madera de *Neltuma glandulosa* (ex *Prosopis glandulosa*) es de 0.70 g cm⁻³, valor que concuerda con Sotomayor y Villaseñor (2006) quienes indican un valor promedio de 0.73 g cm⁻³ para el género de Neltuma.

3.2.6. Determinación y cálculo de contenido de carbono

Para la determinación del carbono de manera indirecta se multiplicó la biomasa por el valor del contenido de carbono de la especie. Manzano *et al.* (2007) determinaron que el contenido de carbono en *Neltuma glandulosa* en poblaciones naturales del noreste de México es de 48.86 % en relación con su biomasa total. Pantoja (2013) utilizó tres métodos para calcular la biomasa de *Neltuma glandulosa* en China, Nuevo León, en donde reafirma que el porcentaje de carbono con relación a la biomasa obtenida por Manzano *et al.* (2007) es el que mejor aplica para esta especie.

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

3.3.1. Ajuste de modelos alométricos para el volumen de *Neltuma glandulosa*

Se ajustaron un conjunto de ecuaciones alométricas: 10 lineales y 3 no lineales para cuantificar el volumen de la especie de *Neltuma glandulosa*, mismas que han sido empleadas en estudios similares (Méndez *et al.*, 2006; Rueda, 2013; Silva *et al.*, 2018), mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y mínimos cuadrados

ponderados (MCP) en el paquete estadístico R (R Core Team, 2023). Las variables más relevantes en la estimación del volumen son: diámetro basal y altura total; las cuales, son fáciles de medir en campo. En la Tabla 1 se muestran las ecuaciones ajustadas para el volumen comercial de ramas, fuste y árbol total de mezquite.

Tabla 1. Modelos alométricos empleados para cuantificar el volumen comercial de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Modelos Lineales		
No	Ecuaciones	Modelos
1	Variable combinada de Spurr	$V = B_0 + B_1 DB^2 H$
2	Australiana de Stoa	$V = B_0 + B_1 DB^2 + B_2 H + B_3 DB^2 H$
3	Meyer modificada	$V = B_0 + B_1 DB + B_2 DB^2 + B_3 DBH + B_4 DB^2 H$
4	Naslund modificada	$V = B_0 + B_1 DB^2 H + B_2 H + B_3 DBH^2$
5	Australiana	$V = B_0 + B_1 DB + B_2 H + B_3 DB^2 H$
6	Sloboda	$V = B_0 + B_1 H + B_2 DB^2 H + B_3 DBH^2$
7	Dissescu-Stanescu (polinómico de segundo grado incompleto) (Mod. Var. DB)	$V = B_0 + B_1 DB^2$
8	Salas	$V = B_0 + B_1 DBH$
9	Spurr	$V = B_0 DB^2 H$
10	Dissescu-Meyer	$V = B_0 DB + B_1 DB^2$
Modelos No Lineales		
No	Ecuaciones	Modelos
11	Schumacher-Hall	$V = B_0 * DB^{B_1} * H^{B_2}$
12	Potencia	$V = B_0 (DB)^{B_1}$
13	Alométrico	$V = B_0 (DBH)^{B_1}$

Donde: V = Volumen en m^3 ; DB = Diámetro basal (cm); H = Altura total (m); $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 \dots B_n$ = Parámetros de la regresión.

3.3.2. Ajuste de modelos alométricos para la biomasa y carbono para *Neltuma glandulosa*

Se emplearon modelos alométricos propuestos por Gayoso *et al.* (2002) para cuantificar la biomasa y carbono de mezquite (Tabla 2); estos modelos han sido aplicados en otros estudios para la biomasa y contenido de carbono (Méndez *et al.*, 2006, Méndez *et al.*, 2012; Montes *et al.*, 2008; Sione *et al.*, 2020), al igual que los modelos para el volumen de mezquite, estos fueron ajustados MCO y MCP en el paquete estadístico R.

Tabla 2. Modelos alométricos empleados para cuantificar la biomasa y carbono de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Modelos Lineales		
No	Ecuaciones	Modelos
1	Berkout	$BC = B_0 + B_1 DB$
2	Kopezky	$BC = B_0 + B_1 DB^2$
3	Meyer	$BC = B_0 + B_1 DB^2 + B_2 DBH + B_3 DB^2 H$
4	Hohenadl – Krenn	$BC = B_0 + B_1 DB + B_2 DB^2$
5	Variable combinada de Spurr	$BC = B_0 + B_1 DB^2 H$
6	Salas	$BC = B_0 + B_1 DBH$
7	Dissescu-Meyer	$BC = B_0 DB + B_1 DB^2$
8	Sloboda	$BC = B_0 + B_1 H + B_2 DB^2 H + B_3 DBH^2$
Modelos No Lineales		
No	Ecuaciones	Modelos
9	Alométrico	$BC = B_0 (DBH)^{B_1}$
10	Potencia	$BC = B_0 (DB)^{B_1}$

Donde: B y C = Biomasa o carbono (Kg); DB = Diámetro basal (cm); H = Altura total (m); $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 \dots B_n$ = Parámetros de la regresión.

3.3.3. Criterios para la selección del modelo alométrico ajustado para el volumen, biomasa y carbono

Acosta *et al.* (2002) recomienda analizar gráficamente el volumen, biomasa y carbono obtenidos mediante los modelos alométricos para verificar los valores predichos con los valores reales obtenidos en campo; los modelos alométricos que predigan valores muy lejanos de la realidad de la especie serán descartados.

En la selección de la ecuación se tomaron en cuenta los siguientes estadísticos de la regresión obtenidos después del ajuste del modelo alométrico: mayor valor de coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$), el error estándar más bajo (Sxy) y la suma de cuadrados de residuales más bajo (SSE), el valor más bajo de la raíz del error cuadrático medio (RCME) y el coeficiente de variación más bajo (CV %); además de la significancia de sus parámetros ($P \leq 0.05$).

También se consideraron los supuestos básicos de la regresión obtenidos en las pruebas estadísticas: para determinar la autocorrelación en las ecuaciones se aplicó la prueba de Durbin-Watson (D-W) (Durbin y Watson, 1971), con esto se busca determinar si existe alguna dependencia en los valores en relación con el orden de adquisición. El estadístico Durbin-Watson se sitúa en un rango de 0 a 4. Un valor de 2 señala la ausencia de autocorrelación, un valor cercano a 0 indica autocorrelación positiva y un valor cercano a 4 indica autocorrelación negativa, también se toma en cuenta la significancia de su estadístico ($P \leq 0.05$), en donde, si el valor de D-W quedara en la zona de indecisión, un valor P mayor a 0.05 significa que no hay autocorrelación.

Se utilizó la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) para comprobar que los residuales tengan normalidad (Massey, 1951); esta prueba es adecuada para muestras grandes ($n > 50$). El estadístico de prueba (D) obtiene valores entre 0 y 1, cuanto mayor sea el valor de D, mayor será la discrepancia entre los datos observados y la distribución normal. Valor P: Indica la probabilidad de que los datos sean consistentes con la distribución normal asumida. Si el valor P es mayor que su nivel de significancia (alfa), generalmente 0.05, entonces se concluye que los residuales tienen una distribución normal.

Finalmente se aplicó la prueba de White (1980), la cual, se utiliza para detectar si los modelos presentan heterocedasticidad. Según la prueba de White una hipótesis nula (H_0) significa que no hay presencia de heteroscedasticidad en los residuales. La estadística de prueba de White se basa en la comparación de los cuadrados de los residuos estimados en el modelo de regresión con las variables independientes. Cuanto mayor sea la estadística de prueba, mayor será la evidencia de heterocedasticidad y si el valor P es menor que el nivel de significancia (generalmente 0.05), se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. Esto indica la presencia de heterocedasticidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Estadísticas descriptivas básicas de *Neltuma glandulosa*

En la Tabla 3 se muestran las estadísticas básicas de los 60 árboles de *Neltuma glandulosa* estudiadas en el municipio de San Pedro, Coahuila; con base a la descripción los individuos presentan un diámetro basal desde 5.00 – 40.00 cm, alturas desde 1.92 – 6.00 m, diámetro de copa desde 2.93 – 7.12 m; para este estudio se incluyeron todas las categorías de altura y diámetro basal existentes actualmente en los mezquiales del área de estudio. En esta tabla también se reportan los valores máximos, mínimos y promedios del volumen, biomasa y contenido de carbono del fuste principal y de las ramas comerciales (> 5 cm, *DB*) del conjunto de individuos muestreados.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Variables y componentes	Media	D.S.	C.V.	Mínimo	Máximo	N.C. (0.95)
Diámetro a la base del árbol (cm)	22.333	10.338	0.463	5.000	40.000	2.671
Altura total (m)	3.619	1.145	0.316	1.920	6.000	0.296
Diámetro de copa (m)	5.060	1.173	0.232	2.930	7.120	0.303
Cobertura (m ²)	21.175	9.516	0.449	6.743	39.815	2.458
Volumen del fuste principal (m ³)	0.036	0.031	0.876	0.002	0.117	0.008
Volumen de ramas > 5 cm diámetro (m ³)	0.052	0.035	0.674	0.002	0.133	0.009
Biomasa del fuste principal (kg)	25.116	21.994	0.876	1.374	81.950	5.682
Biomasa de las ramas > 5 cm diámetro (kg)	36.217	24.413	0.674	1.612	93.387	6.306
Contenido de carbono del fuste principal (kg)	12.271	10.746	0.876	0.672	40.041	2.776
Contenido de carbono ramas > 5 cm diámetro (kg)	17.696	11.928	0.674	0.787	45.629	3.081
Volumen total (m ³)	0.088	0.062	0.711	0.004	0.233	0.016
Biomasa total (kg)	61.332	43.634	0.711	2.986	163.426	11.272
Contenido de carbono total (kg)	29.967	21.319	0.711	1.459	79.850	5.507

D.S. = Desviación estándar; C.V. = Coeficiente de variación; N.C. = nivel de confianza al 95%.

4.1.2. Tendencia de los datos de *Neltuma glandulosa*

La relación entre el diámetro basal y la altura, así como el diámetro de copa, se muestra en la Figura 4. En dicha figura, se puede observar que la altura y el diámetro de copa

muestran una clara tendencia lineal con respecto al diámetro basal; además, se puede notar que los individuos tienden a crecer más en horizontal que en vertical, lo que lleva a la conclusión de que las poblaciones de mezquites en estas áreas presentan una baja altura, pero una gran extensión en cuanto a su superficie de cobertura.

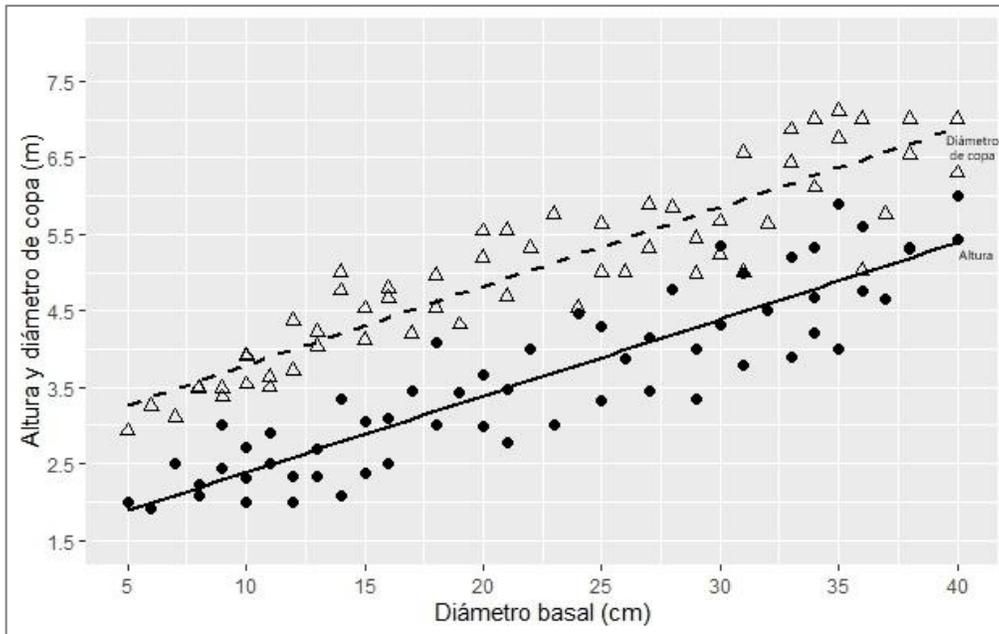


Figura 4. Relación del diámetro basal - altura y diámetro de copa de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Con base a la Figura 5, se puede observar que, en promedio, las ramas con un diámetro superior a 5 cm representan el 63 % del volumen total del árbol, mientras que los fustes principales aportan un promedio del 37 %. Estos resultados sugieren que la biomasa y la captura de carbono se concentran principalmente en las ramas en lugar del fuste principal de los árboles. Estos porcentajes indican claramente que el crecimiento de los mezquites tiende a ser más horizontal que vertical, dado que la especie comienza a ramificarse a una altura muy baja.

