



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

EL CAPULÍN (*Prunus serotina*), UNA ALTERNATIVA AGROFORESTAL PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN ZONAS SEMISECAS

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

GERARDO EMILIO BALDERAS ZAMORANO

Bajo la supervisión de:

DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA



APROBADA



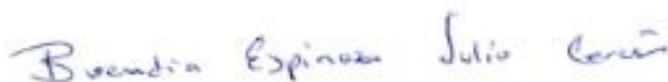
Chapingo, Estado de México, mayo de 2023

EL CAPULÍN (*Prunus serótina*), UNA ALTERNATIVA AGROFORESTAL PARA
LA REHABILITACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN ZONAS SEMISECAS

Tesis realizada por **GERARDO EMILIO BALDERAS ZAMORANO** bajo la
supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como
requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

DIRECTOR:



DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR:



DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NUÑEZ

ASESOR:



M.C. MAYRA CLEMENTINA ZAMORA ELIZALDE

CONTENIDO

RESUMEN GENERAL	XII
GENERAL ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo general.....	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. REVISIÓN DE LITERATURA	19
3.1 Cambio de uso de suelo y vegetación	19
3.1.1 Causas	20
3.1.2 Efectos.....	21
3.1.3 Degradación del suelo.....	22
3.1.4 Problemática social.....	24
3.1.5 Diagnóstico.....	25
3.1.6 Diagnóstico en la microcuenca Tula, México.....	26
3.2 Agroforestería	27
3.2.1 Agroforestería para la restauración del paisaje	28
3.2.2 Agroforestería para restaurar la productividad del suelo	28
3.3 Capulín	30
3.3.1 Nombres comunes en México	30
3.3.2 Distribución.....	31
3.3.3 Distribución potencial.....	31
3.3.4 Descripción.....	32
3.3.5 Desarrollo óptimo	33
3.3.6 Hábitat	33
3.3.7 Importancia ecológica.....	33
3.3.8 Vegetación asociada	33

3.3.9 Aspectos fisiológicos	34
3.3.10 Tolerancias.....	34
3.3.11 Desventajas.....	34
3.4 Experiencias con la planta	34
3.4.1 Usos múltiples	35
4. LITERATURA CITADA	37
5. EVALUACIÓN DE LA ADAPTACIÓN DE LA ESPECIE MULTIPROPÓSITO PRUNUS SEROTINA EN ZONAS SEMISECAS MEDIANTE ANÁLISIS FUNCIONAL DE CRECIMIENTO	45
5.1 Resumen	45
5.2 Abstract.....	46
5.3 Introducción	47
5.4 Materiales y métodos.....	49
5.4.1 Descripción de la zona de estudio	49
5.4.2 Diseño metodológico	51
5.4.3 Modelo de crecimiento.....	53
5.5 Resultados.....	54
5.6 Discusión	60
5.7 Conclusiones	63
5.8 Literatura citada	64
6. IMPLEMENTACIÓN DE UN ENFOQUE DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ADAPTACIÓN DE ESPECIES MULTIPROPÓSITO PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS	67
6.1 Resumen	67
6.2 Abstract.....	68
6.3 Introducción	69
6.4 Materiales y método.....	72

6.4.1 Área de estudio	72
6.4.2 Sitio Experimental.....	73
6.4.3 Especie objetivo	74
6.4.4 Diseño experimental	75
6.4.5 Muestreo de vegetación y medición de variables.	75
6.4.6 Determinación de las areas potenciales de plantación de la especie	76
6.4.7 Registros de presencia de especies	76
6.4.8 Variables edafoclimáticas	76
6.4.9 Ajuste y evaluación del modelo predictivo.	77
6.4.10 Evaluación de la supervivencia, el crecimiento vegetativo y el riesgo de mortalidad de la de las especies en condiciones de campo	78
6.4.11 Estimación de la supervivencia	78
6.4.12 Estimación del riesgo de muerte.	79
6.4.13 Estimación del crecimiento vegetativo.	80
6.5 Resultados.....	80
6.5.1 Registros de presencia	80
6.5.2 Ajuste y evaluación del modelo.	80
6.5.3 Estimación de la supervivencia	82
6.5.4 Estimación del riesgo de muerte	84
6.5.5 Estimación del crecimiento vegetativo.....	85
6.6 Discusión	87
6.6.1 Determinación de las áreas potenciales de plantación de la especie	87
6.6.2 Evaluación de la supervivencia	88
6.7 Conclusiones	90
6.8 Literatura citada	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de ejemplares de <i>Prunus serotina</i> registrados en Tropicos.org. Missouri Botanical Garden.	31
Figura 2. Localización de la zona de estudio.	50
Figura 3. Arreglo de los árboles de capulín en la parcela experimental.....	52
Figura 4. Diámetro acumulado observado (diam acum), diámetro acumulado predicho (diam acum pre) y tasa de crecimiento acumulado (razón de cambio) en plantas de capulín con y sin daño.....	55
Figura 5. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de diámetro en plantas de capulín con daño.	56
Figura 6. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de diámetro en plantas de capulín sin daño.	57
Figura 7. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín con y sin daño.....	58
Figura 8. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín con daño.	59
Figura 9. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín sin daño.	60
Figura 10. Área de estudio y ubicación del sitio experimental dentro de la cuenca de Tula, México.....	74
Figura 11. Distribución de la especie <i>Prunus serotina</i> de acuerdo con el diseño experimental en el área experimental, Ejido San Felipe Teotitlán, Estado de México.....	75
Figura 12. Hábitat potencial para la especie <i>Prunus serotina</i> , en la cuenca de Tula, México, utilizando MaxEnt.	82

Figura 13. Función de supervivencia estimada $[S(t)]$ del capulín durante el periodo de julio de 2021 a junio de 2022.	83
Figura 14. Función de riesgo estimada durante el periodo de julio de 2021 a junio de 2022.	84

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Estimación de la supervivencia mediante el estimador de Kaplan-Meier para la especie <i>Prunus serotina</i> evaluada durante julio de 2021 a junio de 2022.	83
Cuadro 2. Variables morfológicas que influyen en el riesgo de muerte en (<i>Prunus serotina</i>)	85
Cuadro 3. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 1: Ciclo verano.	85
Cuadro 4. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 2: Ciclo otoño.	86
Cuadro 5. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 3: Ciclo invierno.	86
Cuadro 6. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 4: Ciclo primavera.	87

DEDICATORIA

A dios por permitirme llegar hasta este momento y cuidar siempre de mi familia y amigos.

A mi madre, Alma Refugio Zamorano Olvera quien me ha enseñado que todo es posible con esfuerzo y dedicación, eres mi mayor ejemplo, te amo.

A mi padre Eusebio Emilio Balderas Jiménez por su amor y consejos que me han ayudado a ser quien soy, te amo.

A mi hermana Sayzetti quien me ha apoyado en las buenas y en las malas, siempre estaremos juntos. A mi sobrino Leonardo quien me ha enseñado un amor que no conocía.

A mi mami Lena por su amor y consejos que me han ayudado a ser una mejor persona.

A mi familia, gracias por todo el apoyo y cariño.

A quienes ya no están físicamente, pero si en el corazón.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por el apoyo otorgado mediante la beca de estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma máter, así como al Departamento de Suelos por brindarme la oportunidad de formarme personal y profesionalmente.

A la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por el apoyo brindado para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Julio César Buendía Espinoza, por su tiempo, consejos y guía para poder llevar acabo esta investigación.

A la Dra. Rosa María García Núñez por sus consejos para el trabajo en campo.

A la M.C. Mayra Clementina Zamora Elizalde, por sus consejos y enseñanzas que contribuyeron a realizar esta investigación.

A la Dra. Elisa del Carmen Martínez Ochoa, por su dedicación y enseñanzas que permitieron que esta investigación tomara un mejor rumbo.

Al Dr. Miguel Uribe Gómez, por sus enseñanzas y consejos durante todo el proceso de formación.

A quien acompañó mis pasos durante tantos años, gracias por el cariño y apoyo, siempre estaré agradecido por todo lo vivido.

A mis amigos, compañeros de la maestría, y todos quienes a través de sus conocimientos, amistad, energía y entusiasmo han estado conmigo.

A los ejidatarios de la comunidad de San Felipe Teotitlán por el apoyo brindado para la realización del trabajo de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Gerardo Emilio Balderas Zamorano
Fecha de nacimiento	06 de octubre de 1994
Lugar de nacimiento	Texcoco, Estado de México
CURP	BAZG941006HMCLMR03
Profesión	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
Cédula profesional	11561302

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, 2009-2012.
Licenciatura	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Universidad Autónoma Chapingo, 2012-2016.
Maestría	Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, 2021-2022

RESUMEN GENERAL

El capulín (*Prunus serotina*), una alternativa agroforestal para la rehabilitación de suelos degradados en zonas semisecas¹

La degradación natural se ha visto acelerada por actividades antropogénicas como el uso del suelo y el cambio de vegetación, razón por la cual la problemática medioambiental ha cobrado tanta importancia en la actualidad. El objetivo de este estudio fue evaluar la adaptación del capulín (*Prunus serotina*) mediante sistemas agroforestales en la zona semiárida del ejido San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, dentro de la microcuenca Tula, México, para disminuir la degradación del suelo y contribuir al desarrollo de microclimas favorables para otras especies. Durante un periodo de doce meses, se evaluó la supervivencia y las variables morfológicas diámetro y altura en plantas de capulín establecidas en un diseño agroforestal basado en un arreglo de árboles en lindero. Utilizando puntos de presencia de capulín y variables edafoclimáticas, se desarrolló un modelo de distribución de especies para identificar áreas aptas de distribución dentro de la cuenca. Se evaluó el crecimiento vegetativo de la población, de individuos dañados y no dañados mediante modelos de crecimiento. Los resultados indicaron que el modelo de distribución de especie generado fue muy preciso (área bajo la curva [AUC] ≥ 0.7), mostrando áreas de sitios potenciales de plantación (>0.4). La tasa de supervivencia de la especie alcanzó un nivel marginal (~69 %). La variable morfológica diámetro final redujo el riesgo de muerte de la especie en un 100 %. Los modelos de crecimiento vegetativo indicaron un comportamiento análogo tanto para el diámetro como la altura, aunque el crecimiento fue mayor en los individuos sin daños. Los individuos con daños mostraron estrategias de adaptación a los factores externos y condiciones del sitio. Este estudio permite determinar si una especie es capaz de adaptarse a los suelos y a las condiciones climáticas del lugar donde se establece, permitiendo recomendar la agroforestería como técnica de gestión de suelos degradados.

Palabras clave: Adaptación, Distribución, Supervivencia, Crecimiento acumulado, Fisiología

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Gerardo Emilio Balderas Zamorano

Director de tesis: Julio César Buendía Espinoza

GENERAL ABSTRACT

Capulin (*Prunus serotina*) an agroforestry alternative for the rehabilitation of degraded soils in semi-dry areas.²

The natural degradation has been accelerated by anthropogenic activities like the use of the ground and the change of vegetation, that's why environmental issues have become so important in the actuality. The objective of this study was to evaluate the adaptation of capulin (*Prunus serotina*) through agroforestry systems in the semi-arid zone of the ejido San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, within the Tula micro-watershed, Mexico, to reduce soil degradation and contribute to the development of favorable microclimates for other species. During a period of twelve months, the survival and morphological variables diameter and height were evaluated in capulin plants established in an agroforestry design based on a border tree arrangement. Using points of capulin presence and edaphoclimatic variables, a species distribution model was developed to identify suitable areas of distribution within the watershed. The vegetative growth of the population of damaged and undamaged individuals was evaluated using growth models. The results indicated that the specie distribution model generated was very accurate (area under the curve [AUC] ≥ 0.7), showing potential areas sites of planting (>0.4). The survival rate of the species reached a marginal level (~69 %). The morphological variable final diameter reduced the risk of death of the species by 100 %. Vegetative growth models indicated analogous behavior for both diameter and height, although growth was greater in undamaged individuals. Individuals with damage showed adaptation strategies to external factors and site conditions. This study makes it possible to determine whether a specie is capable of adapting to the soils and climatic conditions of the site where it is established, making it possible to recommend agroforestry as a management technique for degraded soils.

Palabras clave: Adaptation, Distribution, Survival, Cumulative growth, Physiology.

² Thesis Master of Science in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Gerardo Emilio Balderas Zamorano

Advisor: Julio Cesar Buendía Espinoza

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de cambio de uso del suelo y vegetación han sido constantes en nuestro país, no obstante, éstos se incrementaron en velocidad y extensión principalmente a partir de la segunda mitad del siglo XX; Challenger y Dirzo et al. (2009) afirman que para 1976 la cobertura vegetal original del país se había reducido en un 38 %; hacia 1993 sólo cubría el 54 % y para el año 2002 ocupaba únicamente el 50 % de su superficie original. Las actividades que más consecuencias han tenido sobre la vegetación natural son la ganadería, la agricultura, el crecimiento de los asentamientos humanos y las zonas urbanas. Esta situación la podemos observar en la microcuenca Tula, México, donde tras llevarse a cabo el diagnóstico del uso del suelo (Zamora et al., 2020), se identificó que se han presentado cambios significativos en la pérdida de cobertura vegetal, provocando problemas como la degradación del suelo, la cual es entendida como, la pérdida temporal o permanente de la capacidad productiva biológica y económica del suelo (Zavala-Cruz et al., 2011).

Dada esta problemática, es necesario plantear alternativas de rehabilitación de los suelos degradados que además respondan a las necesidades socioeconómicas de la población, entendiendo como rehabilitación la reparación de los procesos, la productividad y servicios de un ecosistema sin tener como objetivo producir el estado original, rehabilitación se puede usar para indicar cualquier acto de mejoramiento desde un estado degradado (Society for Ecological Restoration International, 2004). Uno de los aspectos más importantes para la rehabilitación del suelo, es la selección de las especies que se utilizaran para dicho fin, ya que estas deben ser tolerantes a las condiciones del sitio, se pueden seleccionar especies nativas o exóticas y así construir modelos que ayuden en el proceso de rehabilitación o restauración de ecosistemas (Rosa-Mera & Monroy-Ata, 2006), sin embargo se suelen proponer especies sin conocer las zonas aptas para su establecimiento.

Una de las alternativas para identificar estas zonas, es la modelación de la distribución de especies (SDM), los cuales identifican las zonas potenciales para el establecimiento y desarrollo de especies considerando el entorno biofísico (Qin et al., 2017; Regos et al., 2019). Algunos modelos de distribución también utilizan conceptos como el de nicho ecológico, el cual describe de forma general, el rango de condiciones ambientales, físicas y bióticas, en las cuales una especie, o más precisamente, una población local, puede vivir y perpetuarse exitosamente. Existe una plétora de enfoques ENM, que varían en el grado en que los procesos se incorporan explícitamente. Los ENM correlativos y mecanicistas pueden verse como dos puntos finales de ese continuo (Dormann et al., 2012; Soberón et al. 2017). Los ENM correlativos predicen distribuciones relacionando estadísticamente las distribuciones actuales (presencias o abundancias) con las capas ambientales (Elith et al., 2006; Guisan & Thuiller, 2005). Por el contrario, los modelos de nicho mecanicistas modelan explícitamente los procesos que limitan el rango, a menudo a partir de principios de equilibrio de masa y calor (Kearney & Porter, 2019). La decisión de elegir entre cualquiera de los dos enfoques debe responder a los objetivos del estudio, así como a la información y recursos disponibles para que este se lleva a cabo.

Dentro de la zona de estudio fueron realizados dos estudios utilizando la modelación de nichos ecológicos con la finalidad de evaluar ciertas especies con potencial para la rehabilitación del sitio, el primero de ellos respecto a las especies *Macroptilium atropurpureum* y *Vicia sativa* (Zamora et al., 2020) donde se encontró que estas especies tienen un potencial muy bajo de distribución en la región por lo que no se recomienda introducirlas en la microcuenca como una opción de rehabilitación ya que no tendrán un desarrollo óptimo. El segundo de ellos con la especie *Leucaena collinsii* (Aguilar-Díaz et al., 2020) donde se encontró que el área de distribución en la microcuenca es baja. Toda vez que los resultados de las especies evaluadas en la zona de estudio demuestran que no son una opción viable para la rehabilitación del suelo, es necesario continuar la búsqueda de aquellas especies que puedan adaptarse a las condiciones del sitio.

El capulín (*Prunus serotina*) es una especie arbórea o arbustiva nativa de Norteamérica, perennifolio o caducifolio, de 5 a 15 m de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 1.2 m, se caracteriza por ser una especie de crecimiento moderado a rápido, dominante en la sucesión secundaria, puede establecerse bien después de perturbaciones como fuego, tala y ciclones (Avendaño-Gómez et al, 2015). El capulín es conocido desde épocas prehispánicas por el consumo de su fruto y semilla, así como por el uso de sus hojas y madera (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Olszewska, 2007; Raya-Pérez et al., 2012).

Debido a su frondoso follaje, se ha usado como árbol ornamental y barrera rompevientos; y por su tolerancia a la sequía y a los suelos pobres ha sido considerada una especie importante en rehabilitación de terrenos erosionados y restauración ecológica (Starfinger et al., 2003). Dado lo anterior, se considera que el capulín es una especie con potencial para la rehabilitación de suelos degradados que puede proveer más de un bien o servicio, por lo que puede considerarse su uso para prácticas como las agroforestales, no obstante, el capulín es una especie considerada como sub utilizada (Guzmán et al., 2020) ya que existen muy pocos estudios relacionados con su fisiología, crecimiento, morfología, relaciones genéticas y propagación, lo cual genera incertidumbre acerca de las zonas aptas de su distribución.

