



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE DE ZONAS ÁRIDAS

MODELACIÓN DE BIOMASA Y VARIABLES ASOCIADAS A LA PRODUCTIVIDAD DE TRES ESPECIES NO MADERABLES DE ZONAS ÁRIDAS

TESIS

que como requisito parcial

para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Recursos Naturales y Medio ambiente de Zonas Áridas

Presenta:

MARGARITO MALDONADO ORTIZ

Bajo la dirección de:

Dr. Martín Martínez Salvador

Dr. Ricardo David Valdez Cepeda



APROBADA



Bermejillo, Durango, México, Marzo de 2023



**MODELACIÓN DE BIOMASA Y VARIABLES ASOCIADAS A LA
PRODUCTIVIDAD DE TRES ESPECIES NO MADERABLES DE ZONAS
ÁRIDAS**

Tesis realizada por Margarito Maldonado Ortiz bajo la supervisión del comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

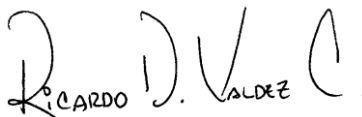
**DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE DE ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR:



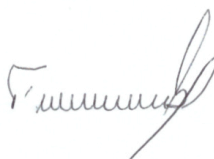
Dr. Martín Martínez Salvador

CODIRECTOR:



Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

ASESOR:



Dr. Fabián García Gonzalez

ASESOR:



Dr. Ricardo Mata González

LECTOR EXTERNO:



Dr. Pablito Marcelo López Serrano

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I.....	13
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	13
1.1 Hipótesis.....	15
1.2 Objetivo General.....	15
1.2.1 Objetivos particulares.....	15
CAPÍTULO II.....	16
2.- REVISIÓN DE LITERATURA	16
2.1 Biomasa forestal	16
2.2 Estimación de la biomasa forestal	16
2.3 Ecuaciones alométricas en zonas áridas de México	18
2.4 Especies no maderables de importancia económica.....	19
2.5 Productividad de las especies no maderables.....	20
2.6 Referencias.....	21

CAPÍTULO III.....	32
3.- ECUACIONES PARA ESTIMAR BIOMASA DE CANDELILLA (<i>Euphorbia antisiphilitica</i> Zucc) EN CHIHUAHUA, MÉXICO	32
3.1 Resumen	33
3.2 Abstract.....	34
3.3 Introducción	35
3.4 Materiales y métodos.....	36
3.4.1 Ubicación y descripción del área de estudio	36
3.4.2 Levantamiento de datos	37
3.4.3 Base de datos	38
3.4.4 Resumen descriptivo de las variables	38
3.4.5 Selección de variables predictoras.....	39
3.4.6 Selección de modelos	41
3.4.7 Análisis estadístico.....	42
3.5 Resultados.....	43
3.5.1 Estadísticos básicos de las variables morfométricas	43
3.5.2 Ecuaciones de biomasa	43
3.6 Discusión	47
3.7 Conclusiones	48
3.8 Agradecimientos	49
3.9 Conflicto de interés	49
3.10 Contribuciones por autor.....	49
3.11 Referencias.....	49

CAPÍTULO IV	56
4.- INFLUENCIA DE VARIABLES DE CLIMA, SUELO Y RELIEVE SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE ORÉGANO Y LECHUGUILLA EN EL NORTE DE MÉXICO.....	56
4.1 Resumen	56
4.2 Abstrac.....	58
4.3 Introducción	59
4.4 Materiales y métodos.....	60
4.4.1 Área de estudio	60
4.4.2 Colecta de datos	61
4.4.3 Variables ecológicas	62
4.4.4 Análisis de productividad.....	62
4.4.5 Análisis estadístico.....	63
4.5 Resultados.....	64
4.6 Discusión	71
4.7 Conclusiones	74
4.8 Agradecimientos	75
4.9 Literatura citada	75
CAPITULO V	82
5.- CONCLUSIONES GENERALES	82
CAPITULO VI	83
6.- REFERENCIAS	83

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de muestras de las poblaciones de <i>Euphorbia antisiphilitica</i> Zucc. en el área de estudio.	38
Cuadro 2. Resumen estadístico de <i>Euphorbia antisiphilitica</i> Zucc. en los municipios de Coyame del Sotol y Aldama, estado de Chihuahua.	39
Cuadro 3. Ecuaciones logarítmicas propuestas para determinar la biomasa de <i>Euphorbia antisiphilitica</i> Zucc.	42
Cuadro 4. Valores de parámetros estimados y sus estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones logarítmicas para predecir biomasa en <i>Euphorbia antisiphilitica</i> Zucc.	44
Cuadro 5. Supuestos de normalidad, heterocedasticidad y valor inflación de las ecuaciones ensayadas.	45
Cuadro 6. Estimaciones obtenidas mediante la corrección de autocorrelación y heterocedasticidad de las ecuaciones 2.2 y 3.2.	46
Cuadro 7. Estadísticos de prueba del análisis discriminante canónico de <i>A. lechuguilla</i> y <i>L. graveolens</i> en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.	64
Cuadro 8. Dimensión de las funciones canónicas de <i>A. lechuguilla</i> y <i>L. graveolens</i> en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.	65
Cuadro 9. Estructura canónica total que influyen en la calidad de estación de <i>A. lechuguilla</i> y <i>L. graveolens</i> en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.	68
Cuadro 10. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables climáticas, relieve, suelo y dasométricas de <i>A. lechuguilla</i> por calidad de sitio.	70
Cuadro 11. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables climáticas, relieve, suelo y dasométricas de <i>L. graveolens</i> por calidad de sitio.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio en los municipios de Aldama y Coyame del Sotol del estado de Chihuahua, México.....	37
Figura 2. Prueba de correlación de variables morfométricas y biomasa de candelilla.....	40
Figura 3. Relación de la biomasa con las variables predictores de <i>Euphorbia antisiphilitica</i>	41
Figura 4. Localización del área de estudio que comprende los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.....	62
Figura 5. Clasificación de productividad de las funciones discriminantes de <i>Agave lechuguilla</i> estudiadas en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.	66
Figura 6. Clasificación de productividad de las funciones discriminantes de <i>Lippia graveolens</i> estudiadas en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.	67

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado:

A Dios por dirigirme en el camino correcto y tomar buenas decisiones.

A mi linda esposa **Leticia Feria Ortiz** por todo su amor, comprensión, paciencia y su apoyo para realizar este proyecto.

A mi **hijo Iker Maldonado Feria** por ser mi fuerza e inspiración para continuar con las cosas que realizo.

A mis **padres** por el cariño y la confianza que me han dado.

A mis **hermanos** por el apoyo que me han dado.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por el financiamiento económico de beca para realizar el doctorado.

Al Fondo sectorial **CONACYT-CONAFOR** por el apoyo para la colecta de información a través de los proyectos: “Mejores prácticas de manejo y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México” clave CONAFOR-2017-04-292674 y, “Patrones de distribución e indicadores de productividad para el aprovechamiento y conservación de especies forestales de zonas áridas” clave 000000000148094.

A la **Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA)** de la **Universidad Autónoma Chapingo** por haberme dado la oportunidad de estudiar un doctorado.

Al **Dr. Martín Martínez Salvador** por la obtención de los datos necesarios para la investigación y de antemano agradecer por las valiosas sugerencias y disponibilidad de tiempo para aclarar dudas.

Al **Dr. Ricardo David Valdez Cepeda** por compartir sus sabios conocimientos y sus extraordinarias sugerencias en la investigación.

Al **Dr. Fabián García González** y al **Dr. Ricardo Mata González** por la disponibilidad para realizar mejoras en el trabajo de investigación; sus comentarios constructivos ayudaron a afinar detalles.

A José Manuel (Chema), Citlali y Bonifacio por la amistad y sus valiosas sugerencias en la investigación.

En Mixteco: ***Kutavisa nundakani*** (Agradezco a todos)

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Margarito Maldonado Ortiz

Fecha de nacimiento: 22 de febrero de 1990

Lugar de nacimiento: Yosocahua, Magdalena Peñasco, Oaxaca

Profesión: Ingeniero Forestal



Desarrollo académico

- Preparatoria. CeCyTE EMSaD 51 Magdalena Peñasco, Oaxaca
- Ingeniero Forestal por la Universidad Autónoma Indígena de México, 2009-2013. Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa.
- Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales por la División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, 2016-2017. Texcoco, Edo. México.

Yo colaboré como administrador de certificación forestal, en la recepción, revisión y asesoría a los técnicos forestales en jornadas de certificación en los estados de Michoacán, Hidalgo, Campeche y Oaxaca en el Instituto Nacional de Investigadores Forestales Agrícolas y Pecuarias en el Campo Experimental Uruapan y Valles Centrales de Oaxaca. Asimismo, yo he generado conocimiento sobre la identificación y clasificación de *Quercus* (Encinos).

RESUMEN GENERAL

Modelación de biomasa y variables asociadas a la productividad de tres especies no maderables de zonas áridas

La lechuguilla (*Agave lechuguilla*), la candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) y el orégano (*Lippia graveolens*) son especies que crecen de manera silvestre en las zonas áridas del norte de México. Estas especies son de importancia económica y social para los recolectores que habitan en estas regiones. Los objetivos fueron generar ecuaciones para estimar biomasa de candelilla, así como describir las relaciones de variables de suelo, clima y relieve con la productividad del orégano y la lechuguilla en las zonas áridas del norte de México. Para estimar la biomasa de candelilla se cosecharon 198 individuos mediante un muestreo selectivo destructivo y, posteriormente, procedimientos de ajuste de ecuaciones no lineales se aplicaron utilizando el método de mínimos cuadrados ordinarios. Por su parte, para identificar la influencia de las variables de climática, suelo y relieve sobre la productividad de la lechuguilla y el orégano se realizó un muestreo en los estados de Durango, Coahuila y Chihuahua; entonces, datos de abundancia y tamaño de las especies, así como de variables de clima, suelo y relieve fueron registrados. Un índice de productividad a priori se generó usando el tamaño y abundancia de las plantas; además, un análisis discriminante canónico (ADC) y un análisis de varianza se realizaron para conocer las posibles variables que se asocian a la productividad. Los resultados indicaron que al modelo Schumacher y Hall en su forma logarítmica corresponden los mejores estimadores estadísticos para predecir la biomasa de candelilla, con el uso de diámetro de copa y diámetro de base de la planta. Además, el ADC mostró una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.001$) para las clases de productividad de orégano y lechuguilla. Las variables climáticas y suelo influyen sobre la productividad de la lechuguilla, mientras que solo las climáticas están relacionadas con la productividad del orégano. Los resultados aportan conocimiento sobre elementos cuantitativos para realizar un mejor manejo forestal de las especies no maderables en las zonas áridas.

Palabras clave: *Agave lechuguilla*, *Euphorbia antisyphilitica*, *Lippia graveolens*, biomasa, productividad.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Margarito Maldonado Ortiz

Directores de Tesis: Dr. Martín Martínez Salvador y Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

ABSTRACT

Biomass modeling and variables associated with the productivity of three non-timber species of arid zones

Lechuguilla (*Agave lechuguilla*), candelilla (*Euphorbia antispyhilitica*) and oregano (*Lippia graveolens*) are species that grow in the arid areas of northern Mexico. These species have highly economic and social importance for the gatherers that inhabit this region. The aims were to generate equations to estimate candelilla biomass, as well as to describe the relationships among soil, climate and relief variables with the productivity of oregano and lechuguilla in the arid zones of northern Mexico. To estimate the biomass of candelilla, 198 individuals were harvested through a selective-destructive sampling, afterwards nonlinear equation adjustment procedures were applied using the ordinary least squares method. On the other hand, to identify the influence of climatic, soil and relief variables on the productivity of lechuguilla and oregano, a sampling was carried out in the states of Durango, Coahuila and Chihuahua. A dataset of abundance and size of the species was collected, as well as climate, soil and relief variables data. An a priori productivity index was built using the size and abundance of the plants; a canonical discriminant analysis (ADC) and an analysis of variance were performed to determine the possible influence of the non-biotic variables on the productivity of oregano and lechuguilla lands. Results indicated that to the Schumacher and Hall model in its logarithmic form corresponds the best statistic estimators to predict candelilla biomass using crown diameter and base diameter of the plant. In addition, the ADC showed a statistically significant difference ($p < 0.001$) for the productivity classes of oregano and lechuguilla. The climatic and soil variables have effects on the productivity of lechuguilla, whereas only the climatic are related with the productivity of oregano. Results contribute to the knowledge about quantitative elements for better forest management of non-timber species in arid zones of Mexico.

Key words: *Agave lechuguilla*, *Euphorbia antispyhilitica*, *Lippia graveolens*, biomass, productivity.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Margarito Maldonado Ortiz

Directores de Tesis: Dr. Martín Martínez Salvador y Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La lechuguilla (*Agave lechuguilla*), el orégano (*Lippia graveolens*) y la candelilla (*Euohorbia antisiphilitica*) son especies que crecen en el norte de México y Sur de Estados Unidos de América (Aranda-Ledesma et al., 2022; Mata-González y Meléndez-González, 2005; Rojas et al., 2021). Estas especies son caracterizadas como no maderables en los ecosistemas áridos de México y proporcionan múltiples beneficios como alimento, forraje, fibra, cera y medicina tradicional (Aranda-Ledesma et al., 2022; Flores-del Angel et al., 2013). El aprovechamiento de estos recursos es una de las actividades de mayor importancia para el bienestar social de las comunidades rurales en su área de distribución (Pando-Moreno et al., 2008). Sin embargo, el efecto del cambio climático y algunos otros agentes de disturbio han generado alteración en las poblaciones de varias especies (Becerra-López et al., 2020), sobre todo de aquellas sometidas a aprovechamiento comercial (Martínez et al., 2013). Por lo tanto, las necesidades de cuantificación de su biomasa (Flores-Hernández et al., 2020) e identificación de las variables que influyen sobre su crecimiento potencial (Briones et al., 2018) son notorias.

Por otra parte, las variables climáticas y los tipos de suelo influyen sobre la distribución y crecimiento de los arbustos; entonces, en las zonas áridas es posible observar variaciones en los tamaños y abundancia de las especies de acuerdo a la variación de dichos factores (Bennett et al., 2020). Entonces, el uso comercial de algunas especies de zonas áridas sugiere la necesidad de conocer aspectos importantes como la cantidad de biomasa producida, así como la relación de su distribución y abundancia con los fenómenos climáticos o de sitio tales como suelo y relieve (Conti et al., 2019; Daba y Soromessa, 2019; Vargas-Piedra et al., 2020).

El estado del arte actual sugiere escasez de información sobre modelos de biomasa de especies forestales que son usadas para extraer productos no

maderables de zonas áridas (Hernández-Ramos et al., 2019; M. Pando-Moreno et al., 2008). Al respecto, Conti et al. (2019) resaltan la importancia de realizar más investigaciones para explorar la influencia de las condiciones climáticas sobre la morfología de las plantas y, por consiguiente, sobre su biomasa. Por su parte, Nyamjav et al. (2020) destacan la importancia de las ecuaciones con variables combinadas como el diámetro basal, la copa arbustiva y la altura de las plantas para estimar la biomasa de los arbustos y consideran que es posible usar estos parámetros para desarrollar modelos estadísticos para muchas especies arbustivas. También, Aneseyee et al. (2021) mencionan que al utilizar variables ambientales como el clima y la topografía en los modelos pueden mejorar la predicción de la biomasa y describir la influencia de los factores no bióticos sobre el crecimiento de las especies.

De Castro Oliveira et al. (2019) sugirieron el uso de variables climáticas para distinguir el área potencial de algunas especies de las zonas áridas de Brasil. El estudio de productividad en estos ecosistemas resulta básico para desarrollar mejores planes sobre el manejo y conservación, principalmente de las especies de importancia económica, las cuales son cosechadas periódicamente de manera que se incrementa el riesgo de deterioro de los sitios donde crecen de manera silvestre y de sus poblaciones (Hernández-Herrera et al., 2020; Ramírez-López et al., 2022). Una alternativa para aportar a esta necesidad de conocimiento es identificar la influencia de los factores no bióticos, como clima, relieve y suelo, sobre la distribución, crecimiento y abundancia de las especies de interés (Martínez-Salvador et al., 2019; Martínez-Salvador et al., 2013).

Por lo tanto, esta tesis se ha desarrollado con la finalidad de aportar conocimiento sobre variables cuantitativas de las poblaciones de lechuguilla, orégano y candelilla en el norte de México.

1.1 Hipótesis

- La biomasa de plantas de *Euphorbia antisiphilita* puede estimarse con buena precisión usando variables estructurales de fácil medición como diámetro de copa y diámetro de la base de la planta.
- El uso de variables de tamaño de plantas y abundancia de poblaciones de *Lippia graveolens* y *Agave lechuguilla* permiten estimar de forma indirecta la productividad de los ecosistemas donde estas especies crecen.

1.2 Objetivo General

Generar ecuaciones para estimar biomasa mediante la descripción de relaciones entre variables ambientales (suelo, clima y relieve) y la productividad de *Lippia graveolens*, *Agave lechuguilla* y *Euphorbia antisiphilitica* en las zonas áridas del norte de México.

1.2.1 Objetivos particulares

- Ajustar ecuaciones alométricas para estimar biomasa total utilizando variables morfométricas en *Euphorbia antisiphilitica* para la zona de Aldama y Coyame del Sotol en el noreste de Chihuahua.
- Identificar las variables climáticas, suelo y relieve que influyen sobre la productividad del orégano y lechuguilla en su área natural de distribución en el norte de México

CAPÍTULO II

2.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biomasa forestal

La biomasa se refiere a la materia orgánica existente en la biosfera, ya sea vegetal o animal (Contescu et al., 2018; Perea-Moreno et al., 2019). La biomasa vegetal es un elemento principal para determinar la productividad de un ecosistema forestal, incluyendo todo tipo de especies vegetales (Méndez González et al., 2012).