Un patrón semejante se evidencia en la Figura 6 al analizar las tendencias proporcionales de los volúmenes de mezquite en relación con su diámetro basal. En esta figura, se observa que el volumen de las ramas comerciales disminuye a medida que crece la categoría diamétrica, mientras que el volumen del fuste principal tiende a aumentar. Esta tendencia puede atribuirse a las condiciones climáticas de la zona de estudio,

caracterizadas por elevadas temperaturas y escasas precipitaciones. Bajo tales condiciones, las ramas de los mezquites suelen secarse como un mecanismo de autorregulación para conservar energía. No obstante, se hace necesario realizar un análisis más exhaustivo con el fin de comprender plenamente este fenómeno y tomar en consideración otros tipos de variables que no fueron abordadas en este estudio.

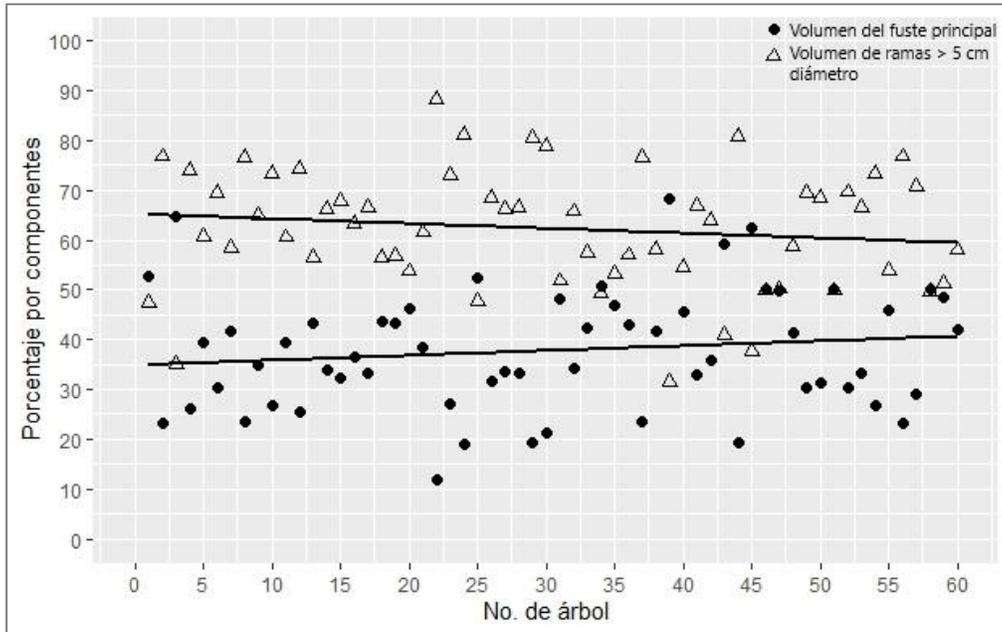


Figura 5. Porcentaje de componentes de volumen en árboles de *Neltuma glandulosa* del municipio de San Pedro, Coahuila.

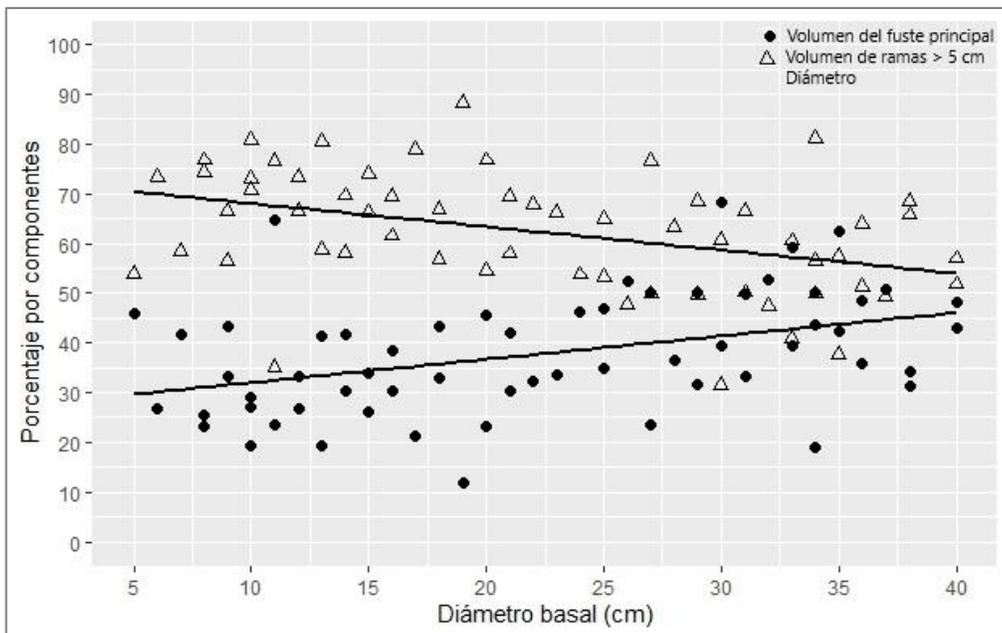


Figura 6. Tendencia porcentual de volumen en *Neltuma glandulosa* en relación con el diámetro basal del municipio de San Pedro, Coahuila.

En la Figura 7 se puede apreciar que la relación entre el volumen total, el diámetro basal y la altura es de naturaleza lineal. En este contexto, es importante destacar que a medida que las variables independientes aumentan, la variabilidad de los datos también tiende a aumentar. La frecuencia más alta en la categoría de altura se encuentra en el rango de 2 a 4 metros. En cuanto a la categoría de diámetro basal, los datos muestran una concentración significativa en árboles con diámetro basal de 5 a 20 centímetros.

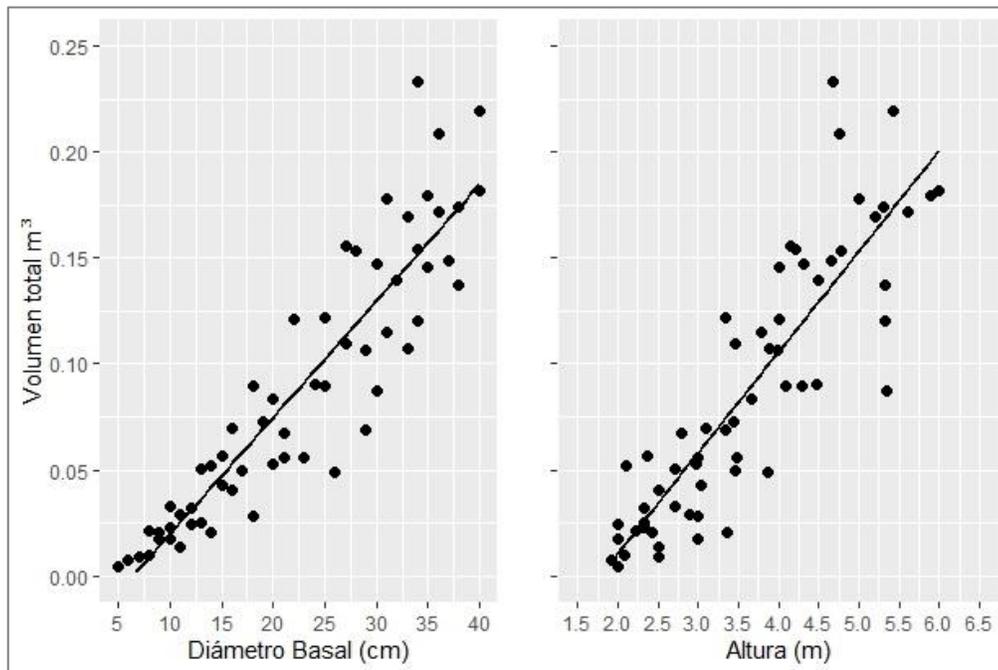


Figura 7. Distribución del volumen con relación al diámetro basal y altura en el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.1.3. Ecuaciones para la cuantificación del volumen comercial total de *Neltuma glandulosa*

A continuación, se presenta la Tabla 4, que contiene los parámetros obtenidos en cada uno de los modelos de regresión utilizados para la cuantificación del volumen comercial total del árbol de *Neltuma glandulosa*, así como los supuestos empleados para la selección de la mejor ecuación. En términos generales, se puede afirmar que los modelos alométricos evaluados logran una adecuada cuantificación del volumen comercial de esta especie. En la misma Tabla 4 indica en la columna derecha el orden de selección de las ecuaciones que mejor cuantifica el volumen del mezquite en las poblaciones evaluadas.

Tabla 4. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen comercial total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	R^2_{aj}	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F	OM
1	0.03052	0.00002141												
Pr > t	<.0001	<.0001				0.7937	0.1827	0.0465	2.012	0.096	8.64	32.31	228.05	6
2	-0.03503	0.00012075	0.01986	-0.00000830										
Pr > t	0.0908	0.0007	0.0105	0.2473		0.8392	0.1942	0.0350	1.863	0.100	13.64	28.53	103.61	9
3	-0.00008002	-0.00117	0.00010959	0.00118	-0.00002240									
Pr > t	0.9975	0.8106	0.4286	0.1605	0.3793	0.8389	0.1948	0.0344	1.855	0.099	15.41	28.55	77.81	8
4	-0.06862	0.00003777	0.04142	-0.00023602										
Pr > t	0.0125	<.0001	0.0003	0.0029		0.8314	0.0256	0.0367	1.9646	0.060	13.41	29.21	97.97	2
5	-0.03778	0.00345	0.01014	0.00000440										
Pr > t	0.0715	0.0007	0.1951	0.3075		0.8395	0.0250	0.0349	1.8439	0.0972	14.31	28.50	103.86	11
6	-0.06865	0.04143	0.00003777	-0.0002361										
Pr > t 	0.0125	0.0003	<.0001	0.0029		0.8314	0.0256	0.0366	1.9646	0.0601	13.41	29.21	97.97	1
7	0.00006129	0.00609												
Pr > t	0.9940	<.0001				0.7308	0.0323	0.0606	2.259	0.0842	9.09	36.91	161.16	13
8	0.00626	0.00089071												
Pr > t	0.2864	<.0001				0.8304	0.0256	0.0382	2.093	0.1209	10.01	29.30	289.84	12
9	0.000027													
Pr > t	<.0001					0.6795	0.0353	0.0735	1.726	0.1343	8.41	40.29	233.04	7
10	0.001798	0.000079												
Pr > t	0.0015	<.0001				0.8328	0.0255	0.0376	1.594	0.1174	12.63	29.10	142.06	4
11	0.001088	1.196432	0.464013											
Pr > t	0.0337	<.0001	0.0694			0.8417	0.0248	0.0351	1.835	0.1094	14.62	28.30	101.89	10
12	0.000737	1.513609												
Pr > t	0.0265	<.0001				0.8343	0.0254	0.0373	1.5773	0.1240	12.86	28.99	146.80	5
13	0.001751	0.875142												
Pr > t	0.0052	<.0001				0.8362	0.0252	0.0369	2.046	0.117	11.06	28.76	143.22	3

M = Modelo; R^2_{aj} = Coeficiente de determinación ajustado; Sxy = Error Estándar; SSE = Suma de los cuadrados de los residuales; D-W = Estadística de autocorrelación de Durbin-Watson; (K-S) = Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov; White = Test de heterocedasticidad de White; CV = Coeficiente de variación (%); F = Valor de F; Pr > |t| = Significancia estadísticas al 95 %, OM = Orden de modelos seleccionados que mejor se ajustaron.

Los valores de R^2 ajustada obtenidos van desde 73.08 hasta 84.17 por ciento, el error estándar más alto obtenido fue de 0.1948 m³ y el coeficiente de variación más elevado fue de 49.29 %. Se descartaron automáticamente en este estudio los modelos de Stoa Australiano (2), Meyer modificado (3), Australiano (5), Dissescu-Stanescu (polinómico de segundo grado incompleto) (Mod. Var. H) (7), Salas (8) y Schumacher-Hall (11) debido que presentaron uno o más coeficientes de estimación con una probabilidad mayor a 0.05, lo que implicó que tenían parámetros no significativos en el modelo para la determinación del volumen de mezquite.

Los modelos Dissescu-Meyer (10) y Potencia (12) muestran evidencia de autocorrelación negativa y presentan heterocedasticidad en los residuales de los volúmenes estimados; los modelos de Variable combinada de Spurr (1) y Spurr (9) presentaron una R^2 ajustada de 0.7937 y 0.7308 respectivamente, valores menores en comparación a otros modelos ajustados. El modelo Alométrico (13) presentó excelentes estadísticos, sin embargo, los residuales no tienen una distribución normal, dado que están sesgado a la derecha.