En conjunto con la modelación de zonas aptas de distribución y debido a que el éxito del establecimiento en campo depende de la variación genética y su interacción con las condiciones ambientales (relación planta-suelo-atmósfera) y factores ambientales como la disponibilidad de luz, temperatura y agua (Pessarakli, 2002). Se vuelve de gran importancia describir el crecimiento de las plantas mediante una aproximación cuantitativa, una de las herramientas más útiles para esto es el análisis de crecimiento, el cual utiliza datos simples y básicos para describir e interpretar el crecimiento de las plantas en un ambiente determinado (Hunt, 1978). Así mismo en cualquier proceso de rehabilitación, es necesario garantizar que las especies propuestas superen la fase de

establecimiento, esto se logra cuando hay altos niveles de supervivencia y crecimiento (Cerrillo et al., 2006), lo cual está relacionado con la capacidad de adaptación de las especies a un hábitat determinado (Sigala et al., 2015). Por ello el objetivo de esta investigación fue evaluar la adaptación del capulín (*Prunus serotina*) a través del análisis de crecimiento funcional y el análisis de supervivencia para identificar las zonas aptas de distribución dentro de la microcuenca Tula, México para su posible uso como especie agroforestal en la rehabilitación de suelos degradados.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la adaptación del capulín (*Prunus serotina*) a través del análisis de crecimiento funcional y el análisis de supervivencia para identificar las zonas aptas de distribución dentro de la microcuenca Tula, México para su posible uso como especie agroforestal en la rehabilitación de suelos degradados.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar la adaptabilidad de *Prunus serotina* en un área degradada de clima templado semiárido, ubicada en la Cuenca de Tula en México, para la rehabilitación de suelos degradados, mediante el análisis funcional del crecimiento acumulado en diámetro y altura.
2. Determinar la adaptabilidad de *Prunus serotina* en un área degradada de clima templado semiárido, ubicada en la Cuenca de Tula en México, para la rehabilitación de suelos degradados a través de la agroforestería, mediante la identificación de sus zonas potenciales de distribución, la evaluación de su sobrevivencia, la evaluación de sus variables morfológicas y la evaluación de su riesgo de mortalidad.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Cambio de uso de suelo y vegetación

La vegetación natural juega un papel primordial en la naturaleza por sus diversas funciones ecosistémicas y prestar servicios a la sociedad humana (Galicía & Zarco-Arista, 2014). En primer lugar, alberga una gran diversidad de organismos y hábitats para la vida silvestre animal; tiene un papel fundamental en la protección de los suelos contra la erosión, permite la recarga de agua, la fertilidad del suelo regula el clima y elabora la energía que sustenta las redes tróficas (Balvanera et al., 2009; Maass et al., 2005). En segundo lugar, provee madera para construir refugios, recursos forestales no maderables, materiales y materias primas, alimentos y filtra el agua para su almacenamiento (Balvanera et al., 2009; Galicía & Zarco-Arista, 2014).

Es así como, históricamente las sociedades humanas han dependido de la vegetación, primero para la recolección de los recursos que provee, después a través de sistemas agroforestales, y en la actualidad proveyendo servicios ecosistémicos en los ambientes rurales y urbanos. La vegetación natural y el suelo no solo se han aprovechado como fuentes de alimento, materiales y bienestar, también han sido la base del desarrollo económico, una fuente de capital y del funcionamiento de los mercados. Es decir, la vegetación natural es esencial para el bienestar tanto de las poblaciones locales en el corto y el largo plazo, así como para el desarrollo y la solidez de las economías nacionales y la subsistencia de la biosfera terrestre (Galicía & Zarco-Arista, 2014; Maass et al., 2005).

Los cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal son el componente principal en el deterioro a escala global, regional y local, y han sido documentados como el segundo problema ambiental a nivel global. Si bien los procesos de cambio de uso del suelo y vegetación han sido constantes en nuestro país, éstos se incrementaron en velocidad y extensión principalmente a partir de la segunda mitad del siglo XX; Challenger y Dirzo et al. (2009) afirman que para 1976 la

cobertura vegetal original del país se había reducido en un 38 %; hacia 1993 sólo cubría el 54 % y para el año 2002 ocupaba únicamente el 50 % de su superficie original. En particular la cobertura de la vegetación original en México se ha perdido principalmente debido al Cambio de Uso de Suelo (CUS) y en consecuencia también ha cambiado en su estructura y composición, lo cual se refleja en la presencia de la vegetación secundaria (CONAFOR, 2012).

3.1.1 Causas

Los estudios del cambio de la vegetación y uso del suelo se han dirigido a entender las tasas de deforestación, es decir la magnitud del cambio y su distribución espacial, dejando de lado sus causas, lo cual impide tomar medidas preventivas y hallar soluciones. En la década del 2000, se inició una línea de investigación acerca de las causas del cambio de uso del suelo y de la vegetación, con el objeto de entender los factores que los determinan. Estas causas pueden ser directas (próximas) e indirectas (subyacentes) en distintas escalas espaciotemporales, y sus consecuencias se expresan también en diversas escalas. Las causas directas se originan en las actividades humanas y generalmente operan a escala local (Lambin et al., 2001). Las causas indirectas están relacionadas con factores sociales, demográficos, económicos, tecnológicos, culturales y biofísicos; y operan más difusamente (a distancia) en escala regional (provincias o países) o global.

Las causas del cambio de uso del suelo difieren en su origen, naturaleza, extensión geográfica, duración e intensidad. Pueden actuar independientemente o en sincronía con otras (Lambin et al., 2003), y a menudo interactúan con una o más causas próximas (Verburg et al., 2006) sugieren que los impactos diferenciales en el paisaje son una demostración del impacto de los cambios macroeconómicos que se pueden presentar sobre los patrones de uso del suelo a nivel regional.

Las actividades humanas y la creciente demanda por bienes como alimento, vivienda, agua potable y servicios ambientales generan constantemente, y en

amplias escalas geográficas, una presión sobre los recursos naturales con grandes impactos, la mayoría de ellos negativos, sobre la estructura, funcionamiento y distribución de estos (Challenger & Dirzo et al., 2009; Vitousek et al., 1997).

Las actividades que más consecuencias han tenido sobre la vegetación natural son la ganadería, la agricultura y el crecimiento de los asentamientos humanos y las zonas urbanas. Mientras que las dos primeras han tenido un impacto significativo desde antes de la década de los 70 del siglo XX, la última ha registrado un incremento importante a partir de esa década (Sánchez et al., 2008), constituyéndose en la actualidad en el CUS más importante de algunas regiones del país (SEMARNAT, 2008).

3.1.2 Efectos

A nivel de cuenca, la vegetación cumple con un gran número de funciones que ayudan a mantener la estabilidad y correcto funcionamiento del intercambio de materia y energía cuenca arriba-cuenca abajo (Matthews et al., 2000). La pérdida y degradación de la vegetación natural, así como la velocidad a la que están ocurriendo dichos cambios, desencadenan procesos negativos —a distintas escalas espaciales y temporales— muchas veces difíciles de revertir. Esto compromete los servicios ecosistémicos en las cuencas, como la estabilización del suelo, la regulación del volumen y periodicidad de los caudales y la purificación e infiltración del agua, por mencionar algunos (Matthews et al., 2000; Revenga et al., 1998).

De acuerdo con Lambin et al. (2001), dentro de los aspectos que se pueden ver afectados por el CUS están a) la alteración de las comunidades vegetales, incluyendo las pérdidas de la diversidad biológica (material genético, especies, géneros, y tipos de vegetación); b) la alteración de la dinámica vegetal, con pérdidas de biomasa y productividad, contaminación de agua y suelo o inadecuado manejo del fuego; y c) la afectación de la capacidad de los sistemas biológicos para recuperarse de las perturbaciones antropogénicas.

Por otro lado, el CUS puede alterar, radicalmente, la cubierta vegetal aun en lapsos de tiempo breves, lo que provoca alteraciones en las propiedades físicas, químicas y microbianas del suelo. Los aportes continuos de materia orgánica, en forma de mantillo, reducen la densidad aparente y la erosión, e incrementan la fertilidad, la tasa de infiltración y la retención de agua; en consecuencia, la biomasa vegetal se mantiene (Huang et al., 2006; Jia et al., 2011). Igualmente, conduce a una pérdida de carbono en el suelo, resultado de diversos grados de perturbación humana directa o indirecta, que constituye un importante factor de cambio global (Smith et al., 2016).

Los factores edáficos como el pH, niveles de nutrimentos, así como la calidad y cantidad de materia orgánica del suelo cambian con la profundidad (Eilers et al., 2012; Rumpel & Kögel-Knabner, 2011).

3.1.3 Degradación del suelo

Como se ha descrito anteriormente el CUS es una problemática ambiental, social y económica que tiene consecuencias, a corto, mediano y largo plazo. Uno de los recursos más afectados por esta actividad y al que no se le brinda la atención necesaria es el suelo. Debido, en gran medida, a que no es un bien directamente consumible y a la percepción errónea de que es renovable en la escala de tiempo humana, no obstante, se calcula que un centímetro de espesor de suelo puede tardar en formarse alrededor de cien años (FAO, 2015; Gardi et al., 2014; Guevara et al., 2012; Zinck, 2005). La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, 1984) define a este como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo; no obstante el suelo no solo es un material sin vida, es considerado además un cuerpo natural en el que ocurren diversas interacciones dinámicas con factores abióticos y bióticos. Debido a estas interacciones, el suelo juega un papel fundamental para el

mantenimiento de la vida en la tierra ya que funge como el principal soporte de la vegetación.

Tanto en México como a nivel mundial, el suelo sufre una degradación acelerada como consecuencia principalmente de diversas actividades humanas. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), coloca a México entre los primeros lugares en este aspecto (con cerca de 50 % de suelos severa y muy severamente degradados), comparado con el resto de sus países miembros. Este deterioro se encuentra asociado a la falta de conocimiento sobre el papel ambiental que juega el suelo, así como de los límites para su aprovechamiento en función de sus aptitudes y acerca de las técnicas apropiadas para que pueda ser sustentable. Este desconocimiento se traduce, entre otros aspectos, en la falta de políticas de usos del suelo y en prácticas que lejos de contribuir a su protección, aceleran su degradación, sin considerar que su pérdida puede ser irreversible (SEMARNAT, 2015).

La degradación del suelo se refiere a los procesos inducidos por las actividades humanas que disminuyen su productividad biológica y su capacidad actual o futura para sostener la vida humana (Oldeman, 1998), así como en la disminución de la capacidad de los ecosistemas para producir bienes y servicios ambientales tanto directos como indirectos (FAO, 2015). Resulta de la interacción de factores ambientales, como el tipo de suelo, la topografía y el clima, así como de factores socioeconómicos como la densidad poblacional, tenencia de la tierra, las políticas ambientales y los usos y gestión del suelo (Gardi et al., 2014).

El suelo sufre procesos de degradación de forma natural, sin embargo, los procesos antropogénicos han aumentado la presión y la velocidad de la degradación. La complejidad de las presiones que se ejercen sobre el suelo y de sus consecuencias deriva de la intervención de múltiples factores entre los cuales destacan, por su importancia, la topografía, el uso del suelo, el sobrepastoreo, la densidad poblacional y la pobreza. Su combinación varía de una región a otra del

país, lo que da lugar a condiciones que favorecen o agravan su degradación (Instituto Nacional de Ecología, 2004).

Según el estudio Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana (SEMARNAT & CP, 2003) el 44.9 % del territorio nacional presentaba evidencias de degradación en 2002, mientras que en el 55.1 % restante no mostraba indicios de degradación aparente. Dicho estudio además divide la degradación en procesos (es decir, degradación química y física y erosión hídrica y eólica), en tipos específicos dentro de cada proceso, niveles (ligero, moderado, fuerte y extremo) y causas de la degradación. Con respecto a la superficie afectada por los diferentes procesos de degradación, la degradación química ocupaba el primer lugar (34.04 millones de ha, 17.8 % de la superficie terrestre del país), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones, 11.9 %), eólica (18.12 millones, 9.5 %) y la degradación física (10.84 millones, 5.7 %).

La erosión hídrica se define como la remoción laminar o en masa de los materiales del suelo por medio de las corrientes de agua. Por acción de éstas se puede deformar el terreno y originar cavernas y cárcavas. En la erosión eólica, el agente de cambio del terreno es el viento. La degradación química involucra procesos que conducen a la disminución o eliminación de la productividad biológica del suelo y está fuertemente asociado con el incremento de la agricultura. La degradación física se refiere a un cambio en la estructura del suelo cuya manifestación más conspicua es la pérdida o disminución de su capacidad para absorber y almacenar agua (SEMARNAT, 2008).

3.1.4 Problemática social

Entre las consecuencias sociales y económicas del cambio de uso del suelo se encuentra el cambio de actividades productivas (por ejemplo, la transición de agricultura de temporal y ganadería a agricultura de invernadero) debido a la falta de recursos financieros y naturales. Por lo tanto, las familias campesinas optan por diversificar su producción y desarrollar estrategias múltiples en las que la agricultura ya no contribuye necesaria o exclusivamente a la economía

campesina. Algunas de las nuevas actividades son las agropecuarias de bajo rendimiento, las actividades extra-finca, la migración y la conformación de redes sociales de ayuda mutua, ya que las familias buscan diversificar sus estrategias de ingreso para acceder a mejores condiciones de vida sin abandonar totalmente la vocación agrícola (Ramos et al., 2009). Empero, la falta de inversión en tecnología para la agricultura y ciertos factores ambientales limitantes (como la falta de agua, suelos calcáreos, vientos, heladas, granizadas, entre otros), suelen conducir a una degradación aún mayor de la cubierta vegetal natural.

Mas et al. (2009), mencionan que dentro de la problemática del CUS debe abordarse una visión de conservación con la finalidad de abordarse en políticas que puedan adaptarse en los casos particulares de cada región, además de contribuir con que las bases de datos utilizadas en la evaluación del CUS cuenten con un mecanismo de evaluación de su calidad de información. Tal evaluación permite no solamente conocer el grado de fiabilidad con el cual el mapa presenta la distribución de las coberturas del suelo, o los cambios de cobertura, sino también sus sesgos y defectos específicos.

Palacios-Sánchez et al (2009), valoró el impacto de las actividades económicas en los recursos suelo y vegetación con la finalidad de comparar los beneficios obtenidos por el CUS y los costos de recuperación de la superficie afectada.

3.1.5 Diagnóstico

El diagnóstico del CUS y vegetación puede abordarse de distintas formas, en el caso de México, una de las formas más empleadas es mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ejemplo del uso del SIG en el diagnóstico del CUS son los estudios realizados por Cuevas et al. (2010), Mas et al. (2009) y Trucíos-Caciano et al. (2011), entre otros.

La media mundial predice que México debería tener alrededor de 0.7 ha de cubierta arbolada per cápita para la presente década. No obstante, los datos actuales, indican que México alberga tan solo 0.5 ha de cubierta forestal per

cápita, y la predicción para el 2025 indica será de 0.3 ha per cápita; es decir por debajo de la media mundial (Velázquez et al., 2002). Se estima que las selvas mexicanas cubrían alrededor de un 20 % de la superficie nacional, y que entre 1976 y 1980 la deforestación anual de éstas fue de 160,000 ha/año (Maser et al., 1997).

3.1.6 Diagnóstico en la microcuenca Tula, México

Conforme a lo reportado por Zamora et al. (2020), la microcuenca Tula ha presentado cambios significativos en uso de suelo, del periodo 1992-2000, la cobertura con mayor cambio fue la forestal con 63 %, el 52 % del área forestal pasó a área agrícola, además la población incremento 14 %, que indica que la deforestación ocurrió por la necesidad de producir bienes para satisfacer necesidades de la población, y porque no había políticas públicas que regularan el aprovechamiento de los recursos forestales. Durante el periodo 2000-2017, el área forestal solo disminuyó 6 %, debido a la implementación de políticas públicas federales y a las políticas estatales del estado de Hidalgo, las cuales contribuyeron a contrarrestar la deforestación y a recuperar áreas abandonadas. La tendencia del uso de suelo en la microcuenca es que la superficie continúe sin cambio, las áreas agrícolas existentes se mantengan y sigan incrementándose hasta que sean abandonadas debido a su disminución en la productividad e invadidas por las zonas urbanas, las cuales incrementarán debido al crecimiento de la población.

3.2 Agroforestería

Debido al deterioro e impacto que ocasionan los sistemas agrarios, se han planteado nuevas prácticas agrícolas que permitan un uso sostenible de los recursos naturales. En este sentido, la agroforestería es uno de los múltiples enfoques que permiten restaurar los bosques y tierras agrícolas degradados, contribuyendo a la restauración del paisaje (FAO, 2017).

Según la FAO (2017), la agroforestería se refiere a los sistemas y técnicas de uso de la tierra en los que se utilizan deliberadamente plantas leñosas perennes (árboles, arbustos, palmeras, bambúes, etc.) en la misma unidad de terreno que ocupan cultivos o animales, con algún tipo de ordenación espacial o secuencia temporal. La agroforestería puede diversificar y mejorar la producción agrícola, ofreciendo a la vez otros beneficios económicos, sociales y ambientales a los usuarios de la tierra.

Los sistemas agroforestales pueden brindar una amplia gama de servicios ecosistémicos: entre otros, servicios de apoyo (por ejemplo, polinización y ciclo del carbono); servicios de regulación (por ejemplo, protección contra el viento, mejor calidad del agua, control biológico de plagas y fijación del nitrógeno); y servicios de aprovisionamiento (por ejemplo, productos alimentarios y no alimentarios para el consumo en el hogar y para generar ingresos). Si están bien diseñados y manejados, los sistemas agroforestales pueden ayudar a restaurar los ecosistemas y contribuir a la conservación de la biodiversidad y a la adaptación al cambio climático y mitigación de sus efectos (FAO, 2017).