Los árboles y arbustos acumulan diferentes cantidades de biomasa, debido a la disponibilidad de nutrientes, luz solar y humedad, así se genera una tasa de crecimiento diferente a lo largo de su desarrollo en un sitio forestal (Jing et al., 2020). Asimismo, la biomasa varía debido a la estructura y composición de la cubierta vegetal (Dai et al., 2020). Por esta razón, la estimación de la biomasa de acuerdo a la composición forestal y estructura es importante para conocer las reservas de carbono, volumen y la productividad en los bosques, puesto que aproximadamente 50% de ella corresponde al carbono (Návar, 2009; Návar et al., 2001).

2.2 Estimación de la biomasa forestal

La estimación de la biomasa es clave en el manejo forestal y la conservación de los recursos forestales (Islam et al., 2021; Návar-Chaidez, 2010). Diferentes métodos se han desarrollado para cuantificar la biomasa forestal; ellos pueden ser directos e indirectos (Traoré et al., 2018). El primer grupo de métodos consiste en medir las variables básicas de las plantas; posteriormente, el árbol se derriba y, luego, la biomasa de cada uno de los componentes del individuo se cuantifica (Sharma et al., 2017). Por otro lado, los métodos indirectos utilizan el desarrollo de las ecuaciones alométricas mediante un análisis de regresión; esas ecuaciones involucran variables de fácil medición como diámetro, altura y diámetro de copa (Ludwig et al., 1975).

Las ecuaciones alométricas son herramientas utilizadas para estimar volumen, biomasa y las existencias de carbono de las especies forestales en un ecosistema forestal (Baskerville, 1972; Goussanou et al., 2016; Rojas-García et al., 2015). La predicción de la biomasa debe ser precisa para conocer la productividad y la cantidad de carbono almacenada en un área de superficie o sitio forestal (Vuorinne et al., 2021). Las ecuaciones se someten a pruebas estadísticas para cumplir con todas las condiciones de predicción de biomasa (Talla et al., 2020). Así, el uso de las regresiones alométricas es un paso importante en la predicción de la biomasa y el volumen de las especies forestales (van der Vyver y Cowling, 2019).

La ecuación más utilizada en los estudios forestales para predecir la biomasa y volumen es el modelo alométrico (Návar, 2009) de tipo potencial;

$$Y = \alpha X^{\beta}$$

donde Y puede considerarse como la biomasa o volumen, X como la variable diámetro o altura, α y β son parámetros de estimación.

Diversos estudios forestales mencionan que las relaciones alométricas en la estimación de la biomasa involucran principalmente al diámetro y a la altura, debido a que son variables fáciles de medir (Kora et al., 2019; Tanwar et al., 2020). Por ello, algunos estudios incluyen la altura de los árboles para la predicción de biomasa; mientras que otros utilizan diámetro de copa y altura de las plantas (Flores-Hernández et al., 2020).

Las ecuaciones alométricas en su mayoría han sido desarrolladas para casos de bosques templados y tropicales (Mahmood et al., 2019; Vargas-Larreta et al., 2017). Mientras que para los ecosistemas áridos y semiáridos existe poca información sobre la estimación de biomasa y volumen de las especies no maderables (Briones et al., 2018; Conti et al., 2019). Por lo tanto, estudiar la cantidad de biomasa y volumen es importante en los casos de especies no maderables, como candelilla, lechuguilla y orégano. El conocimiento generado

en ese contexto puede permitir el desarrollo e implementación de estrategias de aprovechamiento forestal (Flores-Hernández et al., 2020; Reyes-Cárdenas et al., 2019).

2.3 Ecuaciones alométricas en zonas áridas de México

En México se tienen algunos antecedentes sobre la modelación de biomasa y volumen en especies no maderables en los ecosistemas áridos (Flores-Hernández et al., 2020; Hernández-Ramos et al., 2019; Villavicencio-Gutierrez et al., 2018). Una de las primeras publicaciones fue descrita por Ludwig et al. (1975); ellos ensayaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de algunas especies arbóreas del estado de Chihuahua. Por su parte, Návar et al. (2002) estimaron la biomasa de arbustos del matorral espinoso del estado de Tamaulipas. Villavicencio-Gutierrez et al. (2018) ensayaron ecuaciones para estimar la biomasa foliar de *Lippia sp.* del sureste de Coahuila; esta es una de las especies de mayor importancia económica en el bienestar de los habitantes en las zonas áridas.

Los ecosistemas áridos contribuyen con la producción de biomasa, principalmente de especies maderables y no maderables (Méndez-González et al., 2012; Návar et al., 2004). Sin embargo, pocas investigaciones relacionadas a los cambios estructurales de la vegetación existen, especialmente en los ecosistemas donde se realiza aprovechamiento intensivo de las especies no maderables, como maguey, orégano, candelilla y sotol, entre otras especies de valor comercial (Martínez et al., 2013). Todo lo anterior da pauta a continuar haciendo investigación en las zonas áridas con la finalidad de generar conocimiento (Návar et al., 2013). Incluso, lo recomendable es realizar más esfuerzos sobre la estimación de biomasa forestal para conocer su dinámica y la productividad forestal en las zonas áridas (Briones et al., 2018).

2.4 Especies no maderables de importancia económica

En la región norte de México predominan muchas especies no maderables que brindan un beneficio económico a los habitantes. Las especies más destacadas son candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc), lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr) y orégano (*Lippia graveolens*). Estas especies son recursos importantes para la subsistencia de los habitantes (Llamas-Torres et al., 2019).

Candelilla

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) es un arbusto perenne con 20 a 110 cm de altura (Aranda-Ledesma et al., 2022). Las pantas están compuestas por tallos rectos de forma cilíndrica. Cada planta se reproduce de manera asexual, ya sea por rebrotes de tallos aéreos o subterráneos y también por semilla. La candelilla forma colonias de tallos con diámetros de 90 cm aproximadamente; cada planta es un individuo de tamaño moderado y puede desarrollar más de 100 tallos (Bañuelos-Revilla et al., 2019; Rojas-Molina et al., 2011). Esta especie distribuye en los estados de Durango, Zacatecas, Chihuahua, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Coahuila en sitios dentro de un rango de altitud de entre 460 y 2400 msnm. Sus poblaciones mayores se aprecian en sitios localizados desde 700 a 1200 msnm.

La candelilla es considerada una especie de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México por su cera natural. De sus plantas se obtienen varios productos (e.g. cera y alimentos), algunos con usos en las industrias cosmética y farmacéutica (Rojas et al., 2021).

Lechuguilla

La lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) es una especie cuyas plantas son suculentas con una piña de 20 a 30 hojas gruesas, pulposas y fibrosas que nacen en el centro de un pseudotallo o cáudex y están dispuestas en forma verticilada. La lechuguilla es nativa en las zonas áridas y semiáridas del sur de Estados Unidos de América y del noreste de México. En México, la lechuguilla se

distribuye en los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas (Castillo-Quiroz et al., 2014; Pando-Moreno et al., 2004).

De la lechuguilla se extrae fibra resistente y es utilizada en la fabricación de diferentes utensilios domésticos como sogas, cepillos y brochas, entre otros productos (Morreeuw et al., 2021; Peña-Rodríguez et al., 2020). El aprovechamiento de esta especie constituye el principal ingreso de las comunidades rurales en los ecosistemas áridos y semiáridos (Pando-Moreno et al., 2008).

Orégano

El orégano (*Lippia graveolens*) es una especie de arbustos aromáticos distribuidos en las zonas áridas y semiáridas. Cada arbusto alcanza una altura máxima de hasta 2 m y presenta tallos leñosos muy ramificados desde la base. Las plantas tienen hojas finamente crenadas y tomentosas, de forma oblonga o elíptica de 1.5 cm de amplitud y de 1 a 1.5 cm de longitud. Las flores están dispuestas en espigas subglobosas, con corolas blancas zigomorfas. Los frutos son dehiscentes y secos (Mata-González y Meléndez-González, 2005).

Las hojas del orégano tienen muchos usos en las industrias medicinal, cosmética y perfumería. Asimismo, de las hojas del orégano se deriva el aceite que es utilizado en las industrias alimentaria, licorería, refresquera, farmacéutica y cosmetología (Cortés-Chitala et al., 2021). El orégano está distribuido a nivel mundial; en México se distribuyen 40 especies, aunque las más comunes son *Lippia berlandieri* y *L. graveolens*. Ambas especies son importantes económicamente para las comunidades rurales de las zonas áridas y semiáridas (Chacón-Vargas et al., 2022; García-Pérez et al., 2012).

2.5 Productividad de las especies no maderables

La productividad es la capacidad o magnitud de producción de biomasa en un sitio forestal determinado. El conocimiento sobre la productividad de biomasa

involucra información para un mejor manejo forestal. Por ello, la productividad forestal es identificada como el índice de sitio (IS) definido como la altura dominante para una especie en un rodal (Loera-Gallegos et al., 2018; Noordermeer et al., 2020). También, la productividad es una expresión sobre la influencia de los factores bióticos y abióticos sobre el crecimiento de plantas en un sitio (Skovsgaard & Vanclay, 2008).

Hernández-Herrera et al. (2019) y Martínez-Salvador et al. (2013) mencionan que las variables físicas y químicas del suelo influyen sobre el crecimiento de algunas especies no maderables en las zonas áridas. Hernández-Herrera et al. (2020) señalan que las variables climáticas (temperatura y precipitación) son relevantes en la distribución potencial la candelilla. Por su parte, Ramírez-López et al. (2022) indican que la topografía influye sobre el crecimiento de *Lippia graveolens*.

Debido a la importancia económica de algunas especies no maderables en zonas áridas (Taylor et al., 2017), lo necesario es que los propietarios y gestores del manejo de los recursos naturales tengan conocimiento acerca de la capacidad productiva de las especies en la región. Esto se debe a que el cambio climático ha generado una variabilidad en el espacio por cambios de precipitación y temperatura; esos cambios han alterado la estructura poblacional de algunas especies no maderables (Vargas-Piedra et al., 2020). De ahí la importancia de identificar las variables que influyen sobre la productividad de algunas especies no maderables para generar acciones de manejo y conservación de los recursos naturales (Briones et al., 2018; Li et al., 2022; Nobel y Quero, 1986).

2.6 Referencias

Aneseyee, A. B., Soromessa, T., Elias, E., & Feyisa, G. L. (2021). Allometric equations for selected Acacia species (*Vachellia* and *Senegalia* genera) of Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00196-1>

- Aranda-Ledesma, N. E., Bautista-Hernández, I., Rojas, R., Aguilar-Zárate, P., Medina-Herrera, N. del P., Castro-López, C., & Guadalupe Martínez-Ávila, G. C. (2022). Candelilla wax: Prospective suitable applications within the food field. *LWT*, 159, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113170>
- Bañuelos-Revilla, J. E., Palacio-Núñez, J., Martínez-Montoya, J. F., Olmos-Oropeza, G., & Flores-Cano, J. A. (2019). Distribución potencial y abundancia de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511657>
- Baskerville, G. L. (1972). Use of Logarithmic Regression in the Estimation of Plant Biomass. *Canadian Journal of Forestry*, 2(49), 49–53. <https://doi.org/Export> Date 18 February 2014
- Bennett, A. C., Penman, T. D., Arndt, S. K., Roxburgh, S. H., & Bennett, L. T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, 43(11), 1692–1705. <https://doi.org/10.1111/ecog.05180>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Castillo-Quiroz, D., Martínez-Burciaga, O. U., Ávila-Flores, D. Y., Castillo-Reyes, F., & Sánchez-Chaparro, J. D. (2014). Identification of potential areas for establishment of plantations of *Agave lechuguilla* Torr. in Coahuila, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 04(05), 520–526. <https://doi.org/10.4236/ojf.2014.45056>
- Chacón-Vargas, K. F., Sánchez-Torres, L. E., Chávez-González, M. L., Adame-Gallegos, J. R., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2022). Mexican oregano (*Lippia berlandieri* Schauer and *Poliomintha longiflora* Gray) essential oils induce cell

death by apoptosis in *Leishmania* (*Leishmania*) *mexicana* promastigotes. *Molecules*, 27(16), 5183. <https://doi.org/10.3390/molecules27165183>

Contescu, C. I., Adhikari, S. P., Gallego, N. C., Evans, N. C., & Biss, B. E. (2018). Activated carbons derived from high-temperature pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Journal Of Carbon Research*, 4(3), 51. <https://doi.org/10.3390/c4030051>

Conti, G., Gorné, L. D., Zeballos, S. R., Lipoma, M. L., Gatica, G., Kowaljew, E., Whitworth-Hulse, J. I., Cuchietti, A., Poca, M., Pestoni, S., & Fernandes, P. M. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7), 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>

Cortés-Chitala, M. D. C., Flores-Martínez, H., Orozco-Ávila, I., León-Campos, C., Suárez-Jacobo, Á., Estarrón-Espinosa, M., & López-Muraira, I. (2021). Identification and quantification of phenolic compounds from mexican oregano (*Lippia graveolens* HBK) hydroethanolic extracts and evaluation of its antioxidant capacity. *Molecules*, 26(3), 702. <https://doi.org/10.3390/molecules26030702>

Daba, D. E., & Soromessa, T. (2019). The accuracy of species-specific allometric equations for estimating aboveground biomass in tropical moist montane forests: Case study of *Albizia grandibracteata* and *Trichilia dregeana*. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0134-8>

Dai, J., Liu, H., Wang, Y., Guo, Q., Hu, T., Quine, T., Green, S., Hartmann, H., Xu, C., Liu, X., & Jiang, Z. (2020). Drought-modulated allometric patterns of trees in semi-arid forests. *Communications Biology*, 3(1), 405. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01144-4>

Flores-Hernández, C. de J., Méndez-González, J., Sánchez-Pérez, F. de J.,

- Méndez-Encina, F. M., López-Díaz, Ó. M., & López-Serrano, P. M. (2020). Allometric equations for predicting *Agave lechuguilla* Torr. aboveground biomass in Mexico. *Forests*, 11(7), 784. <https://doi.org/10.3390/f11070784>
- García-Pérez, E., Francisco Castro-Álvarez, F., Alejandra Gutiérrez-Urbe, J., & García-Lara, S. (2012). Revisión de la producción, composición fitoquímica y propiedades nutraceuticas del orégano mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3, 339–353.
- Goussanou, C., Guendehou, S., Assogbadjo, A., Kaire, M., Sinsin, B., & Cuni-Sanchez, A. (2016). Specific and generic stem biomass and volume models of tree species in a West African tropical semi-deciduous forest. *Silva Fennica*, 50(2), 1–22. <https://doi.org/10.14214/sf.1474>
- Hernández-Herrera, J. A., Moreno-Reséndez, A., Valenzuela-Núñez, L. M., Flores-Hernández, A., & Zamora Martinez, M. C. (2020). Distribución potencial de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. en México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19(2), 1–14. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.19.1>
- Hernández-Herrera, J. A., Moreno-Reséndez, A., Valenzuela-Núñez, L. M., & Martínez-Salvador, M. (2019). Modelación de la presencia de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. mediante propiedades físicas y químicas del suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 499–511. <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.1910>
- Hernández-Ramos, A., Cano-Pineda, A., Flores-López, C., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & Martínez Angel, L. (2019). Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25(2), 1–13. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521806>
- Islam, M. R., Azad, M. S., Mollick, A. S., Kamruzzaman, M., & Khan, M. N. I. (2021). Allometric equations for estimating stem biomass of *Artocarpus*

chaplasha Roxb. in Sylhet hill forest of Bangladesh. *Trees, Forests and People*, 4, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100084>

Jing, G., Hu, T., Liu, J., Cheng, J., & Li, W. (2020). Biomass estimation, nutrient accumulation, and stoichiometric characteristics of dominant tree species in the semi-arid region on the Loess Plateau of China. *Sustainability*, 12(1), 339. <https://doi.org/10.3390/su12010339>

Kora, S. H., Guendehou, G. S., Goussanou, C. A., Assogbadjo, A. E., & Sinsin, B. (2019). Allometric equations from a non-destructive approach for biomass prediction in natural forest and plantation in West Africa. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 81(2), 111–122. <https://doi.org/10.2989/20702620.2018.1512795>

Li, X., Liu, X., Zhang, H., & Bao, W. (2022). Latitudinal patterns of climatic variables and influence of local topography on climatic variables in the dry valleys of southwestern China. *Journal of Mountain Science*, 19(5), 1348–1356. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7070-2>

Llamas-Torres, I., Bello-Pineda, J., Castillo-Burguete, T. M., Leyequien-Abarca, E., & Calvo-Irabien, L. M. del C. (2019). Integrating ecological and socioeconomic criteria in a GIS-based multicriteria-multiobjective analysis to develop sustainable harvesting strategies for Mexican oregano *Lippia graveolens* Kunth, a non-timber forest product. *Land Use Policy*, 81, 668–679. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.038>

Loera-Gallegos, H. M., Corral-Rivas, J. J., Montiel-Antuna, E., Solis-Moreno, R., Chávez-Simental, J. A., & González-Cervantes, G. (2018). Calidad de sitio para *Agave durangensis* Gentry en la Sierra de Registrillo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1171–1180. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i6.1582>

Ludwig, J. A., Reynolds, J. F., & Whitson, P. D. (1975). Size-biomass relationships

of several Chihuahuan Desert shrubs. *The American Midland Naturalist*, 94(2), 451. <https://doi.org/10.2307/2424437>

Mahmood, H., Siddique, M., Costello, L., Birigazzi, L., Abdullah, S., Henry, M., Siddiqui, B., Aziz, T., Ali, S., Al Mamun, A., Forhad, M., Akhter, M., Iqbal, Z., & Mondol, F. (2019). Allometric models for estimating biomass, carbon and nutrient stock in the Sal zone of Bangladesh. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 12(1), 69–75. <https://doi.org/10.3832/ifor2758-011>

Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R. D., & Pompa-García, M. (2013). Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(3), 35–49. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000300004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Mata-González, R., & Meléndez-González, R. (2005). Growth characteristics of Mexican oregano (*Lippia berlandieri* schauer) under salt stress. *Southwestern Naturalist*, 50(1), 1–6. [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2005\)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2005)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2)

Méndez González, J., Turlan Medina, O. A., Ríos Saucedo, J. Cesar, & Nájera-Luna, J. A. (2012). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Hum. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 1–20.