Basado en los supuestos básicos de selección, el modelo alométrico de Sloboda (6), es el que mejor cuantifica el volumen comercial total de la especie, ya que explica a un 83.14 % de la variación total, presenta un error volumétrico de 0.0250 m³, un coeficiente de variación 29.21 por ciento y un valor de F de 97.97 relativamente bajo a comparación de los demás modelos alométricos evaluados.

4.1.4. Validación del modelo de Sloboda para el volumen comercial total de *Neltuma glandulosa*

Autocorrelación

En el contexto de la detección de autocorrelación en los residuales del modelo de Sloboda, se aplicó el Test de Durbin-Watson para su hallazgo, arrojando un valor de 1.9646 con una probabilidad de 0.4383. Estos resultados indican que los residuos no presentan indicios de autocorrelación. Esto se representa de manera visual en la Figura 8, que muestra la tendencia de los residuos obtenidos del modelo de Sloboda. En dicha figura, se aprecia claramente que los residuos muestran una independencia evidente, sin seguir ningún patrón cíclico o lineal.

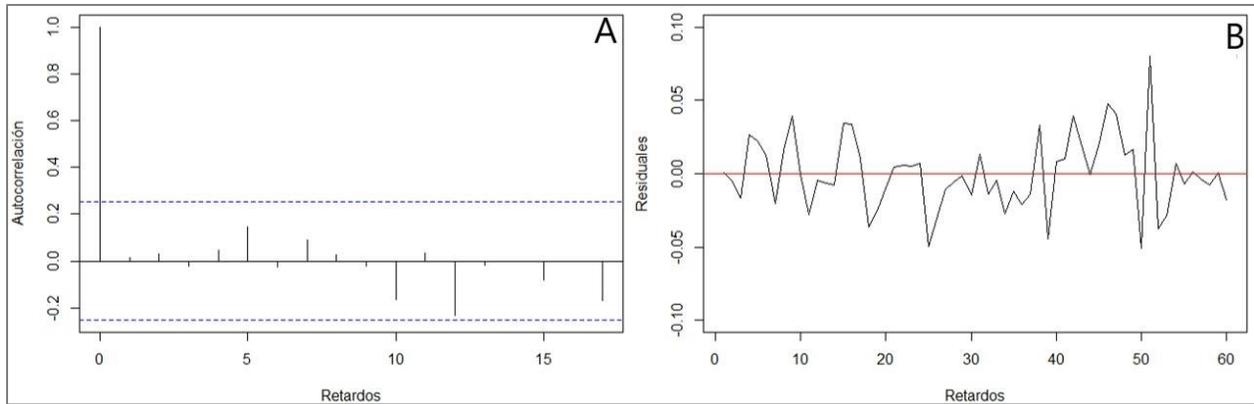


Figura 8. A) distribución de la autocorrelación de los residuales y B) gráfica de residuales del modelo alométrico de Sloboda para el volumen comercial total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Distribución normal

Para determinar si los residuales siguen una distribución normal se aplicó el Test de Kolmogórov-Smirnov, en donde se obtuvo un valor de $D = 0.060$ el cual es cercano a 0 sugiriendo que los residuales se distribuyen normalmente; y a una significancia de 0.9728, valor mayor a 0.05 mostrando que los residuales provienen de una distribución normal. En la Figura 9 se muestra la tendencia de los residuales mediante histograma y la normalidad de Q-Q Plot, donde se puede apreciar los residuales tiene una distribución normal.

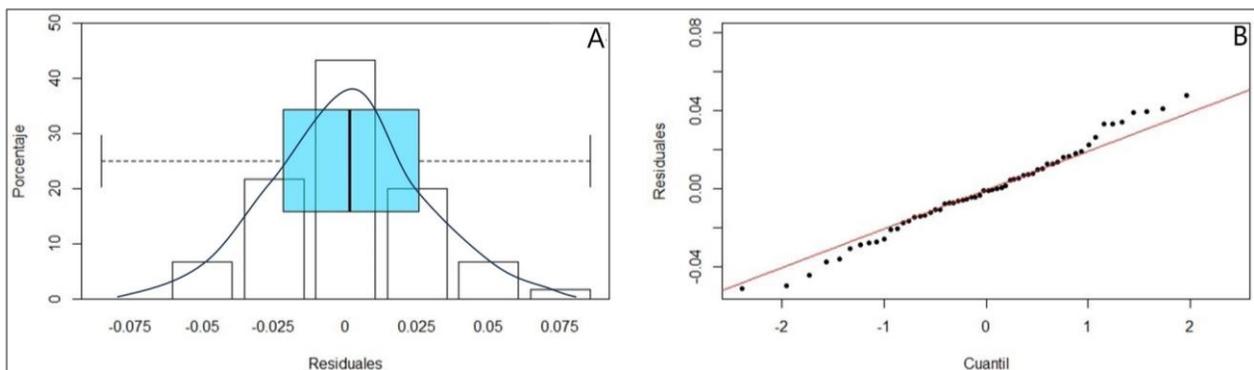


Figura 9. A) Histograma de residuales y B) Normalidad Q-Q Plot de los residuales del modelo alométrico de Sloboda para el volumen comercial total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Heterocedasticidad

El modelo alométrico de Sloboda para el volumen de mezquite con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0.05$), se realizó el Test de White para evaluar la presencia de

heterocedasticidad en los residuales. El valor de Ji obtenido en este test fue de 13.41, con 9 grados de libertad y una significancia de $P < 0.1448$.

Comparando este valor de Ji con el Ji cuadrado crítico de la tabla de White, que es 16.919, se observa que el valor obtenido (13.41) es menor que el valor crítico. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0). En conclusión, esto indica que el modelo exhibe homocedasticidad en sus residuales, lo que significa que la varianza de los residuales no aumenta a medida que los valores de las variables explicativas, como el diámetro basal y la altura, aumentan. La Figura 10 ilustra la distribución de los residuales demostrando que la varianza alrededor de la línea de regresión es la misma para todos los valores de la variable predictora.

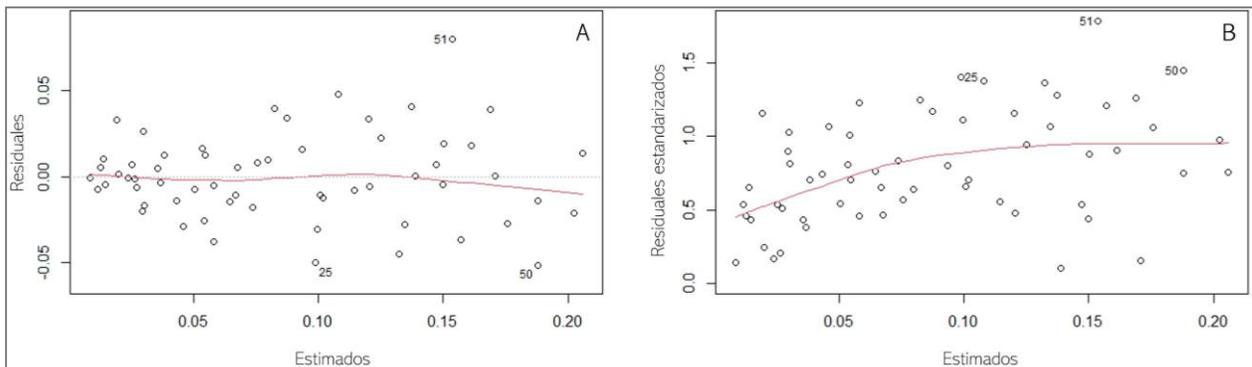


Figura 10. A) Residuales vs valores estimados y B) Residuales estandarizados vs valores estimados del modelo Sloboda para el volumen comercial total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.1.5. Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar el volumen comercial total de *Neltuma glandulosa*

A continuación, se presenta el modelo alométrico final de Sloboda, diseñado para la evaluación del volumen comercial de la especie *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila (Figura 11).

$$V = -0.06865 + 0.04143(H) + 0.00003777(DB^2 * H) - 0.0002361(DB * H^2)$$

Donde:

V = Volumen comercial (m^3)

H = Altura total del árbol (m)

DB = Diámetro basal (cm)

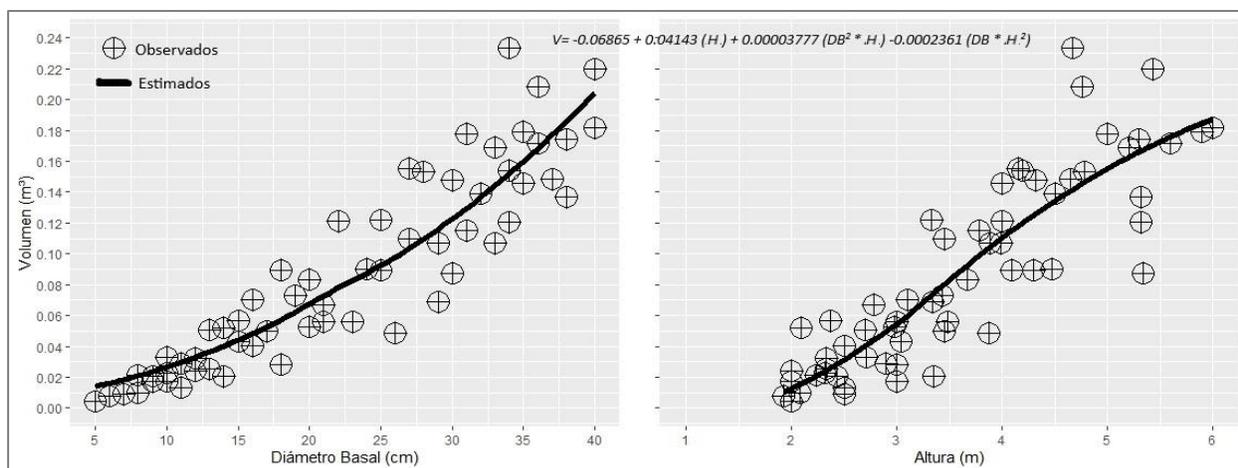


Figura 11. Representación gráfica del volumen estimado con relación al diámetro basal y altura de *Neltuma glandulosa* para el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.1.6. Ecuaciones para la cuantificación de la biomasa total de *Neltuma glandulosa*

En la Tabla 5 se muestran los estadísticos obtenidos de los modelos alométricos (Tabla 2) ajustados para cuantificar la biomasa total de la especie. Los modelos no lineales: Alométrico (9) y Potencia (10) en conjunto con el modelo lineal de Dissescu-Meyer (7) presentaron buenos ajustes con una R^2 *aj.* de 0.8362, 0.8344 y 0.8328 respectivamente, además de una baja variabilidad. A pesar de estos buenos ajustes, es relevante destacar que ambos modelos incumplen con un supuesto fundamental en los modelos predictivos, la media de la suma de los residuos no se acerca a cero, por consiguiente, sus estimaciones no son confiables, dado que puede sobreestimar o subestimar la biomasa en la especie.

Los modelos de Meyer (3), Hohenadl-Krenn (4) y Salas (6) mostraron uno o más parámetros de estimación con una probabilidad superior a 0.05, este resultado sugiere que estas ecuaciones no logran explicar adecuadamente el comportamiento de la biomasa para la especie de mezquite. El modelo de Sloboda (8) sigue siendo el más destacado al explicar un 83.14 % de la biomasa del mezquite, con un error promedio de 17.92 Kg, aproximadamente un 29.21 % con respecto a la media. Aunque el error promedio parece alto al estimar la biomasa en categorías pequeñas de la especie, es esencial considerar que la biomasa máxima alcanza los 163.426 Kg.