Nicholls y Altieri (2002), afirman que aquellos agroecosistemas que tengan mayor biodiversidad presentan más procesos que contribuyen con la productividad y calidad de los sistemas en contraste con los sistemas tradicionales (monocultivos) en los cuales la baja calidad de los recursos naturales tiende a llevar al sistema a un estado de degradación.

3.2.1 Agroforestería para la restauración del paisaje

Dentro de los sistemas agroforestales, existen diversas tecnologías que contribuyen con la restauración al aumentar la productividad de la tierra al mismo tiempo que resuelven las exigencias de los agricultores de bajos ingresos. La presencia de árboles ofrece una gran cantidad de ventajas debido a que estos son elementos mitigadores del cambio climático global al brindar distintos servicios ambientales como la retención del suelo, el control de erosión, la recarga de mantos acuíferos, la producción de bienes (madera, forraje, medicina, alimento), entre otros (Morison & Morecroft, 2008; Rodríguez-Blanco et al, 2010).

En conjunto con los beneficios anteriores, los sistemas agroforestales proveen hábitat para diversas especies que contribuyen con la dispersión de semillas y a mejorar la variabilidad genética, propiciando un ecosistema saludable (Saborío, 2016). Otro aspecto importante, es que estos proporcionan múltiples beneficios ambientales a la sociedad, entre los cuales se encuentran: la regulación de ciclo del agua, la disminución de la erosión del suelo, servicios culturales y de soporte que contribuyen con los procesos de renovación del suelo y mantenimiento de la biodiversidad (Nicholls & Altieri, 2002).

3.2.2 Agroforestería para restaurar la productividad del suelo

A nivel mundial se ha evidenciado una disminución significativa de la fertilidad del suelo como consecuencia de la degradación de la tierra y de la sobreexplotación, ocasionando la reducción de la productividad del suelo, aumentando la inseguridad alimentaria en las comunidades locales. La fertilidad del suelo disminuye cuando las cantidades de nutrientes extraídos del suelo exceden las cantidades de nutrientes que se agregan a los suelos arables, así mismo puede disminuir por acción de la erosión y de prácticas agrícolas inapropiadas, como el monocultivo, el laboreo frecuente, la remoción de los residuos de las plantas y la falta de períodos de barbecho adecuados (FAO, 2017).

El uso de árboles en las practicas agroforestales brinda ciertas características que contribuyen a aumentar la fertilidad de los suelos, entre estas se encuentran

la gran producción de biomasa, la fijación del nitrógeno, las asociaciones micorrícicas, las redes densas y profundas de raíces finas y la capacidad de crecer en suelos pobres. Los árboles pueden contribuir a reconstituir la materia orgánica del suelo al succionar los nutrientes de capas más profundas del suelo y de rocas desgastadas y agregarlos a las capas superficiales del suelo con la hojarasca (Acharya & Kafle, 2009).

Las prácticas agroforestales más utilizadas para controlar la degradación del suelo son las cortinas rompevientos y cinturones de protección como árboles en lindero, estos, ofrecen además de madera, otros productos derivados de los árboles que contribuyen a aumentar la productividad de los cultivos al reducir los daños ocasionados por agentes como el viento, la fuerte radiación que ocasiona la evaporación del suelo, así mismo, promueven buenas prácticas como la mejora de la polinización, lo cual contribuye a mejorar la salud de los agroecosistemas. Jiménez et al. (2001) menciona que dentro de un sistema agroforestal es importante establecer especies frutales, ya que estas atraen una gran cantidad de polinizadores.

3.3 Capulín

El capulín es una especie nativa de América y que se conforma por un complejo botánico de cinco subespecies [*capuli* (sur de México a Guatemala), *eximia* (Meseta Edwards de Texas), *hirsuta* (Georgia y Alabama), *serotina* (oriente de los Estados Unidos y Canadá, reapareciendo en el oriente mexicano) y *virens* (occidente de Texas hasta Arizona y el norte de México)], cuyas bases de identificación taxonómica y distribución geográfica fueron propuestos por McVaugh (1951). Este autor afirmó que las cinco subespecies son razas geográficas cuyos caracteres morfológicos y hábitats son distintivos, pero que su reconocimiento visual en el campo sería imposible si no fuera porque están geográficamente segregadas en la naturaleza, ya que presentan variación continua y cierto grado de superposición en casi todos los caracteres utilizados para distinguirlas.

En México se han hecho algunas revisiones parciales del complejo botánico, diferenciando morfológicamente con dificultad a las tres subespecies presentes en el país (*capuli*, *serotina* y *virens*; Fresno-Ramírez et al., 2011; Rzedowski & Calderón de Rzedowski, 2005). Todos estos trabajos han resaltado la complejidad para separar los grupos intraespecíficos debido a las similitudes morfológicas y, de acuerdo con Fresno-Ramírez et al. (2011), esto ha conducido a la subutilización de los recursos genéticos del capulín.

3.3.1 Nombres comunes en México

Al ser una especie nativa, el capulín presenta una gran cantidad de nombres comunes entre los que se encuentran: capulín, capulín blanco (Rep. Mex.), capulín (Mesa Central), cerezo (Ario de Rosales, Mich.); shencua, shengua, xengua (l. tarasca, Mich.), cusabi (l. tarahumara, Chih.), uasiqui, Jeco (l. guarigia, Chih.), pakshumk (l. mixe, Oax.), t-nundaya (l. mixteca, Oax.), tzu'uri (l. cora, Nay.), paté, shimal-ma-lu (l. chontal, Oax.), capulitaunday (l. zapoteco, Oax.), xeugua (Mich.) y detze, Ghohito (l. Otomí).

3.3.2 Distribución

Al capulín se le encuentra en los siguientes estados de la República Mexicana: Coahuila, Chiapas, Chihuahua, Ciudad de México, Durango, Estado de México, Hidalgo, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas (Figura 1). Principalmente en las regiones montañosas en altitudes de hasta 2,500 msnm o más.



Figura 1. Distribución de ejemplares de *Prunus serotina* registrados en Tropicos.org. Missouri Botanical Garden.

3.3.3 Distribución potencial

Estudios realizados para comprender el impacto potencial del cambio climático en los hábitats y áreas de distribución natural del capulín, sugieren que en México desaparecerán áreas actualmente aptas para la especie y la consecuente erosión genética inevitablemente resultaría en la pérdida de la variabilidad del complejo (Guzmán et al. 2018; Segura et al., 2018). No obstante, estos trabajos también indican que en México el clima del futuro favorecerá la aparición de nuevas áreas

aptas para la especie, y estas podrían usarse para establecer zonas de cultivo de la especie con fines forestales.

Adicionalmente, el comportamiento invasor de la especie en Europa (Aerts et al., 2017; Camenen, Porté & Benito Garzón, 2016) muestra que el capulín es capaz de enfrentar exitosamente los retos ambientales propios de la colonización de nuevos hábitats y estimula a pensar que podrá hacer lo mismo frente a la variación climática ocasionada por el calentamiento global.

3.3.4 Descripción

El capulín es un árbol o arbusto monopódico, perennifolio o caducifolio, de 5 a 15 m (hasta 38 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 1.2 m., tiene una copa ancha de forma ovoide que produce una sombra densa. Sus hojas son estipuladas, simples, alternas, cortamente pecioladas, ovadas a lanceoladas, de 5 a 16 cm de largo por 2 a 5 cm de ancho, con margen aserrado; haz verde oscuro y brillante. Presenta un tronco largo y recto en el bosque, aunque en los claros puede ser corto y ancho, sus ramas son alternas, erguido-extendidas, lampiñas, escabrosas por la presencia de muchas lenticelas esparcidas. La corteza del capulín es café o grisácea casi lisa y glabra, exceptuando las ramas tiernas que a veces son pubescentes; tiene flores numerosas, pequeñas y blancas, agrupadas en racimos axilares colgantes y largos, de 10 a 15 cm, con pedicelos de 5 a 10 mm de largo.

El fruto del capulín se considera como una drupa globosa de color negro rojizo en la madurez, de 12 a 20 mm de diámetro con sabor agridulce y algo astringente que contiene una sola semilla esférica y rodeada por un endocarpio o hueso leñoso (almendra) de sabor amargo. Posee un sistema radical de superficial y extendido a medianamente profundo, la mayoría de las raíces ocupan los primeros 60 cm del suelo (Avendaño-Gómez et al., 2015)

3.3.5 Desarrollo óptimo

El desarrollo óptimo del capulín está en función de diversos factores tanto bióticos como abióticos, así como de las interrelaciones entre los mismo, en los apartados siguientes se mencionan las condiciones actuales en las que se desarrolla.

3.3.6 Hábitat

Se desarrolla sobre pendientes acentuadas y se le puede encontrar en zonas de cultivo, habita principalmente en muchos lugares templados y fríos de México.

El capulín puede desarrollarse en distintos tipos de suelos entre los que se encuentran aquellos que son: pedregoso oscuro, somero, profundo con abundante materia orgánica, regosol eútrico, cambisol, pedregoso oscuro somero, andosol mólico, acrisol órtico, toba andesítica, ácido, húmedo (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011).

3.3.7 Importancia ecológica

Se le considera como una especie primaria que puede tener hábitos secundarios. Es intolerante a la sombra, se desarrolla principalmente en claros (pionera), es una especie dominante en la sucesión secundaria que puede establecerse bien después de perturbaciones como fuego, tala y ciclones. Los árboles nunca llegan a la parte alta del dosel de bosques en estadios sucesionales tardíos, pero si hay plántulas en el sotobosque que pueden sobrevivir hasta 5 años (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011).

3.3.8 Vegetación asociada

La vegetación que se asocia con el capulín es la siguiente: bosque de encino, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña (cerca de su límite superior) y pastizales, aunque como se mencionó anteriormente se le suele encontrar también en zonas de cultivo.

Algunas de las especies con las que se le asocia naturalmente son: *Pinus tenuifolia*, *Abies religiosa*, *Oreopanax xalapensis*, *Tilia sp.*, *Pseutotsuga sp.*, *Acer sp.*, *Arbutus sp.*, *Dendropanax sp.* y *Ternstroemia sp.*

3.3.9 Aspectos fisiológicos

Es una especie de moderado a rápido crecimiento, las plántulas crecen de 5 a 10 cm en un mes, es un árbol intolerante por lo que, aunque puede persistir en condiciones de sombra crecerá mejor en un ambiente libre de ella, puede vivir de 40 a 60 años; y se caracteriza por presentar capacidad de rebrote.

El capulín empieza a producir frutos a los 5 años, la máxima producción de semillas se da después de los 30 años, producen buena cosecha en intervalos de 1 a 5 años. La regeneración de los árboles es buena debido a que el banco de semillas natural se recarga cada año con los frutos que caen al suelo.

3.3.10 Tolerancias

Es una especie demandante de luz, firme al viento, puede resistir sequías, fuego y daño por termitas, además es tolerante a heladas y ciertos grados de contaminación ambiental. Puede desarrollarse en suelos ácidos, suelos compactos y pedregosos, algunas veces a suelos húmedos y suelos someros.

3.3.11 Desventajas

La especie es intolerante a la sombra, puede ser susceptible al daño por hongos (fruto, hojas) e insectos (hoja) como orugas, gusanos y polillas.

3.4 Experiencias con la planta

El capulín es un árbol común en las zonas boscosas templadas subhúmedas de México que se explota principalmente en la recolección de frutos silvestres y en huertos de traspatio, y que tiene potencial para aprovechamiento agroforestal. Es un recurso sub aprovechado y todavía poco estudiado, por lo que hacen falta estudios de todo tipo, incluyendo variación genética.

Callo (2013) identificó el uso del capulín dentro de las prácticas agroforestales en Adolfo López Mateos, Tlaxcala. La vegetación afín a los suelos de tepetate es, por lo general, secundaria, pero con un alto grado de persistencia, en las que predominan pteridofitas y espermatofitas (Vibrans, 1997).

Se han emprendido intentos de repoblamiento con especies arbóreas avecindadas como casuarina (*Casuarina equisetifolia*), acacia (*Acacia retinoides*) y eucalipto (*Eucaliptus* sp.); especies forestales, como pino (*Pinus* spp.) y ciprés (*Cupressus* spp.) (Pedraza et al., 1987); especies arbustivas, como tepozán (*Buddleia cordata*), cotoneaster (*Cotoneaster pannosus*), tlaxistle (*Amelanchier denticulata*) y fresno (*Tecoma stans*) (Guerra y Garzón, 1992); frutales, como el durazno (*Prunus persica*) y capulín (*Prunus serotina*); y especies suculentas, como nopal (*Opuntia* spp.) y maguey (*Agave* spp.) (Coca, 1999). Se ha identificado que el capulín es empleado como seto vivo que, además de desempeñar funciones de protección física de las parcelas, cursos de agua y caminos, se usan como barrera física para frenar la escorrentía.

3.4.1 Usos múltiples

El capulín es conocido desde épocas prehispánicas por el consumo de su fruto y semilla, así como por el uso de sus hojas y madera (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Olszewska, 2007; Raya-Pérez et al., 2012). Debido a su frondoso follaje, se ha usado como árbol ornamental y barrera rompevientos; y por su tolerancia a la sequía y a los suelos pobres ha sido considerada una especie importante en rehabilitación de terrenos erosionados y restauración ecológica (Niembro et al., 2010; Starfinger et al., 2003); en el ámbito alimenticio, el capulín forma parte de la dieta mexicana y popularmente sus frutos se consumen frescos, secos o como ingredientes de otras preparaciones (e.j., jaleas, tamales o licores) (Niembro et al., 2010; Raya-Pérez et al., 2012). Su madera se utiliza como fuente de energía (leña) o como materia prima para realizar diversos trabajos de ebanistería (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Niembro et al., 2010), en

EE. UU. hay plantaciones comerciales con fines forestales (Barnd & Ginzel, 2008; Wang & Pijut, 2014).

A la especie se le han atribuido propiedades medicinales como expectorante, sedante y antiespasmódica; por esto sus frutos y hojas se usan en infusiones para combatir la tos (Mendoza-Castelán & Lugo-Pérez, 2010). También se ha demostrado que sus inflorescencias y hojas son excelente fuente de antioxidantes (Olszewska, 2007); además, forma parte de los sistemas agrícolas en la región central de México desde la época prehispánica, sobre todo en Tlaxcala (Altieri & Trujillo, 1987).

Se puede encontrar en diferentes agroecosistemas como los huertos familiares (espacios ubicados en el patio o alrededor de las viviendas), las terrazas (sitios con inclinación en los cuales se construyen muros de tierra y se siembran especies vegetales siguiendo las curvas de nivel, para evitar la erosión y conservar la humedad), parcelas de temporal y los “metepantles” (metl-maguey; pantli-pared; en nahuatl), que son sistemas para evitar la erosión y delimitar los terrenos de cultivo con plantas de maguey (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Altieri & Trujillo, 1987).

Avendaño-Gómez et al. (2015) menciona que, de acuerdo con los otomíes de Ixtenco, conservar y sembrar árboles de capulín en los campos de cultivo es benéfico para el sistema agrícola. Esto fue confirmado por Altieri y Trujillo (1987) y por Martínez (1998), quienes encontraron que los árboles del capulín son elementos importantes dentro de los sistemas agrícolas tlaxcaltecas por ser una especie multipropósito con funciones de conservación del suelo, y adición de nutrimentos como nitrógeno, fósforo y calcio. Además, se han propuesto sistemas basados en los agroecosistemas mencionados, como las terrazas de muro vivo que evitan la pérdida de suelos con pendiente (Gómez et al., 2002).

4. LITERATURA CITADA

- Acharya, A. K. & Kafle, N. (2009). Land degradation issues in Nepal and its management through agroforestry. *Journal of Agriculture and Environment*, 10: 133-143.
- Adriano-Morán, C.C., & McClung de Tapia, E. (2008). Trees and shrubs: the use of wood in prehispanic Teotihuacan. *Journal of Archaeological Science*, 35(11), 2927-2936. doi: 10.1016/j.jas.2008.06.001
- Aerts, R., Ewald, M., Nicolas, M., Piat, J., Skowronek, S., Lenoir, J., Hattab, T., Garzón-López, C.X., Feilhauer, H., Schmidtlein, S., Rocchini, D., Decocq, G., Somers, B., Van De Kerchove, R., Denef, K., & Honnay, O. (2017). Invasion by the alien tree *Prunus serotina* alters ecosystem functions in a temperate deciduous forest. *Frontiers in Plant Science*, 8, 179. doi: 10.3389/fpls.2017.00179
- Aguilar-Díaz I., Buendía-Espinoza J. C., Cahuich-Damián J. E., Morales-García A., Martínez-Hernández P. A., & Zamora-Elizalde M. C. (2020). Análisis de adaptabilidad de *Leucaena collinsii* en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 11, 1233-1245.
- Altieri, M. A. & Trujillo, J. (1987). "The Agroecology of Corn Production in Tlaxcala, México", *Human Ecology*, 15(2): 189-220.
- Avendaño-Gómez, A., Lira-Saade, R., Madrigal-Calle, B., García-Moya, E., Soto-Hernández, M., & Romo de Vivar-Romo, A. (2015). Manejo y síndromes de domesticación del capulín (*Prunus serotina* Ehrh ssp. capuli (Cav.) Mc Vaugh) en comunidades del estado de Tlaxcala. *Agrociencia*, 49(2), 189-204.
- Balvanera, P., Cotler, H., Aburto Oropeza, O., Aguilar Contreras, A., Aguilera Peña, M., Aluja, M., & Guevara Sanginés, A. E. (2009). *Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos*.
- Barnd, B. D. & Ginzel, M. D. (2008). Causes of gummosis in black cherry (*Prunus serotina*). FNR-229-W. *USDA Forest Service and Purdue University*. Recuperado de <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/FNR/FNR-229W.pdf>
- Callo, C. D. (2013). Prácticas agroforestales y especies de uso múltiple para la rehabilitación y conservación de suelos volcánicos en Adolfo López Mateos, Tlaxcala: percepción de los agricultores. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 13(4), 117-134.
- Camenen, E., Porté, A., & Benito Garzón, M. (2016) American trees shift their niches when invading Western Europe: evaluating invasion risks in a changing climate. *Ecology and Evolution*, 6, 72637275. doi: 10.1002/ece3.2376
- Cerrillo, R. M. N., del Campo García, A., & Segarra, J. C. (2006). Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta.