Morreeuw, Z. P., Ríos-González, L. J., Salinas-Salazar, C., Melchor-Martínez, E. M., Ascacio-Valdés, J. A., Parra-Saldívar, R., Iqbal, H. M. N., & Reyes, A. G. (2021). Early optimization stages of *Agave lechuguilla* bagasse processing toward biorefinement: drying procedure and enzymatic hydrolysis for flavonoid extraction. *Molecules*, 26(23), 7292. <https://doi.org/10.3390/molecules26237292>

Návar-Chaidez, J. de J. (2010). Biomass allometry for tree species of

- northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 507–519.
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>
- Návar, J., Méndez, E., & Dale, V. (2002). Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Annals of Forest Science*, 59(8), 813–821. <https://doi.org/10.1051/forest:2002079>
- Návar, J., Méndez, E., Nájera, A., Graciano, J., Dale, V., & Parresol, B. (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 59(4), 657–674. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.02.010>
- Návar, J., Nájera, J., & Jurado, E. (2001). Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipan thornscrub in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 47(3), 281–290. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0708>
- Návar, J., Ríos-Saucedo, J., Pérez-Verdín, G., Rodríguez-Flores, F. de J., & Domínguez-Calleros, P. A. (2013). Regional aboveground biomass equations for North American arid and semi-arid forests. *Journal of Arid Environments*, 97, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.016>
- Nobel, P. S., & Quero, E. (1986). Environmental productivity indices for a Chihuahuan Desert cam plant, *Agave lechuguilla*. *Ecology*, 67(1), 1–11. <http://www.jstor.org/stable/1938497>
- Noordermeer, L., Gobakken, T., Næsset, E., & Bollandsås, O. M. (2020). Predicting and mapping site index in operational forest inventories using bitemporal airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 457, 117768. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117768>

- Nyamjav, J., Batsaikhan, M.-E., Li, G., Li, J., Luvsanjamba, A., Jin, K., Xiao, W., Wu, L., Indree, T., & Qin, A. (2020). Allometric equations for estimating above-ground biomass of *Nitraria sibirica* Pall. in Gobi Desert of Mongolia. *PLOS ONE*, 15(9), e0239268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239268>
- Pando-Moreno, M., Pulido, R., Castillo, D., Jurado, E., & Jiménez, J. (2008). Estimating fiber for lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Agavaceae), a traditional non-timber forest product in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(11), 3686–3690. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.053>
- Pando-Moreno, Marisela, Eufracio, O., Jurado, E., & Estrada, E. (2004). Post-harvest growth of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Agavaceae) in northeastern Mexico. *Economic Botany*, 58(1), 78–82.
- Peña-Rodríguez, A., Pelletier-Morreeuw, Z., García-Luján, J., Rodríguez-Jaramillo, M. del C., Guzmán-Villanueva, L., Escobedo-Fregoso, C., Tovar-Ramírez, D., & Reyes, A. G. (2020). Evaluation of *Agave lechuguilla* by-product crude extract as a feed additive for juvenile shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Research*, 51(4), 1336–1345. <https://doi.org/10.1111/are.14497>
- Perea-Moreno, M.-A., Samerón-Manzano, E., & Perea-Moreno, A.-J. (2019). Biomass as renewable energy: worldwide research trends. *Sustainability*, 11(3), 863. <https://doi.org/10.3390/su11030863>
- Ramírez-López, X., Ramírez-Herrera, C., Velasco-García, M. V., & Cetina-Alcalá, V. M. (2022). Population structure and spatial distribution of oregano (*Lippia graveolens* H. B. K.) at the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 28(2), 289–303. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.04.024>
- Randriamalala, J. R., Radosy, H. O., Ramanakoto, M., Razafindrahanta, H.,

- Ravoninjatovo, J. M., Haingomanantsoa, R. S., & Ramananantoandro, T. (2022). Allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs of Malagasy xerophytic thickets. *Journal of Arid Environments*, 202, 104751. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104751>
- Reyes-Cárdenas, O., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Flores-Garnica, J. G., & Cárdenas-Tristán, A. (2019). Modelización de biomasa forestal aérea mediante técnicas deterministas y estocásticas. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511622>
- Rojas-García, F., De Jong, B. H. J., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835–864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rojas-Molina, R., Saucedo-Pompa, S., De León-Zapata, M. A., Jasso-Cantú, D., & Aguilar, C. N. (2011). Pasado, presente y futuro de la candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 7–18.
- Rojas, R., Tafolla-Arellano, J. C., & Martínez-ávila, G. C. G. (2021). Euphorbia antisiphilitica zucc: A source of phytochemicals with potential applications in industry. *Plants*, 10(1), 7–9. <https://doi.org/10.3390/plants10010008>
- Sharma, R. P., Bhandari, S. K., & BK, R. B. (2017). Allometric bark biomass model for *Daphne bholua* in the Mid-Hills of Nepal. *Mountain Research and Development*, 37(2), 206–215. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00052.1>
- Skovsgaard, J. P., & Vanclay, J. K. (2008). Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. In *Forestry*, 81(1), 13-31. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041>

- Talla, R., Sagna, M., Diallo, D., Diallo, A., Ndiaye, D., Sarr, O., Guisse, A., Sagna, M. B., & Dalanda Diallo, M. (2020). Development of allometric models for estimating the biomass of *Sclerocarya birrea* (A.Rich) Hoscht and *Boscia senegalensis* (Pers.) Lam. ex Poir. *Open Journal of Ecology*, 10(08), 571–584. <https://doi.org/10.4236/oje.2020.108035>
- Tanwar, S. P. S., Verma, A., Kumar, P., Alam, N. M., & Bhatt, R. K. (2020). Biomass and carbon projection models in *Hardwickia binata* Roxb. vis a vis estimation of its carbon sequestration potential under arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(14), 1925–1935. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1701659>
- Taylor, N. T., Davis, K. M., Abad, H., McClung, M. R., & Moran, M. D. (2017). Ecosystem services of the Big Bend region of the Chihuahuan Desert. *Ecosystem Services*, 27, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.07.017>
- Traoré, S., Djomo, A. N., N'guessan, A. K., Coulibaly, B., Ahoba, A., Gnahoua, G. M., N'guessan, É. K., Adou Yao, C. Y., N'Dja, J. K., & Guédé, N. Z. (2018). Stand structure, allometric equations, biomass and carbon sequestration capacity of *Acacia* Wild. (Mimosaceae) in Côte d'Ivoire. *Open Journal of Forestry*, 08(01), 42–60. <https://doi.org/10.4236/ojf.2018.81004>
- van der Vyver, M. L., & Cowling, R. M. (2019). Aboveground biomass and carbon pool estimates of *Portulacaria afra* (spekboom)-rich subtropical thicket with species-specific allometric models. *Forest Ecology and Management*, 448(May), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.048>
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of north-western Mexico. *Forests*, 8(8), 269. <https://doi.org/10.3390/f8080269>

- Vargas-Piedra, G., Valdez-Cepeda, R. D., López-Santos, A., Flores-Hernández, A., Hernández-Quiroz, N. S., & Martínez-Salvador, M. (2020). Current and future potential distribution of the xerophytic shrub candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) under two climate change scenarios. *Forests*, *11*(5), 530. <https://doi.org/10.3390/f11050530>
- Villavicencio-Gutierrez, E. E., Hernández-Ramos, A., Aguilar-González, C. N., & García-Cuevas, X. (2018). Estimación de la biomasa foliar seca de *Lippia graveolens* Kunth del sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(45). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.139>
- Vuorinne, I., Heiskanen, J., Maghenda, M., Mwangala, L., Muukkonen, P., & Pellikka, P. K. E. (2021). Allometric models for estimating leaf biomass of sisal in a semi-arid environment in Kenya. *Biomass and Bioenergy*, *155*, 106294. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106294>

CAPÍTULO III

3.- ECUACIONES PARA ESTIMAR BIOMASA DE CANDELILLA (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc) EN CHIHUAHUA, MÉXICO

EQUATIONS TO ESTIMATE AERIAL BIOMASS OF CANDELILLA (*Euphorbia antisiphilitica* ZUCC) IN CHIHUAHUA

The screenshot shows the article page on the website of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). The header includes the INIFAP logo and the journal title 'Revista Mexicana de Ciencias Forestales'. The article title is 'Ecuaciones para estimar biomasa de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc) en Chihuahua, México'. The authors listed are Margarito Maldonado-Ortiz, Pablito Marcelo López Serrano, Ricardo David Valdez-Cepeda, Ricardo Mata-González, Fabián García-González, and Martín Martínez-Salvador. The article is published in Volume 13, Number 72 (2022). The page also features a map of Chihuahua, download links for PDF, HTML, and XML, and a citation section. The journal's ISSN is 2448-6671 and its Factor de Impacto is 0.3636.

inifap
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Conocimiento de los bosques para la gente
Knowledge of the forests for the people

Revista Mexicana de Ciencias Forestales

NÚMERO ACTUAL PUBLICACIONES SOBRE LA REVISTA ENVÍOS REPORTE DOI ENTRAR Q BUSCAR

IDIOMA ENTRAR

English Español (Español)

INICIO ARCHIVOS VOL. 13 NÚM. 72 (2022) Artículo Científico

Ecuaciones para estimar biomasa de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc) en Chihuahua, México

Margarito Maldonado-Ortiz
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Pablito Marcelo López Serrano
Universidad Juárez del Estado de Durango
<https://orcid.org/0000-0003-0840-0806>

Ricardo David Valdez-Cepeda
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
<https://orcid.org/0000-0002-6990-2802>

Ricardo Mata-González
Oregon State University
<https://orcid.org/0000-0003-2053-7027>

Fabián García-González
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo

Martín Martínez-Salvador
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA
<https://orcid.org/0000-0002-2879-5070>

DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1231>

Palabras clave: *Euphorbia antisiphilitica*, cera de candelilla, ecuaciones alométricas.

PDF PDF (ENGLISH) HTML HTML (ENGLISH) XML

PUBLICADO 07-07-2022

CÓMO CITAR
Maldonado-Ortiz, Margarito, Pablito Marcelo López Serrano, Ricardo David Valdez-Cepeda, Ricardo Mata-González, Fabián García-González, y Martín Martínez-Salvador. 2022. «Ecuaciones Para Estimar Biomasa De Candelilla (*Euphorbia Antisiphilitica* Zucc) En

INGRESAMOS A SCOPUS
September 21, 2021
Nos es grato informar que la Revista Mexicana de Ciencias Forestales ingreso a la base de datos Scopus

ISSN en línea 2448-6671
August 12, 2021

Factor de Impacto
August 12, 2021
Factor de Impacto 2020 = 0.3636
SciELO Citation Index - Web of Science

ENVIAR UN ARTÍCULO

Maldonado-Ortiz, Margarito, Pablito Marcelo López Serrano, Ricardo David Valdez-Cepeda, Ricardo Mata-González, Fabián García-González, y Martín Martínez-Salvador. 2022. Ecuaciones para estimar biomasa de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.) en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(72), 173–200. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1231>

3.1 Resumen

La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) es un arbusto que crece en las zonas áridas del norte de México. Esta especie se cosecha para extraer una cera que produce como respuesta al estrés hídrico. Para autorizar la cosecha de las plantas, lo necesario es realizar estimaciones indirectas de su biomasa. El objetivo del presente estudio fue generar ecuaciones alométricas para estimar biomasa de candelilla a partir de variables morfométricas. El trabajo se llevó a cabo en la región de Aldama y Coyame del Sotol en el noreste de Chihuahua México. Se aplicó un muestro selectivo y destructivo de 198 individuos de candelilla, las cuales se obtuvieron en ejidos con programas de manejo forestal vigente. Para ajustar la mejor ecuación se probaron cuatro modelos y diferentes combinaciones de variables predictoras de biomasa. Las variables se transformaron a escala logarítmica. Se seleccionó el modelo de *Schumacher y Hall* en la forma logarítmica con el uso de las variables diámetro de copa y diámetro de la base de la planta, ya que fue el que presentó los mejores ajustes estadísticos ($R^2_{adj}=0.83$), la raíz del cuadrado medio del error ($RCME=0.042$), y los parámetros del modelo fueron significativos ($p<0.0001$) en su corrección de los supuestos de regresión. La ecuación obtenida es confiable para estimar biomasa de candelilla en el noreste del estado de Chihuahua, México.

Palabras clave: biomasa de arbustos, cera de candelilla, ecuaciones alométricas, predicción de biomasa, zonas áridas.

3.2 Abstract

Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) is a shrub that grows in the arid zones of northern Mexico. This species is harvested for the purpose of extracting a wax that it produces in response to water stress. In order to authorize the harvesting of plants, it is necessary to estimate their biomass indirectly through predictive equations. The objective of this study was to generate allometric equations to estimate the biomass of candelilla based on morphometric variables. The work was carried out in the region of Aldama and Coyame del Sotol in northeastern Chihuahua, Mexico. A selective and destructive sampling of 198 individuals of candelilla was applied, which were obtained in ejidos with forest management programs in force. Four models and different combinations of biomass predictor variables were tested to fit the best equation. Variables were transformed to logarithmic scale. The Schumacher and Hall model was selected in the logarithmic form determined by the crown diameter and base diameter of the plant, since it exhibited the best statistical adjustments ($R^2_{adj} = 0.83$), as well as by the root mean square of the error ($RMSE = 0.042$), and the model parameters were significant ($p < 0.0001$) in their correction of the regression assumptions. The equation thus obtained is reliable for estimating the biomass of candelilla in the northeastern state of Chihuahua, Mexico.

key words: Shrub biomass, *Candelilla* wax, allometric equations, biomass prediction, arid zones.

3.3 Introducción

La candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.) se reproduce por rizomas, y forma grupos de tallos en manchones de plantas que crecen en el semidesierto del norte de México (Arato *et al.*, 2014). Esta especie produce una cera natural como un mecanismo para tolerar el déficit hídrico, la cual se cosecha para su comercialización en los mercados nacional e internacional (Rojas *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2016).

En México, la recolección de la candelilla se realizan, principalmente, habitantes de núcleos poblacionales de las zonas áridas de los estados de San Luis Potosí, Zacatecas, Coahuila y Chihuahua (Villa-Castorena *et al.*, 2010; Becerra-López *et al.*, 2020). Los procedimientos de extracción, la estimación de la biomasa, las intensidades de recolecta y la regeneración del taxón, han sido objeto de estudio con fines de conservación y manejo, ya que se ocasionan alteraciones en su distribución y abundancia por efecto tanto del aprovechamiento inadecuado, como por influencia del cambio climático (Vargas-Piedra *et al.*, 2020).

La generación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa o volúmenes, es un tema ampliamente estudiado para las especies arbóreas de bosques templados y tropicales no solo de México, sino a nivel internacional (Vargas-Larreta *et al.*, 2017; Martínez-Domínguez *et al.*, 2020; Martínez-Sánchez *et al.*, 2020). Sin embargo, en taxones arbustivas y plantas de las zonas semiáridas, la generación de estas ecuaciones es poco estudiada, aún para las especies que se aprovechan con fines comerciales (Flores-Hernández *et al.*, 2020; Villavicencio-Gutierrez *et al.*, 2020). Además, es necesario desarrollarlas a nivel de regiones ecológicas debido a la amplia variación de condiciones ambientales en las que crecen los taxa del semidesierto, tal es el caso de la candelilla (Hernández-Ramos *et al.*, 2019; Vargas-Piedra *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2020).

Entre los trabajos publicados en relación con ecuaciones para estimar biomasa de candelilla, destacan los producidos para algunas regiones en el estado de Coahuila (Flores del Angel, 2013), los cuales fueron generadas a partir de datos

de altura media de la planta y diámetros de copa, y más. Recientemente Hernández-Ramos *et al.* (2019) documentan ecuaciones para algunos municipios del estado de Coahuila con ajustes aceptables en los estimadores estadísticos, ello permite confiabilidad para la estimación de biomasa de la especie en estas regiones; sin embargo, para Chihuahua no hay ecuaciones con validez científica.

El objetivo del presente estudio fue generar ecuaciones alométricas para estimar biomasa total utilizando variables morfométricas de *Euphorbia antisyphilitica*, para la región de Aldama y Coyame del Sotol en el noreste de Chihuahua, México.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Ubicación y descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló en los municipios de Coyame del Sotol y Aldama del estado de Chihuahua, México (Figura 1). La vegetación arbustiva predominante está compuesta por matorral desértico micrófilo y rosetófilo con dominancia de las especies *Euphorbia antisyphilitica* Zucc, *Agave lechuguilla* Torr., *Larrea tridentata* (DC.) Coville y *Dasyllirion sp.* Zucc. (Granados-Sánchez *et al.*, 2011). Las cotas altimétricas del área oscilan de 940 a 1 500 m, con precipitaciones medias anuales de 200 a 400 mm y temperatura media anual de 24° C (Granados-Sánchez *et al.*, 2011; González-Medrano, 2012).

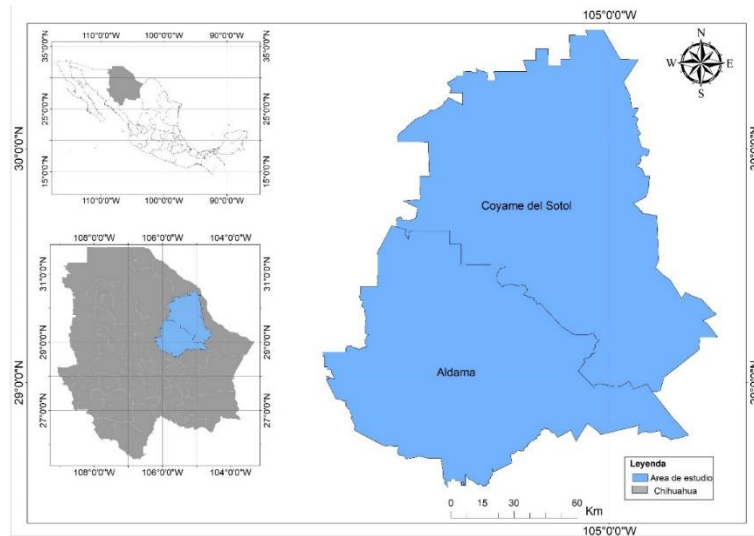


Figura 1. Localización del área de estudio en los municipios de Aldama y Coyame del Sotol del estado de Chihuahua, México.