Tabla 5. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación de la biomasa de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

M	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	R ² aj.	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F	OM
1	-24.661	3.850							1.5596	0.0704	9.38			
Pr > t	<.0001	<.0001				0.8293	18.03	18847.2	0.0397	0.9068	0.0092	29.39	287.68	4
2	10.912782	0.083495							1.6229	0.1283	11.23			
Pr > t	0.0060	<.0001				0.8252	18.24	19306.1	0.0671	0.2535	0.0036	29.74	279.50	6
3	-4.053525	0.054366	0.697962	-0.011700					1.8423	0.0991	15.39			
Pr > t	0.5641	0.0330	0.00648	0.06198		0.8416	17.36	16883.2	0.2544	0.5627	0.0808	28.31	105.53	8
4	-9.96341	2.21290	0.03622						1.5763	0.1161	12.88			
Pr > t	0.4126	0.0741	0.1760			0.8319	17.89	18246.1	0.0442	0.3652	0.0119	29.17	146.96	9
5	21.36671	0.014988							2.0117	0.0969	8.64			
Pr > t	<.0001	<.0001				0.7937	19.82	22776.1	0.5136	0.5918	0.0133	32.30	228.05	7
6	4.381161	0.623497							2.0928	0.1209	10.01			
Pr > t	0.2863	<.0001				0.8304	17.97	18728.0	0.6365	0.3176	0.0067	29.29	289.88	10
7	1.25885	0.055613							1.5944	0.1145	12.63			
Pr > t	0.0015	<.0001				0.8328	17.84	18464.2	0.0541	0.3815	0.0132	29.09	143.19	5
8	-48.05642	29.00426	0.02644	-0.16526					1.9646	0.0601	13.41			
Pr > t 	0.0125	0.0003	<.0001	0.0029		0.8314	17.92	18464.2	0.4383	0.9728	0.1452	29.21	97.97	1
9	1.226255	0.875092							2.0456	0.1165	11.06			
Pr > t	0.0052	<.0001				0.8362	17.66	18087.1	N/A	0.3607	0.0503	28.79	143.27	2
10	0.515985	1.513502							1.5768	0.12403	12.86			
Pr > t	0.0264	<.0001				0.8344	17.76	18289.6	N/A	0.2899	0.0247	28.95	146.74	3

M = Modelo; R²aj = Coeficiente de determinación ajustado; Sxy = Error Estándar; SSE = Suma de los cuadrados de los residuales; D-W = Estadística de autocorrelación de Durbin-Watson; (K-S) = Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov; White = Test de heterocedasticidad de White; CV = Coeficiente de variación (%); F = Valor de F; Pr > |t| = Significancia estadísticas al 95 %, OM = Orden de modelos seleccionados que mejor se ajustaron.

4.1.7. Validación del modelo de Sloboda para la biomasa de *Neltuma glandulosa*

El modelo de Sloboda, diseñado para la cuantificación de la biomasa del mezquite, exhibe congruencia en sus resultados al someterse a pruebas de autocorrelación mediante Durbin-Watson (DW), evaluación de la distribución normal mediante Kolmogórov-Smirnov (KS), y análisis de heterocedasticidad a través de White, de manera análoga al modelo desarrollado para la determinación del volumen de dicha especie (Tablas 4 y 5). Esta coherencia se atribuye a la dependencia directa existente entre la biomasa y el volumen de los árboles. En consecuencia, se infiere que el modelo alométrico de Sloboda (8) diseñado para la biomasa no presenta inconsistencias, lo cual respalda su idoneidad para la evaluación de la especie de mezquite.

4.1.8. Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar la biomasa total de *Neltuma glandulosa*

La ecuación alométrica final derivada del modelo de Sloboda, para la estimación de la biomasa de *Neltuma glandulosa*, se presenta a continuación (Figura 12):

$$B = -48.05642 + 29.00426(H) + 0.02644(DB^2 * H) - 0.165526(DB * H^2)$$

Donde:

B = Biomasa total (Kg)

H = Altura total del árbol (m)

DB = Diámetro basal (cm)

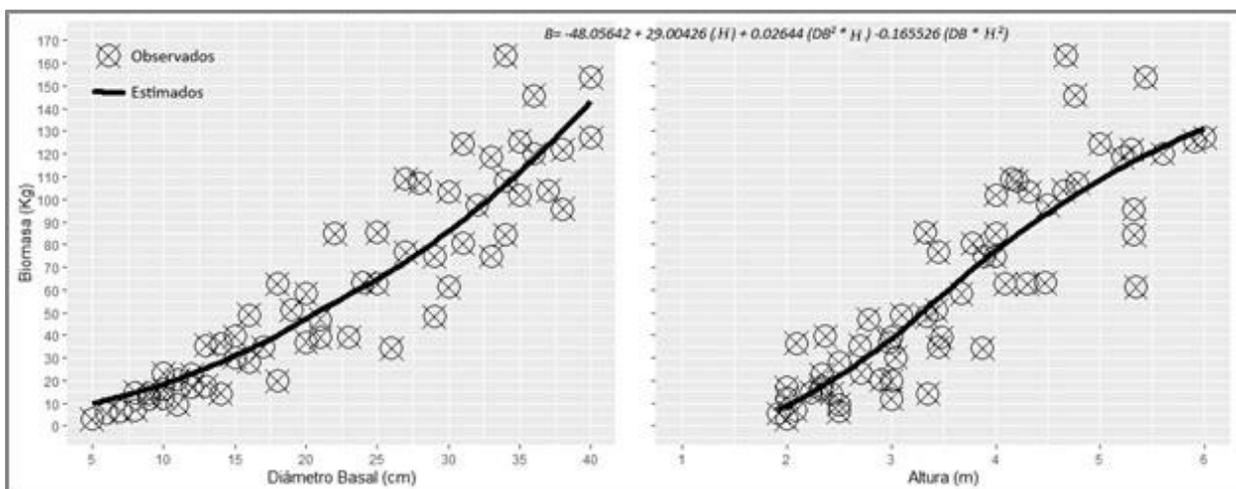


Figura 12. Representación gráfica de la biomasa estimado con relación al diámetro basal y altura de *Neltuma glandulosa* para el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.1.9. Ecuaciones para la cuantificación del contenido de carbono total de *Neltuma glandulosa*

De acuerdo con los resultados derivados de las regresiones aplicadas a los modelos destinados a evaluar el contenido de carbono (Tabla 6), se constata que el modelo lineal propuesto por Sloboda (6) continúa destacando al exhibir los estadísticos más favorables, además de cumplir con todos los supuestos fundamentales de regresión necesarios para la estimación precisa del contenido de carbono en mezquite. Los resultados de los distintos test's de confirmación del modelo, tales como Durbin-Watson, Kolmogórov-Smirnov y White, presentan similitudes con los obtenidos para la biomasa. Se atribuye esta coherencia al hecho de que los mismos árboles fueron evaluados para ambos modelos, variando únicamente la variable de interés en cuestión.

4.1.10. Estructura del modelo alométrico de Sloboda para determinar el contenido de carbono total de *Neltuma glandulosa*

La formulación del modelo de Sloboda (6) diseñada para la estimación del contenido de carbono en mezquite se expresa de la siguiente manera (Figura 13):

$$C = -23.480368 + 14.171481(H) + 0.012918(DB^2 * H) - 0.080744(DB * H^2)$$

Donde:

C = Contenido de carbono (Kg)

H = Altura total del árbol (m)

DB = Diámetro basal (cm)

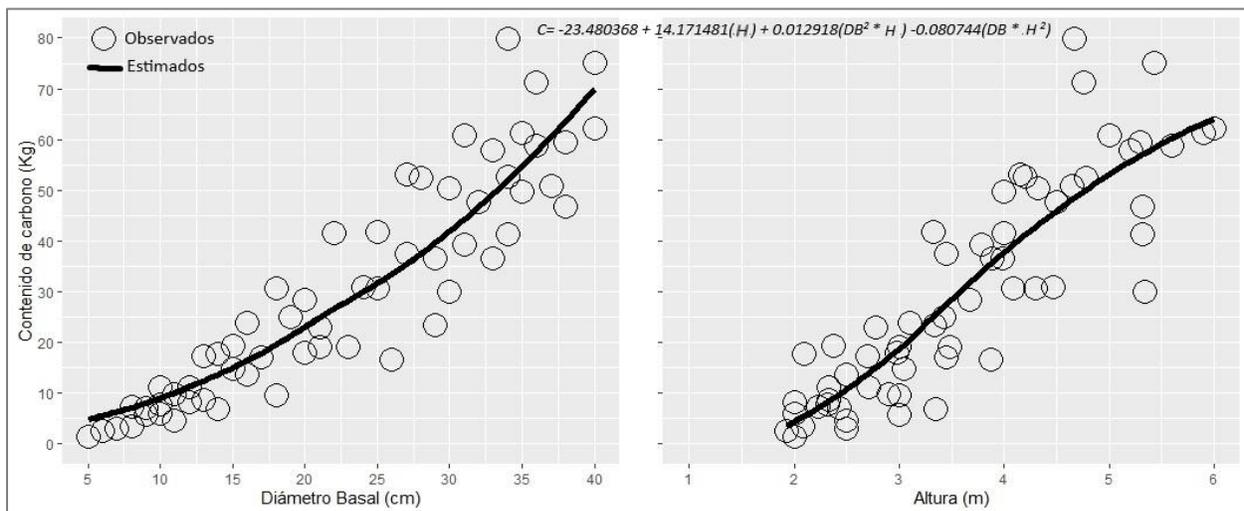


Figura 13. Representación gráfica del contenido de carbono estimado con relación al diámetro basal y altura de *Neltuma glandulosa* para el municipio de San Pedro, Coahuila.

Tabla 6. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación de contenido de carbono de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

M	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	R ² aj.	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F	OM
1	-12.0493	1.8813							1.5596	0.0704	9.38			
Pr > t	<.0001	<.0001				0.8293	18.03	4499.4	0.0397	0.9068	0.0092	29.39	287.68	4
2	5.331985	0.04079							1.6229	0.1283	11.23			
Pr > t	0.0060	<.0001				0.8252	18.24	4608.9	0.0671	0.2535	0.0036	29.74	279.50	6
3	-1.980553	0.026563	0.341024	-0.005716					1.8423	0.0991	15.39			
Pr > t	0.5641	0.0330	0.00648	0.06198		0.8416	17.36	4030.5	0.2544	0.5627	0.0808	28.31	105.53	8
4	-4.86812	1.08122	0.01770						1.5763	0.1161	12.88			
Pr > t	0.4126	0.0741	0.1760			0.8319	17.89	4355.9	0.0442	0.3652	0.0119	29.17	146.96	9
5	10.43978	0.007323							2.0117	0.0969	8.64			
Pr > t	<.0001	<.0001				0.7937	19.82	5437.3	0.5136	0.5918	0.0133	32.30	228.05	7
6	2.140635	0.304641							2.0928	0.1209	10.01			
Pr > t	0.2863	<.0001				0.8304	17.97	4470.9	0.6365	0.3176	0.0067	29.29	289.88	10
7	0.615074	0.027173							1.5944	0.1145	12.63			
Pr > t	0.0015	<.0001				0.8328	17.84	4408.0	0.0541	0.3815	0.0132	29.09	143.19	5
8	-23.480368	14.171481	0.012918	-0.080744					1.9646	0.0601	13.41			
Pr > t 	0.0125	0.0003	<.0001	0.0029		0.8314	17.92	4290.9	0.4383	0.9728	0.1452	29.21	97.97	1
9	0.599149	0.875092							2.0456	0.1165	11.06			
Pr > t	0.0052	0.0052				0.8362	17.66	4317.9	N/A	0.3607	0.0503	28.79	143.27	2
10	0.25211	1.513502							1.5768	0.12403	12.86			
Pr > t	0.0264	<.0001				0.8344	17.76	4366.3	N/A	0.2899	0.0247	28.95	146.74	3

M = Modelo; R²aj = Coeficiente de determinación ajustado; Sxy = Error Estándar; SSE = Suma de los cuadrados de los residuales; D-W = Estadística de autocorrelación de Durbin-Watson; (K-S) = Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov; White = Test de heterocedasticidad de White; CV = Coeficiente de variación (%); F = Valor de F; Pr > |t| = Significancia estadísticas al 95 %, OM = Orden de modelos seleccionados que mejor se ajustaron.

4.1.11. Ecuaciones para la cuantificación del volumen por secciones de *Neltuma glandulosa*

Los resultados de las ecuaciones ajustadas para la determinación del volumen comercial en el fuste y ramas de los árboles de mezquite se presentan en las Tablas 7 y 8. Las variables de altura total (h) y diámetro basal (DB) explican un 73.96 % el contenido del volumen en los fustes y un 75.20 % el volumen de las ramas. En el caso del fuste los modelos no lineales (11, 12 y 13) presentaron coeficientes de intercepción no significativos ($P < 0.05$) y problemas de heterocedasticidad en sus residuales con relación al volumen estimado; entre los modelos lineales, solo los modelos 1 y 9 demostraron significancia estadística en sus coeficientes de regresión. El modelo 1 destacó al obtener el mejor R^2 ajustada, alcanzando un valor de 73.96 %; sin embargo, se identificó heterocedasticidad en los residuales de este modelo. Para abordar este problema, se aplicó el método MCP, asignando peso a $1/(DB^2H)$ para corregir la heterocedasticidad.

En lo que respecta a la estimación del volumen en las ramas comerciales, los modelos ajustados mostraron resultados muy similares en su orden de selección al del árbol completo (Tabla 4). El modelo de Sloboda (6) destacó al presentar los mejores estadísticos, explicando aproximadamente el 75.20 % del volumen con un error volumétrico de 0.0170 m^3 . Este modelo no mostró problemas de autocorrelación ni de heterocedasticidad, y sus residuales se distribuyeron de manera normal. De los modelos no lineales, el modelo de Potencia (12) y Alométrico (13) fueron estadísticamente significativos al tener una probabilidad mayor 0.05 en sus coeficientes, sin embargo, presentaron una R^2 ajustada menor que el de Sloboda.