In *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: estado actual de conocimientos* (pp. 31-46). Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

- Challenger, A., & Dirzo, R. (2009). Tendencias de cambio y estado de la biodiversidad, los ecosistemas y sus servicios. Estado de conservación y tendencias de cambio. *Capital Natural de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México, 35-72.
- Coca, E. (1999). *Sistema de rehabilitación y recuperación productiva de suelos erosionados: un modelo para la conservación de los recursos naturales del municipio de Lázaro Cárdenas, Tlaxcala*. (Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2012). *Inventario nacional forestal y de suelos*. Informe 2004-2009. Coordinación General de Planeación e Información. Gerencia de Inventario Forestal y Geomática.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *Ficha técnica Prunus serotina*. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/60-rosac6m.pdf. (Consultada el 16 de junio de 2021)
- Cuevas, M. L., Garrido, Pérez, J. L., & González, D. I. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. *Cotler, H., coord. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte IAP México, DF p, 96-103*.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García-Marquéz, J.R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. & Lautenbach, S. (2012). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 35: 001-020.
- Eilers, K. G., S. Debenport, Anderson S., & Fierer N. (2012). Digging deeper to find unique microbial communities: The strong effect of depth on the structure of bacterial and archaeal communities in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 50: 58-65.
- Elith, J., C. Graham, R. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. Hijmans, F. Huettmann, J. Leathwick, A. Lehmann, L. Jin, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. T. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz and N. E. Zimmermann. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29(2):129-151.
- FAO. (2015). *Alianza mundial por el suelo. sección ¿Por qué una Alianza Mundial por el Suelo*. Consultada en: www.fao.org/globalsoilpartnership/es/.

- FAO. (2017). *Agroforestería para la restauración del paisaje*. Roma, Italia. Consultada en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/4c40fe3e-df0b-479a-8c75-bb4877a4d4e8/>.
- Fresnedo-Ramírez, J., Segura, S., & Muratalla-Lúa, A. (2011). Morphovariability of capulín (*Prunus serotina* Ehrh.) in the centralwestern region of Mexico from a plant genetic resources perspective. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 58(4), 481-495. doi: 10.1007/s10722-010-9592-2
- Galicia L. y Zarco-Arista Alba Esmeralda (2014) Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review, *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 10:4, 275-288, DOI: 10.1080/21513732.2014.973907.
- Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló, et al. (Eds). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg.
- Gómez, S. U., Nicolás, N. F., & Fernández, A. T. (2002). Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia*, 36(2), 161-168.
- Guerra, V. y Garzón C. (1992). "Crecimiento de cinco especies forestales y su relación con la recuperación de suelos de Tlaxcala, México", en Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, 20-26 de octubre 1991, *Terra* (10) núm. especial.
- Guevara, M., C. Aguilar, C. Arroyo, F. González & Larson J. (2012). La diversidad de los datos sobre los suelos de México: perfiles y clases, escalas y modelos continuos. Conabio. *Biodiversitas* 105: 13-16.
- Guisan, A. & Thuiller, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, v. 8, n. 9, p. 993-1009, 2005. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guzmán, F. A, Segura-Ledesma, S. D., & Almaguer-Vargas, G. (2020). El capulín (*Prunus serotina* Ehrh.): árbol multipropósito con potencial forestal en México. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611866. doi: 10.21829/myb.2020.2611866
- Guzmán, F. A., Segura, S., & Fresnedo-Ramírez, J. (2018). Morphological variation in black cherry (*Prunus serotina* Ehrh.) associated with environmental conditions in Mexico and the United States. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65, 2151-2168. doi: 10.1007/s10722-018-0681-y
- Huang, Z. L., L. D. Chen, B. J. Fu, Y. H. Lu, Y. L. Huang and J. Gong. (2006). The relative efficiency of four representative cropland conversions in reducing water erosion: evidence from long-term plots in the loess Hilly Area, China. *Land Degradation & Development* 17: 615-627.

- Hunt, A. (1978). The sociological movement in law. En: The Sociological Movement in Law. Palgrave Macmillan, London. pp. 1-10
- Instituto Nacional de Ecología. (2004). *Perspectivas del Medio Ambiente en México: GEO México 2004*. México.
- Jia, X. X., M. A. Shao, X. R. Wei, R. Horton and X. Z. Li. (2011). Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma* 160: 281-291
- Jiménez, F., Muschler, R. & Kopsell, E. (2001). *Funciones y aplicaciones de los sistemas Agroforestales*. Proyecto Agroforestal CATIE, Turrialba, Costa Rica. 187 p
- Kearney, M. R., & Porter, W. P. (2019). NicheMapR - an R package for biophysical modelling: the ectotherm and Dynamic Energy Budget models. *Ecography*. doi:10.1111/ecog.04680
- Lambin, E. F., B. L. Turner & Geist H. J. (2001), The causes of land-use and landcover change: Moving beyond myths, *Global Environmental Change*, 11, 261-269.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). *Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions*. Annual review of environment and resources, 28(1), 205-241.
- Maass, J. M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G. C., Mooney, H. A., Ehrlich, P., ... & Sarukhán, J. (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and society*, 10(1).
- Martínez, S. T. (1998). *La Diáspora Tlaxcalteca, la Colonización Agrícola del Norte Mexicano*. Ediciones del Gobierno del Estado de Tlaxcala. Tlaxcala., México. 165 p.
- Mas, J. F., Velázquez, A., y Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).
- Masera, O. R., Ordóñez, M. J., & Dirzo, R. (1997). Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic change*, 35(3), 265-295
- Matthews, E., Payne, R., Rohweder, M., & Murray, S. (2000). *Pilot analysis of global ecosystems: forest ecosystems*. World Resources Institute.
- McVaugh, R. (1951). A revision of the North American black cherries (*Prunus serotina* Ehrh., and relatives). *Brittonia*, 7(4), 279-315. doi: 10.2307/2804698
- Mendoza-Castelán, G., & Lugo-Pérez, R. (2010). *Farmacia viviente: conceptos, reflexiones y aplicaciones*. Universidad Autónoma Chapingo. Disponible

en:http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/hidalgo/Documents/Agricultura%20Familiar/LIBRO%20GMC_Farmacia_Viviente_2010%20DR.%20GUILLERMO%20MENDOZA%20CASTELAN.pdf

- Morison, J. I., & Morecroft, M. D. (Eds.). (2008). *Plant growth and climate change*. John Wiley & Sons.
- Nicholls, C. y Altieri, M. (2002). *Biodiversidad y diseño agroecológico: un estudio de caso de manejo de plagas en viñedos. Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* (Costa Rica) N° 65: 50-64. Consultado en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2029E/A2029E.PDF>
- Niembro Rocas, A., Vázquez Torres, M., & Sánchez Sánchez, O. (2010). *Árboles de Veracruz: 100 especies para la reforestación estratégica* (pp. 8687). México: Gobierno del Estado de Veracruz. Recuperado de https://www.sev.gob.mx/servicios/publicaciones/colec_veracruzsigloXXI/ArbolesVeracruz100especies.pdf
- Oldeman, L. (1998). *Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation*. Wageningen: ISRIC.
- Olszewska, M. (2007). Quantitative HPLC analysis of flavonoids and chlorogenic acid in the leaves and inflorescences of *Prunus serotina* ehrh. *Acta chromatographica*, 19, 253-269.
- Palacios-Sánchez, J. E., Mejía-Saenz, E., Oropeza-Mota, J. L., Martínez-Menes, M. R., & Figueroa-Sandoval, B. (2009). Impacto de las actividades económicas en los recursos suelo y vegetación. *Terra Latinoamericana*, 27, 247-255.
- Pedraza, C. E., Rodriguez, F. C., & Fierros, G. A. M. (1987). Establecimiento de cinco especies forestales en tres tipos de tepetate de la zona de Tequexquahuac a Coatepec, Estado de México. *Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural, Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, México*.
- Pessaraki, M. (2002). *Handbook of plant and crop physiology* (2 ed.). New York: Marcel Decker Inc. 973 p.
- Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R.W., Ma, F., Jian, Z., Xu, G., & Pei, S. (2017). Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch, an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 10, 139-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2017.02.004>
- Ramos Pérez, P. P., M. R. Parra Vázquez, S. H. Daumás, O. B. H. Hernández (2009), "Estrategias de vida, sistemas agrícolas e innovación en el municipio de Oxchuc, Chiapas". *Revista de Geografía Agrícola*, vol. 41, pp. 83-104.
- Raya-Pérez, J. C., Aguirre-Mancilla, C. L., Tapia-Aparicio, R., Ramírez Pimentel, J.G., & Covarrubias-Prieto, J. (2012). Storage proteins characterization

- and mineral composition of black Cherry seed (*Prunus serotina*). *Polibotánica*, 34, 203-215.
- Regos A., Gagne, L., Alcaraz, S. D., Honrado, J. P., & Domínguez, J. (2019). Effects of species traits and environmental predictors on performance and transferability of ecological niche models. *Scientific Reports*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40766-5>
- Revenga, C., S. Murray, J. Abramovitz y A. Hammond, (1998). *Watersheds of the World. Ecological Value and Vulnerability*, World Resources Institute, Washington, D.C.
- Rodríguez-Blanco, M. L., Taboada-Castro, M. M., & Taboada-Castro, M. T. (2010). Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW Spain. *Land Degradation & Development*, 21(2), 161-170.
- Rosa-Mera, C. J. D. L., y Monroy-Ata, A. (2006). Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 9, 96-100.
- Rumpel, C. and I. Kögel-Knabner. (2011). Deep soil organic matter a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil* 338: 143-158.
- Rzedowski, J. y Calderón de Rzedowski, G. (2005). *Prunus serotina* Ehrh. In J. Rzedowski and G. Calderón de Rzedowski (Eds.), *Flora del Bajío y regiones adyacentes* (pp. 101-111). Pátzcuaro, Michoacán, México: Instituto de Ecología A. C. Recuperado de <http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOBA/Flora%20135-Rosaceae.pdf>
- Saborío, M. F. C. (2016). Agroforestería y biodiversidad: La importancia de los sistemas agroforestales en la conservación de especies. *Repertorio Científico*, 19, 1-4.
- Sánchez Colón, S., A. Flores Martínez, I. A. Cruz-Leyva y A. Velázquez. (2008). *Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas*. II Estudio de país. CONABIO, México.
- Segura, S., Guzman-Diaz, F., Lopez-Upton, J., Mathuriau, C., & LopezMedina, J. (2018). Distribution of *Prunus serotina* Ehrh. In North America and its invasion in Europe. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6, 111-124. doi: 10.4236/gep.2018.69009
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2008). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales*. México. 2008. México, D. F.
- SEMARNAT y CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000*. México.

- SEMARNAT. (2015) *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Edición 2015.
- Sigala RJA, González TMA, Prieto RJA (2015) Survival of *Pinus pseudostrobus* Lindl. plantations in terms of the production system and pre-conditioning in the nursery. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6:20–31
- Smith, P., J. I. House, M. Bustamante, J. Sobock, R. Harper, G. Pan, P. C. West, J.M. Clark, T. Adhya, C. Rumpel, K. Paustian, P. Kuikman, M. F. Cotrufo, J. A. Elliott, R. McDowell, R. I. Griffiths, S. Asakawa, A. Bondeau, A. K. Jain, J. Meersmans and T. A. M. Pugh. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology* 22:1008-1028.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 437-441.
- Society for Ecological Restoration International. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Consultada en https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/SER_Primer/ser-primer-spanish.pdf
- Soil Science Society of America (SSSA). (1984). *Glossary of Soil Science Terms*. SSSA. SSSA, EUA.
- Starfinger, U., Kowarik, I., Rode, M., & Schepker, H. (2003). From desirable ornamental plant to pest to accepted addition to the flora – the perception of an alien tree species through the centuries. *Biological Invasions*, 5, 323-335. <https://doi.org/10.1023/B:BINV.0000005573.14800.07>
- Trucíos-Caciano, R., Estrada-Ávalos, J., Cerano-Paredes, J., & Rivera-González, M. (2011). Interpretación del cambio en vegetación y uso de suelo. *Terra Latinoamericana*, 29, 359-367.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. D., Saucedo, R. M., Alcántara, P. C., Castro, R., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, 62, 21-37.
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius Jr, R. G., & Veldkamp, A. (2006). Modeling land-use and land-cover change. In *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts* (pp. 117-135). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Vibrans, H. (1997). “Lista florística mexicana de plantas vasculares silvestres en San Juan Quetzalcoapan, Tlaxcala, México”, en *Acta Botánica Mexicana* 38:21-67.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.

- Wang, Y. & Pijut, P. M. (2014). Can *Prunus serotina* be genetically engineered for reproductive sterility and insect pest resistance? *Springer Science Reviews*, 2, 75-93. doi: 10.1007/s40362-014-0024-0
- Zamora E., M. C., Espinoza B., J. C., García, A. M., Hernández M., P. A., & Núñez G., R. M. (2020). Distribución potencial de dos especies de leguminosas en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 1299-1310.
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Cabrera, C. R. F., Castañeda, A. L., & Torres, E. S. (2011). *Degradación y conservación de suelos en la cuenca del río Grijalva, Tabasco*. Colegio de Postgraduados, Secretaría de recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX. Villahermosa, Tabasco, México.
- Zinck, A. (2005). Suelos, información y sociedad. *Gaceta ecológica*, (76), 7-22.

5. EVALUACIÓN DE LA ADAPTACIÓN DE LA ESPECIE MULTIPROPÓSITO *Prunus serotina* EN ZONAS SEMISECAS MEDIANTE ANÁLISIS FUNCIONAL DE CRECIMIENTO

EVALUATION OF THE ADAPTATION OF THE MULTIPURPOSE SPECIE *Prunus serotina* IN SEMI-DRY AREAS THROUGH FUNCTIONAL GROWTH ANALYSIS

5.1 Resumen

La agroforestería es un sistema de aprovechamiento de la tierra que utiliza especies de uso múltiple como alternativa de producción sostenible ante la problemática ambiental actual. En el presente trabajo se evaluó la adaptación de la especie *Prunus serotina* (capulín) en un área degradada de clima templado semiárido, ubicada en la Cuenca de Tula en México, para la rehabilitación de suelos degradados, mediante el análisis funcional del crecimiento acumulado en diámetro y altura. La medición de las variables se realizó en toda la población, en individuos con daño mecánico y en individuos sin daño. Respecto al crecimiento en diámetro, las tasas de crecimiento presentaron comportamientos similares en los tres casos, con un punto máximo durante el invierno al relacionarse con la senescencia en hojas y acumulación de reserva en tallos. Para la variable altura, se observó un comportamiento análogo para los tres casos evaluados, mientras los puntos de crecimiento máximo se presentaron durante la época de lluvias debido al ambiente de humedad creado por la vegetación herbácea presente durante la temporada. Se observó que para los tres casos evaluados se expresaron estrategias de adaptación ya que se presentó crecimiento en las variables evaluadas aun en los individuos que sufrieron daños mecánicos por lo que se recomienda el uso del capulín como un recurso agroforestal para combatir problemas ambientales como la degradación del suelo.

Palabras clave: Adaptación, lluvia, agroforestería, daño mecánico, fitohormonas.

5.2 Abstract

Agroforestry is a system of land use that utilizes multiple-use species as a sustainable production alternative in the face of current environmental problems. In the present work, the adaptation of the species *Prunus serotina* (capulin) was evaluated in a degraded area of temperate semi-arid climate, located in the Tula Basin in Mexico, for the rehabilitation of degraded soils, by means of the functional analysis of the accumulated growth in diameter and height. The variables were measured in the entire population, in individuals with mechanical damage and in individuals without damage. Regarding diameter growth, growth rates showed similar behaviors in the three cases, with a peak during the winter when related to senescence in leaves and accumulation of reserves in stems. For the height variable, a similar behavior was observed for the three cases evaluated, while the maximum growth points occurred during the rainy season due to the humidity created by the herbaceous vegetation present during the season. It was observed that for the three cases evaluated, adaptation strategies were expressed, since growth was presented in the variables evaluated, even in the individuals that suffered mechanical damage, so that the use of capulin as an agroforestry resource to combat environmental problems such as soil degradation is recommended.

Keywords: Adaptation, rain, agroforestry, mechanical damage, phytohormones.

5.3 Introducción

El territorio nacional posee una privilegiada diversidad de ecosistemas naturales, mismos que brindan una amplia gama de recursos naturales y servicios ambientales; no obstante, el uso masivo y acelerado de estos ha provocado una presión sobre los mecanismos naturales de asimilación y resiliencia que resulta en su agotamiento (Orozco, 2003). A través de los últimos años, la problemática ambiental relacionada al desarrollo socioeconómico ha tomado gran relevancia por la insostenibilidad de los sistemas actuales de producción y consumo (Jiménez, 1996). Ante este panorama, ha surgido la preocupación por encontrar sistemas de uso de la tierra alternativos que permitan aprovechar los recursos naturales de manera sustentable. En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 con el objetivo de que los países y la sociedad emprendan un nuevo camino a la mejora de la vida para conseguir un futuro sostenible. En este trabajo hacemos énfasis en tres objetivos: hambre cero (objetivo 2), acción por el clima (objetivo 13) y vida de ecosistemas terrestres (objetivo 15); ya que estos hablan de buscar alternativas de producción que sean ambientalmente sostenibles, socialmente aceptables y económicamente viables donde se maximice la producción, se disminuya la generación de residuos e insumos utilizados al aprovechar de manera integral los recursos.