3.4.2 Levantamiento de datos

Los datos se colectaron en ejidos y comunidades que tienen estudios técnicos vigentes para el aprovechamiento de la candelilla (Cuadro 1). Para este estudio se consideró el término “planta” a la colonia compacta de candelillas que crecen en manchones independientes, y se considerando al menos 20 centímetros de separación entre las bases de las colonias. Los individuos se seleccionaron de acuerdo a sus características de salud y tamaño, y se evitaron plantas enfermas o poco densas. Las muestras se obtuvieron considerando la variabilidad de condiciones de crecimiento que existen en las poblaciones de las plantas. Se realizó un procedimiento de medición destructivo de 198 plantas, distribuidas en siete ejidos con permisos de aprovechamiento forestal de candelilla. Un procedimiento de medición destructivo se realizó en 198 plantas distribuidas en siete ejidos con permisos de aprovechamiento forestal para candelilla. A cada ejemplar se le midieron las variables morfométricas; altura total media (Atm), altura promedio de los extremos de la copa del arbusto, sin considerar la altura central de la planta, la cual es comúnmente mayor; altura total (At), altura total de la planta considerando el tallo más largo de la porción central de la copa; diámetro de la base (Db), diámetro de la base de la planta medido 10 cm sobre la superficie

del suelo; diámetro de copa (D_c), promedio del diámetro menor y mayor de la amplitud de copa medidos en forma perpendicular en dirección norte-sur y este-oeste. Posteriormente, cada planta fue extraída para obtener el peso de biomasa total verde (kg) incluyendo la raíz (Villavicencio-Gutiérrez et al., 2018).

Cuadro 1. Distribución de muestras de las poblaciones de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en el área de estudio.

Municipio	Predios	Muestras
Aldama	Chorreras	92
Coyame del Sotol	Cañón de Barrera	58
	El Táscate	19
	Fco. Portillo	6
	San Pedro	23
Total		198

3.4.3 Base de datos

En gabinete, se estimaron las variables diámetro medio de copa (D_c) y la cobertura copa (Ca), la cual se obtuvo utilizando la fórmula del área de un círculo con el diámetro medio de copa.

3.4.4 Resumen descriptivo de las variables

En el Cuadro 2, se observa que en las plantas de candelilla se registró un intervalo de biomasa de 0.09 a 12.89 kg por planta. También se observa el amplio intervalo en el tamaño de las plantas muestreadas, lo cual permite utilizar la ecuación resultante para la mayoría de los tamaños posibles de planta presentes en campo.

Cuadro 2. Resumen estadístico de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en los municipios de Coyame del Sotol y Aldama, estado de Chihuahua.

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	DE	CV (%)
Db (cm)	198	7	91	29.2	18.41	63.05
At (cm)	198	17	105	46.43	15.33	33.02
Atm (cm)	198	10	80	30	11.05	36.83
Dc (cm)	198	14.5	147.5	50.53	25.88	51.22
Ca (m ²)	198	0.02	1.71	0.25	0.27	108.00
Biomasa (kg)	198	0.09	12.89	1.85	2.33	125.95

Db = Diámetro base; At = Altura total; Atm = Altura media; Dc = Diámetro copa; Da = Cobertura de copa; n = Tamaño de muestra; DE = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación.

3.4.5 Selección de variables predictoras

La prueba de correlación de *Pearson* se realizó incluyendo a todas las variables para identificar su relación con la biomasa de las plantas. Esto con la finalidad de identificar las variables correlacionadas con la biomasa e identificar las variables predictoras. Gráficas de distribución se utilizaron para visualizar la relación entre la variable dependiente (biomasa) y las variables independientes (diámetro de copa, diámetro de base, cobertura copa y altura) (Figuras 2 y 3).

	Biomasa				
Db	0.80				
Ca	0.86	0.85			
Dc	0.85	0.90	0.97		
Atm	0.53	0.53	0.55	0.62	
At	0.44	0.46	0.48	0.55	0.90

Figura 2. Prueba de correlación de variables morfométricas y biomasa de candelilla.

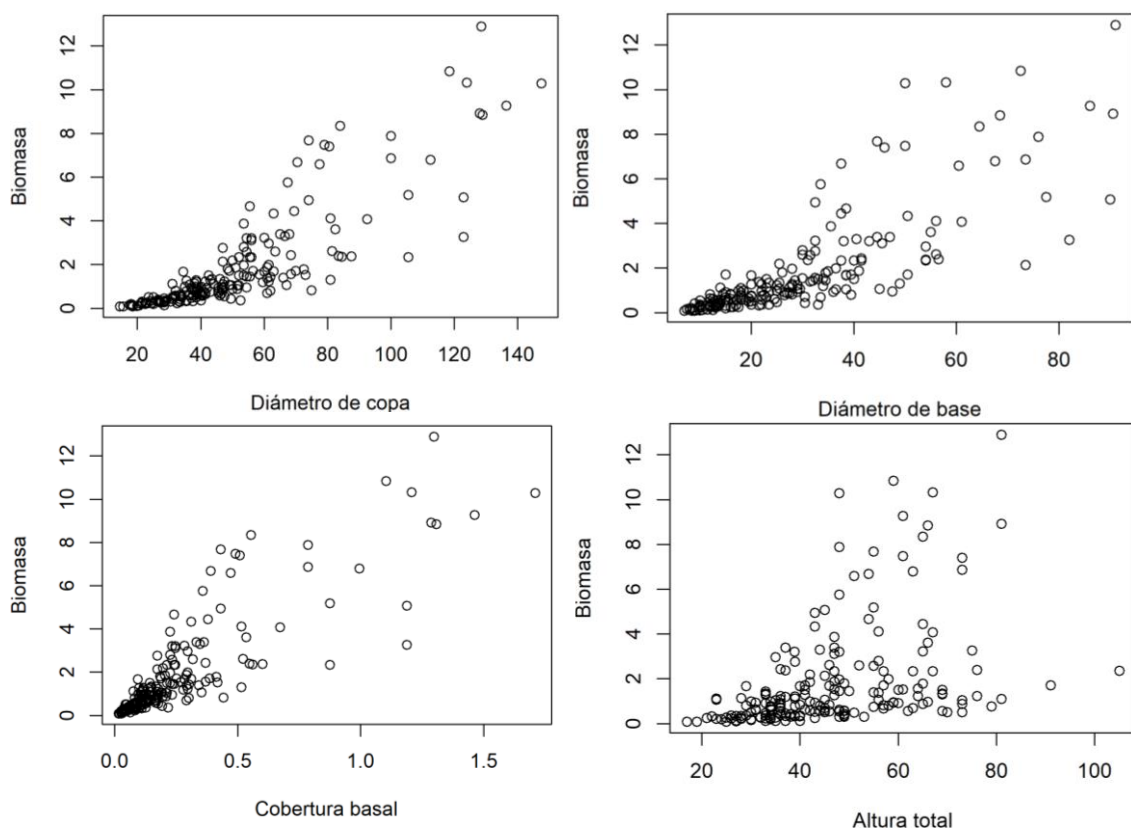


Figura 3. Relación de la biomasa con las variables predictoras de *Euphorbia antisiphilitica*.

3.4.6 Selección de modelos

Para determinar la biomasa de *E. antisiphilitica*, ecuaciones con criterios de flexibilidad con diferentes combinaciones de variables se seleccionaron (Cuadro 3). Estas ecuaciones han tenido buenas predicciones de biomasa en varias especies forestales (Návar, 2010; Altanzagas *et al.*, 2019; Noulèkoun *et al.*, 2018). En los estudios alométricos de biomasa, las varianzas del error para las ecuaciones no lineales basadas en unidades aritméticas son no constantes (heterocedasticidad) (Chave *et al.*, 2005). Para eliminar ese problema, el uso de las transformaciones logarítmicas es uno de los métodos más usados para disminuir la influencia de los errores (Moussa y Mahamene, 2018; Zhao *et al.*, 2019). En consecuencia, las ecuaciones logarítmicas se utilizaron para estimar la biomasa de la candelilla (Cuadro 3). Las ecuaciones alométricas en su forma

logarítmica, los predichos conducen a un sesgo sistemático; para minimizarlo, el factor de corrección (*FC*) se calculó en cada modelo (Sprugel, 1983).

Cuadro 3. Ecuaciones logarítmicas propuestas para determinar la biomasa de *Euphorbia antispyhilitica* Zucc.

Ec.	Ecuación logarítmica	Ecuación original	Tipo
1.1	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Dc)$	$B = \beta_0 Dc^{B_1}$	Alométrico
1.2	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Ca)$	$B = \beta_0 Ca^{B_1}$	Alométrico
1.3	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Db)$	$B = \beta_0 Db^{B_1}$	Alométrico
2.1	$\ln(B) = \ln(B_0) + B_1 \ln(Db) + B_2 \ln(At)$	$B = \beta_0 Db^{B_1} At^{B_2}$	Schumacher y Hall
2.2	$\ln(B) = \ln(B_0) + B_1 \ln(Dc) + B_2 \ln(Db)$	$B = \beta_0 Dc^{B_1} Db^{B_2}$	Schumacher y Hall
2.3	$\ln(B) = \ln(B_0) + B_1 \ln(Db) + B_2 \ln(Atm)$	$B = \beta_0 Db^{B_1} Atm^{B_2}$	Schumacher y Hall
3.1	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Dc^2 * At)$	$B = \beta_0 (Dc^2 * At)^{B_1}$	Spurr
3.2	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Dc^2 * Db)$	$B = \beta_0 (Dc^2 * Db)^{B_1}$	Spurr
3.3	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Db^2 * Dc)$	$B = \beta_0 (Db^2 * Dc)^{B_1}$	Spurr
4.1	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(At * Ca)$	$B = \beta_0 (At * Ca)^{B_1}$	Spurr
4.2	$\ln(B) = \ln(B_0) + (B_1) \ln(Dc * Db)$	$B = \beta_0 (Dc * Db)^{B_1}$	Spurr

Fuente: Návar, 2010; Noulèkoun *et al.*, 2018; Altanzagas *et al.*, 2019. *Ec* = Ecuación; *B* = Biomasa; *B*₀, *B*₁ y *B*₂ = Parámetros de los modelos; *ln*= Logaritmo natural.

$$FC = \exp\left(\frac{SEE^2}{2}\right)$$

Donde:

FC = Factor de corrección,

SEE = Error estándar de la estimación

Exp = Función exponencial.

3.4.7 Análisis estadístico

Los modelos se ajustaron por el método Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) (Montgomery *et al.*, 2021). La selección del modelo se basó en criterios de ajuste de las ecuaciones, específicamente en el nivel de significancia de los parámetros ($p \leq 0.05$). Además, en la evaluación de las ecuaciones se consideraron el

coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), la raíz del error medio cuadrático ($REMC$), el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información Bayesiano (BIC) y el porcentaje medio absoluto del error ($PMAE$) (Picard *et al.*, 2015; Islam *et al.*, 2021). Posteriormente, para validar las ecuaciones, los supuestos de las regresiones se verificaron de acuerdo con sus predicciones, la normalidad se verificó con la prueba de Lilliefors, mientras que el cumplimiento de homocedasticidad se evaluó con la prueba de Breusch-Pagan (Villavicencio-Gutiérrez *et al.*, 2018; Flores-Hernández *et al.*, 2020; Villavicencio-Gutierrez *et al.*, 2020). La corrección de la autocorrelación se realizó con el método *cochrane.orcutt* (Kutner *et al.*, 2005) con la librería *orcutt* de *R Project*, la cual contempla un modelo de autorregresivo en tiempo continuo (Quiñonez *et al.*, 2018). Finalmente, para detectar multicolinealidad se utilizó el factor inflación de varianza (VIF) (Mahmood *et al.*, 2019). Todos los análisis estadísticos y gráficos se realizaron con las funciones *lm* y *plot* en el *software R Project* (R Core Team, 2021).

3.5 Resultados

3.5.1 Estadísticos básicos de las variables morfométricas

El resultado del análisis de correlación de *Pearson* muestra que las variables que registraron mayor correlación con la biomasa fueron la cobertura copa ($r=0.86$), el diámetro de copa ($r=0.85$) y el diámetro de base ($r=0.80$) (Figura 2). Sin embargo, en el análisis de regresión lineal se utilizaron todas las variables seleccionadas para obtener los mejores ajustes.

3.5.2 Ecuaciones de biomasa

Los parámetros estimados fueron significativamente diferentes de cero a un nivel de significancia del 5% ($p<0.0001$). Los estadísticos de ajuste (R^2_{adj} , $REMC$, IAC y BIC) presentaron valores parecidos en las diferentes ecuaciones (Cuadro 4). De acuerdo con los criterios de selección, las ecuaciones 2.2 y 3.2 fueron seleccionadas para estimar la biomasa, ya que ambas tuvieron los R^2_{adj} mayores

(0.84), y a la *REMC*, el *AIC* y el *BIC* corresponden los valores menores. Por su parte, la prueba de *Lilliefors* evidenció normalidad de los residuos: $D=0.047$, valor $p=0.345$ y $D=0.039$, valor $p=0.0641$, para las ecuaciones 2.2 y 3.2, respectivamente (Cuadro 5). La prueba de *Breusch Pagan* sugirió una ligera presencia de heterocedasticidad: $BP=9.180$, $p=0.050$ y $PB=8.697$, $p=0.003$, para las ecuaciones 2.2 y 3.2, respectivamente. La prueba de *Durbin-Watson* fue de 1.34 para las dos ecuaciones, lo que indica que existió una cierta consideración de autocorrelación entre las variables. Ante estas evidencias se corrigieron las ecuaciones para obtener estimaciones confiables en la predicción de biomasa de la candelilla (Cuadro 5).

Cuadro 4. Valores de parámetros estimados y sus estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones logarítmicas para predecir biomasa en *Euphorbia antisiphilitica* Zucc.

Ecuación	Parámetro	Estimador	Error Estándar	Valor t	Valor p	Variable	R^2_{adj}	REMC	AIC	BIC	FC
1.1	B1	-8.12	0.27	-30.05	0.0001	Dc	0.82	0.47	268.38	278.25	1.12
	B2	2.13	0.07	30.29	0.0001						
1.2	B1	1.96	0.07	26.91	0.0001	Ca	0.82	0.47	268.38	278.25	1.12
	B2	1.06	0.03	30.29	0.0001						
1.3	B1	-5.19	0.20	-25.01	0.0001	Db	0.77	0.54	323.30	333.17	1.16
	B2	1.62	0.06	25.45	0.0001						
2.1	B1	-7.04	0.41	-16.803	0.0001	Db, At	0.79	0.51	301.59	314.74	1.14
	B2	1.45	0.06	20.752	0.0001						
	B3	0.63	0.12	4.981	0.0001						
2.2*	B1	-7.46	0.28	-25.741	0.0001	Dc, Db	0.84	0.45	247.66	260.81	1.10
	B2	1.46	0.15	9.676	0.0001						
	B3	0.58	0.12	4.87	0.0001						
2.3	B1	-6.66	0.35	-18.643	0.0001	Db, Atm	0.79	0.51	302.22	315.37	1.14
	B2	1.42	0.07	19.427	0.0001						
	B3	0.62	0.12	4.911	0.0001						
3.1	B1	-9.58	0.35	-27.32	0.0001	Dc ² *At	0.79	0.51	299.75	309.61	1.14
	B2	0.84	0.03	27.47	0.0001						
3.2*	B1	-7.32	0.22	-32.39	0.0001	Dc ² *Db	0.84	0.45	246.28	256.15	1.10
	B2	0.677	0.02	32.39	0.0001						
3.3	B1	-6.26	0.21	-29.21	0.0001	Db ² *Dc	0.82	0.48	275.91	285.78	1.12

Ecuación	Parámetro	Estimador	Error Estándar	Valor t	Valor p	Variable	R^2_{adj}	REMC	AIC	BIC	FC
4.1	B2	0.614	0.02	29.60	0.0001						
	B1	-1.63	0.06	-23.45	0.0001	At*Ca	0.79	0.51	299.75	309.61	1.14
	B2	0.84	0.03	27.4	0.0001						
4.2	B1	-6.80	0.21	-31.04	0.0001	Dc*Db	0.83	0.46	256.67	266.53	1.11
	B2	0.97	0.03	31.39	0.0001						

R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC = Raíz del error medio cuadrático; AIC = criterio de información de Akaike; BIC = Criterio de información Bayesiano; FC = factor de corrección; Db = diámetro base; Dc = diámetro copa; At = altura total; Atm = altura media; Ca = cobertura copa; * = Modelo seleccionado.

Cuadro 5. Supuestos de normalidad, heterocedasticidad y valor inflación de las ecuaciones ensayadas.

Ecuación	Liliefors	Valor p	Breusch Pagan	Valor p	Durbin watson	VIF
1.1	0.042	0.521	9.227	0.002	1.350	
1.2	0.042	0.521	9.227	0.002	1.357	
1.3	0.039	0.632	1.102	0.293	1.299	
2.1	0.042	0.507	3.181	0.203	1.193	1.342
2.2	0.047	0.345	9.180	0.050	1.346	5.186
2.3	0.031	0.900	1.728	0.410	1.260	1.469
3.1	0.040	0.581	5.910	0.015	1.028	
3.2	0.039	0.641	8.697	0.003	1.340	
3.3	0.030	0.910	4.027	0.044	1.308	
4.1	0.040	0.580	5.910	0.015	1.028	
4.2	0.042	0.510	6.448	0.011	1.322	

La corrección se realizó con la prueba de *Cochrane Orcutt*. Al corregir la autocorrelación estimaciones confiables se hicieron para predecir la biomasa (Cuadro 6). La prueba de *Durbin-Watson* aumentó a 2.19 para las dos ecuaciones seleccionadas. La prueba la prueba de *Breusch Pagan* indicó la ausencia de heterocedasticidad: BP=3.689, $p=0.15$ y BP=3.286, $p=0.47$, para las ecuaciones 2.2 y 3.2, respectivamente.

Cuadro 6. Estimaciones obtenidas mediante la corrección de autocorrelación y heterocedasticidad de las ecuaciones 2.2 y 3.2.