Los modelos 2, 3, 5 y 8 presentaron al menos un parámetro de coeficiente no significativo por lo que fueron automáticamente descartados (Tabla 8). En general el error volumétrico varió entre 0.0170 a 0.0256 m^3 , mientras que el coeficiente de variación fluctuó entre 33.22 y 49.27 %. De forma general los modelos mostraron una mayor capacidad de ajuste en las ramas en comparación con los fustes. Esta observación podría ser atribuida al hecho de que las ramas exhibieron una menor variabilidad en sus datos en contraste con los fustes (Figuras 5 y 6).

Tabla 7. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen comercial del fuste principal de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	R^2_{aj}	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F	OM
1	0.008078	0.00001043												
Pr > t	0.0088	<.0001				0.7396	0.0160	0.0149	1.9714	0.1466	15.1	44.68	168.55	1
2	-0.02702	0.00001512	0.0131	0.00000238										
Pr > t	0.0333	0.463	0.0057	0.5834		0.7658	0.0149	0.0129	2.2026	0.1368	17.35	42.37	65.31	5
3	0.00297	-0.00247	0.00005192	0.0011	-0.00001626									
Pr > t	0.8466	0.3963	0.5273	0.0296	0.2835	0.7763	0.0144	0.0121	2.2796	0.1221	19.68	41.41	52.19	4
4	-0.02371	0.00000493	0.01252	0.00000282										
Pr > t	0.1408	0.3216	0.0579	0.9505		0.7635	0.0150	0.0130	2.2506	0.1080	19.68	42.58	64.5	7
5	-0.02796	0.00051689	0.0117	0.00000373										
Pr > t	0.0292	0.3767	0.0158	0.1568		0.7668	0.0149	0.0128	2.1849	0.1415	17.8	42.28	65.68	8
6	-0.02371	0.01252	0.00000493	0.00000282										
Pr > t	0.1408	0.0579	0.3216	0.9505		0.7635	0.0150	0.0130	2.2506	0.1080	19.68	42.58	64.5	6
7	0.00194	0.0000562												
Pr > t	0.5809	<.0001				0.7189	0.0167	0.0161	1.7359	0.1354	15.4	46.43	151.89	12
8	-0.00384	0.00043481												
Pr > t	0.2576	<.0001				0.7777	0.0148	0.0127	1.7359	0.1354	13.72	41.28	207.46	9
9	0.000012													
Pr > t	<.0001					0.7115	0.0169	0.0168	1.9436	0.1579	15.72	47.03	201.55	13
10	0.000264	0.00005												
Pr > t	0.4545	<.0001				0.7201	0.0166	0.0165	1.7351	0.1425	18.92	46.32	74.78	11
11	0.0003683	0.8687518	1.355316											
Pr > t	0.156274	0.006164	0.000625			0.7739	0.0149	0.0127	2.1531	0.1387	19.6	41.64	64.3	3
12	0.000118	1.797918												
Pr > t	0.2035	<.0001				0.7213	0.0166	0.0165	1.7323	0.1463	19.54	46.23	74.96	10
13	0.000266	1.084225												
Pr > t	0.0772	<.0001				0.7754	0.0148	0.0128	2.0726	0.1305	15.13	41.5	97.59	2

M = Modelo; R^2_{aj} = Coeficiente de determinación ajustado; Sxy = Error Estándar; SSE = Suma de los cuadrados de los residuales; D-W = Estadística de autocorrelación de Durbin-Watson; (K-S) = Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov; White = Test de heterocedasticidad de White; CV = Coeficiente de variación (%); F = Valor de F; Pr > |t| = Significancia estadísticas al 95 %, OM = Orden de modelos seleccionados que mejor se ajustaron.

Tabla 8. Parámetros y estadísticos de regresión para la cuantificación del volumen de las ramas comerciales de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	R^2_{aj}	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F	OM
1	0.02245	0.00001099				0.6647	0.0201	0.0236	2.0848	0.1458	10.19	39.03	117.97	6
	<.0001	<.0001							0.6251	0.1410	0.0061			
2	-0.00804	0.00010566	0.00677	-0.00001069		0.7469	0.0172	0.0172	1.7746	0.0768	19.54	33.91	59.03	9
	0.576	<.0001	0.2038	0.0362					0.1811	0.8435	0.0122			
3	-0.00308	0.00131	0.00005757	0.0000794	-0.00000613	0.7411	0.0172	0.0173	1.757	0.0886	20.31	34.29	43.23	10
	0.8665	0.7071	0.5571	0.8928	0.7335				0.1638	0.6994	0.0412			
4	-0.04494	0.00003284	0.02891	-0.0002389		0.7520	0.0170	0.0168	1.8367	0.0839	18.78	33.56	60.65	2
	0.0157	<.0001	0.0002	<.0001					0.2553	0.7602	0.0271			
5	-0.00984	0.00293	-0.00155	0.000000668		0.7426	0.0173	0.0175	1.795	0.0941	18.19	34.19	57.74	11
	0.5019	<.0001	0.7779	0.8262					0.2031	0.6275	0.033			
6	-0.04494	0.02891	0.00003284	-0.0002389		0.7520	0.0170	0.0168	1.8367	0.0839	18.78	33.56	60.65	1
	0.0157	0.0002	<.0001	<.0001					0.2553	0.7602	0.02710			
7	0.01365	0.00006307				0.7353	0.0179	0.0186	1.888	0.0995	12.55	34.68	164.88	4
	0.0006	<.0001							0.3256	0.5578	0.0019			
8	0.0101	0.0004559				0.6922	0.0193	0.0217	2.0885	0.1072	10.7	37.39	133.66	12
	0.0249	<.0001							0.6303	0.4627	0.0047			
9	0.000015					0.4669	0.0256	0.0382	1.6937	0.1145	5.97	49.27	138.00	13
	<.0001								0.1262	0.3814	0.0505			
10	0.001534	0.000029				0.7499	0.0174	0.0176	1.8497	0.1206	14.56	33.71	84.49	7
	0.0001	0.0156							0.2759	0.3211	0.0057			
11	0.0007475	1.4027907	-0.1260383			0.7475	0.0173	0.0175	1.7899	0.0938	18.72	33.87	58.09	8
	0.0659	<.0001	0.6744						N/A	0.6323	0.0277			
12	0.0008309	1.3168322				0.7510	0.0174	0.0175	1.8342	0.1	14.7	33.63	87.75	3
	0.0374	<.0001							N/A	0.551	0.0117			
13	0.0019642	0.7381389				0.7112	0.0187	0.0204	2.0474	0.1184	13.86	33.22	68.12	5
Pr > t	0.0146	<.0001							N/A	0.3421	0.0165			

M= Modelo; R^2_{aj} = Coeficiente de determinación ajustado; Sxy = Error Estándar; SSE= Suma de los cuadrados de los residuales; D-W = Estadística de autocorrelación de Durbin-Watson; (K-S) = Test de normalidad de Kolmogórov-Smirnov; White = Test de heterocedasticidad de White; CV = Coeficiente de variación (%); F = Valor de F; Pr > |t| = Significancia estadísticas al 95 %, OM = Orden de modelos seleccionados que mejor se ajustaron.

La corrección del modelo de variables combinadas de Spurr (1) para el fuste (Tabla 7) se realizó mediante el MCP, donde se otorgó peso a la inversa de la combinación de diámetro basal al cuadrado por la altura total ($1/(DB^2H)$), con el fin de corregir la heterocedasticidad en los residuales del modelo. Después de aplicar la Prueba de White nuevamente, los valores de significancia (p) resultaron superiores al 5 %, lo que indica que las varianzas de los errores son constantes o homocedásticas (Figura 14).

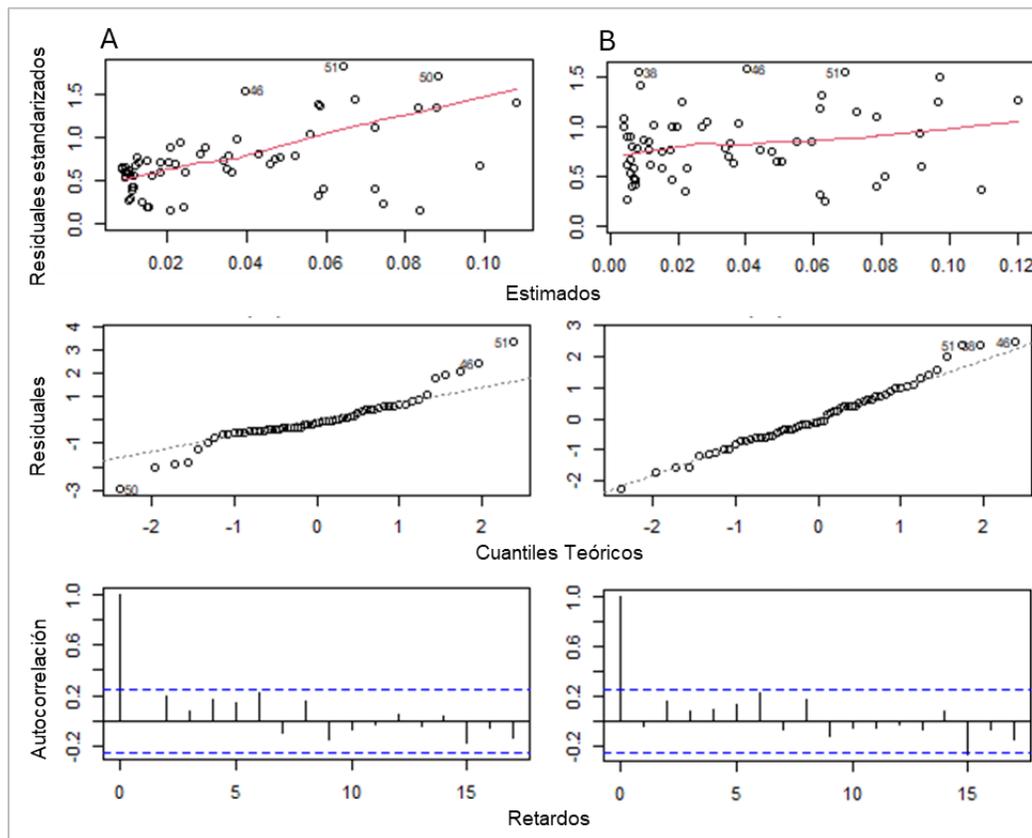


Figura 14. Pruebas de heterocedasticidad, distribución normal y autocorrelación del modelo para volumen del fuste de *Neltuma glandulosa*: A) modelo (1) con heterocedasticidad y B) modelo (1) corregido por MCP.

Los resultados obtenidos de la corrección del modelo de variable combinada de Spurr (1) mediante MCP para homogenizar la varianza de los residuales, se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Estadísticas de ajustes obtenidas del modelo (1) corregido por MCP para el volumen del fuste principal de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	$R^2_{aj.}$	S_{xy}	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F
1	0.003415	0.00001217	0.8049	0.0166	0.0161	2.0625	0.1651	3.28	46.47	209.51
Pr > t	<.0001	<.0001				0.8480	0.0674	0.0659		

El modelo de variable combinada de Spurr para determinar el volumen del fuste (se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V = 0.003415 + 0.00001217 (DB^2 * H)$$

Mientras tanto, el modelo de Sloboda para determinar el volumen de las ramas se presenta con la siguiente ecuación:

$$V = -0.04494 + 0.02891 (H) + 0.00003284 (DB^2 * H) - 0.0002389 (DB * H^2)$$

Donde: V = Volumen (m³), H = Altura total del árbol (m) y DB = Diámetro basal (cm)

Para obtener el volumen total, simplemente sumamos los volúmenes calculados por cada modelo (Figura 15).