Una de las alternativas de producción ante el contexto expuesto es la agroforestería, que abarca los sistemas de uso de la tierra que utilizan plantas leñosas perennes de uso múltiple (árboles, arbustos, palmeras, bambúes, entre otros) en la misma unidad de terreno que ocupan cultivos o animales, con algún tipo de ordenación espacial o secuencia temporal (FAO, 2017). Una ventaja del uso de especies leñosas es que son elementos mitigadores del cambio climático global por la captura del CO atmosférico (Morison & Morecroft, 2008), además de otorgar servicios ambientales como la retención del suelo, el control de erosión, la recarga de mantos acuíferos, la producción de bienes (madera, forraje, medicina, alimento), entre otros (Rodríguez-Blanco et al., 2010).

A pesar de los beneficios medioambientales que otorgan las especies leñosas, existe un vacío en su estudio fenológico, fisiológico, morfológico y de su interacción con el entorno ambiental (Melo-Cruz et al., 2012). Esto conduce a que diversas especies utilizadas en agroforestería reduzcan su posibilidad de supervivencia y la productividad esperada, debido a que no se estudia su adaptación al entorno de crecimiento (Lüttge et al., 2011). Un ejemplo de especie leñosa con potencial agroforestal es el capulín (*Prunus serotina*), que ha sido subutilizado debido a los pocos estudios relacionados con su fisiología, crecimiento, morfología, relaciones genéticas y propagación. Este recurso forestal es un árbol o arbusto multipropósito nativo de Norteamérica, tanto perennifolio como caducifolio, de crecimiento moderado a rápido que llega a medir hasta 15 metros de altura y diámetro a la altura de pecho de hasta 1.2 m, con comportamiento dominante en la sucesión secundaria por su alta capacidad de adaptación en zonas perturbadas (Avendaño-Gómez et al., 2015).

El capulín es conocido principalmente por el consumo de su fruto y semilla (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Olszewska, 2007; Raya-Pérez et al., 2012), así como, por ser árbol ornamental y barrera rompevientos dado su frondoso follaje. Es considerada una especie importante en rehabilitación de terrenos erosionados y en la restauración ecológica por su tolerancia a la sequía y a los suelos pobres (Starfinger et al., 2003). Debido a las ventajas ya mencionadas, se vuelve importante ampliar la información acerca del capulín, una de las opciones para determinar si esta especie tiene potencial para adaptarse a las condiciones de un sitio es el análisis de su crecimiento, el cual permite explicar su comportamiento ante diversas condiciones ambientales y aprovecharlo como recurso agroforestal. De acuerdo con Hunt (1978) el análisis de crecimiento es una aproximación cuantitativa que usa datos simples y básicos, para la descripción e interpretación de las plantas que crecen bajo ambiente natural, seminatural o controlado.

Hay dos metodologías para efectuar el análisis de crecimiento: i) análisis tradicional o clásico que involucra la toma de datos en función del tiempo de un

gran número de muestras (Gardner et al., 2003), con los cuales se generan funciones paramétricas flexibles que describen y explican el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante curvas de crecimiento; y ii) análisis funcional o dinámico, el cual comprende medidas a intervalos de tiempos más frecuentes y en un pequeño número de plantas (Flórez et al., 2006). Uno de los objetivos del análisis funcional es obtener funciones matemáticas que permitan describir el crecimiento de las plantas (Hunt, 1982), utilizando la totalidad de información colectada en campo, y relacionarla con factores medio ambientales. Entre las ventajas de esta metodología se destaca que las funciones matemáticas resumen mucha información en pocos parámetros, lo que vuelve más fácil la interpretación de estos (Moreno et al., 2013). Por otro lado, el estudio del crecimiento en el campo es dependiente de la variación genética y de las condiciones ambientales (relación planta-suelo-atmósfera) (Pessarakli, 2002), por lo que, en un análisis de crecimiento lo ideal es analizar la población, o en su defecto con una muestra representativa.

Por lo anterior, el presente estudio plantea como objetivo evaluar la adaptación del capulín a condiciones semiáridas mediante análisis de crecimiento funcional acumulado de toda la población. En este trabajo se propone evaluar tanto las plantas que sufrieron daño mecánico (ruptura de tallo), como aquellas que crecieron con normalidad. Se espera que el análisis de crecimiento funcional explique el comportamiento del capulín como una medida de adaptación a las condiciones ambientales de zonas semiáridas, para proponerse como alternativa agroforestal al ser un recurso multipropósito que brinda tanto bienes como servicios de los que destaca la detención de la degradación del suelo.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Descripción de la zona de estudio

Para la evaluación de la adaptación en campo, se estableció una parcela experimental con superficie de 1559 m² ubicada en el ejido de la comunidad de

San Felipe Teotitlán (Figura 2) localizada entre los municipios mexiquenses de Nopaltepec y Axapusco, dentro de la microcuenca Tula, México.

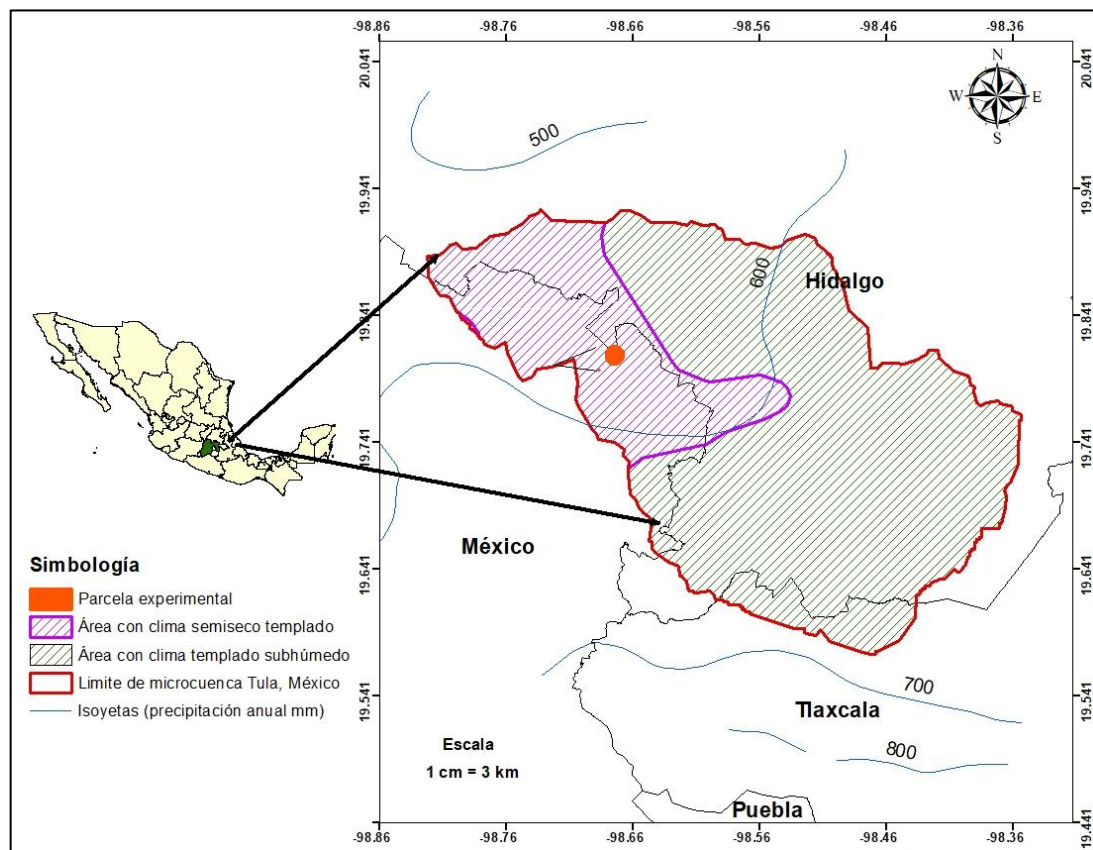


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

Dentro del área de estudio existen dos tipos de clima, semiseco templado con lluvias en verano (BS1kw) y templado subhúmedo con lluvias en verano (C(w0)(w)) (INEGI, 2008). No obstante, para la microcuenca no existe una variación tan contrastante respecto a la precipitación media anual ya que estas van entre los 500 a 700 mm anuales como se ilustra en la Figura 2, así como a la temperatura media anual que se encuentra entre los 15 y 13 °C (INEGI, 2007). Asimismo, se obtuvieron datos de normales climatológicas entre los años 1971 al 2000, cuando operaba la estación meteorológica de Nopaltepec, que indican una temperatura media anual de 16.9 °C y precipitación total anual de 558.6 mm (PMDU, 2019). De acuerdo con el PMDU, los asentamientos de San Felipe Teotitlán se ubican en la zona de lomas con pendientes entre 15 a 25 %.

Las dos principales actividades económicas de la región son la extracción de tezontle y materiales pétreos (Nororiente del poblado de San Felipe Teotitlán) y la agricultura. Dado que la agricultura al ser de temporal corre riesgo ante eventos ambientales como sequías e inundaciones, existe la tendencia de cambio de uso del suelo agrícola a predios urbanos. Además, en la región se presenta erosión del suelo ante la tala inmoderada, el uso pecuario semiextensivo y el cambio de uso de suelo agrícola a urbe. En el PMDU se expone un escenario tendencial hacia el crecimiento del sector de servicios e industrial, con el subsecuente deterioro del sector primario por la transformación acelerada de terrenos agrícolas en usos urbanos. Este escenario aleja la posibilidad de un desarrollo ambiental sustentable, e incrementa el riesgo de pérdida de recursos naturales ocasionados por un manejo inadecuado de los residuos sólidos, aguas servidas, erosión del suelo y contaminación atmosférica producto de la urbe (PMDU, 2019).

5.4.2 Diseño metodológico

Se realizó el trasplante de 41 individuos de capulín de 70 cm a 120 cm de altura y entre 4.7 mm y 11 mm de diámetro durante el mes de julio de 2021. Para ello se excavaron cepas de aproximadamente 30 cm por 30 cm de superficie y 40 cm de profundidad. El arreglo elegido fue de árboles en lindero con un distanciamiento de 5 metros (Figura 3), siguiendo las recomendaciones de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011).

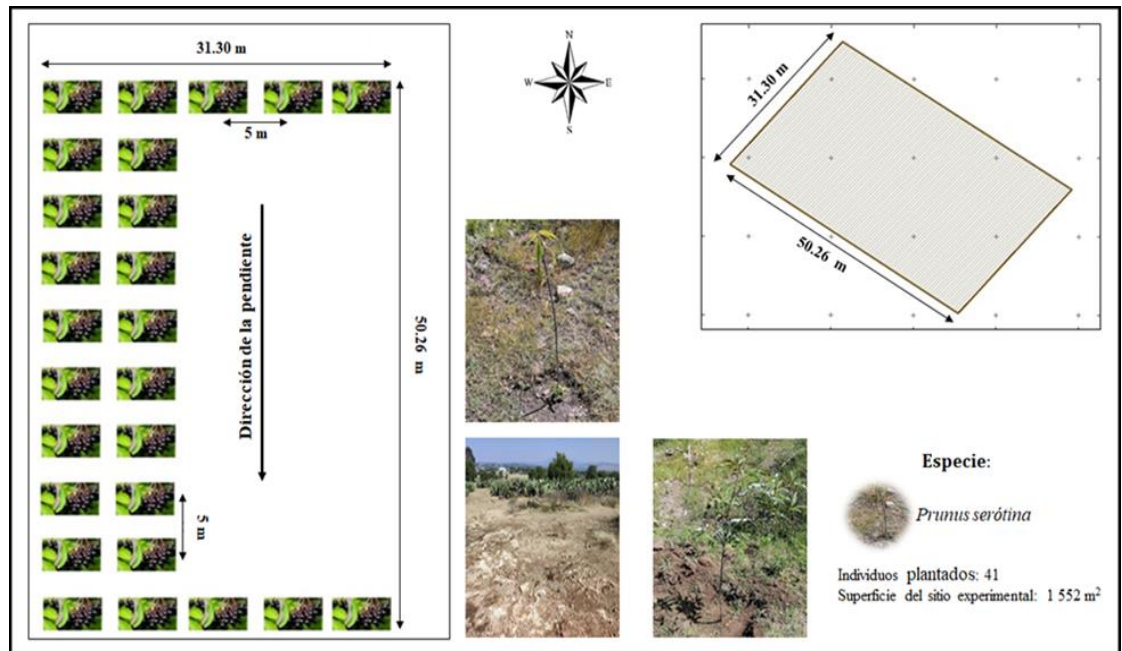


Figura 3. Arreglo de los árboles de capulín en la parcela experimental.

La toma de datos se realizó de manera mensual entre julio de 2021 a junio de 2022, evaluando dos variables cuantitativas (altura y diámetro) y una cualitativa (condición). El análisis se enfatizó en marcar un periodo cada tres meses en sincronía con las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno. La altura (cm) se midió con un flexómetro, colocando el cero en el inicio de tallo (cuello) hasta la parte más alta (ápice) en línea recta; el diámetro (mm) se midió con un vernier digital (STAINLESS HARDENED) en el cuello de la planta. Los datos de condición se tomaron mediante inspección visual, para lo cual se propuso la siguiente clasificación: HV = Hojas verdes; HS= Hojas secas; SH: Sin hojas, pero con presencia de yemas y color rojizo del tronco y M: Muerto= individuos sin hojas, color café del tronco y ramas.

Durante el experimento algunas plantas sufrieron daños mecánicos y se perdió la parte apical del tallo (ruptura). Dado que se evaluó al crecimiento como efecto de factores del medio ambientales y no por efecto del daño mecánico, se explicó el crecimiento como resultado del comportamiento en toda la población, sin enfatizar el crecimiento individual, sino mediante el análisis de crecimiento acumulado poblacional.

5.4.3 Modelo de crecimiento

Varios modelos se aplican para describir la cinética del crecimiento de distintos cultivos, como el modelo lineal, el exponencial, el modelo logístico, o éstos con modificaciones. Para la determinación de la dinámica del crecimiento acumulado en diámetro y en altura se utilizó la ecuación diferencial propuesta por Sarikaya y Ladisch (1997):

$$\frac{dD}{dt} = \mu_1 D - k_1 D^2 \quad (1)$$

Donde: D = diámetro (mm) o altura en (cm), t = tiempo (días), μ_1 = la tasa específica de crecimiento (días⁻¹), K = es el diámetro máximo de crecimiento (mm) o la altura máxima de crecimiento y $k_1 = \frac{\mu_1}{K}$ es el factor de retención de crecimiento. Cuando el crecimiento del D es pequeño, el factor $k_1 D^2$ es insignificante, por lo que el diámetro o la altura tienen un crecimiento exponencial.

El modelo de la dinámica del crecimiento, obtenido de la integración de $\frac{dD}{dt}$ ajustado a los datos fue: $D(t) = \frac{K}{1 + C e^{-\mu_1 t}}$ donde: $C = \frac{c}{k_1}$ y c = es la constante de integración. El punto en el que la población $D(t)$ crece rápidamente de un tiempo a otro se obtuvo en el instante en que $D(t)$ es máximo y $D''(t) = 0$:

$$\frac{d^2 D}{dt^2} = \frac{d(\mu_1 D - k_1 D^2)}{dt} = 0 \text{ tal que } D(t)_{\text{máx}} = \frac{K}{2} \quad (2)$$

Y esto sucede cuando t es igual a $\frac{K}{2} = \frac{K}{1 + C e^{-\mu_1 t}}$ tal que $t_{\text{máx}} = \frac{\ln(C)}{\mu_1}$. Finalmente, la producción excedente, se obtuvo mediante $\frac{dD}{dt} = \mu_1 \left(\frac{K}{2}\right) - k_1 \left(\frac{K}{2}\right)^2$ tal que $\frac{dD}{dt}_{\text{máx}} = \frac{\mu_1 K}{4}$.

Los datos y tasas de crecimiento fueron analizados y modelados en el software Microsoft® Excel® (versión 2207 compilación 16.0.15427.20182) así como en el software Curve Expert versión 1.3 por medio del algoritmo Marquard (Hyams, 2003).

5.5 Resultados

De los 41 individuos de capulín (*Prunus serotina*) establecidos, solo 37 sobrevivieron hasta el final del estudio. De éstos, se identificaron 23 individuos que sufrieron daños mecánicos, resultando 12 plantas dañadas en el año 2021 y 11 en el año 2022; no obstante, sus datos de crecimiento en diámetro y altura, posterior a la ruptura, fueron considerados en este estudio para evaluar la adaptación a las condiciones ambientales del sitio.

Respecto a la variable de condición, todos los individuos permanecieron en la categoría HV (Hojas verdes) desde el establecimiento hasta octubre de 2021; posteriormente, el 83 % de los individuos se identificó con HS (Hojas secas) desde octubre hasta diciembre de 2021 (invierno). A partir de diciembre de 2022, todos los individuos se identificaron como SH (Sin hojas), únicamente tres individuos mantuvieron hojas verdes hasta el mes de febrero de 2022, y de mayo a junio se defoliaron. A mediados del mes de mayo se identificó que las yemas comenzaban a activarse al presentar una coloración rojiza.

Con los datos de medición de diámetro para toda la población (con daño y sin daño) se obtuvo el modelo que representa el incremento acumulado de diámetro en función del tiempo (Figura 4). Resultó un modelo logístico que explica aproximadamente el 99 % de la varianza, donde el incremento acumulado durante el tiempo de evaluación fue de aproximadamente 2 mm. En cuanto a la dinámica de crecimiento en diámetro, el modelo indica que su máximo crecimiento o capacidad de carga tiene valor de $K = 2.35$ mm, durante el año de evaluación. Mientras que, el punto de crecimiento máximo que se acumuló para toda la población tuvo un valor de $D(t)_{\text{máx}} = 1.18$ mm, que se alcanzó a los 6.08 meses (2 de diciembre de 2021) con una tasa de crecimiento (razón de cambio) en su punto máximo de 0.23 mm mes^{-1} .