Ecuación	Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor <i>t</i>	Valor <i>p</i>	R^2_{adj}	REMC	FC
2.2	B1	-7.03	0.27	-25.157	0.0001	0.83	0.42	1.09
	B2	1.36	0.14	9.484	0.0001			
	B3	0.57	0.11	4.897	0.0001			
3.2	B1	-6.93	0.23	-30.134	0.0001	0.83	0.42	1.09
	B2	0.64	0.02	30.814	0.0001			

R^2_{adj} = Coeficiente de determinación ajustado; REMC= Raíz del error medio cuadrático; FC= Factor de corrección.

La capacidad predictiva del modelo 2.2 mostró un porcentaje medio absoluto del error 3.6%, mientras que en la ecuación 3.2 fue de 3.8%. Por lo tanto, los criterios analizados favorecen a la ecuación 2.2 para estimar la biomasa verde la candelilla. Las estimaciones obtenidas son alternativas para predecir la biomasa de candelilla mediante el uso de la transformación inversa a una escala logarítmica. Por lo tanto, la recomendación es utilizar la siguiente ecuación para la estimación de biomasa de candelilla en la región de estudio.

$$B = \exp(-7.03 + 1.36 * \ln(Dc) + 0.57 * \ln(Db)) * 1.15 \quad Ec. 2.2$$

Donde:

B = biomasa (kg)

ln = Logaritmo natural

exp = Función exponencial

Dc = diámetro de copa (cm)

Db = diámetro de base (cm)

3.6 Discusión

Las variables independientes de las plantas de candelilla mostraron una buena correlación con la biomasa, principalmente la cobertura de copa, el diámetro de copa y el diámetro de la base. La altura total y la altura media mostraron una relación más débil. Al respecto, lo que destaca es que a diferencia de la mayoría de las especies arbóreas cuya predicción de biomasa y volumen se realiza con datos de altura y diámetro de los individuos, en los taxones arbustivos si existen otras variables predictoras que dependen de las formas de las plantas.

Por ejemplo, Pando-Moreno *et al.* (2004) probaron varias variables para predecir la biomasa de lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) y determinaron que al volumen del cogollo, como variable independiente, se asocia un mayor coeficiente de correlación contra la biomasa del cogollo. Por su parte, Villavicencio-Gutierrez *et al.* (2018) identificaron una relación confiable entre el diámetro promedio de copa y el diámetro de base con la biomasa de *Lippia graveolens* Kunth en las zonas áridas mediante la ecuación de *Schumacher y Hall*. Sobresale que en las especies arbustivas con formas irregulares, un análisis de variables es necesario para obtener las que mejor predicen la biomasa y evitar multicolinealidad (Daryanto *et al.*, 2013; Dai *et al.*, 2020).

En este estudio, las ecuaciones alométricas en las que se utilizaron las variables diámetro de copa y diámetro de la base permitieron estimar la biomasa de candelilla con mayor precisión. Estas ecuaciones estadísticamente aceptables ($p < 0.0001$) tuvieron un *REMC* (0.42) pequeño y una R^2_{adj} (0.82). Al respecto, algunos estudios indican que el diámetro de copa es una variable confiable para estimar la biomasa de los arbustos en zonas áridas y semiáridas (Ali *et al.*, 2015; Sione *et al.*, 2019; Aranha *et al.*, 2020; Chieppa *et al.*, 2020).

La predicción de biomasa o volúmenes en especies de porte arbustivo suele presentar valores aceptables de los estimadores de bondad de ajuste. Sin embargo, los estadísticos de prueba comúnmente presentan valores menores en comparación con la predicción de biomasa en taxones arbóreos, especialmente

en especies coníferas, las cuales por lo general mantienen formas cónicas y sólidas, a diferencia de los arbustos, los cuales son muy ramificados y poco uniformes (Pando-Moreno *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2016; Vargas-Larreta *et al.*, 2017; Yao *et al.*, 2021). En este sentido, el presente estudio no fue la excepción, ya que los máximos valores en el coeficiente de determinación (R^2_{adj}) fueron de 0.84 en comparación con ecuaciones de modelos para especies arbóreas, cuyos coeficientes son generalmente mayores a 0.90 (Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

En el caso de candelilla que se documenta, el modelo de *Schumacher* y *Hall* (Ecuación 2.2) en su forma logarítmica predijo la biomasa de la candelilla con coeficientes estadísticamente aceptables. Las formas generales de esas ecuaciones se han utilizado en otras investigaciones en ambientes áridos y semiáridos (Návar *et al.*, 2004; Flores-Hernández *et al.*, 2020), por lo que se ratifica su efectividad. Además, lo importante es destacar que los diámetros de copa y de la base de los arbustos son fáciles de medir en la candelilla, la cual crece en colonias o grupos pequeños de tallos formando manchones amplios desde la base (Flores-del Angel *et al.*, 2013; Bañuelos-Revilla *et al.*, 2019). Finalmente, las estimaciones obtenidas pueden utilizarse para calcular la biomasa área de *E. antisiphilitica* para las zonas áridas del estado de Chihuahua.

3.7 Conclusiones

La ecuación alométrica de *Schumacher* y *Hall* en su forma logarítmica puede usarse para estimar la biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* en la región noreste de Chihuahua. La ecuación seleccionada incluye variables morfométricas de fácil medición como las variables copa y diámetro de base de las plantas.

Los modelos ensayados en este estudio se recomiendan para estimar la biomasa verde de candelilla, la cual se requiere en los estudios técnicos y programas de manejo de la especie en los municipios de Aldama y Coyame del Sotol en el noreste de Chihuahua, México.

3.8 Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca de posgrado número 732643. Los autores agradecen al fondo sectorial CONACYT-CONAFOR por el financiamiento del proyecto “Mejores prácticas y generación de tablas de volumen y biomasa para las principales especies forestales no maderables y de importancia económica en los ecosistemas áridos y semiáridos de México”.

3.9 Conflicto de interés

Los autores declaran que no tener conflicto de intereses con persona e institución alguna.

3.10 Contribuciones por autor

Margarito Maldonado Ortiz y Martín Martínez Salvador: procesamiento y análisis de los datos, planeación y redacción de manuscrito; Pablito Marcelo López Serrano: coordinación general del proyecto y apoyo para almacenamiento de información; Ricardo D. Valdez Cepeda: Análisis de datos; Ricardo Mata González: revisión y corrección de la contribución; Fabián García González: revisión y corrección del documento.

3.11 Referencias

- Ali, A., M. S. Xu, Y. T. Zhao, Q. Q. Zhang, L. L. Zhou, X. D. Yang and E. R. Yan. 2015. Allometric biomass equations for shrub and small tree species in subtropical China. *Silva Fennica* 49(4). Doi: 10.14214/sf.1275.
- Altanzagas B., Y. Luo, B. Altansukh, C. Dorjsuren, J. Fang and H. Hu. 2019. Allometric Equations for estimating the above-ground biomass of five forest tree species in Khangai, Mongolia. *Forests* 10(8): 661. Doi:10.3390/f10080661.
- Aranha, J., T. Enes, A. Calvão and H. Viana. 2020. Shrub biomass estimates in former burnt areas using Sentinel 2 images processing and classification.

Forests 11(5): 555. Doi:10.3390/f11050555

Arato, M., S. Speelman and G. Van H. 2014. The contribution of non-timber forest products towards sustainable rural development: The case of Candelilla wax from the Chihuahuan Desert in Mexico. *Natural Resources Forum* 38(2): 141–153. Doi:10.1111/1477-8947.12043.

Bañuelos R., J. E., J. Palacio N., J. F. Martínez M., G. Olmos O. y J. A. Flores C. 2019. Distribución potencial y abundancia de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. *Madera y Bosques* 25(1): 1-14. Doi:10.21829/myb.2019.2511657.

Becerra-López, J. L., R. Rosales-Serna., M. Ehsan, J. S. Becerra-López., A. Czaja, J. L. Estrada-Rodríguez, U. Romero-Méndez, S. Santana-Espinoza., C. M. Reyes-Rodríguez., J. C. Ríos-Saucedo. and P. A. Domínguez-Martínez. 2020. Climatic change and habitat availability for three sotol species in Mexico: A vision towards their sustainable use. *Sustainability* 12(8): 3455. Doi:10.3390/su12083455.

Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, ... and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145 (1): 87–99. Doi:10.1007/s00442-005-0100-x.

Chieppa, J., S. A. Power, D. T. Tissue and U. N. Nielsen. 2020. Allometric estimates of aboveground biomass using cover and height are improved by increasing specificity of plant functional groups in Eastern Australian Rangelands. *Rangeland Ecology and Management* 73(3):375-383. Doi: 10.1016/j.rama.2020.01.009.

Dai, J., H. Liu, Y. Wang, Q. Guo, T. Hu, T. Quine, S. Green, H. Hartmann, C. Xu, X. Liu and Z. Jiang. 2020. Drought-modulated allometric patterns of trees in semi-arid forests. *Communications Biology* 3(1): 1-8. Doi:10.1038/s42003-020-01144-4.

Daryanto, S., D. J. Eldridge and H. L. Throop. 2013. Managing semi-arid

woodlands for carbon storage: Grazing and shrub effects on above and belowground carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 169: 1-11. Doi:10.1016/j.agee.2013.02.001.

Flores del Angel, M. L. 2013. Situación actual de las poblaciones de Candelilla (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc): Inventario, su propagación sexual y asexual en el estado de Coahuila, México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de las Garzas, NL, México. 134 p.

Flores-del Angel, M. L., R. Foroughbakhch, A. Rocha E., M. L. Cárdenas Á., M. A. Guzmán L., Y. L. Hernández A. and M.A. Alvarado V. 2013. Morphology, viability and germination of candelilla seeds (*Euphorbia antisyphilitica* Zucc.). *Phyton* 82: 161-167. Doi: 10.32604/phyton.2013.82.161.

Flores-Hernández, C. de J., J. Méndez González, F. de J. Sánchez Pérez, F. M. Méndez Encina, Ó. M. López Díaz and P. M. López-Serrano. 2020. Allometric Equations for Predicting *Agave lechuguilla* Torr. aboveground biomass in Mexico. *Forests* 11(7): 784. Doi:10.3390/f11070784.

González-Medrano. F. 2012. Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) e Instituto Nacional de Ecología (INE). Tlalpan, México D. F., Mexico. 173 p

Granados-Sánchez, D., A. Sánchez G., R. L. Granados V. y A. Borja de la R. 2011. Ecología de la vegetación del desierto chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 17: 111-130. Doi:10.5154/r.rchscfa. 2010.10.102.

Hernández-Ramos, A., A. Cano-Pineda, C. Flores-López, J. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, M. Martínez-Salvador y L. Martínez-Ángel. 2019. Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques* 25(2): 1-13.

Doi:10.21829/myb.2019.2521806.

- Islam, R., S. Azad, A. S. Mollick, M. Kamruzzaman and N. I. Khan. 2021. Allometric equations for estimating stem biomass of *Artocarpus chaplasha* Roxb. in Sylhet hill forest of Bangladesh. *Trees, Forests and People* 4: 100084. Doi: 10.1016/j.tfp.2021.100084.
- Kutner, M. H., C. J. Nachtsheim, J. Neter and W. Li. 2005. Applied linear statistical models. McGraw-Hill Irwin. New York, NY. U S A. 1396 p.
- Luo, Y., X. Wang, Z. Ouyang, F. Lu, L. Feng and J. Tao. 2020. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth System Science Data* 12(1): 21-40. Doi:10.5194/essd-12-21-2020.
- Mahmood, H., M.R. H. Siddique, L. Costello, L. Birigazzi, ...and F. K. Mondol. 2019. Allometric models for estimating biomass, carbon and nutrient stock in the sal zone of Bangladesh. *iForest Biogeosciences and Forestry* 12(1): 69–75. Doi:10.3832/ifor2758-011.
- Martínez-Domínguez, A., F. Ruiz-Aquino, W. Santiago-García, P. Antúnez, M. Á. López-López, C. Valenzuela-Encinas and R. Feria-Reyes. 2020. Allometric equations to estimate aboveground and belowground biomass of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Forest Science and Technology* 16(3): 161-170. Doi:10.1080/21580103.2020.1801526.
- Martínez-Sánchez, J. L., C. Martínez-Garza, L. Cámara, and O. Castillo. 2020. Species-specific or generic allometric equations: which option is better when estimating the biomass of Mexican tropical humid forests?. *Carbon Management* 11(3): 241–249. Doi:10.1080/17583004.2020.1738823.
- Montgomery, D. C., E. A. Peck and G. G. Vining. 2021. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA. 704 p.
- Moussa, M. and L. Mahamane. 2018. Allometric models for estimating aboveground biomass and carbon in *Faidherbia albida* and *Prosopis*

africana under agroforestry parklands in drylands of Niger. *Journal of Forestry Research* 29(6): 1703–1717. Doi:10.1007/s11676-018-0603-z.

Muñoz-Ruíz, C. V., S. López-Dáz, F. Covarrubias-Villa, E. Villar-Luna, J. R. Medina-Medrano and L. G. Barriada B. 2016. Effect of abiotic stress conditions on the wax production in candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.). *Revista Latinoamericana Química* 44 (1): 26-36. <https://www.researchgate.net/publication/311705358/1/10/2021>

Návar, J. 2010. Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: A Literature review and the challenges ahead. In Momba M., N. B. (Ed.) *Biomass*. Sciyo, Rijeka, Croatia. pp 27-64. p. <http://www.intechopen.com/source/pdfs/11396>. (1 de octubre de 2021)

Návar, J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale and B. Parresol. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 59(4): 657-674. Doi:10.1016/j.jaridenv.2004.02.010.

Noulèkoun, F., J. B. Naab, J. P. A. Lamers, S. Baumert and A. Khamzina. 2018. Sapling biomass allometry and carbon content in five afforestation species on marginal farmland in semi-arid Benin. *New Forests* 49(3): 363-382. Doi:10.1007/s11056-017-9624-2.

Pando-Moreno, M., O. Eufracio, E. Jurado and E. Estrada. 2004. Post-harvest growth of lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., agavaceae) in northeastern Mexico. *Economic Botany* 58(1): 78–82. Doi: 10.1016/j.foreco.2008.02.053.

Picard, N., E. Rutishauser, P. Ploton, A. Ngomanda and M. Henry. 2015. Should tree biomass allometry be restricted to power models?. *Forest Ecology and Management* 353: 156-163. Doi:10.1016/j.foreco.2015.05.035.

Quiñonez-Barraza, G., G. G. García-Espinoza y O. A. Aguirre-Calderón. 2018. ¿Cómo corregir la heterocedasticidad y autocorrelación de residuales en

modelos de ahusamiento y crecimiento en altura?. *Revista mexicana de ciencias forestales* 9(49): 28-59. Doi:10.29298/rmcf.v9i49.151.

R core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. (1 de diciembre de 2021)

Rojas, M. R., S. Saucedo P., M. A. De León Z., D. Jasso C. y C. N. Aguilar. 2011. Pasado, presente y futuro de la candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 7-18. Doi:10.29298/rmcf.v2i6.571.

Sione, S. M. J., H. J. Andrade Castañeda, S. G. Ledesma, L. J. Rosenberger, J. D. Oszust and M. G. Wilson. 2019. Aerial biomass allometric models for *Prosopis affinis* Spreng. in native espinal forests of Argentina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 23(6): 467-473. Doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p467-473.

Sprugel, D. G. (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64: 209-210. Doi:10.2307/1937343.

Vargas-Larreta B., C. A. López-Sánchez, J. J. Corral-Rivas, J. O. López-Martínez, C. G. Aguirre-Calderón and J. G. Álvarez-González. 2017. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western México. *Forest* 8(8): 296. Doi:10.3390/f8080269.

Vargas-Piedra, G., R. D. Valdez-Cepeda, A. López-Santos, A. Flores-Hernández, N. S. Hernández-Quiroz and M. Martínez-Salvador. 2020. Current and future potential distribution of the xerophytic shrub candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) under two climate change scenarios. *Forests* 11(5): 530. Doi:10.3390/f11050530.

Villa-Castorena, M., E. A. Catalán-Valencia, M. A. Inzunza-Ibarr, M. de L. González-López y J. G. Arreola-Ávila. 2010. Producción de plántulas de candelilla (*Euphorbia antisiphylitica* Zucc.) mediante estacas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 16(1): 37-47.

Doi:10.5154/r.rchscfa.2009.07.027.

- Villavicencio-Gutierrez, E. E., A. Hernández-Ramos, C. N. Aguilar-González y X. García-Cuevas. 2018. Estimación de la biomasa foliar seca de *Lippia graveolens* Kunth del sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(45). Doi:10.29298/rmcf.v9i45.139.
- Villavicencio-Gutierrez, E. E., S. Mendoza-Morales y J. Méndez G. 2020. Modelo para predecir biomasa foliar seca de *Litsea parvifolia* (Hemsl.) Mez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(58). Doi:10.29298/rmcf.v11i58.642
- Yao, X., G. Yang, B. Wu, L. Jiang and F. Wang. 2021. Biomass estimation models for six shrub species in hunshandake sandy land in inner Mongolia, Northern China. *Forests* 12(2): 167. Doi:10.3390/f12020167.
- Zhang, L., G. Cui, W. Shen and X. Liu. 2016. Cover as a simple predictor of biomass for two shrubs in Tibet. *Ecological Indicators* 64: 266-271. Doi:10.1016/j.ecolind.2016.01.009.
- Zhao, H., Z. Li, G. Zhou, Z. Qiu and Z. Wu. 2019. Site-specific allometric models for prediction of above-and belowground biomass of subtropical forests in Guangzhou, southern China. *Forests* 10(10): 862. Doi:10.3390/f10100862.