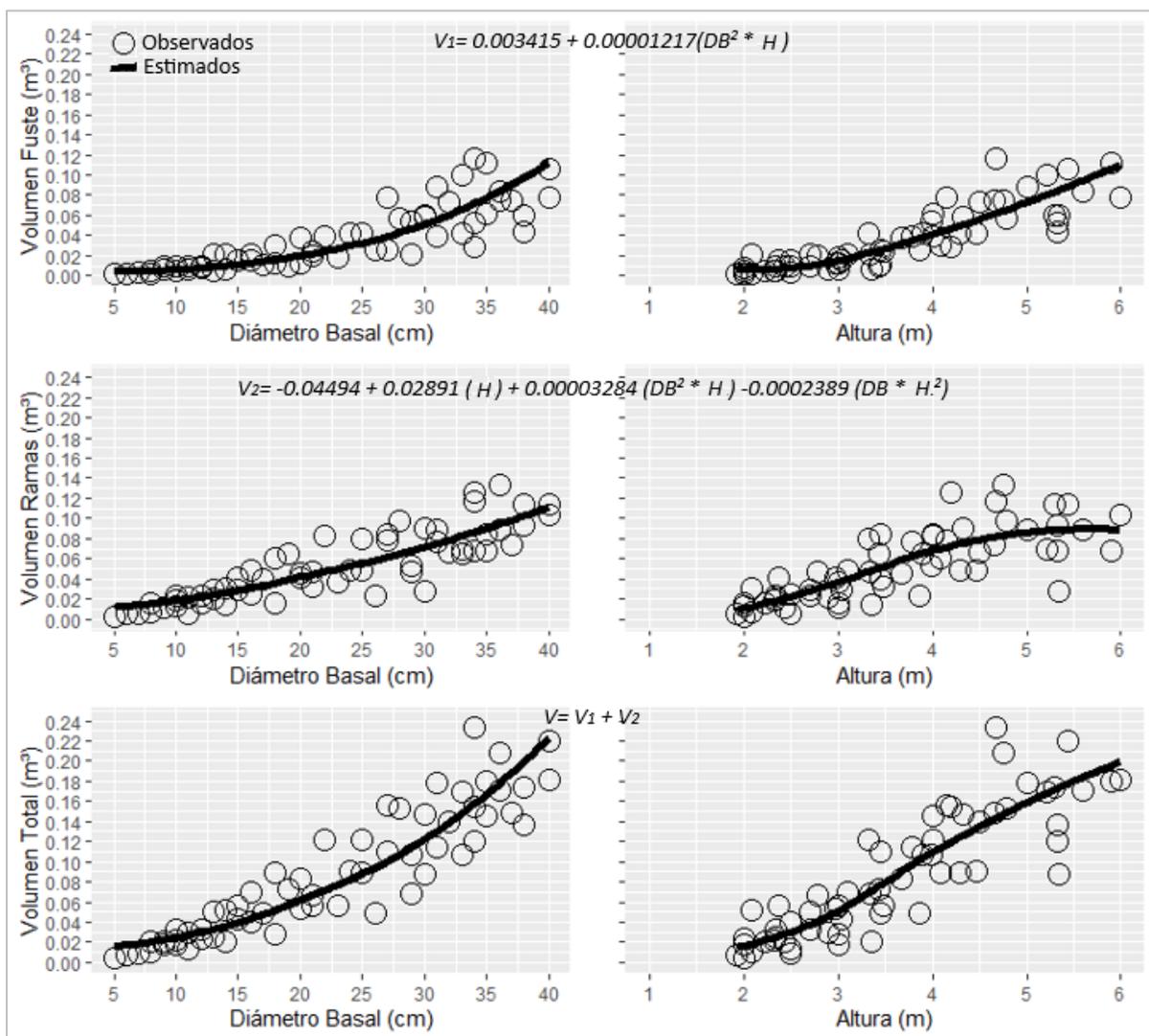


Figura 15. Volumen observado y estimado de ramas, fuste y total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.1.12. Ecuaciones para la cuantificación de la biomasa por secciones de *Neltuma glandulosa*

Después de ajustar los modelos para biomasa (Tabla 2) se observó que el modelo de Variable Combinada de Spurr (5) demostró los mejores resultados estadísticos para estimar la biomasa del fuste como el volumen de la sección (Tablas 7 y 9). Esta superioridad se atribuye a que la biomasa está directamente relacionada con el volumen, dado que la biomasa se obtuvo únicamente convirtiendo este último en biomasa mediante la multiplicación del volumen de la sección por la densidad de la madera específica de la especie.

En la Tabla 10 se muestran los parámetros de estimación de la biomasa para el fuste, así como la R^2 ajustada de 73.96 %. Los estadísticos de validación del modelo fueron iguales a los del volumen. Por lo tanto, se concluye que el modelo de Variable Combinada de Spurr presenta problemas de heterocedasticidad.

Tabla 10. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) por MCO para la biomasa del fuste principal de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	$R^2_{aj.}$	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F
5	5.6546314	0.0072984	0.7396	11.224	7306.9	1.9714	0.1466	15.1	46.68	168.55
Pr > t	0.0088	<.0001				0.4500	0.1370	0.0005		

La corrección de las varianzas de los residuales se llevó a cabo utilizando el método de MCP, similar al enfoque aplicado en el modelo de volumen. En este caso, se asignó peso inverso a la combinación de diámetro basal al cuadrado por la altura total ($1/(DB^2H)$), lo que resultó con una R^2 ajustada del 80.49 %, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) corregido por MCP para la biomasa del fuste principal de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	$R^2_{aj.}$	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F
5	2.3905264	0.0085225	0.8049	11.673	7904.2	2.0625	0.1651	3.28	46.47	209.51
Pr > t	<.0001	<.0001				0.8480	0.0674	0.0659		

En el contexto de la biomasa en ramas comerciales, se observó una similitud en los resultados obtenidos en comparación con la biomasa del fuste. Destaca particularmente el modelo propuesto por Sloboda (referenciado como 8 en la Tabla 2), el cual fue utilizado

tanto para estimar el volumen de las ramas como para calcular su biomasa.

Tabla 12. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (8) para la biomasa de las ramas comerciales de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

B_0	B_1	B_2	B_3	$R^2_{aj.}$	S_{xy}	SSE	CV
-31.458682	20.239194	0.022989	-0.167230	0.7520	11.94	8275.6	60.65
0.0157	0.0002	<.0001	<.0001				

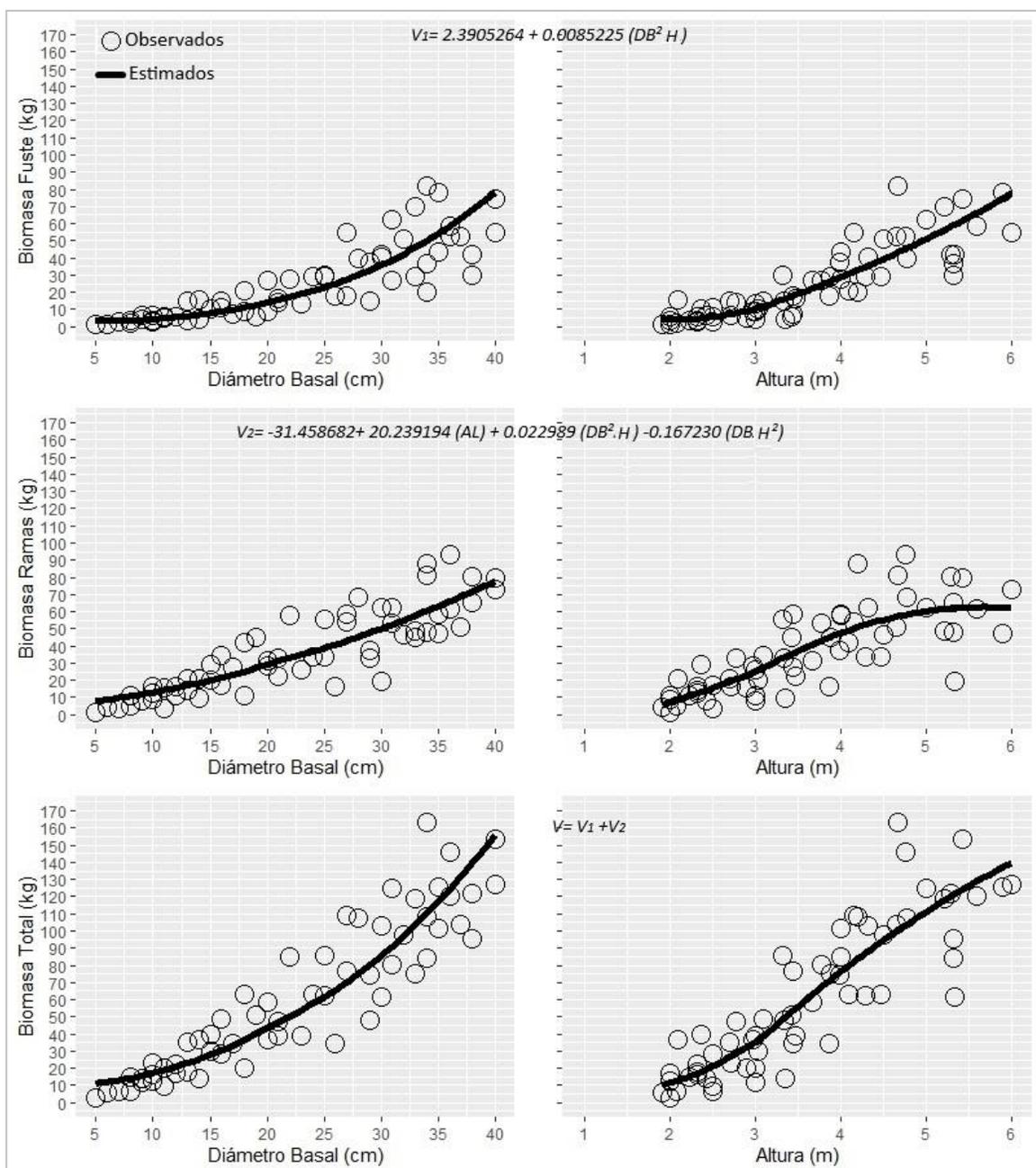


Figura 16. Biomasa observado y estimado de ramas, fuste y total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

Las estructuras de las ecuaciones para la biomasa del fuste y ramas comerciales (Figura 16) quedaron de la siguiente manera:

Ecuación para el fuste:

$$B = 2.3905264 + 0.0085225 (DB^2 * H)$$

Ecuación para las ramas:

$$B = -31.458682 + 20.239194 (H) + 0.022989 (DB^2 * H) - 0.167230 (DB * H^2)$$

Donde: B = Biomasa (kg), H = Altura total del árbol (m) y DB = Diámetro basal (cm)

Para la biomasa total únicamente se suman ambas ecuaciones.

4.1.13. Ecuaciones para la cuantificación del contenido de carbono por secciones de *Neltuma glandulosa*

Los ajustes de los modelos alométricos presentados en la Tabla 2 para cuantificar el contenido de carbono de la especie de mezquite por secciones (fuste principal y ramas comerciales) es asintótica a la biomasa y al volumen, por dicha razón, los mismos modelos (Sloboda para ramas, y variable combinada de Spurr para fuste) muestran un alto grado de significancia estadística para todos estos parámetros.

En las Tablas 13 y 14 se detallan los parámetros obtenidos y su nivel de significancia para determinar el contenido de carbono del fuste y las ramas comerciales. Cabe destacar que el modelo de la variable combinada de Spurr (Tabla 13) ya se presenta en su forma corregida mediante el método de MCP.

Tabla 13. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (5) corregido por MCP para el contenido de carbono del fuste principal de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

M	B_0	B_1	$R^2_{aj.}$	Sxy	SSE	D-W	K-S	WHITE	CV	F
5	1.1680112	0.0041641	0.8049	5.7038	1886.9	2.0625	0.1651	3.28	46.47	209.51
Pr > t	<.0001	<.0001				0.8480	0.0674	0.0659		

Tabla 14. Estadísticas de ajustes obtenidos del modelo (8) para el contenido de carbono de las ramas comerciales de *Neltuma glandulosa* en San Pedro, Coahuila.

B_0	B_1	B_2	B_3	$R^2_{aj.}$	Sxy	SSE	CV
-15.370712	9.888870	0.011232	-0.081708	0.7520	5.8363	1975.6	60.65
0.0157	0.0002	<.0001	<.0001				

Las estructuras de las ecuaciones para cuantificar el contenido de carbono del fuste y ramas comerciales (Figura 17) quedaron de la siguiente manera:

Ecuación para el fuste:

$$C = 1.1680112 + 0.0041641 (DB^2 * H)$$

Ecuación para las ramas:

$$C = -15.370712 + 9.888870 (H) + 0.011232 (DB^2 * H) - 0.081708 (DB * H^2)$$

Donde: C = Contenido de carbono (kg), H = Altura total del árbol (m) y DB = Diámetro basal (cm)

Para el contenido de carbono total únicamente se suman ambas ecuaciones.