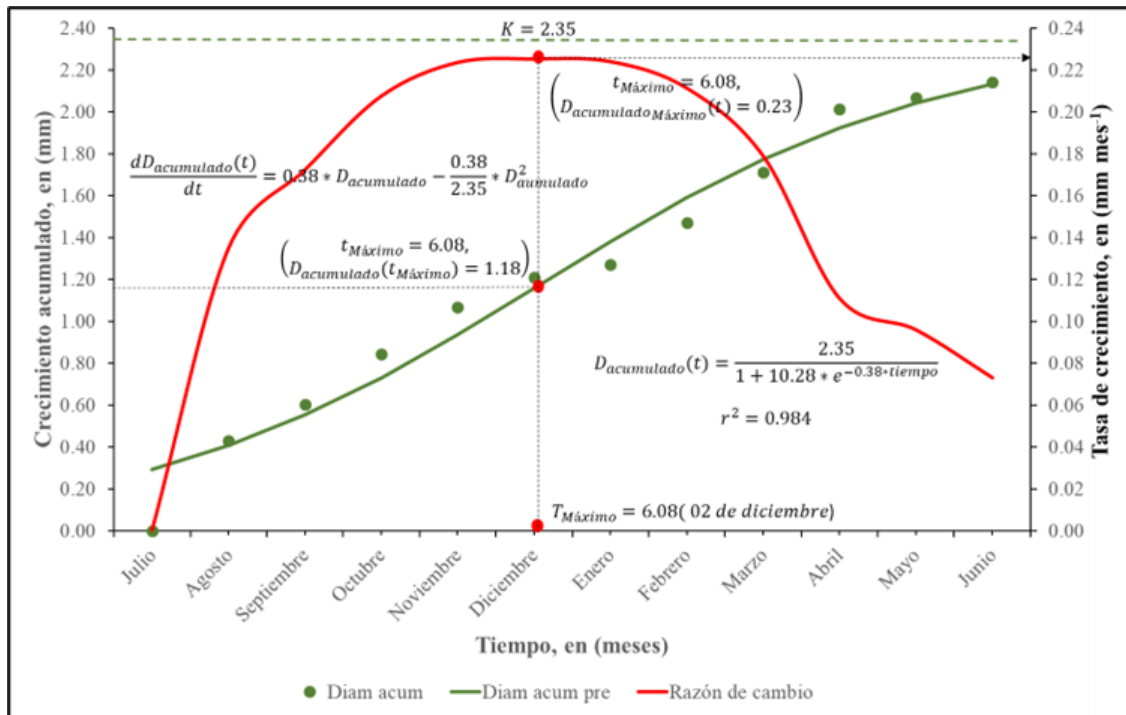


Figura 4. Diámetro acumulado observado (diam acum), diámetro acumulado predicho (diam acum pre) y tasa de crecimiento acumulado (razón de cambio) en plantas de capulín con y sin daño.

La Figura 5 muestra el comportamiento de los individuos con daño, donde el crecimiento máximo se alcanzó en $K = 1.82$ mm, durante el periodo de evaluación (un año), siendo un valor de capacidad de carga menor al resto de la población. El punto de crecimiento máximo fue $D(t)_{\text{máx}} = 0.91$ mm a los 7.41 meses (13 de enero de 2022), lo que representa más de un mes de retraso en comparación al valor de toda la población. En este periodo se presentó una tasa de crecimiento en su punto óptimo con valor de 0.22 mm mes^{-1} .

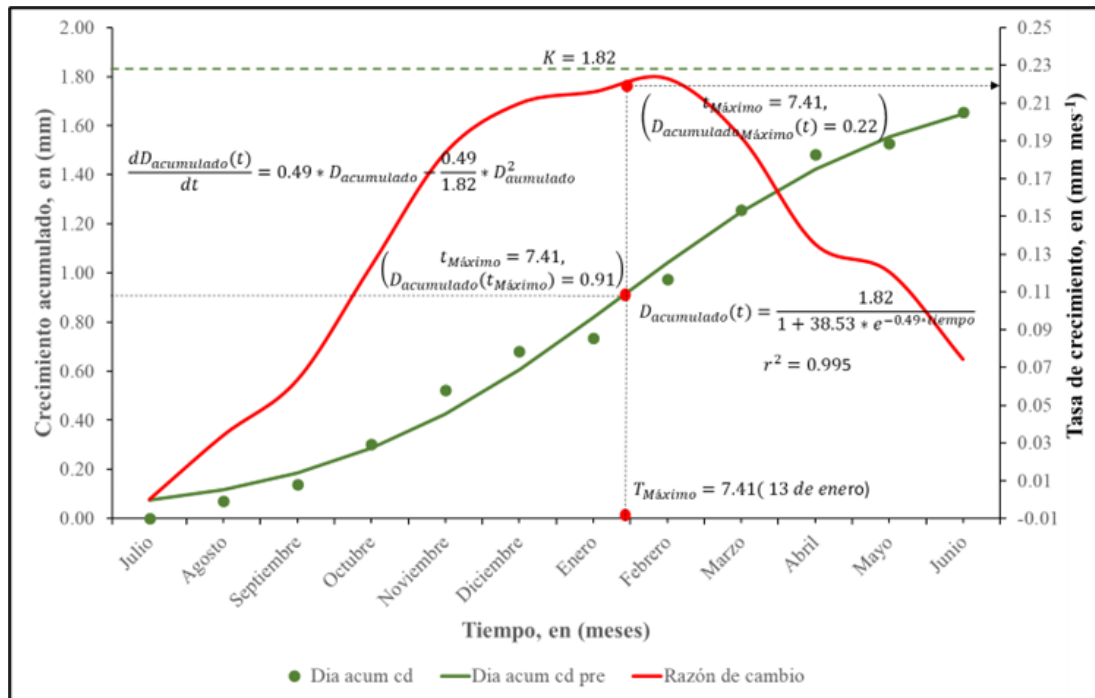


Figura 5. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de diámetro en plantas de capulín con daño.

El comportamiento en el incremento de diámetro de los individuos sin daño (Figura 6) mostró una tendencia similar a la observada en toda la población, porque la capacidad de carga se alcanzó en $K = 2.46$ mm durante el año evaluado, con un punto de crecimiento máximo $D(t)_{\text{máx}} = 1.23$ mm a los 6.78 meses (23 de diciembre de 2022), y una tasa de crecimiento en su punto óptimo de 0.20 mm mes^{-1} .

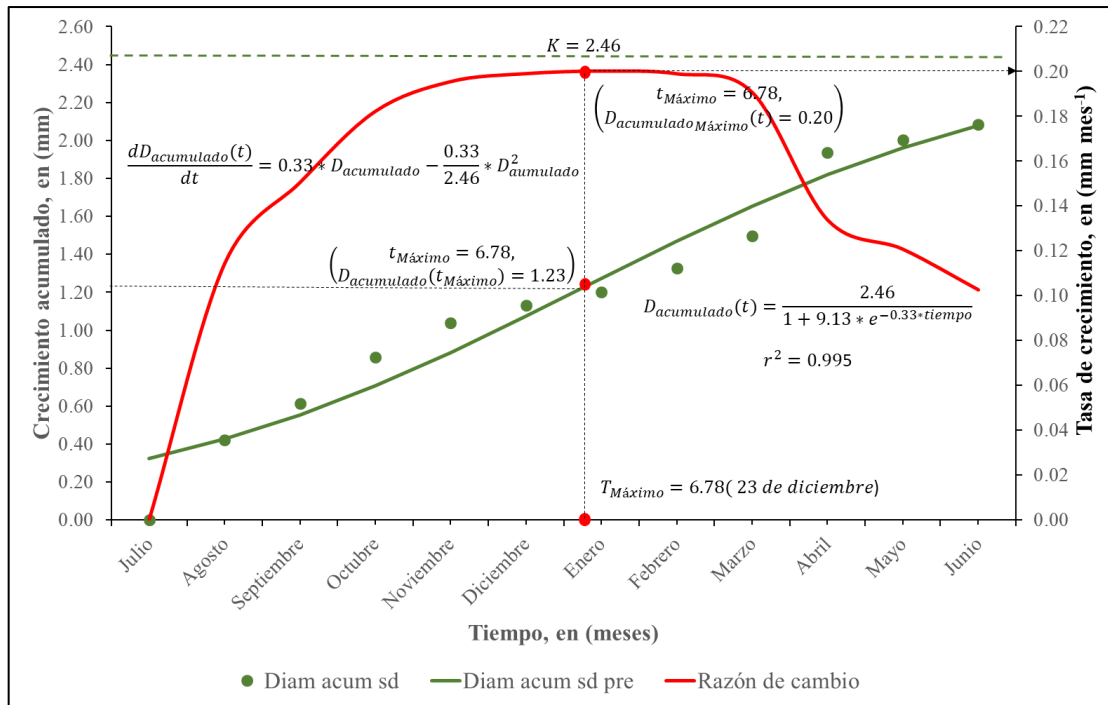


Figura 6. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de diámetro en plantas de capulín sin daño.

Respecto al incremento en altura se observó que el comportamiento de la población (Figura 7) tuvo una capacidad de carga de $K = 6.14$ cm, que representó el máximo crecimiento en altura durante el año de evaluación. Asimismo, el punto de crecimiento máximo de un tiempo a otro fue $A(t)_{máx} = 3.07$ cm a los 2.48 meses (14 de agosto de 2021), con tasa de crecimiento en su punto óptimo de 2.15 cm mes^{-1} .

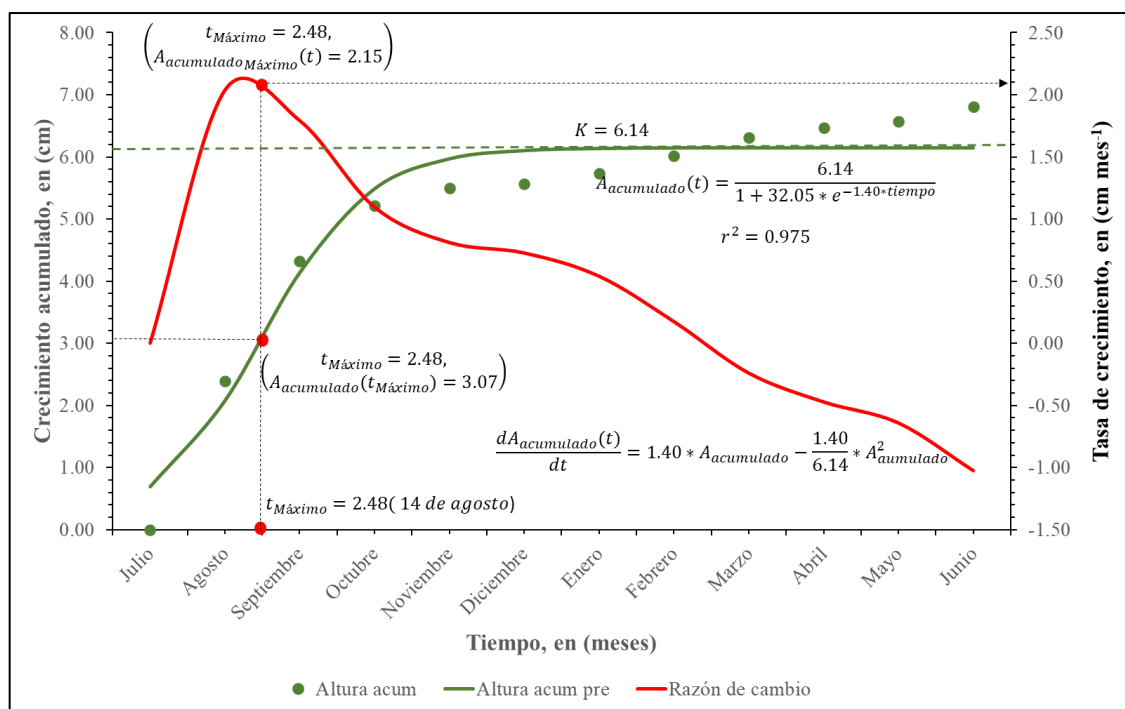


Figura 7. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín con y sin daño.

La capacidad de carga de los individuos con daño (Figura 8) fue menor en comparación con la de la población y se alcanzó cuando $K = 4.32$ cm durante el año, con punto de crecimiento máximo $A(t)_{m\acute{a}x} = 2.16$ cm que se alcanzó a los 3.3 meses (11 de septiembre). De manera análoga, la razón de cambio en su punto óptimo fue de 0.64 cm mes^{-1} , valor que representa menos de la mitad del valor obtenido por la población.

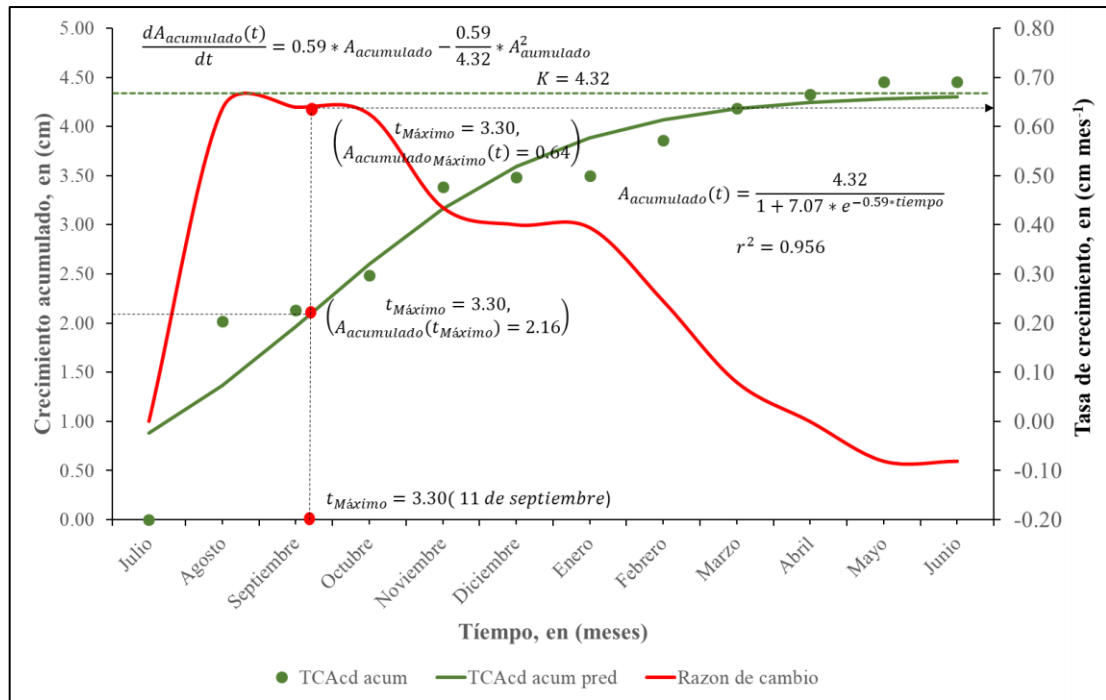


Figura 8. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín con daño.

De manera similar a los valores de diámetro obtenidos en los individuos sin daño, se observó que el incremento en altura (Figura 9) o la capacidad de carga fue mayor con respecto a toda la población y a los individuos con daño ($K = 9.4$ cm). Además, el punto de crecimiento máximo de un tiempo a otro fue mayor y se alcanzó cuando $A(t)_{máx} = 4.37$ cm a los 2.3 meses (11 de agosto), y máxima tasa de crecimiento con valor de 4.37 cm mes^{-1} . En la Figura 9 se aprecia que los puntos óptimos para las plantas sin daño son semejantes a los expresados en toda la población durante el mes de agosto.

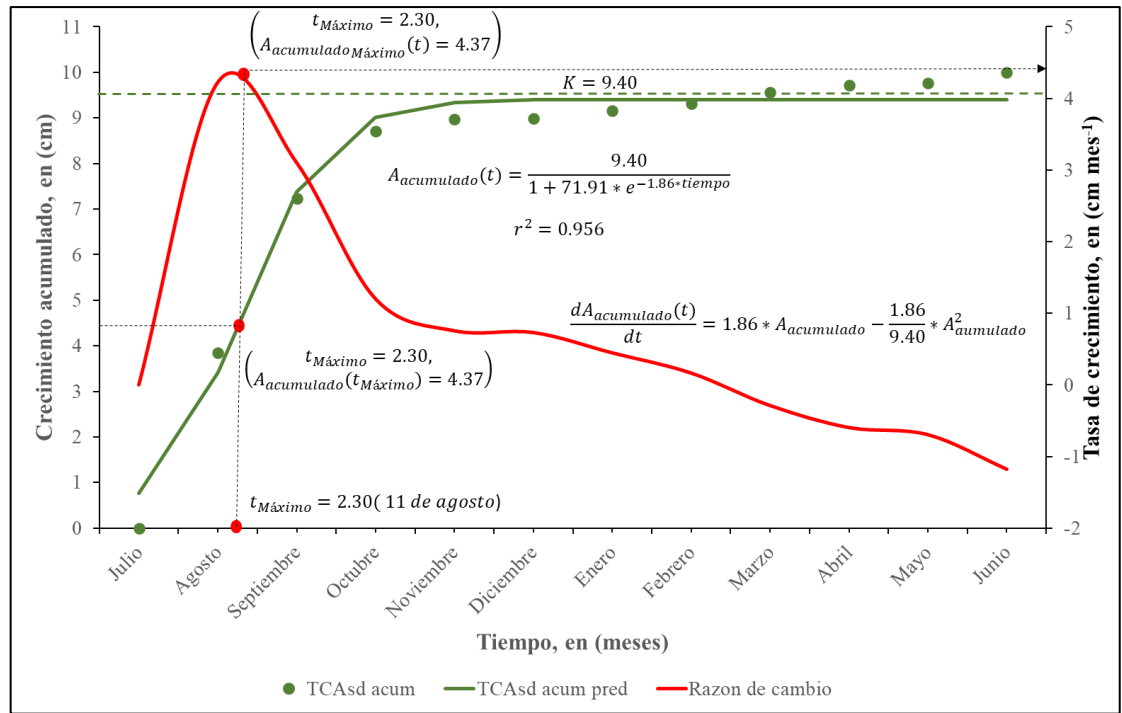


Figura 9. Crecimiento acumulado y tasa de crecimiento acumulado de altura en plantas de capulín sin daño.