CAPÍTULO IV

4.- INFLUENCIA DE VARIABLES DE CLIMA, SUELO Y RELIEVE SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE ORÉGANO Y LECHUGUILLA EN EL NORTE DE MÉXICO

INFLUENCE OF CLIMATIC, SOIL AND RELIEF VARIABLES ON THE PRODUCTIVITY OF OREGANO AND LECHUGUILLA IN NOTHERN MEXICO

4.1 Resumen

El orégano y la lechuguilla son especies cosechadas en el centro norte de México y comercializadas en los mercados nacional e internacional. El objetivo fue identificar las variables climáticas, edáficas y de relieve que influyen sobre la productividad del orégano y la lechuguilla en su área natural de distribución en el norte de México. Un muestreo se aplicó en las zonas áridas de Durango, Chihuahua y Coahuila. Las variables medidas fueron tamaño de planta y variables ecológicas del sitio relacionadas con clima, suelo y relieve. Para asignar clases de productividad (alta, media o baja) a cada sitio muestreado se construyó un índice con la abundancia y tamaño de plantas por especie. Un análisis discriminante canónico (ADC) se realizó para detectar posibles diferencias entre las clases de productividad. El ADC mostró diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.001$) entre clases de productividad en *A. lechuguilla* y *L. graveolens*. Dos variables climáticas y tres de suelo parecen influir sobre la productividad de lechuguilla, mientras que la productividad del orégano está influenciada por siete variables climáticas. Los valores medios de las variables de clima y suelo que influyen sobre la productividad de las especies pueden tener uso potencial para construir modelos espaciales de productividad adecuados para el manejo de las especies en su área de distribución.

Palabras clave: *Agave lechuguilla*, *Lippia graveolens*, índice de productividad, análisis multivariado, potencial productivo.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Margarito Maldonado Ortiz
Directores de Tesis: Dr. Martín Martínez Salvador y Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

4.2 Abstrac

Oregano and lechuguilla are two species harvested in central and north of Mexico. These species are traded in national and international markets. The aim was to identify the influence of climate, soil and relief variables (non-biotic) on the productivity of oregano and lechuguilla in the lands of their natural distribution in northern Mexico. A sampling was carried out in the arid zones of Durango, Chihuahua and Coahuila. Abundance and plant size variables were measured, as well as variables of climate, soil and relief. To assign productivity classes (high, medium or low) to each sampled site, a productivity index was constructed with the data of abundance and size of plants of each of both studied species. In order to determine the influence of non-biotic variables on the productivity index, a canonical discriminant analysis (ADC) was performed to detect possible differences between the productivity classes. The ADC showed a statistically significant difference ($p < 0.001$) among the productivity classes for *A. lechuguilla*, as well as for *L. graveolens*. Two climatic variables and three soil variables seem to influence lechuguilla productivity, while oregano productivity might be influenced by seven climatic variables. The average values of the climatic and soil variables with effect on the productivity of both species have a potential use to build spatial models of productivity suitable for the management of the species in their natural area of distribution.

Key words: *Agave lechuguilla*, *Lippia graveolens*, productivity index, multivariate analysis, productive potential.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Margarito Maldonado Ortiz
Directores de Tesis: Dr. Martín Martínez Salvador y Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

4.3 Introducción

Agave lechuguilla (lechuguilla) y *Lippia graveolens* (orégano) son dos especies que crecen de manera silvestre y son cosechadas con fines comerciales (Cortés-Chitala et al., 2021; Mata-González y Meléndez-González, 2005; Peña-Rodríguez et al., 2020). Ambas especies se distribuyen en una región extensa del norte de México donde las condiciones de suelo, clima y relieve parecen cambiar en función de gradientes altitudinales desde zonas de valles hasta cimas de cerros y sierras (Granados-Sánchez et al., 2013).

Los escenarios futuros asociados al calentamiento global suponen variaciones de las variables climáticas en la zona de distribución de las especies estudiadas (Flores-Rentería et al., 2023; Vargas-Piedra et al., 2020), mientras que los métodos inadecuados de cosecha de ambas especies y el sobrepastoreo podrían alterar las características de los suelos (Bennett et al., 2020; Cartwright et al., 2020; Ougahi et al., 2022). Ello podría afectar la productividad del territorio de esta región y en consecuencia la abundancia y crecimiento del orégano y la lechuguilla, las cuales han sido de considerable importancia económica y social para los pobladores de las zonas rurales donde se distribuyen sus poblaciones (Vargas-Piedra et al., 2020).

El término “productividad” ha sido ampliamente estudiado, principalmente para ecosistemas templados y tropicales (Martínez-Salvador et al., 2019), por lo que es sugerente incorporar estudios de productividad para generar conocimiento sobre las características de los terrenos donde crecen estas especies de alto valor comercial y ecológico en las zonas áridas y semiáridas (Briones et al., 2018; Návar et al., 2013). Algunos métodos empleados en el estudio de productividad de ecosistemas con un enfoque de aprovechamiento de especies forestales incluyen al ajuste de curvas de crecimiento en altura de árboles dominantes (índice de sitio), el uso de modelos de máxima entropía (MaxEnt), las redes neuronales artificiales y la aplicación de técnicas multivariadas para identificar la relación del crecimiento de las plantas en función de variables climáticas (de

Castro Oliveira et al., 2019; Hernández-Herrera et al., 2020; Li et al., 2022; Martínez-Salvador et al., 2019).

Por ejemplo, Bertini et al. (2015) emplearon estadística multivariada para discriminar variables químicas y físicas de suelos que afectan los bosques de Araucaria en Brasil. Sánchez-Medina et al. (2021) utilizaron los análisis de discriminante y de frecuencia para clasificar los bosques de *Fagus sylvatica* en el noreste de México. Por su parte, Martínez-Salvador et al. (2013) emplearon el análisis discriminante canónico para encontrar la influencia de las variables climáticas y de suelos en la productividad de *Pinus arizonica* y *P. engelmannii*.

A través de la aplicación de estas metodologías se ha cuantificado la influencia de algunos parámetros del relieve sobre el crecimiento de las especies forestales en diversas regiones del mundo (Murphy et al., 2020; Zhang et al., 2022). Además, algunos fenómenos han sido descritos como la influencia de rangos de precipitación y temperatura sobre la producción y distribución potencial de las especies; por ejemplo, Hernández-Herrera et al. (2020) y Vargas-Piedra et al. (2020) lo demostraron para especies de las zonas áridas de México.

Como un aporte al conocimiento en el tema de productividad para ecosistemas de zonas áridas, esta investigación describe la influencia de las variables climáticas, suelo y relieve sobre la productividad del orégano y la lechuguilla en su área natural de distribución en el norte de México.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Área de estudio

La zona de estudio (ZE) está ubicada en las zonas áridas y semiáridas de los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila, México (Figura 4). La vegetación predominante está compuesta por especies de arbustos como *E. antisypilitica*, *A. lechuguilla* y géneros como *Lippia graveolens*, *Dasyllirion spp.*, *Larrea sp.* y *Opuntia spp.* (González-Medrano, 2012). La cota altimétrica oscila entre 700 a 2400 msnm, con precipitación media anual de 250 mm y temperaturas que varían

desde -5 °C en invierno hasta 40 °C en verano (García, 2004). La ZE es caracterizada por las precipitaciones escasas y temperaturas calientes.

4.4.2 Colecta de datos

Los datos utilizados provienen de 27 conglomerados de muestreo distribuidos en el Norte de México (Figura 4). Cada conglomerado está formado por 16 sitios circulares de 250 m², distribuidos en una superficie aproximada de 20 ha. Cada conglomerado tiene cuatro transectos con 4 sitios; cada centro de sitio se encuentra separado por 100 m dentro de cada transecto y con una separación de 200 m entre transecto. Cada sitio circular de 250 m² se dividió en cuatro cuadrantes de muestreo. En cada cuadrante se contaron el número de arbustos de orégano y lechuguilla, y para cada especie se eligió una planta moda a la cual se le midieron las variables altura (cm), diámetro mayor de copa (cm), diámetro menor de copa (cm) y diámetro de la base (cm) (Martínez-Salvador et al., 2015). La base de datos se conformó de una muestra de 1162 plantas de lechuguilla y 646 de orégano.

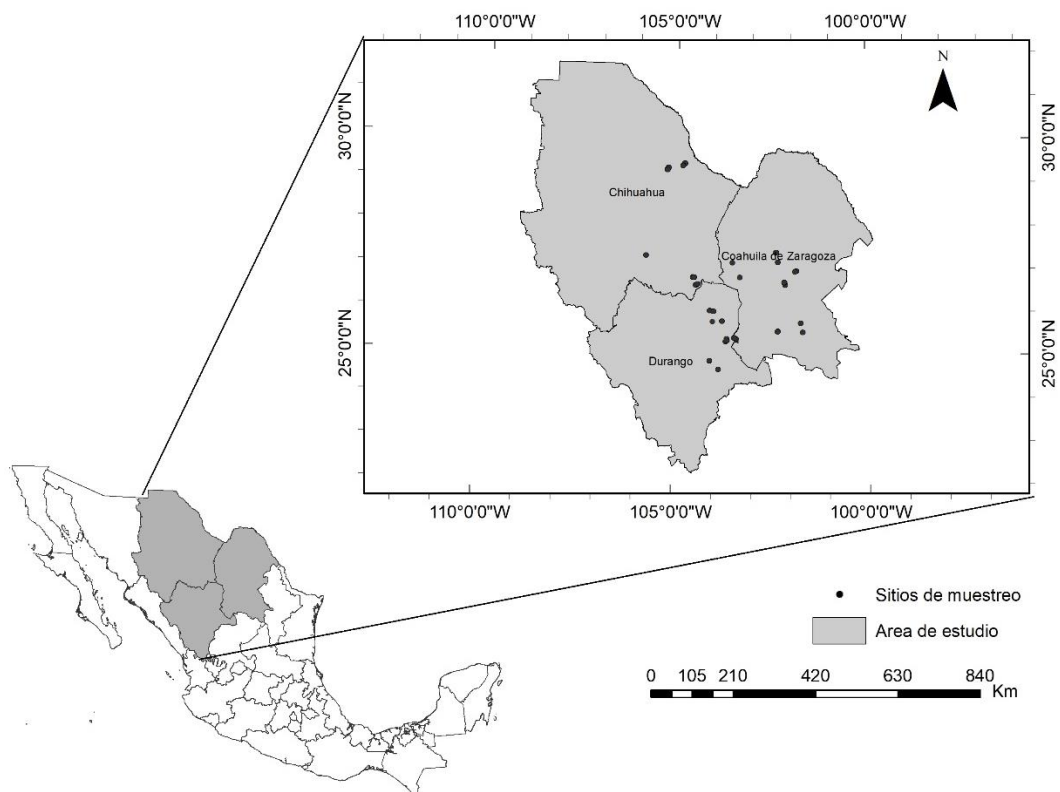


Figura 4. Localización del área de estudio que comprende los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

4.4.3 Variables ecológicas

En el centro de cada cuadrante se registraron las variables suelo desnudo (%), pedregosidad (%), profundidad de suelo (cm), hojarasca (%), cobertura basal (%) y textura de suelo (1 = fina, 2 = media y 3 = gruesa).

Además, información de las variables climáticas de temperatura mínima verano, temperatura mínima invierno, temperatura mínima anual, temperatura máxima verano, temperatura máxima invierno, temperatura máxima anual, precipitación verano, precipitación invierno y precipitación anual fue involucrada. Estas variables de las estaciones meteorológicas se obtuvieron mediante el uso del programa Eric II (Extractor Rápido de Información Climatológico), el cual es integrado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2001). El programa registra información diaria, mensual y anual de la precipitación y temperatura del año 1940 a 2002. Para cada variable se realizaron interpolaciones utilizando el método IDW (Mei, 2014) en sistemas de información geográfica. Los datos climáticos fueron extraídos de los valores de los píxeles que coinciden con la ubicación cartesiana de los sitios de muestreo para cada modelo interpolado.

Los datos topográficos utilizados fueron altitud (msnm), pendiente (%) y exposición (Azimut). Estas variables se obtuvieron del modelo digital de elevación (MDE) a una resolución de 30 m de la plataforma de Continuo de Elevaciones Mexicano (MDE) que corresponden a las elevaciones del territorio mexicano (Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), 2022).

4.4.4 Análisis de productividad

En este estudio se realizó una clasificación a priori de niveles de productividad de cada sitio. Los niveles de productividad estuvieron en función de la abundancia de arbustos de las especies y el tamaño de las plantas, de tal manera que los

sitios con mayor abundancia y mayor tamaño de arbustos fueron considerados como sitios de mayor productividad y viceversa.

Para estimar el valor de productividad se utilizó la ecuación para el cálculo de valor de importancia ecológica (Cottam y Curtis, 1956), como se describe en la ecuación 1.

$$VP = \frac{VRA + VRH + VRC}{3} \quad Ec. 1$$

donde,

VP = Valor de productividad

VRA = valor relativo de abundancia (número de individuos de la especie *x* en el sitio *i* / sumatoria de los individuos de todos los sitios)

VRH = valor relativo de altura (altura promedio de los individuos de la especie *x* en el sitio *i* / sumatoria de los promedios de altura de los individuos de todos los sitios)

VRC = valor relativo de copa (cobertura de copa de los individuos de la especie *x* en el sitio *i* / sumatoria de cobertura de copa de los individuos de todos los sitios).

Los valores de productividad obtenidos con la Ec. 1 fueron ordenados de mayor a menor y después se establecieron tres clases de productividad. El primer tercio de valores mayores fue categorizado como sitios de productividad alta, el tercio medio corresponde a productividad media y el tercer tercio del grupo fue asignado a sitios de productividad baja.

4.4.5 Análisis estadístico

Con los datos estandarizados (paquetería dplyr de R project) de las variables registradas se realizó un análisis discriminante canónico (ADC) para detectar diferencias multivariadas entre las clases de productividad (alta, media y baja). La prueba de Lambda Wilks se consideró como estadístico de prueba para la

toma de decisiones sobre las funciones canónicas (Bagheri Bodaghabadi et al., 2019). Además, un análisis de varianza se utilizó para determinar si cada una de las variables influye significativamente sobre la productividad de las especies. Finalmente, una comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey a un nivel de significancia = 0.05. Todos los análisis estadísticos realizaron en el programa R Project (R Core Team, 2022) como herramienta para el procesamiento y análisis de datos.

4.5 Resultados

La prueba de Lambda Wilks mostró diferencia significativa ($p < 0.001$) entre las clases de productividad de las especies de estudio. Para *A. lechuguilla* el Lambda de Wilks fue = 0.89 ($F_{36,1954} = 3.09$; $p < 0.0001$), mientras que para *L. graveolens* fue 0.75 ($F_{34,1020} = 4.55$; $p < 0.001$) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estadísticos de prueba del análisis discriminante canónico de *A. lechuguilla* y *L. graveolens* en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

Especie	Estadístico	Valor	Valor de F	Núm. GL	Den. GL	Pr > F
<i>A. lechuguilla</i>	Lambda de Wilks	0.89	3.09	36	1954	0.0001
	Pillai's Trace	0.10	3.08	36	1956	0.0001
	Hotelling-Lawley Trace	0.11	3.09	36	1763.2	0.0001
<i>L. graveolens</i>	Lambda de Wilks	0.75	4.55	34	1020	0.0001
	Pillai's Trace	0.25	4.40	34	1022	0.0001
	Hotelling-Lawley Trace	0.31	4.70	34	913.37	0.0001

Valor de F= estadística de F, Núm. GL= numerador de grados de libertad, Den GL= denominador de grados de libertad, Pr> F = valor de P.

El ADC mostró dos ejes canónicos para diferenciar las clases de productividad de las especies (Cuadro 8). Para *A. lechuguilla*, las dos primeras funciones indicaron diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre las clases de productividad. La primera explicó el 64 % de variación total, mientras que la segunda solo 36 % de variación (Figura 5). Por su parte, para *L. graveolens*, la primera función explicó el 85 % de variación total ($p < 0.0001$), mientras que la segunda función

mostró diferencia no significativa ($F_{16,511} = 1.51$, $p > 0.09$) con solo el 15% de variación total (Cuadro 8 y Figura 6).

Cuadro 8. Dimensión de las funciones canónicas de *A. lechuguilla* y *L. graveolens* en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

Especie	Can	Autovalor	Proporción	Valor de F	Núm. GL	Den. GL	Pr >
<i>A. lechuguilla</i>	1	0.07	0.64	3.09	36	1954	0.0001
	2	0.04	0.36	2.39	17	978	0.001
<i>L. graveolens</i>	1	0.26	0.85	4.55	34	1020	0.0001
	2	0.04	0.15	1.51	16	511	0.09

Can= dimensión canónica, Núm. GL= numerador de grados de libertad, Den GL= denominador de grados de libertad, Pr> F= valor de P.

La contribución de las variables climáticas, topográficas y de suelo sobre la productividad de las especies se observa en los coeficientes estructurales (Cuadro 9). Para *A. lechuguilla*, el primer eje canónico (can1) correlacionó positivamente con profundidad de suelo (0.44), suelo desnudo (0.33), cobertura basal (0.31), temperatura mínima invierno (0.30), temperatura máxima invierno (0.21); pero negativamente con la exposición (-0.36), pedregosidad (-0.33) y altitud (-0.20).