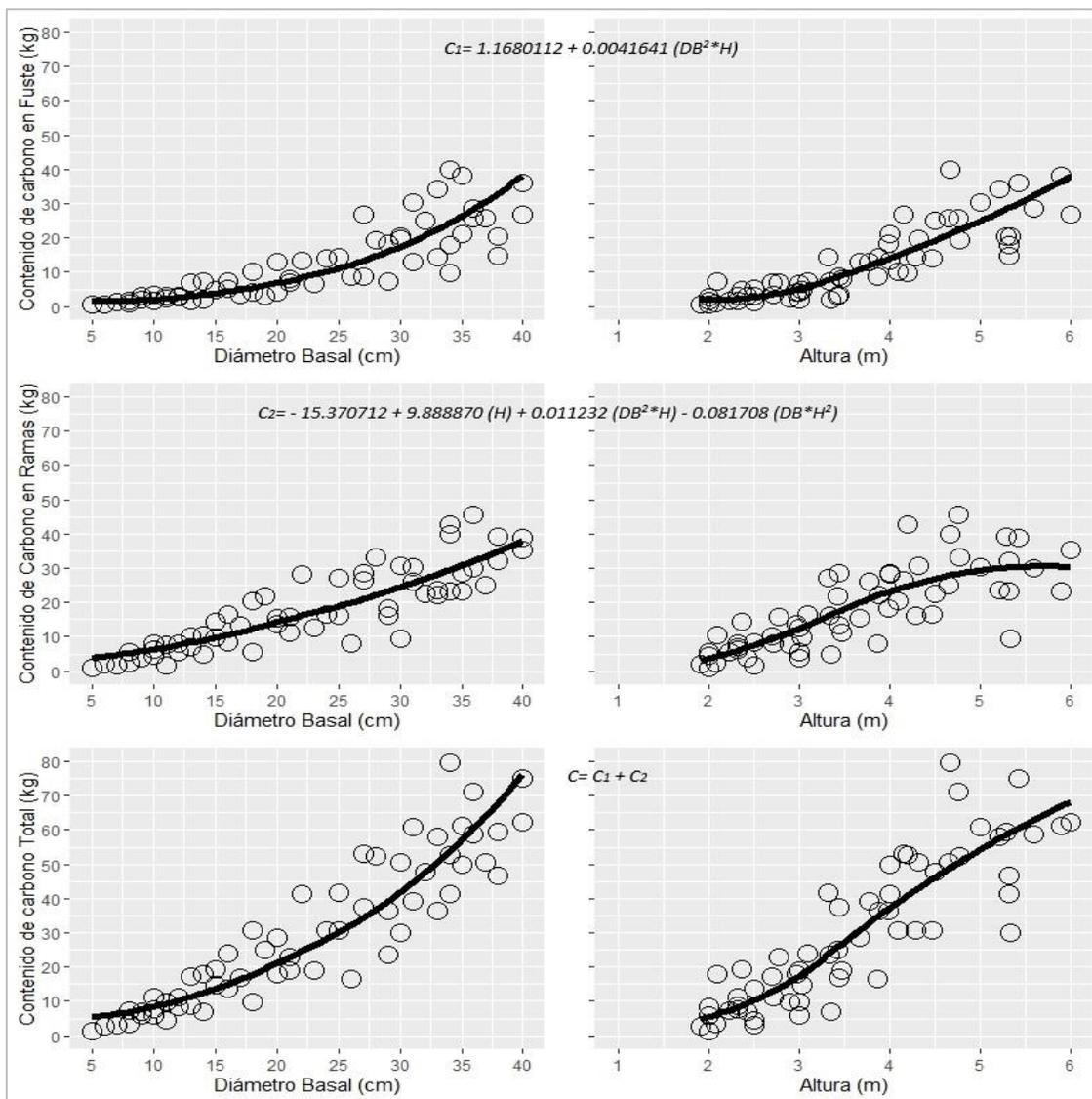


Figura 17. Contenido de carbono observado y estimado de ramas, fuste y total de *Neltuma glandulosa* en el municipio de San Pedro, Coahuila.

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Estadísticas descriptivas

Los rangos de H , DB y DC presentados en la Tabla 3 de este estudio exhiben similitudes con los estadísticos básicos de *Neltuma glandulosa* var. *Torreyana* obtenidos por Méndez et al. (2006) en donde reportan árboles con H máxima de 9 m, DB hasta 45 cm y DC mayor de 11.5 m, sin embargo, es importante considerar que las condiciones ambientales de las áreas de los estudios son muy diferentes (precipitación, suelos, exposición, etc.) que son determinantes en el crecimiento de los árboles. Un estudio similar llevado a cabo por Silva et al. (2018) para la especie *Neltuma articulata* reportó árboles con una H máxima de 10.58 m, un DB máximo de 52 cm, y un DC de 8.5 m. Estos resultados indican que *Neltuma articulata* tiende a desarrollarse verticalmente, en contraste con lo observado en la Figura 4, donde se demuestra que la especie de *Neltuma glandulosa* tiende a crecer de manera más horizontal.

4.2.2. Modelos para la cuantificación del volumen, biomasa y contenido de carbono de *Neltuma glandulosa*

Es importante mencionar que las variables de DB y H se han identificado como variables confiables para la determinación del volumen y la biomasa de los árboles (Méndez et al., 2006; Rueda, 2013; Montes de Oca et al., 2008, Ríos et al., 2011). El modelo de Sloboda demostró una R^2 ajustada del 83.14 % para la cuantificación del volumen, la biomasa y el contenido de carbono del árbol completo, con un CV del 29 %. Este rendimiento lo posiciona en el primer lugar entre los ajustes de modelos evaluados, en contraste con los resultados obtenidos por Méndez et al. (2006), donde el mismo modelo exhibió una R^2 ajustada del 88.16% y CV del 32.26 %, colocándolo en el séptimo lugar en su estudio para la selección de los modelos con mejor ajuste de *P. glandulosa* en el municipio de Mexicali, B.C.

Por otro lado, Rueda (2013) llevó a cabo ajustes de modelos utilizando el método destructivo con 25 árboles de *P. glandulosa*, y encontró que el modelo no lineal de Schumacher-Hall presentó los mejores ajustes (R^2 ajustada de 88.03 %), mientras que el modelo de Sloboda ocupó el octavo lugar entre los nueve modelos ajustados. Montes de

Oca *et al.* (2008) realizaron un ajuste de varios modelos lineales para la estimación del volumen en *Pinus durangensis*, donde el modelo de Sloboda demostró los mejores estadísticos con una R^2 ajustada de 96.28 % y un error volumétrico de 0.1636 m³.

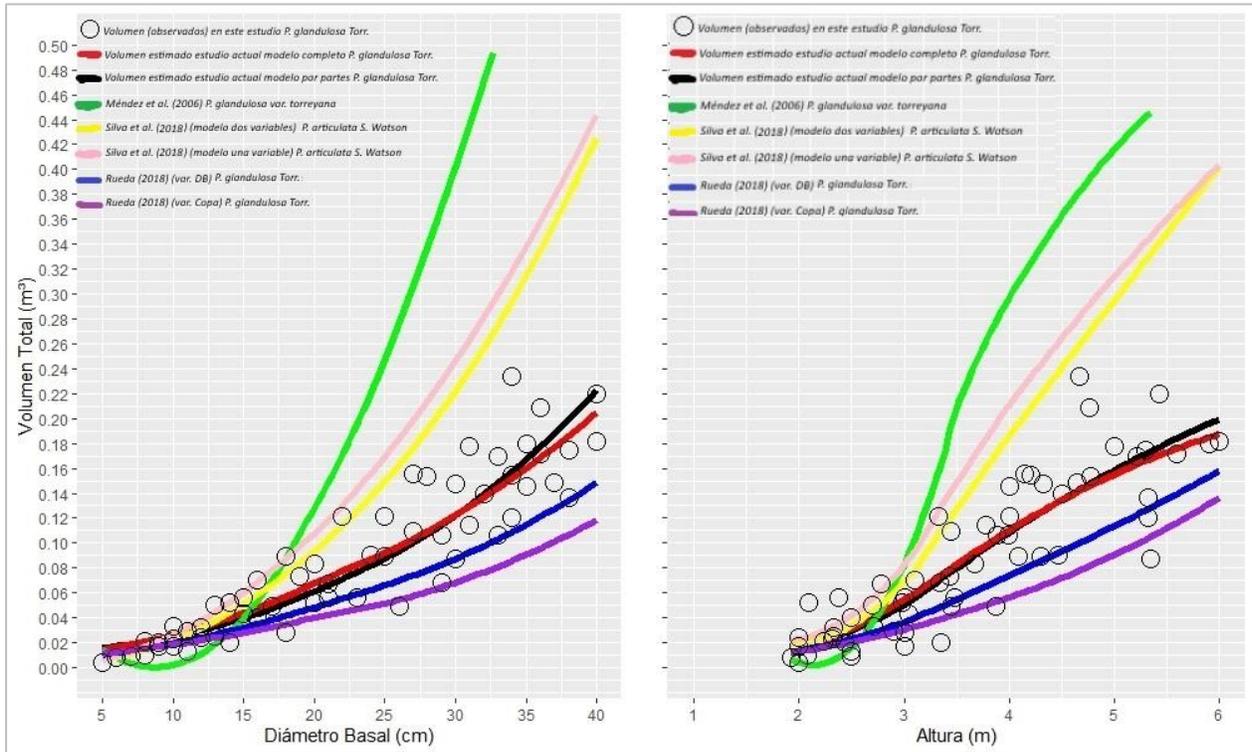


Figura 18. Comparación del volumen total de *Neltuma glandulosa* con el volumen de diferentes autores y especies de *Prosopis*.

La variabilidad en los volúmenes obtenidos con el modelo completo (rojo) y por partes (negro) en este estudio (Figura 18) se atribuye a los diferentes coeficientes de determinación obtenidos en las ramas y fustes, además que el modelo de variable combinada de Spurr (fuste) presentó problemas de heterocedasticidad, la cual fue corregida por MCP. Sin embargo, ambos modelos pueden ser empleados para determinar el volumen, la biomasa y el contenido de carbono, con sus respectivos coeficientes de regresión, para la especie de *Neltuma glandulosa*.

En la Figura 18 se muestra asimismo la discrepancia entre los modelos generados por Méndez *et al.* (2006) (representado en verde) y por Rueda (2013) (en morado y azul), en términos de sobreestimación y subestimación de los volúmenes observados en el presente estudio, podría atribuirse al tamaño muestral utilizado en la construcción de

cada modelo y a las diferentes condiciones ambientales de las áreas de estudios. El modelo verde, se ajustó con una muestra de 18 árboles, mientras que el modelo de Rueda (2013) se generó con una muestra más grande de 25 árboles. La diferencia en el tamaño muestral puede haber influido en la precisión y la generalización de los modelos a la hora de predecir los volúmenes de la especie de *N. glandulosa* en el presente estudio.

El número de árboles empleados en la derivación de ecuaciones de biomasa ha sido variable, oscilando entre 15 (Carrillo *et al.*, 2014) y 384 (Návar, 2004). En el contexto mexicano, más del 50 % de los estudios de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa han utilizado muestras que van desde 10 hasta 40 árboles (Montoya *et al.*, 2018). Esta diversidad en el tamaño de la muestra puede influir en la precisión y generalización de las ecuaciones resultantes. Mientras que una muestra más amplia puede proporcionar una mejor representación de la variabilidad poblacional, muestras pequeñas pueden ser más prácticas y viables en ciertos contextos, aunque pueden resultar en ecuaciones menos precisas.

4.2.3. Modelos para la cuantificación de biomasa y captura de carbono

El aumento del interés en el cambio climático ha llevado a una mayor importancia de la estimación del contenido de carbono en los árboles en el mercado de bonos verdes. Esto ha generado una demanda de herramientas que puedan medir rápidamente la captura de carbono en los bosques, donde los modelos alométricos se destacan como una herramienta útil para estimar el carbono almacenado en diversas especies (Lozano *et al.*, 2018; Acosta *et al.*, 2011). El contenido de carbono en los árboles relacionado directamente con la biomasa se puede obtener mediante la multiplicación del porcentaje de carbono por la biomasa del árbol (Manzano *et al.*, 2007), algunos autores han desarrollado modelos de estimación del contenido de carbono junto con la biomasa (Carillo *et al.*, 2014; Diaz *et al.*, 2007; Schlegel, 2001). En este estudio, se encontró que el carbono se almacena principalmente en las ramas comerciales en comparación con los fustes de la especie. Se observó una diferenciación significativa, especialmente en las primeras categorías de DB (Figura 17), donde el contenido de carbono en las ramas supera notablemente al de los fustes. Sin embargo, en las categorías de diámetro más altas, se observó que el contenido de carbono en las ramas es casi igual al de los fustes.

5. CONCLUSIÓN

El modelo alométrico de Sloboda en su forma lineal fue la más adecuado para la estimación precisa del volumen, biomasa y contenido de carbono para la especie de *Neltuma glandulosa* al presentar una R^2 ajustada de 83.14 % y un coeficiente de variación de 29.21 % en el árbol completo. Además, este modelo cumple con todos los supuestos del modelo de regresión: heterocedasticidad, autocorrelación, distribución normal y significancia estadística en todos sus estimadores. Lo anterior garantiza la fiabilidad de las estimaciones generadas por la ecuación, lo que lo convierte en una herramienta técnica confiable para la toma de decisiones en el ámbito de gestión y manejo de los mezquiales en el municipio de San Pedro, Coahuila. El diámetro basal y la altura demuestran ser buenas variables predictoras para el volumen, biomasa y contenido de carbono para ramas, fustes y árboles completos de *Neltuma glandulosa*. El modelo de la variable combinada de Spurr corregido por el método de MCP (dando peso a la inversa de la combinación de diámetro basal al cuadrado por la altura total ($1/(DB^2H)$)) es el que mejor cuantifica el volumen, biomasa y contenido de carbono en los fustes de la especie de *Neltuma glandulosa* en el presente estudio.