5.6 Discusión

Después de realizar la comparación del crecimiento en los individuos con daño, en los individuos sin daño y en la población, se observó que las tasas de crecimiento en diámetro presentaron comportamientos similares; no obstante, los valores de la capacidad de carga, el punto de crecimiento máximo y el tiempo en el que éste se alcanzó, fueron mayores en los individuos que no sufrieron daños, y menores en los que fueron dañados. En los tres casos, se observó que los puntos de crecimiento máximo se ubicaron entre los meses de diciembre y de enero, que corresponde a la estación de invierno para los cuales se mencionan temperaturas medias entre 12 y 13 °C y temperaturas mínimas entre 5 y 6 ° y poca humedad ambiental (Weatherspark, 2023). Este periodo de bajas temperaturas propició la senescencia de hojas en los individuos, lo cual promovió la latencia en los procesos de crecimiento y la acumulación de reservas en tallo promoviendo su engrosamiento. Díaz-Montenegro (2002) menciona que la movilidad de nutrientes corresponde con la fenología de la planta, donde el

nitrógeno (hasta 50 %), fósforo (25-55 %) y potasio (25-55 %) de hojas senescentes se translocan hacia la madera del tallo o se movilizan hacia las raíces, cabe mencionar que de acuerdo con Reich et al. (1992), las especies caducifolias presentan una mayor concentración de nitrógeno en las hojas. Posterior al invierno (febrero a abril), se observó una disminución en el crecimiento acumulado en diámetro en toda la población (corresponde a la quiescencia de post-dormancia según lo expuesto por Viveros-Viveros y Vargas-Hernández (2007), porque la acumulación de reservas en tallo fue afectada por la baja humedad relativa y lluvias entre los 10 y 25 mm por mes (Weatherspark, 2023) que es característica en la zona de estudio. A partir de mayo, con el incremento en temperaturas (17 °C) y la presencia de lluvias (mayores a 50 mm), se activó el desarrollo de las yemas vegetativas y, por lo tanto, el crecimiento en diámetro se redujo. Estas observaciones concuerdan con Díaz-Montenegro (2002) y Villar et al. (2008), quienes exponen que los cambios de temperatura y precipitación inducen el incremento de hormonas como giberelinas, y el transporte de fotosintatos hacia las yemas para su activación, así como el aprovechamiento de las reservas acumuladas en tallos o raíces. Un caso análogo lo presentaron Pineda-Herrera et al. (2015) en dos especies forestales de Oaxaca, al demostrar que, para el caso del diámetro, se observó una fase de crecimiento mínimo en todas las curvas o de reposo desde octubre hasta mayo, y un ascenso al iniciar la época de lluvias.

Algo importante a resaltar respecto al incremento en diámetro es la supervivencia de las plantas que sufren daño, como la pérdida parcial o total de la parte aérea, esto debido a la acumulación del mayor contenido de carbohidratos en tallos y raíces en condiciones de estrés (Mc Pherson & Williams, 1998; Villar-Salvador 2003; Villar et al., 2008).

Con respecto al crecimiento acumulado en altura se puede observar que para el caso de la población fue de casi 6 cm durante el periodo de evaluación, 4 cm para las plantas con daño y 8 cm para las plantas sin daño, en los tres casos las curvas tanto de crecimiento acumulado como de razón de cambio presentan un

comportamiento análogo; el punto de crecimiento máximo para la población y los individuos sin daño se alcanza en el mes de agosto y para los individuos con daño a inicios de septiembre, estas fechas coinciden con el periodo de lluvias en la zona de estudio (mayo a octubre), en la cual se identificó una abundante vegetación herbácea que mitigó el exceso de radiación, propiciando un ambiente de humedad en el suelo que fue aprovechado por el capulín (Villar et al., 2008), esto coincide con investigaciones como la realizada por Pimienta-Barrios et al. (2002), quienes identificaron que en el caso del pitayo un importante crecimiento en ramas en los meses de mayor humedad en el suelo, así como con lo identificado por Pineda-Herrera et al. (2015) para las especies *Schizolobium parahyba* y *Vochysia guatemalensis* donde la relación entre el ancho de las zonas de crecimiento y la precipitación fue alta, lo cual indica un crecimiento relacionado con las condiciones de humedad presentes.

Posterior al periodo de lluvias (otoño e invierno), se observó una disminución tanto en el crecimiento acumulado como en la tasa de crecimiento en altura relacionado a la presencia de temperaturas frías y menor humedad, ocasionando una baja actividad metabólica relacionada también con la senescencia en hojas por la reducción en la concentración de hormonas de crecimiento como auxinas, giberelinas y citoquininas, y aumento en la producción de hormonas como ácido abscísico (Díaz-Montenegro, 2002). Según Villar-Salvador (2003) las menores tasas de crecimiento, como se observó desde septiembre de 2021 hasta marzo de 2022 en capulín, pueden asociarse a una mayor asignación de biomasa para la formación de raíces con la finalidad de asegurar la supervivencia en los periodos de estrés hídrico o escasez de nutrientes.

Durante los meses de abril a junio, el crecimiento en altura se mantiene bajo debido a que los fotosintatos acumulados previo a la dormancia de la planta se translocan para el proceso de activación de yemas, lo cual coincide con Viveros-Viveros y Vargas-Hernández (2007) que mencionan que justo antes del rompimiento de la dormancia la planta concentra su energía en el crecimiento de

las yemas, lo cual coincide con la coloración rojiza de las yemas en los meses de mayo y junio identificada en campo.

5.7 Conclusiones

El análisis funcional de crecimiento utilizado con las variables diámetro, altura y condición, es una herramienta útil para interpretar la adaptación del capulín ante diversos factores ambientales. El arreglo agroforestal, árboles en lindero propicio que durante los meses de lluvia se crearan condiciones que permitieron mitigar el exceso de radiación y propiciar un ambiente de humedad en el suelo que fue aprovechado por el capulín para continuar creciendo y acumulando reservas que posteriormente utilizó para superar los periodos de estrés presentes en el sitio. Las plantas dañadas mostraron un comportamiento análogo a las plantas sin daño, ya que estas acumularon reservas en tallos (expresado como crecimiento en diámetro), como una estrategia de adaptación a las condiciones ambientales del lugar y a factores externos (daños mecánicos). En esta investigación se observó que el capulín se comporta como especie caducifolia con poca longevidad foliar, por lo que se recomienda incluir variables como horas frío, concentración de fitohormonas y disponibilidad de nutrientes en estudios futuros.

5.8 Literatura citada

- Adriano-Morán, C.C., and McClung de Tapia, E. (2008). Trees and shrubs: the use of wood in prehispanic Teotihuacan. *Journal of Archaeological Science*, 35(11), 2927-2936. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.001>
- Avendaño-Gómez, A., Lira-Saade, R., Madrigal-Calle, B., García-Moya, E., Soto-Hernández, M., & Romo de Vivar-Romo, A. (2015). Manejo y síndromes de domesticación del capulín (*Prunus serotina* Ehrh ssp. *capuli* (Cav.) Mc Vaugh) en comunidades del estado de Tlaxcala. *Agrociencia*, 49(2), 189-204.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *Ficha técnica Prunus serotina*. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/60-rosac6m.pdf. (Consultada el 16 de junio de 2021)
- Díaz-Montenegro Daniel H. (2002) *Fisiología de árboles frutales*. AGT Editor. ISBN 9684631057. Pp 390
- FAO. (2017). *Agroforestería para la restauración del paisaje*. Roma, Italia. Consultada en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/4c40fe3e-df0b-479a-8c75-bb4877a4d4e8/>
- Flórez, V., Miranda, D., Chaves, B., Chaparro, L., Cárdenas, C., & Farías, A. (2006). *Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato*. Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp. 43-52
- Gardner, F., Pearce, R., & Mitchell, R. (2003). *Physiology of crop plants*. 2nd ed. Iowa State University Press. Iowa City, IA.
- Hunt R (1982) *Plant Growth Curves*. Edward Arnold, Ltd. London.
- Hunt, A. (1978). The sociological movement in law. En: *The Sociological Movement in Law*. Palgrave Macmillan, London. pp. 1-10
- Hyams, D. (2003). Curve Expert 1.3. A comprehensive curve fitting system for Windows. USA.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2007). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000*. Precipitación media anual. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000*. Unidades climáticas. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- Jiménez H., L. M. (1996). *Desarrollo sostenible y Economía Ecológica*. Integración Medio Ambiente-desarrollo y economía ecológica. Madrid: Síntesis.

- Lüttge, U., Beck, E., & Bartels, D. (2011). Plant desiccation tolerance: Analysis and synthesis, Vol. 215, Ecological studies. Berlin: Springer. 386 p.
- Mc Pherson, K., and Williams, K. (1998). The role of carbohydrate reserves in the growth, resilience, and persistence of cabbage palm seedlings (*Sabal palmetto*). *Oecologia*, 117, 460-468
- Melo-Cruz, O., Rodríguez-Santos, N., y Rojas-Ramírez, F. (2012). Patrones de arquitectura foliar asociados al crecimiento funcional de cinco especies leñosas nativas de la cordillera oriental utilizadas en restauración ecológica en la sabana de Bogotá. *Colombia forestal*, 15, 119-130.
- Moreno, Á. P. G., Mogollón, M. P. A. G., López, C. E. Ñ., Villota, T. M. S., y Torres, J. M. C. (2013). Análisis funcional de crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* subsp. *andigena*). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 172-185.
- Morison, J. I., y Morecroft, M. D. (2008). *Plant growth and climate change*. John Wiley & Sons.
- Olszewska, M. (2007). Quantitative HPLC analysis of flavonoids and chlorogenic acid in the leaves and inflorescences of *Prunus serotina* ehrh. *Acta chromatographica*, 19, 253-269.
- Orozco, L. C. (2003). Deterioro ambiental vs. Desarrollo económico y social. Boletín IIE, 103-108.
- Pessaraki, M. (2002). Handbook of plant and crop physiology (2 ed.). New York: Marcel Decker Inc. 973 p.
- Pimienta-Barrios, E., Robles-Murgía, C., & Pimienta-Barrios, E. (2002). Crecimiento primario en plantas silvestres de pitayo (*Stenocereus queretaroensis* (Weber) Buxbaum) y su relación con temperatura, lluvia y micorrizas. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 25(2), 219-219.
- Pineda-Herrera, E., J.I. Valdez & López M., A. (2012). Fenología de dos especies arbóreas en una selva alta perennifolia del Norte de Oaxaca. *Botanical Sciences*, 90,185-193.
- Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J. I., López-López, M. Á., Manzano-Méndez, F., & Salgado-Ugarte, I. H. (2015). Incremento en diámetro y periodicidad de anillos de crecimiento de dos especies arbóreas en una selva húmeda del norte de Oaxaca, México. *Madera y bosques*, 21(3), 55-68.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Nopaltepec [PMDU]. (2019). Disponible en:<https://seduo.edomex.gob.mx/sites/seduo.edomex.gob.mx/files/files/PMDU%20NOPALTEPEC%202019.pdf>
- Raya-Pérez, J. C., Aguirre-Mancilla, C. L., Tapia-Aparicio, R., Ramírez Pimentel, J.G., & Covarrubias-Prieto, J. (2012). Storage proteins characterization and mineral composition of black Cherry seed (*Prunus serotina*). *Polibotánica*, 34, 203-215.

- Reich, P. B., M. B. Walters, y D. S. Ellsworth. (1992). Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecological Monographs* 62: 365-392.
- Rodríguez-Blanco, M. L., Taboada-Castro, M. M., & Taboada-Castro, M. T. (2010). Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW Spain. *Land Degradation & Development*, 21(2), 161-170.
- Sarikaya, A., and Ladisch, M. R. (1997). An unstructured mathematical model for growth of *Pleurotus ostreatus* on lignocellulosic material in solid-state fermentation systems. *Applied biochemistry and biotechnology*, 62, 71-85.
- Starfinger, U., Kowarik, I., Rode, M., & Schepker, H. (2003). From desirable ornamental plant to pest to accepted addition to the flora – the perception of an alien tree species through the centuries. *Biological Invasions*, 5, 323-335. <https://doi.org/10.1023/B:BINV.0000005573.14800.07>
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J. L., Poorter, H., Valladares, F., & Marañón, T. (2008). Capítulo 7: Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: Valladares F (ed). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid, España, pp. 193–230.
- Villar-Salvador, P. (2003). Importancia de la calidad de la planta en los proyectos de revegetación. En: *Restauración de Ecosistemas en Ambientes Mediterráneos*. En: Rey-Benayas, J.M., Espigares
- Viveros-Viveros, H. y Vargas-Hernández, J. J. (2007). Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13, 131-135.
- Weatherspark. (2023). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Nopaltepec*. <https://es.weatherspark.com/y/6612/Clima-promedio-en-Nopaltepec-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

6. IMPLEMENTACIÓN DE UN ENFOQUE DE EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ADAPTACIÓN DE ESPECIES MULTIPROPÓSITO PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS

IMPLEMENTATION OF AN APPROACH TO ASSESS THE POTENTIAL ADAPTATION OF MULTIPURPOSE SPECIES FOR THE REHABILITATION OF DEGRADED SOILS

6.1 Resumen

Cualquier especie propuesta para fines de rehabilitación debe completar con éxito la fase de establecimiento en campo, asegurando altos niveles de supervivencia y crecimiento, los cuales están influenciados por la variación genética y factores bióticos y abióticos como las condiciones ambientales del sitio de establecimiento. Este estudio evaluó la capacidad de adaptación de la especie de uso múltiple *Prunus serotina* (capulín) en un arreglo agroforestal de árboles en lindero en una zona de clima templado semiárido y condiciones de degradación ubicada en la cuenca de Tula en México, evaluando su potencial de plantación, supervivencia, crecimiento de variables morfológicas (altura y diámetro) y riesgo de muerte para su uso como plantas con fines de rehabilitación de suelos degradados. La especie fue seleccionada de acuerdo con su potencial multipropósito, así como por su fisonomía y fisiología. La modelación de las zonas aptas de distribución mostró que para el área de la cuenca Tula con clima semiseco templado la categoría de potencial de plantación que predomina es la buena con el 78.9 %, seguida de la categoría alta con el 17.1 % y la categoría baja con apenas el 4 % del área total. La tasa de supervivencia de la especie seleccionada alcanzó un nivel marginal (68.3 %). Las condiciones climáticas estacionales afectaron el crecimiento tanto en diámetro como en altura. El diámetro final redujo el riesgo de muerte en 100 %. Los resultados proporcionan una base sólida para establecer especies de uso múltiple en arreglos agroforestales que contribuyan a la rehabilitación de sitios degradados.

Palabras clave: Capulín, supervivencia, distribución, crecimiento, riesgo

6.2 Abstract

Any species proposed for rehabilitation purposes must successfully complete the field establishment phase, ensuring high levels of survival and growth, which are influenced by genetic variation and biotic and abiotic factors such as the environmental conditions of the establishment site. This study evaluated the adaptive capacity of the multipurpose species *Prunus serotina* (capulin) in an agroforestry arrangement of trees in a semi-arid temperate zone and degraded conditions located in the Tula basin in Mexico, evaluating its planting potential, survival, growth of morphological variables (height and diameter) and risk of death for use as plants for rehabilitation of degraded soils. The species was selected according to its multipurpose potential, as well as its physiognomy and physiology. The modeling of the suitable distribution zones showed that for the area of the Tula basin with a semi-dry temperate climate, the predominant category of planting potential is good with 78.9 %, followed by high category with 17.1 % and low category with only 4 % of the total area. The survival rate of the selected species reached a marginal level (68.3 %). Seasonal climatic conditions affected growth in both diameter and height. The final diameter reduced the risk of death by 100 %. The results provide a solid basis for establishing multiple-use species in agroforestry arrangements that contribute to the rehabilitation of degraded sites.

Keywords: Capulin, survival, distribution, growth, risk.

6.3 Introducción

En la actualidad la problemática ambiental ha tomado gran relevancia ya que las actividades humanas (urbanización, expansión agrícola, cambios en el uso de la tierra, uso de especies exóticas invasivas, etc.) han acelerado los procesos o actividades naturales de degradación, lo cual pone en riesgo la capacidad de resiliencia de los ecosistemas debido al ritmo tan acelerado de dichos procesos (Davies et al., 2012; Guevara et al, 2005). Esto se traduce en una crisis ambiental y socio ecológica que se manifiesta tanto a escalas locales como global (Estenssoro, 2010; Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La degradación de los ecosistemas ocasiona cambios importantes en la composición, densidad de especies y los procesos naturales que en ellos ocurren, en detrimento de los servicios ambientales que brindan a la sociedad y de la posibilidad de aprovecharlos sustentablemente. Las consecuencias pueden notarse en la pérdida y disminución de los servicios ecosistémicos, reducción de biodiversidad, degradación de suelo, contaminación, menor recarga de acuíferos, disminución de la capacidad productiva, cambio de uso de suelo, entre otros (Challenger & Dirzo, 2009).