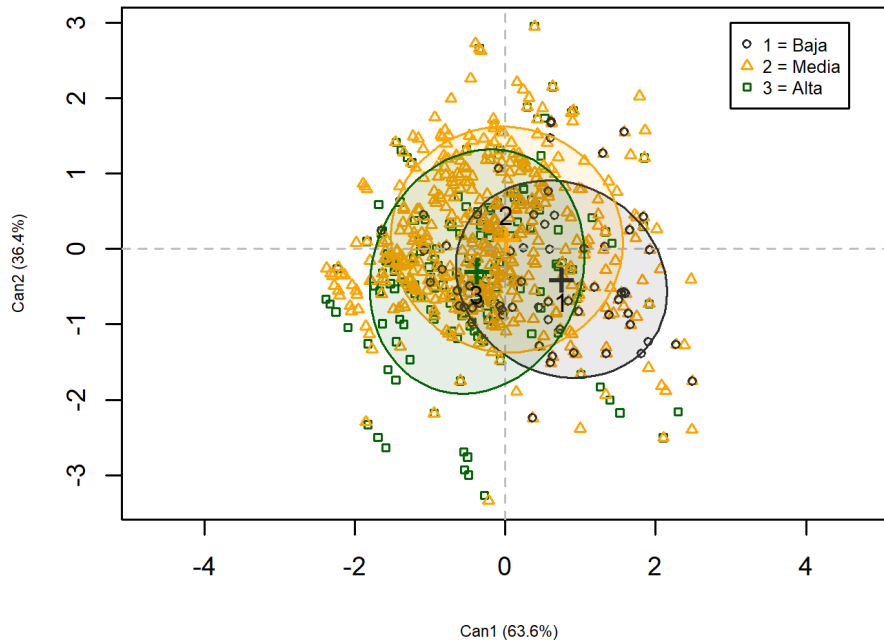


Figura 5. Clasificación de productividad de las funciones discriminantes de *Agave lechuguilla* estudiadas en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

Estos resultados muestran que la productividad de las poblaciones de lechuguilla en el norte de México está influenciada por variables climáticas y de suelos, destacando las temperaturas extremas de la estación invernal, así como las condiciones relacionadas con la profundidad de suelo y la cobertura basal. Estas características de sitio sugieren la factibilidad de seleccionar terrenos potenciales para propagar la lechuguilla en zonas bajas de laderas y lomeríos, así como en los valles de las zonas áridas del norte de México, destacando además que la lechuguilla podría prosperar en terrenos con porcentajes pequeños de pedregosidad. En el caso la especie *L. graveolens*, la primera función canónica se correlacionó positivamente con temperatura mínima anual (0.80), temperatura mínima invierno (0.78), temperatura mínima de verano (0.73), temperatura máxima de invierno (0.35), temperatura máxima verano (0.27) y temperatura máxima anual (0.24), pero negativamente con precipitación anual (0.44) y precipitación verano (0.41) (Cuadro 9).

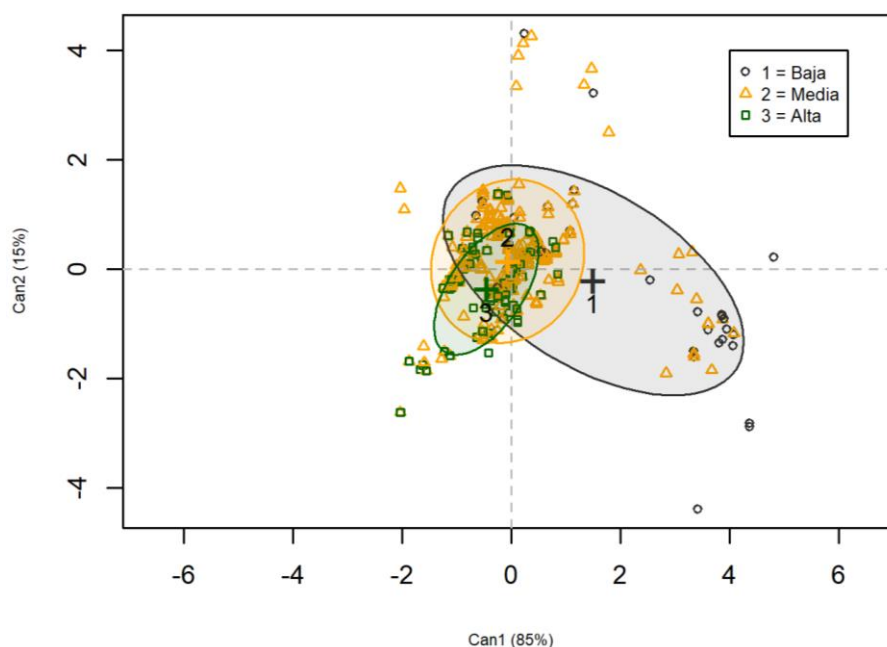


Figura 6. Clasificación de productividad de las funciones discriminantes de *Lippia graveolens* estudiadas en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

Estos resultados sugieren que la productividad del orégano está influenciada principalmente por variables climáticas. Lo destacable es la influencia de las temperaturas mínimas de la estación invernal, así como la temperatura máxima de verano, así como la correlación negativa con la precipitación.

Los resultados del ANOVA mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las clases de productividad para *A. lechuguilla*. Las variables que mostraron diferencias significativas fueron temperatura mínima verano, temperatura mínima invierno, temperatura máxima verano, temperatura máxima invierno, precipitación anual, precipitación verano, altitud, profundidad de suelo, suelo desnudo, hojarasca y cobertura basal (Cuadro 10). Mientras que para la especie *L. graveolens*, las variables que mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los niveles de productividad fueron la altitud, hojarasca, temperatura mínima verano, temperatura mínima invierno, temperatura mínima anual, temperatura máxima invierno, temperatura anual, precipitación invierno y exposición (Cuadro 11).

Cuadro 9. Estructura canónica total que influyen en la calidad de estación de *A. lechuguilla* y *L. graveolens* en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila, México.

Variable	Especies			
	<i>Agave lechuguilla</i>		<i>Lippia graveolens</i>	
	Can1	Can2	Can1	Can2
Altitud (msnm)	-0.20	-0.28	-0.11	-0.36
Profundidad de suelo (cm)	0.44	-0.40	0.03	0.05
Textura (fina, media, gruesa)	0.00	-0.16	0.00	0.00
Suelo desnudo (%)	0.33	0.26	0.07	-0.01
Hojarasca (%)	0.15	-0.29	0.09	0.37
Pedregosidad (%)	-0.33	-0.27	-0.09	-0.09
Cobertura basal (%)	0.31	0.45	-0.18	-0.07
Temp min ver (°C)	-0.12	-0.16	0.73	-0.25
Temp min inv (°C)	0.30	-0.13	0.78	0.05
Temp min anual (°C)	0.15	-0.11	0.80	-0.11
Temp max ver (°C)	0.00	0.18	0.27	-0.16
Temp max inv (°C)	0.21	0.17	0.35	0.12
Temp max anual (°C)	0.14	0.14	0.24	-0.20
Precip ver (mm)	-0.05	0.20	-0.41	-0.15
Precip Inv (mm)	0.00	-0.17	-0.19	0.04
Precip anual (mm)	0.06	0.29	-0.44	0.16
Exposición (rumbo)	-0.36	0.09	0.19	0.07
Pendiente (%)	-0.16	0.06	0.18	0.09

Can= Dimensión canónica, Tmin ver= Temperatura mínima verano, Tmin inv= Temperatura mínima invierno, Tmin anual= Temperatura mínima anual, Tmax ver= Temperatura máxima verano, Tmax inv= Temperatura máxima invierno, Tmax anual= Temperatura máxima anual, Pver= Temperatura verano, Pinv= Precipitación invierno, Panual= Precipitación anual, rumbo = N, S, E, W, NE, NW, SE, SW.

Los valores asociados a productividad alta para la especie *A. lechuguilla* fueron 14.78 °C de temperatura mínima verano, 5.53 °C de temperatura mínima invierno, °C 31.33 temperatura máxima verano, °C 22.49 temperatura máxima invierno, 357.85 mm de precipitación anual, 276.23 mm de precipitación verano, 1229 de altitud en msnm, 20.98 cm de profundidad de suelo, 20.62 % de suelo desnudo, 6.25% de hojarasca y 4.25% de cobertura basal. Estos datos pueden ser de utilidad al ser considerados como requerimientos de la especie para elaborar cartografía de productividad para la región árida del Desierto Chihuahuense en el norte de México.

Para la especie *L. graveolens*, los valores asociados a la productividad alta fueron 1412 de altitud, 2.70 % de hojarasca, 13.85 °C de temperatura mínima verano, 4.27 °C de temperatura mínima invierno, 9.45 °C de temperatura mínima anual, 23.27 °C de temperatura máxima invierno, 27.45 °C de temperatura máxima anual, 100 mm de precipitación invierno y una exposición con rumbo este. De la misma manera, estos datos podrían ser de importancia para generar cartografía para elaborar mapas de productividad para la región árida del Desierto Chihuahuense en el norte de México.

Cuadro 10. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables climáticas, relieve, suelo y dasométricas de *A. lechuguilla* por calidad de sitio.

Variable	Estadística			Productividad					
	CME	Valor de F	Pr > F	Baja	Media		Alta		
				Medias	Medias	Medias	Medias	Medias	
Altitud (m. s. n. m.)*	70618.16	14.57	0.0001	1325.78	a	1190.61	b	1229.39	b
Profundidad de suelo (cm)*	119.63	14.62	0.0001	26.20	a	20.53	b	20.98	b
Textura (fina, media y gruesa)	0.12	0.06	0.9456	Media	a	Media	a	Media	a
Suelo desnudo (%)*	884.88	5.99	0.0026	24.63	a b	28.32	a	20.62	b
Hojarasca (%)*	84.70	4.45	0.0119	9.07	a	6.54	b	6.25	b
Pedregosidad (%)	1170.77	2.98	0.0511	45.10	b	47.54	a b	53.16	a
Cobertura basal (%)*	123.81	7.50	0.0006	7.08	b a	7.70	a	4.25	b
Tmin ver (°C)*	1.86	14.71	0.0001	14.03	b	14.71	a	14.78	a
Tmin inv (°C)*	3.84	3.75	0.0239	6.12	a	5.67	b	5.53	b
Tmin anual (°C)	2.32	0.74	0.4761	10.70	a	10.88	a	10.82	a
Tmax ver (°C)*	2.28	7.10	0.0009	30.87	b	31.42	a	31.33	a
Tmax inv (°C)*	4.12	6.67	0.0012	23.32	a	22.76	b	22.49	b
Tmax anual (°C)*	2.69	2.96	0.0520	27.54	a	27.34	b a	27.12	b
Pver (mm)*	6297.53	4.10	0.0169	301.60	a	284.83	b a	276.23	b
Pinv (mm)	68.72	0.29	0.7473	100.40	a	100.43	a	100.90	a
Panual (mm)*	7067.98	6.11	0.0023	388.80	a	375.25	b a	357.85	b
Exposición (rumbo)	1.13	0.85	0.4286	Este	a	Este	a	Este	a
Pendiente (%)	8.43	1.30	0.2730	6.02	a	6.39	a	6.53	a

CME= Error Cuadrático Medio, Valor de F= estadística de F, Pr > F = valor de P, Tmin ver= Temperatura mínima verano, Tmin inv= Temperatura mínima invierno, Tmin anual= Temperatura mínima anual, Tmax ver= Temperatura máxima verano, Tmax inv= Temperatura máxima invierno, Tmax anual= Temperatura máxima anual, Pver= Temperatura verano, Pinv= Precipitación invierno, Panual= Precipitación anual, rumbo = N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, * variables que fueron significativamente diferentes en la productividad en $p \leq 0.05$.

Cuadro 11. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables climáticas, relieve, suelo y dasométricas de *L. graveolens* por calidad de sitio.

Variable	Productividad								
	Estadística			Baja			Alta		
	CME	Valor de F	Pr > F	Medias	Medias	Medias	Medias	Medias	Medias
Altitud (m. s. n. m.)*	32125.02	18.22	0.0001	1518.31	a	1395.11	b	1412.55	b
Profundidad de suelo (cm)	207.00	0.20	0.81	24.66	a	25.56	a	24.92	a
Suelo desnudo (%)	513.00	0.36	0.69	13.39	a	15.59	a	15.35	a
Hojarasca (%)*	36.01	7.83	0.0004	5.95	a	4.14	b	2.70	b
Pedregosidad (%)	946.33	0.60	0.54	57.43	a	60.32	a	62.01	a
Cobertura basal (%)	101.88	2.27	0.10	4.53	b	7.08	a	8.07	a
Tmin ver (°C)*	0.68	7.25	0.0008	13.51	a	13.86	b	13.85	b
Tmin inv (°C)*	1.49	73.30	0.0001	6.16	a	4.66	b	4.27	c
Tmin anual (°C)*	0.74	37.08	0.0001	10.40	a	9.66	b	9.45	b
Tmax ver (°C)	1.44	1.96	0.14	31.30	a	31.56	a	31.58	a
Tmax inv (°C)*	1.47	47.64	0.0001	24.77	a	23.55	b	23.27	b
Tmax anual (°C)*	1.16	26.13	0.0001	28.36	a	27.51	b	27.45	b
Pver (mm)	5096.31	1.24	0.29	340.96	a	333.96	a	344.53	a
Pinv (mm)*	26.47	5.46	0.004	97.87	b	99.65	a	100.00	a
Panual (mm)	4689.32	1.44	0.24	429.26	a	416.51	a	415.63	a
Exposición (rumbo)*	1.38	8.02	0.0004	Este	a	Sur	b	Sur	b
Pendiente (%)	3.94	0.57	0.57	5.97	a	6.18	a	6.04	a

CME= Error Cuadrático Medio, Valor de F= estadística de F, Pr > F = valor de PT, min ver= Temperatura mínima verano, Tmin inv= Temperatura mínima invierno, Tmin anual= Temperatura mínima anual, Tmax ver= Temperatura máxima verano, Tmax inv= Temperatura máxima invierno, Tmax anual= Temperatura máxima anual, Pver= Temperatura verano, Pinv= Precipitación invierno, Panual= Precipitación anual, rumbo = N, S, E, W, NE, NW, SE, SW, * variables que fueron significativamente diferentes en la productividad en $p \leq 0.05$.

4.6 Discusión

El conocimiento sobre la variación espacial de la productividad permite aplicar mejores prácticas de cosecha y de ordenamiento para el uso y conservación de los ecosistemas (Johnson et al., 1996; Martínez-Salvador et al., 2019). En ecosistemas forestales templados y tropicales, el método más común para estimar la productividad de terrenos forestales es el estudio del crecimiento en

altura de árboles dominantes pues este procedimiento es conocido como índice de sitio (Martínez-Salvador et al., 2019). Este método involucra datos cronológicos de edad y altura de árboles dominantes, generalmente coníferas o latifoliadas (Vargas-Larreta et al., 2017); sin embargo, en especies de zonas áridas es complicado generar información de la edad de los arbustos. Los resultados del análisis discriminante canónico mostraron influencia de variables de suelo y clima en relación con la productividad de lechuguilla, mientras que la productividad del orégano resultó ser influenciada por variables de clima y relieve. Estos resultados sugieren que el índice de valor de importancia que utilizamos en este estudio para clasificar niveles de productividad podría implementarse como una alternativa para clasificar la productividad de manera indirecta, ante la imposibilidad de contar con datos cronológicos de crecimiento de las especies arbustivas de zonas áridas.

Además, los resultados de este estudio sugieren que los sitios con alta productividad para el desarrollo de *Agave lechuguilla* incluyen características muy específicas de variables relacionadas con suelo y cobertura vegetal, tales como la profundidad de suelo, porcentaje de hojarasca o mantillo y el porcentaje de suelo desnudo, mientras que entre las variables climáticas destacan temperaturas mínimas y máximas estacionales, así como precipitación anual y de verano (Cuadro 10). Diversos autores también han descrito algunas características climáticas y de suelos en los que se desarrollan poblaciones de lechuguilla en el norte de México, aunque no se observa que hayan vinculado estos datos con la productividad de la especie (Castillo-Quiroz et al., 2014; Granados-Sánchez et al., 2011). Entre las características más citadas se destacan suelos pocos profundos, precipitación promedio de 200 mm, así como condiciones de poca precipitación y temperaturas extremas, y distribución en partes bajas de las sierras en alturas de 1229 msnm (Castillo-Quiroz et al., 2014; Houri y Machaka-Houri, 2016; Granados-Sánchez et al., 2011).

Para el orégano, las variables que mostraron diferencias significativas al ser comparadas entre los tres niveles de productividad clasificados con información

de abundancia y tamaños de las plantas fueron principalmente temperaturas máximas y mínimas estacionales, así como precipitación invernal (Cuadro 11). Los resultados climáticos al menos de las temperaturas extremas relacionados con la productividad del orégano se pueden presentar casi en toda la superficie del desierto chihuahuense (Granados-Sánchez et al., 2011), lo cual podría resultar de interés en relación con el comportamiento futuro de las poblaciones de esta especie, ante escenarios de cambio climático. Vargas-Piedra et al. (2020) mencionan que las temperaturas fría y las precipitaciones del invierno son importantes en el caso del crecimiento de la candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) en el desierto chihuahuense; mediante simulación espacial, ellos encontraron que la especie podría reducir sus poblaciones en el sur del país e incrementar sus áreas de distribución en el norte ante posibles efectos de calentamiento global, lo cual podría ser análogo para el orégano en su área de distribución; sin embargo, este supuesto deberá ser considerado en estudios en el futuro cercano.

Las variables climáticas y de suelos influyen sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Huang et al., 2016; Sun et al., 2021; Wu et al., 2019). Esto es debido que las temperaturas generan microclimas para la descomposición de la hojarascay así se aportan nutrientes para el crecimiento de las plantas (Chen et al., 2018). Este estudio permitió identificar relaciones entre algunas de las variables de los factores involucrados con la abundancia y tamaños de ambas especies estudiadas, principalmente porque el estudio se realizó en una zona extensa del desierto chihuahuense; sin embargo, estudios más intensos y específicos deben realizarse sobre las características físicas y químicas del suelo en relación con el crecimiento de estas especies, sobre todo ante escenarios de plantaciones con fines comerciales, ya que actualmente estas especies solo se cosechan en poblaciones silvestres (Patiño-Flores et al., 2021; Pequeño-Ledezma et al., 2012).

Las variables topográficas identificadas en este estudio fueron la altitud y la exposición en *A. lechuguilla* para la productividad alta. De acuerdo con los

resultados son pocos los factores topográficos que discriminan la productividad alta de la lechuguilla. Los sitios con pendientes mayor de 6% benefician las poblaciones de la lechuguilla, ya que probablemente reciben los mejores condiciones de la luz con lo cual se favorece el crecimiento de las plantas promoviendo mayor productividad en los sitios (Castillo-Quiroz et al., 2014; Zhang, Du, Yang, Song, Zeng, Peng, & Huang, 2022). Mientras que los valores asociados con la altitud van desde 1230 msnm; estos hallazgos coinciden con los encontrados por Castillo-Quiroz et al. (2014) en el establecimiento de una población potencial de *A. lechuguilla*. En *L. graveolens*, los factores topográficos no se identificaron en la productividad alta. Aunque se conoce que las poblaciones del orégano se desarrollan mejor en exposiciones con orientación sur y este (Ramírez-López et al., 2022), esto debido que reciben mayor cantidad de radiación solar. En concordancia con lo anterior, en este estudio la productividad alta fue significativamente diferente ($p < 0.05$) de la productividad baja

Finalmente, estos resultados complementan información de los factores ambientales y físicos que determinan la productividad de *A. lechuguilla* y *L. graveolens*. El análisis discriminante fue congruente en discriminar las variables que influyen en la productividad de las especies en estudio. De esta manera, los análisis multivariados ofrecen una oportunidad para discriminar variables en conjunto de factores (Bianchini et al., 2020). Entonces, en las zonas áridas y semiáridas se requiere más investigación sobre la distribución potencial de las especies.