La combinación de los modelos alométricos segmentados (del fuste y de las ramas), muestra estimaciones de volumen, biomasa y contenido de carbono muy similares con el modelo generado para el árbol completo. Esto se evidencia en la distribución de los valores predichos por ambos conjuntos de modelos, los cuales se encuentran dentro del rango de los valores observados. Por lo tanto, se puede afirmar que tanto los modelos segmentados como el modelo completo son fiables y pueden ser utilizados efectivamente por los asesores técnicos forestales en la toma de decisiones relacionadas con el manejo de poblaciones de mezquites en poblaciones que se distribuyen en condiciones ambientales similares al de presente trabajo.

6. RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, se sugiere aumentar el tamaño de la muestra de árboles, añadiendo un mínimo de 30 individuos adicionales, con el fin de desarrollar modelos alométricos segmentados por categorías diamétricas basales o alturas. Esta estrategia busca mitigar los errores volumétricos inherentes a los modelos tradicionales que consideran árboles como unidades completas. La segmentación de las categorías en tres secciones permite capturar la heterogeneidad dentro de cada estrato de tamaño arbóreo, lo cual potencia la capacidad predictiva de los modelos. Estos modelos mejorarán la estimación precisa del volumen, biomasa y contenido de carbono de la especie, con el objetivo de alcanzar niveles de predicción altamente significativos. Esta estrategia no solo contribuirá a minimizar los errores inherentes a los modelos volumétricos convencionales, sino que también fortalecerá la fiabilidad de las estimaciones, siendo crucial para la gestión forestal sostenible y la evaluación precisa del carbono almacenado en los diferentes bosques.

7. BIBLIOGRAFÍAS

- Acosta M., M. y F. Carrillo A. 2008. Tabla de volumen total con y sin corteza para *Pinus montezumae* Lamb. en el estado de Hidalgo. Folleto Técnico Núm. 7. INIFAP. Campo Experimental Pachuca. Pachuca, Hgo., México. 20 p.
- Acosta M., M., F. Carrillo A. y R. G. Gómez V. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(4): 529-543. Doi: [10.29312/remexca.v2i4.1638](https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638).
- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M. y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36(6): 725-736.
- Álvarez C., G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis de maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, escuela de postgrado en Bolivia, Costa Rica. 76 p.
- Cancino C., J. O. 2006. *Dendrometría básica*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. 163 p.
- Carrillo G., A., J. L. León de la Luz, Y. Bashan & G. J. Bethlenfalvay. 1999. Nurse plants, mycorrhizae, and plant establishment in a disturbed area of the Sonoran Desert. *Restoration Ecology*. 7(4): 321-335. Doi: [10.1046/j.1526-100X.1999.72027.x](https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1999.72027.x).
- Carrillo A., F., M. Acosta M., E. Flores A., J. E. Juárez B. y E. Bonilla P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5): 779-793. Doi: [10.29312/remexca.v5i5.901](https://doi.org/10.29312/remexca.v5i5.901).
- Chinchilla, O. y M. Gómez. 2005. Diferencias volumétricas en cuatro sistemas de medición de trozas de madera. *Revista de Ciencias Ambientales*. 29(1): 76-82. Doi: [10.15359/rca.29-1.7](https://doi.org/10.15359/rca.29-1.7).
- Cruz C., F., R. Mendía S., A. A. Jiménez F., J. A. Nájera L. y F. Cruz G. 2016. Ecuaciones de volumen para *Arbutus spp.* (madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*. 24(68): 41-47. Doi: [10.33064/iycuaa2016681954](https://doi.org/10.33064/iycuaa2016681954).
- Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono

- en *Pinus pátula* Schl. et Cham. Madera y Bosques. 13(1): 25-34. Doi: [10.21829/myb.2007.1311233](https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233).
- Durbin, J. y G. S. Watson. 1971. Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. III. Biometrika. 58(1): 1-19. Doi: [10.2307/2334313](https://doi.org/10.2307/2334313).
- Figueroa N., C. M., G. Ángeles P., A. Velázquez M. y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 1(1): 147-157. Doi: [10.29298/rmcf.v1i1.658](https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658).
- Gayoso A., J., J. Guerra C. y D. Alarcón D. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEF. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 p.
- Gómez, F. 2008. Apuntes del curso de vegetación nativa de zonas áridas. Universidad Autónoma Chapingo. Bermejillo, Dgo. México. 168 p.
- Hermosillo G., Y., J. Ortega A., R. Alonso R., C. Ortega A., A. Gómez G. y R. Magaña M. 2008. Métodos inductivos para maximizar la germinación de semilla de germoplasma nativo en vivero para sistemas silvopastoriles en Nayarit, México. Zootecnia Tropical. 26(3): 355-358.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2006. Conjunto de datos Edafológicos alfanuméricos. Escala 1:250 000. Serie I (Continuo Nacional). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266691>. Fecha de consulta (20 de marzo de 2023).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Fecha de consulta (20 de marzo de 2023).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Red hidrográfica edición 2.0. Región H. Nazas – Aguanaval y Región H. Mapimí. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007011> y <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007010>. Fecha de consulta (20 de marzo de 2023).

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2018. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>. Fecha de consulta (20 de marzo de 2023).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2022. Marco Geoestadístico, diciembre 2022. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>. Fecha de consulta (20 de marzo de 2023).
- Lewis, H. & F. Elvin L. 1977. Medical botany: Plants affecting man's health. John Wiley & Sons, Nueva York. 353 p.
- Lozano S., D. C., B. G. Palacios H. y Z. H. Aguirre M. 2018. Modelos alométricos para estimar el almacenamiento de carbono de bosques montanos bajos en el sur del Ecuador. Ciencia Florestal. 28(3): 1328-1339. Doi: [10.5902/1980509833464](https://doi.org/10.5902/1980509833464).
- Manzano C., G. M., J. Cantú V., F. J. Silva C. y J. Martínez M. 2007. Método práctico para estimación de biomasa y carbono acumulado en poblaciones naturales de mezquite (*Prosopis glandulosa*) en el noreste de México. Centro de Calidad Ambiental. Campus Experimental INIFAP, Terán, N.L. 11 p.
- Massey, F. J. 1951. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. Journal of the American Statistical Association. 46(253): 68-78. Doi: [10.1080/01621459.1951.10500769](https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769).
- Méndez G., J., A. Santos M., J. A. Nájera L. y V. González O. 2006. Modelos para estimar volumen y biomasa de árboles individuales de *Prosopis glandulosa* var. torreyana en el ejido Jesús González Ortega No. 1, Mpio. de Mexicali, B.C. Recursos forestales, Agrofaz. 2(6): 225-239.
- Méndez G., J., O. A. Turlan M., J. C. Ríos S., J.A. Nájera L. 2012. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & bonpl. ex Willd.) m.C. Johnst. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 3(13): 57-72. Doi: [10.29298/rmcf.v3i13.489](https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.489).
- Meza S., R. 2002. Metodología para evaluar las poblaciones de mezquite (*Prosopis spp*). Folleto Técnico No. 6. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Todos Santos. La Paz, B. C. S. México. 46 p.

- Meza S., R. y E. Osuna L. 2003. Estudio dasométrico del mezquite en la zona de Las Pocitas, Baja California Sur. Folleto Científico No. 3. INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Todos Santos. La Paz, Baja California Sur. México. 56 p.
- Montes de Oca C., E., S. Corral R. y J. A. Nájera L. 2008. Ajuste de ecuaciones de volumen en *Pinus durangensis* en la comunidad Las Flechas, Durango, México. InterSedes: Revista de las Sedes Regionales. 9(17): 173-180.
- Montoya J., J. C., J. Méndez G., L. Sosa D., C. G. Ruíz G., A. Zermeño G., J. A. Nájera L., M. G. Manzano C. y A. S. Velázquez R. 2018. Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. Madera y Bosques. 24(spe): 1-11. Doi: [10.21829/myb.2018.2401880](https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401880).
- Návar C, J. J., N. González B. y J. J. Graciano L. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 13 p.
- Návar C., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale & B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. Madera y Bosques. 10(2): 17-28. Doi: [10.21829/myb.2004.1021272](https://doi.org/10.21829/myb.2004.1021272).
- Ordóñez D., J.A.B., A. Galicia N., N. J. Venegas M., T. Hernández T., M. J. Ordóñez D. y R. Dávalos S. 2015. Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. Madera y Bosques. 21(spe): 77-126. Doi: [10.21829/myb.2015.210428](https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428).
- Pantoja C., A. D. 2013. Estimación de captura y almacenamiento de carbono en mezquites en el Rancho el Calabozo, municipio de China, Nuevo León. Tesis de Ingeniero Forestal. Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 52 p.
- Pompa G., M. y J. I. Yerena G. 2014. Concentrada de carbono en *Pinus cembroides* Zucc. Fuente potencial de mitigación del calentamiento global. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 20(3): 133-143. Doi: [10.5154/r.rchscfa.2014.04.014](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.04.014).

- R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. n/p. <https://www.R-project.org/>.
- Ríos S., J. C., A. G. Valles G., G. Sosa P., J. A. Sígala R. y D. Albarrán A. 2011. Metodología para la estimación de volumen, biomasa y carbono para mezquite en la región norte-centro de México. In: Ríos S., J. C., R. Trucíos C., L. M. Valenzuela N., G. Sosa P., R. Rosales S. (eds). Importancia de las poblaciones de mezquite en el Centro-Norte de México. Libro Técnico No. 08. INIFAP Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Gómez Palacio, Dgo. pp. 107-134.
- Rodríguez L., R., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G. y R. Razo Z. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. Revista Ra Ximhai. 5(3): 317-327. Doi: [10.35197/rx.05.03.2009.06.rr](https://doi.org/10.35197/rx.05.03.2009.06.rr).
- Rodríguez P., F. y A. Fernández L. 2009. Herramientas de cubicación sin necesidad de apeo de árboles. Montes. 98: 83-99.
- Rodríguez S., E. N., G. E. Rojo M., B. Ramirez V., R. Martinez R., M. de la C. Cong H., S. M. Medina T. y H. H. Piña Ruiz. 2014. Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis Laevigata* Humb. & Bonpl. Ex Willd.) en México. Ra Ximhai. 10(3): 173-193.
- Rueda M., O. 2013. Modelos y tablas de predicción de volumen para *Prosopis glandulosa* Torr. en el norte de Coahuila. Tesis de Ingeniero Forestal. Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 60 p.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. pp. 1-13.
- Segura, M. y H. J. Andrade C. 2008. ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. Agroforestería de las Américas. 46: 89-96.
- Silva G., J. E., O. A. Aguirre C., E. Alanís R. y M. A. González T. 2018. Ecuaciones de volumen para *Prosopis articulata* S. Watson y *Lysiloma divaricata* (Jacq.) J. F.

- Macbr. en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(50): 415-438. Doi: [10.29298/rmcf.v9i50.261](https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.261).
- Sione, S. M. J., S. G. Ledesma, L. J. Rosenberger, J. D. Oszust, H. J. Andrade C., G. O. Maciel, M. G. Wilson y M. C. Sasal. 2020. Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para *Prosopis nigra* Griseb. Hieron “algarrobo negro” (Fabaceae) en bosques de Entre Ríos (Argentina). *Agronomía & Ambiente Revista de la Facultad de Agronomía UBA*. 40(1): 63-76.
- Sotomayor C., J. R. y J. M. Villaseñor A. 2006. Comportamiento viscoelástico de la madera de *Prosopis sp.* *Madera y Bosques*. 12(2): 3-15. Doi: [10.21829/myb.2006.1221239](https://doi.org/10.21829/myb.2006.1221239).
- Tapia B, J. J. y J. J. Nívar C. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana*. 13(2): 19-28.
- Trucíos C., R., J. C. Ríos S., J. Estrada Á., L. M. Valenzuela N. y R. Jacinto S. 2011. Distribución espacial y cambio de usos de suelo en poblaciones naturales de mezquite. In: Ríos S., J. C., R. Trucíos C., L. M. Valenzuela N., G. Sosa P., R. Rosales S. (eds). Importancia de las poblaciones de mezquite en el Centro-Norte de México. Libro Técnico No. 08. INIFAP Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Gómez Palacio, Dgo. pp. 21-48.
- Villanueva D., J., I. Jasso R., G. González C., I. Sánchez C. y C. Potisek T. 2004. El mezquite en la Comarca Lagunera: Alternativa de producción integral para ecosistemas desérticos. Folleto Científico No. 14. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango, México. 65 p.
- White, H. 1980. A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica*. 48(4): 817-838. Doi: [10.2307/1912934](https://doi.org/10.2307/1912934).