4.7 Conclusiones

Las variables no bióticas de clima, suelo y relieve mostraron influencia sobre los niveles de productividad establecidos a priori con los datos de abundancia y tamaño de las plantas tanto para la especie *Agave lechuguilla*, como para *Lippia graveolens*.

Los niveles de productividad de la lechuguilla son influenciados por la profundidad de suelo, porcentaje de suelo desnudo, cobertura de mantillo, temperaturas extremas estacionales, así como por la precipitación de la estación de verano, mientras que la productividad del orégano es influenciada principalmente por variables climáticas como las temperaturas extremas estacionales y la precipitación invernal.

El conocimiento acerca de la influencia de las variables no bióticas sobre la productividad de ambas especies estudiadas podría ser útil para construir mapas de productividad y mejorar las prácticas para su manejo y conservación.

4.8 Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca de posgrado número 732643.

4.9 Literatura citada

Bagheri Bodaghabadi, M., Faskhodi, A. A., Salehi, M. H., Hosseinifard, S. J., & Heydari, M. (2019). Soil suitability analysis and evaluation of pistachio orchard farming, using canonical multivariate analysis. *Scientia Horticulturae*, 246, 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.069>

Bañuelos-Revilla, J. E., Palacio-Núñez, J., Martínez-Montoya, J. F., Olmos-Oropeza, G., & Flores-Cano, J. A. (2019). Distribución potencial y abundancia de candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*) en el norte de Zacatecas, México. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511657>

Bennett, A. C., Penman, T. D., Arndt, S. K., Roxburgh, S. H., & Bennett, L. T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, 43(11), 1692–1705. <https://doi.org/10.1111/ecog.05180>

Bertini, S. C. B., Azevedo, L. C. B., Stromberger, M. E., & Cardoso, E. J. B. N.

- (2015). Soil properties discriminating Araucaria forests with different disturbance levels. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(4), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S10661-015-4398-5>
- Bianchini, A., V.D. Moraes, P., J. Longhi, S., F. Adami, P., Rossi, P., & V. Batista, V. (2020). Multivariate analysis using a discriminant method for evaluating the techniques of weed management in soybean crop. *Planta Daninha*, 38, 1–8. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582020380100077>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Cartwright, J. M., Littlefield, C. E., Michalak, J. L., Lawler, J. J., & Dobrowski, S. Z. (2020). Topographic, soil, and climate drivers of drought sensitivity in forests and shrublands of the Pacific Northwest, USA. *Scientific Reports*, 10(1), 18486. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75273-5>
- Castillo-Quiroz, D., Martínez-Burciaga, O. U., Ávila-Flores, D. Y., Castillo-Reyes, F., & Sánchez-Chaparro, J. D. (2014). Identification of potential areas for establishment of plantations of *Agave lechuguilla* Torr. in Coahuila, Mexico. *Open Journal of Forestry*, 04(05), 520–526. <https://doi.org/10.4236/ojf.2014.45056>
- Chen, T., Xie, Y., Liu, C., Bai, Y., Zhang, A., Mao, L., & Fan, S. (2018). Trend analysis of relationship between primary productivity, precipitation and temperature in Inner Mongolia. *International Journal of Geo-Information*, 7(6), 214. <https://doi.org/10.3390/ijgi7060214>
- Cortés-Chitala, M. D. C., Flores-Martínez, H., Orozco-Ávila, I., León-Campos, C., Suárez-Jacobo, Á., Estarrón-Espinosa, M., & López-Muraira, I. (2021). Identification and quantification of phenolic compounds from mexican oregano (*Lippia graveolens* HBK) hydroethanolic extracts and evaluation of its antioxidant capacity. *Molecules*, 26(3), 702. <https://doi.org/10.3390/molecules26030702>

- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37(3), 451–460. <https://doi.org/10.2307/1930167>
- De Castro Oliveira, G., Francelino, M. R., Arruda, D. M., Fernandes-Filho, E. I., & Schaefer, C. E. G. R. (2019). Climate and soils at the Brazilian semiarid and the forest-Caatinga problem: new insights and implications for conservation. *Environmental Research Letters*, 14(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3d7b>
- Estadística Instituto Nacional de Geografía e Informática, (INEGI). (2022). Continuo de elevaciones mexicano. INEGI; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>
- Flores-Rentería, D., Delgado-Balbuena, J., Campuzano, E. F., & Curiel Yuste, J. (2023). Seasonal controlling factors of CO₂ exchange in a semiarid shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Science of The Total Environment*, 858, 159918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159918>
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (5ta edi).
- González-Medrano, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Instituto Nacional de Ecología.
- Granados-Sánchez, D., Martínez-Salvador, M., López-Ríos, G. F., Borja-De la Rosa, A., & Rodríguez-Yam, G. A. (2013). Ecología, aprovechamiento y comercialización del orégano (*Lippia graveolens* H. B. K.) en Mapimí, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2), 305–321. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.05.035>
- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados-Victorino, R. L., & Borja-De la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del desierto chihuahuense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 17, 111–130. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.10.102>
- Hernández-Herrera, J. A., Moreno-Reséndez, A., Valenzuela-Núñez, L. M.,

- Flores-Hernández, A., & Zamora Martinez, M. C. (2020). Distribución potencial de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19(2), 1–14. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.19.1>
- Houri, A., & Nisrine Machaka-Houri, N. (2016). Agave *Lechuguilla* as a potential biomass source in arid areas. *Journal of Sustainable Development of Energy*, 4(1), 89–93. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2016.04.0008>
- Huang, W.-D., Zhao, X.-Y., Zhao, X., Li, Y.-L., & Pan, C.-C. (2016). Environmental determinants of genetic diversity in *Caragana microphylla* (Fabaceae) in northern China. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(2), 269–278. <https://doi.org/10.1111/boj.12407>
- IMTA. (2001). Estaciones climatológicas (ERIC). Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/
- Johnson, K. H., Vogt, K. A., Clark, H. J., Schmitz, O. J., & Vogt, D. J. (1996). Biodiversity and the productivity and stability of ecosystems. In *Trends in Ecology and Evolution*, 11(9), 372–377. Elsevier Current Trends. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(96\)10040-9](https://doi.org/10.1016/0169-5347(96)10040-9)
- Li, X., Liu, X., Zhang, H., & Bao, W. (2022). Latitudinal patterns of climatic variables and influence of local topography on climatic variables in the dry valleys of southwestern China. *Journal of Mountain Science*, 19(5), 1348–1356. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7070-2>
- Martínez-Salvador, M., Hermosillo-Rojas, D. E., Mojica-Guerrero, A. S., & Prieto-Amparan, J. A. (2015). Potencial productivo y zonificación para el uso y manejo de especies forestales de zonas áridas .
- Martínez-Salvador, M., Mata-Gonzalez, R., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C. R., Prieto-Amparán, J. A., Vázquez-Quintero, G., & Villarreal-Guerrero, F. (2019). A spatial forestry productivity potential model for *Pinus arizonica* Engelm, a key timber species from northwest Mexico. *Sustainability*, 11(3), 829. <https://doi.org/10.3390/su11030829>

- Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R. D., & Pompa-García, M. (2013). Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(3), 35–49. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000300004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Mata-González, R., & Meléndez-González, R. (2005). Growth characteristics of mexican oregano (*Lippia berlandieri* schauer) under salt stress. *Southwestern Naturalist*, 50(1), 1–6. [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2005\)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2005)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2)
- Mei, G. (2014). Evaluating the power of GPU acceleration for IDW interpolation algorithm. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/171574>
- Murphy, P. C., Knowles, J. F., Moore, D. J. P., Anchukaitis, K., Potts, D. L., & Barron-Gafford, G. A. (2020). Topography influences species-specific patterns of seasonal primary productivity in a semiarid montane forest. *Tree Physiology*, 40(10), 1343–1354. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa083>
- Návar, J., Ríos-Saucedo, J., Pérez-Verdín, G., Rodríguez-Flores, F. de J., & Domínguez-Calleros, P. A. (2013). Regional aboveground biomass equations for North American arid and semi-arid forests. *Journal of Arid Environments*, 97, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.05.016>
- Ougahi, J. H., E. J. Cutler, M., & J. Cook, S. (2022). Assessment of climate change effects on vegetation and river hydrology in a semi-arid river basin. *PLoS ONE*, 17(8), e0271991. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271991>
- Patiño-Flores, A. M., Alanís-Rodríguez, E., García-García, E., González-Rodríguez, H., Aguirre-Calderón, O. A., & Molina-Guerra, V. M. (2021). Estructura y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco regenerado posterior a uso pecuario. *Polibotánica*, 52, 75–88. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.6>
- Peña-Rodríguez, A., Pelletier-Morreeuw, Z., García-Luján, J., Rodríguez-

- Jaramillo, M. del C., Guzmán-Villanueva, L., Escobedo-Fregoso, C., Tovar-Ramírez, D., & Reyes, A. G. (2020). Evaluation of *Agave lechuguilla* by-product crude extract as a feed additive for juvenile shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Research*, 51(4), 1336–1345. <https://doi.org/10.1111/are.14497>
- Pequeño-Ledezma, M. Á., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Yerena-Yamallel, J. I., Cuellar-Rodríguez, G., & Mora-Olivo, A. (2012). Análisis de la restauración pasiva post-pecuaria en el matorral espinoso tamaulipeco del noreste de México. *CienciaUAT*, 7(1), 48. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v7i1.39>
- Ramírez-López, X., Ramírez-Herrera, C., Velasco-García, M. V., & Cetina-Alcalá, V. M. (2022). Population structure and spatial distribution of oregano (*Lippia graveolens* H. B. K.) at the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 28(2), 289–303. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.04.024>
- Robles-Esparza, A., Robles-Berumen, H., Blanco-Macias, F., Martinez-Salvador, M., & Valdez-Cepeda, R. D. (2012). *Dasyilirion cedrosanum* Trelease (Nolinaceae) density varies depending on elevation and slope in the Northeast of Zacatecas, Mexico. *Ekoloji*, 21(85), 15–25. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2012.852>
- Sánchez-Medina, A., Ayuga-Téllez, E., Grande-Ortiz, M. A., González-García, C., & García-Abril, A. (2021). Iterative method of discriminant analysis to classify beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. *Forests*, 12(8), 1128. <https://doi.org/10.3390/f12081128>
- Sun, C., Zhou, Y., Fang, S., & Shang, X. (2021). Ecological gradient analysis and environmental interpretation of *Cyclocarya paliurus* communities. *Forests*, 12(2), 146. <https://doi.org/10.3390/f12020146>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-

- Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 437–455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vargas-Piedra, G., Valdez-Cepeda, R. D., López-Santos, A., Flores-Hernández, A., Hernández-Quiroz, N. S., & Martínez-Salvador, M. (2020). Current and future potential distribution of the xerophytic shrub candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) under two climate change scenarios. *Forests*, 11(5), 530. <https://doi.org/10.3390/f11050530>
- Wu, Z., Zhang, Z., & Wang, J. (2019). Estimating the productive potential of five natural forest types in northeastern China. *Forest Ecosystems*, 6(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0204-0>
- Zhang, L., Du, H., Yang, Z., Song, T., Zeng, F., Peng, W., & Huang, G. (2022). Topography and soil properties determine biomass and productivity indirectly via community structural and species diversity in Karst Forest, Southwest China. *Sustainability*, 14(13), 7644. <https://doi.org/10.3390/su14137644>

CAPITULO V

5.- CONCLUSIONES GENERALES

La biomasa de candelilla puede ser estimada ajustando una regresión con variables de fácil medición como diámetro de copa y diámetro de base. La ecuación Schumacher-Hall en su forma logarítmica puede predecir la biomasa de candelilla, lo cual es de utilidad para los estudios técnicos y programas de aprovechamiento forestal de la especie en la región norte de Chihuahua.

Por su parte, el análisis discriminante canónico mostró ser una alternativa para discriminar variables asociadas a la productividad de la lechuguilla y el orégano. Este análisis permitió estructurar el conjunto de variables de clima, suelo y relieve que influyen sobre las clases de productividad de las especies. El conocimiento generado en este estudio es una alternativa para la toma de decisiones de los administradores forestales para clasificar áreas de mayor potencial de crecimiento de las especies.

Este estudio revela que las especies estudiadas se influncian por diferentes patrones de distribución, por lo que se sugiere que el manejo y aprovechamiento de las especies de zonas áridas se realice por especie, no por grupos de productos como actualmente lo sugiere la regulación oficial.

Finalmente, la realización con estudios sobre la dinámica espacial de la productividad, biomasa y el volumen de las especies no maderables en las zonas áridas y semiáridas es una necesidad.

CAPITULO VI

6.- REFERENCIAS

- Aneseyee, A. B., Soromessa, T., Elias, E., & Feyisa, G. L. (2021). Allometric equations for selected *Acacia* species (*Vachellia* and *Senegalia* genera) of Ethiopia. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 34. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00196-1>
- Aranda-Ledesma, N. E., Bautista-Hernández, I., Rojas, R., Aguilar-Zárate, P., Medina-Herrera, N. del P., Castro-López, C., & Guadalupe Martínez-Ávila, G. C. (2022). Candelilla wax: Prospective suitable applications within the food field. In *LWT* (Vol. 159, p. 113170). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113170>
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., Romero-Méndez, U., Santana-Espinosa, S., Reyes-Rodríguez, C. M., Ríos-Saucedo, J. C., & Domínguez-Martínez, P. A. (2020). Climatic change and habitat availability for three sotol species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*, 12(8), 3455. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Bennett, A. C., Penman, T. D., Arndt, S. K., Roxburgh, S. H., & Bennett, L. T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, 43(11), 1692–1705. <https://doi.org/10.1111/ecog.05180>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Conti, G., Gorné, L. D., Zeballos, S. R., Lipoma, M. L., Gatica, G., Kowaljow, E., Whitworth-Hulse, J. I., Cuchiatti, A., Poca, M., Pestoni, S., & Fernandes, P.

- M. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7), 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>
- Daba, D. E., & Soromessa, T. (2019). The accuracy of species-specific allometric equations for estimating aboveground biomass in tropical moist montane forests: Case study of *Albizia grandibracteata* and *Trichilia dregeana*. *Carbon Balance and Management*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0134-8>
- de Castro Oliveira, G., Francelino, M. R., Arruda, D. M., Fernandes-Filho, E. I., & Schaefer, C. E. G. R. (2019). Climate and soils at the Brazilian semiarid and the forest-Caatinga problem: new insights and implications for conservation. *Environmental Research Letters*, 14(10), 104007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3d7b>
- Flores-del Angel, M. L., Foroughbakhch, R., Rocha-Estrada, A., Cárdenas-Ávila, M. L., Guzmán-Lucio, M. A., Hernández-Aguilar, Y. L., & Alvarado-Vázquez, M. A. (2013). Morphology, viability and germination of candelilla seeds (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc.). *Phyton*, 82, 161–167.
- Flores-Hernández, C. de J., Méndez-González, J., Sánchez-Pérez, F. de J., Méndez-Encina, F. M., López-Díaz, Ó. M., & López-Serrano, P. M. (2020). Allometric Equations for predicting *Agave lechuguilla* Torr. aboveground biomass in Mexico. *Forests*, 11(7), 784. <https://doi.org/10.3390/f11070784>
- Hernández-Herrera, J. A., Moreno-Reséndez, A., Valenzuela-Núñez, L. M., Flores-Hernández, A., & Zamora Martínez, M. C. (2020). Distribución potencial de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 19(2), 1–14. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2021.19.1>
- Hernández-Ramos, A., Cano-Pineda, A., Flores-López, C., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & Martínez Angel, L. (2019).

- Modelos para estimar biomasa de *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. en seis municipios de Coahuila. *Madera y Bosques*, 25(2), 1–13. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521806>
- Martínez-Salvador, M., Mata-Gonzalez, R., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C. R., Prieto-Amparán, J. A., Vázquez-Quintero, G., & Villarreal-Guerrero, F. (2019). A spatial forestry productivity potential model for *Pinus arizonica* Engelm, a key timber species from northwest Mexico. *Sustainability*, 11(3), 829. <https://doi.org/10.3390/su11030829>
- Martínez-Salvador, M., Valdez-Cepeda, R. D., & Pompa-García, M. (2013). Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(3), 35–49. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000300004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Mata-González, R., & Meléndez-González, R. (2005). Growth characteristics of Mexican oregano (*Lippia berlandieri* Schauer) under salt stress. *Southwestern Naturalist*, 50(1), 1–6. [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2005\)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2005)050<0001:GCOMOL>2.0.CO;2)
- Nyamjav, J., Batsaikhan, M.-E., Li, G., Li, J., Luvsanjamba, A., Jin, K., Xiao, W., Wu, L., Indree, T., & Qin, A. (2020). Allometric equations for estimating above-ground biomass of *Nitraria sibirica* Pall. in Gobi Desert of Mongolia. *PLoS ONE*, 15(9), e0239268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239268>
- Pando-Moreno, M., Pulido, R., Castillo, D., Jurado, E., & Jiménez, J. (2008). Estimating fiber for lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Agavaceae), a traditional non-timber forest product in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(11), 3686–3690. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.053>
- Ramírez-López, X., Ramírez-Herrera, C., Velasco-García, M. V., & Cetina-Alcalá,

V. M. (2022). Population structure and spatial distribution of oregano (*Lippia graveolens* H. B. K.) at the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 28(2), 289–303. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.04.024>

Rojas, R., Tafolla-Arellano, J. C., & Martínez-ávila, G. C. G. (2021). *Euphorbia antisyphilitica* Zucc: A source of phytochemicals with potential applications in industry. *Plants*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.3390/plants10010008>