En 1976, la vegetación natural de México cubría aproximadamente el 80 % de la superficie total, mientras que las actividades antropogénicas cubrían el 20 %. Para el 2011, la vegetación natural cubría el 71.7 % (alrededor de 140 millones de hectáreas) de la superficie del país y el 28 % (55 millones de hectáreas) del territorio se había convertido en agricultura, zonas urbanas y otros usos antropogénicos, lo que significa que, en un período de 35 años, la superficie de vegetación natural de México se redujo en aproximadamente 8.3 %. La mayor proporción de vegetación natural (primaria y secundaria) se encontró en Baja California Sur (93 %), Quintana Roo (92 %), Coahuila (92 %), Baja California (90 %), Chihuahua (88 %) y Durango (86 %). Por el contrario, en los estados de Tlaxcala (19 %), Veracruz (29 %), Distrito Federal (29 %), Tabasco (30 %), México (35 %) y Morelos (37 %), la vegetación natural cubría menos del 40 % de su superficie (SEMARNAT, 2002; SEMARNAT, 2015). Este deterioro se debe en

gran medida a la falta de conocimientos sobre el papel que desempeña el suelo en el medio ambiente, los límites para su uso o aprovechamiento y las técnicas apropiadas para hacerlo sostenible. La falta de conocimiento se traduce, entre otras cosas, en políticas inadecuadas del uso del suelo y en una mala planificación territorial que, en lugar de contribuir a su conservación, acelera su degradación, sin considerar la posibilidad de que su pérdida sea irreversible (Gardi et al., 2014; Guevara et al., 2012).

La degradación del suelo se produce como resultado de múltiples factores tanto naturales como antropogénicos, siendo estos últimos los que aceleran su proceso. Los principales factores antropogénicos que provocan que el suelo pierda su productividad biológica y su capacidad para sustentar la vida humana son la topografía, el uso de la tierra, el pastoreo excesivo, la densidad de población y la pobreza (Gardi et al., 2014; Oldeman, 1998).

Dependiendo de la región del país, la combinación de estos factores puede favorecer o agravar la degradación del suelo (Instituto Nacional de Ecología, 2004). De acuerdo con la SEMARNAT y CP (2003), en 2002, el 44.9 % del territorio mexicano presentó signos de degradación del suelo causados por factores antropogénicos. El problema de la degradación del suelo ha dado lugar al desarrollo de métodos de producción alternativos cuyos objetivos son buscar la rehabilitación de los suelos y ecosistemas degradados, así como satisfacer las necesidades socioeconómicas de la población. La rehabilitación puede interpretarse como un proceso de restablecimiento de los procesos, la productividad y los servicios de un ecosistema sin pretender recrear el estado original. (Society for Ecological Restoration International, 2004).

La agroforestería destaca entre estas alternativas de rehabilitación como un sistema de uso de la tierra que utiliza plantas leñosas perennes que se utilizan para múltiples propósitos (árboles, arbustos, palmeras, bambúes, etc.) en la misma parcela de tierra ocupada por cultivos o ganado, con una secuencia espacial o temporal (FAO, 2017). Para lograr un proceso de rehabilitación

adecuado, hay que considerar que la combinación de factores que conducen a la degradación varía de un lugar a otro, por lo que las condiciones de un sitio pueden diferir de las de otro. Por lo tanto, la selección de especies con fines de rehabilitación se convierte en un aspecto fundamental, ya que éstas deben ser tolerantes a las condiciones del sitio, y por lo tanto pueden ser utilizadas para construir modelos (Aunque sería bueno que explicara a que te refieres con modelos) que ayuden en el proceso de rehabilitación o restauración de ecosistemas. Estos modelos pueden desarrollarse mediante la selección de especies autóctonas o exóticas (Rosa-Mera & Monroy-Ata, 2006). El área de distribución de una especie es necesaria para proponerla con fines de rehabilitación en usos del suelo como la agroforestería.

La degradación del suelo es un grave problema en los ecosistemas mexicanos, por lo que es importante desarrollar estrategias de conservación y rehabilitación. La incorporación de árboles frutales y de usos múltiples como el capulín (*Prunus serotina*) bajo prácticas agroforestales puede conducir a una gestión sostenible del suelo, así como a la rehabilitación de áreas degradadas. La selección de esta especie se basó en varios factores, entre ellos el hecho de que tiene múltiples usos, además de ser conocida por el consumo de sus frutos y semillas. Por su tolerancia a la sequía, su resistencia a las bajas temperaturas y su capacidad de adaptación a suelos poco fértiles puede crecer en zonas templadas semiáridas, lo que la hace útil para la restauración ecológica y la rehabilitación de suelos (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Raya-Pérez et al., 2012; Starfinger et al., 2003).

Cualquier especie propuesta para rehabilitación debe completar con éxito la fase de establecimiento en el campo, logrando altos niveles de supervivencia y crecimiento (Cerrillo et al., 2006), los cuales están influenciados por la variación genética y las condiciones ambientales (Aguilos et al., 2020). Los modelos de distribución de especies (SDM) ayudan a identificar zonas potenciales para el establecimiento de especies mediante la correlación entre las especies y su entorno biofísico (Elith & Leathwick, 2009; Phillips et al., 2006; Qin et al., 2017;

Regos et al., 2019; Syfert et al., 2013). MaxEnt es un algoritmo que predice la distribución geográfica de las especies (Giannini et al., 2012; Phillips et al., 2006; Warren y Seifert, 2011) basándose simplemente en datos de presencia (u ocurrencia) de las especies, así como en capas ambientales (Ma & Sun, 2018; Palma-Ordaz & Delgadillo-Rodríguez, 2014; Phillips & Dudík, 2008). La supervivencia de las plantas puede también estudiarse estadísticamente mediante el análisis de supervivencia, que considera los datos sobre el número de muertes de una especie como base para calcular la probabilidad de supervivencia (Crawley, 2007), lo que revela lo adaptable que es la especie a las condiciones del hábitat (Sigala, 2015). El modelo de regresión de riesgos proporcionales de Cox (Bradburn et al., 2003; Cox, 1972) predice la probabilidad de que una especie haya muerto en un momento determinado t dadas ciertas variables morfológicas. En este estudio se combinaron el análisis de supervivencia y el modelo de riesgos proporcionales de Cox para estimar la probabilidad de supervivencia de las especies y determinar su riesgo de muerte en función de sus características morfológicas.

El objetivo de este estudio fue evaluar la adaptabilidad de la especie *Prunus serotina* (capulín) en un área degradada de clima templado semiárido, ubicada en la Cuenca de Tula en México, para la rehabilitación de suelos degradados a través de la agroforestería, mediante la identificación de sus zonas potenciales de distribución, la evaluación de su sobrevivencia, la evaluación de sus variables morfológicas y la evaluación de su riesgo de mortalidad.

6.4 Materiales y método

6.4.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza dentro la microcuenca Tula, entre los estados de México, Hidalgo y Tlaxcala, con elevaciones entre 2 333 y 3 223 m y una superficie de 1 037.66 km². La precipitación media anual varía entre los 500 a 700 mm anuales y la temperatura media anual oscila entre los 15 y 13 grados centígrados (INEGI, 2007). La vegetación predominante es el bosque de táscate,

pino y encino, y el matorral crasicaule (INEGI, 2017) Dentro de la cuenca existen dos tipos de clima, el semiseco templado (28 % de la superficie) con lluvias en verano (BS1kw) y templado subhúmedo (72 % de la superficie) con lluvias en verano (C(w0)(w)) (INEGI, 2008). En el clima templado semiárido, las precipitaciones anuales oscilan entre 500 y 600 mm al año. Los suelos predominantes son el phaeozem háplico y el cambisol eutrófico, ambos de textura media (limosa). En el clima templado subhúmedo, las precipitaciones anuales oscilan entre 600 a 1000 mm anuales, sin embargo dentro de la microcuenca no sobrepasan los 800 mm anuales (INEGI, 2008), los suelos predominantes son el phaeozem háplico (rico en materia orgánica, poco profundo, pedregosos y muy inestables) de textura media y vertisol pélico de textura fina (INEGI, 2017; Zamora et al., 2020).

6.4.2 Sitio Experimental

El sitio experimental fue establecido en una superficie de 1559 m², ubicada en el ejido de la comunidad de San Felipe Teotitlán, perteneciente al municipio de Nopaltepec, dentro de la zona semiseca en la microcuenca Tula. La temperatura media anual oscila entre 15 y 16.9 °C, temperaturas mínimas mayores a 5°C y máximas menores a 28°C, y la precipitación total anual oscila entre 558.6 y 600 mm (PMDU, 2019; Weatherspark, 2023). El municipio depende en gran medida de la agricultura de temporal, susceptible a sequías e inundaciones, que afectan a la producción de cultivos y a los ingresos de los agricultores. La erosión causada por la tala excesiva, el sobrepastoreo y los cambios de uso de suelo de agrícola a urbano ha afectado negativamente la calidad del suelo y la productividad de la tierra (PMDU, 2019).

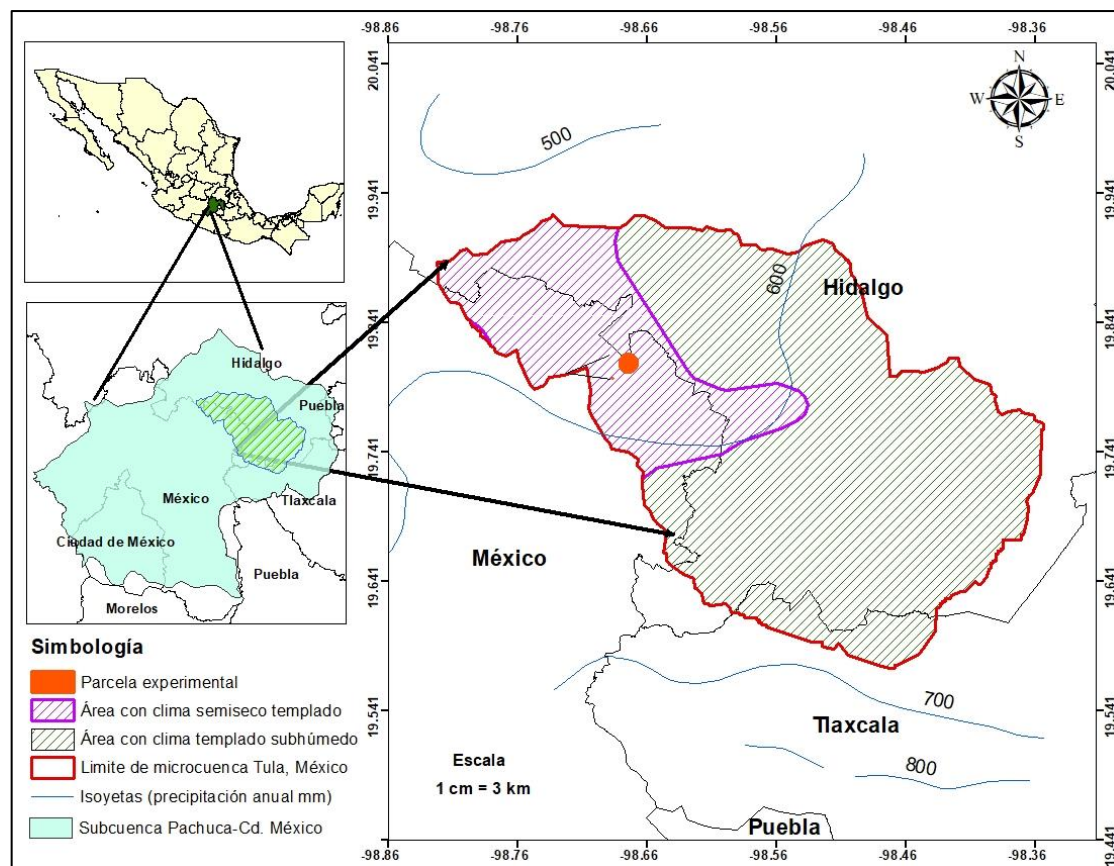


Figura 10. Área de estudio y ubicación del sitio experimental dentro de la cuenca de Tula, México.

6.4.3 Especie objetivo

La especie *Prunus serotina*, también conocida como capulín, ha sido seleccionada por sus características de adaptación, entre las que destacan la tolerancia a la sequía y a las bajas temperaturas, así como por su potencial multipropósito, así como por su taxonomía, forma, función y usos. Debido a estas características y a su adaptación a suelos poco fértiles y tepetatosos con alta pedregosidad, posee un potencial de uso para mejorar las condiciones ecológicas y contribuir en la rehabilitación de los suelos degradados cuando se establece como árboles en lindero, en cortinas rompe vientos o en curvas de nivel (Adriano-Morán & McClung de Tapia, 2008; Olszewska, 2007; Raya-Pérez et al., 2012; Starfinger et al., 2003).

6.4.4 Diseño experimental

En el experimento de campo se aplicó un diseño agroforestal basado en un arreglo de árboles en lindero con un distanciamiento de 5 metros (Figura 11) tomando en cuenta la dirección de la pendiente con el propósito de que estos contribuyeran a proteger el suelo al reducir el escurrimiento y arrastre de sedimentos, así como la creación de microclimas propicios para el establecimiento de otras especies (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2011). Para ello, se excavaron cepas de aproximadamente 30 cm por 30 cm de superficie y 40 cm de profundidad, perpendiculares a la pendiente del terreno, donde se trasplantaron 41 plantas de *Prunus serotina*, en el mes de julio del 2021.

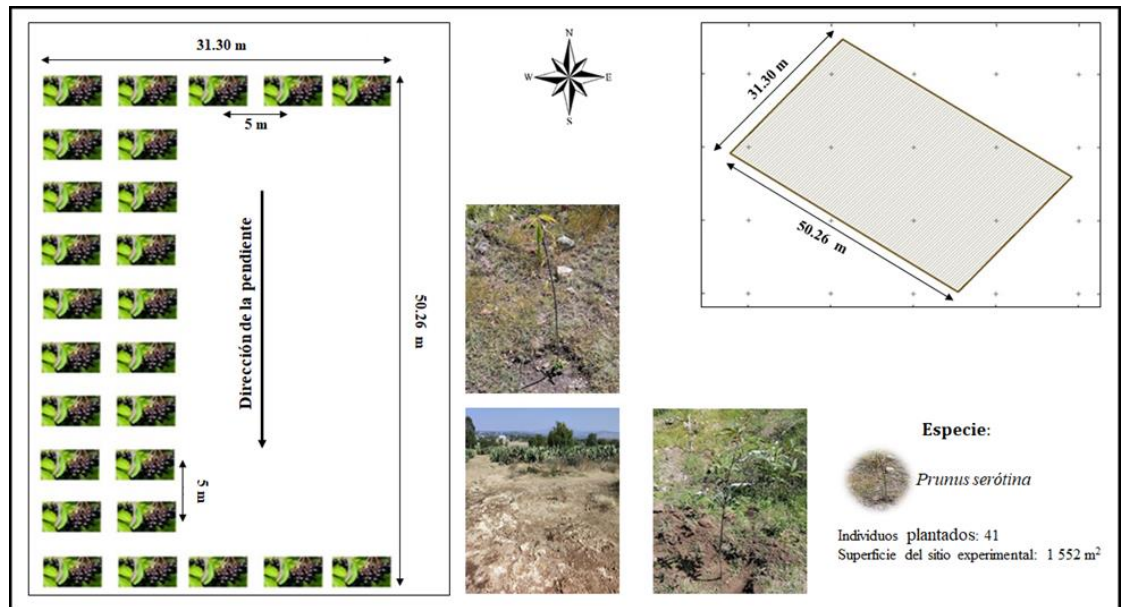


Figura 11. Distribución de la especie *Prunus serotina* de acuerdo con el diseño experimental en el área experimental, Ejido San Felipe Teotitlán, Estado de México.

6.4.5 Muestreo de vegetación y medición de variables.

Durante un periodo de 12 meses que comenzó en julio de 2021 y finalizó en junio de 2022, se evaluó mensualmente la supervivencia y las variables morfológicas de la especie. En cada evaluación se valoró la supervivencia de cada plántula,

asignando un 1 o 0 a las plantas muertas o vivas, respectivamente, y midiendo la altura y el diámetro y de las plántulas. La altura de cada planta (cm) se midió con un flexómetro desde la base de la planta hasta el ápice de su brote vertical dominante. El diámetro del tallo (cm) se midió en el cuello de la planta con un vernier digital (STAINLESS HARDENED).

6.4.6 Determinación de las áreas potenciales de plantación de la especie

El modelo de distribución de la especie se planteó en términos de los registros de presencia de la especie y de las variables edafoclimáticas.

6.4.7 Registros de presencia de especies

Los registros de presencia de la especie (*Prunus serotina*) fueron obtenidos de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org, 2022), la cual contiene información de sitios como el Missoouri Botanical Garden y la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad.

6.4.8 Variables edafoclimáticas

Para calcular el potencial de plantación de la especie *Prunus serotina*, se extrajeron 19 variables edafoclimáticas para cada punto de ocurrencia, homogeneizadas en formato raster con resoluciones de 30 arcosegundos. Diecinueve variables climáticas se obtuvieron de la plataforma WorldClim Versión 2 (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>, consultada el 10 de diciembre del 2022) (Fick & Hijmans, 2017): Temperatura media anual (BIO1), Rango Medio Diurno (BIO2), Isotermalidad (BIO3), Estacionalidad de la temperatura (BIO4), Temperatura máxima del mes más caliente (BIO5), Temperatura mínima del mes más frío (BIO6), Rango anual de la temperatura (BIO7), Temperatura media del trimestre más húmedo (BIO8), Temperatura media del trimestre más seco (BIO9), Temperatura media del trimestre más cálido (BIO10), Temperatura media del trimestre más frío (BIO11), Precipitación anual (BIO12), Precipitación del mes más húmedo (BIO13), Precipitación del mes más

seco (BIO14), Estacionalidad de la precipitación (BIO15), Precipitación del trimestre más húmedo (BIO16), Precipitación del trimestre más seco (BIO17), Precipitación del trimestre más cálido (BIO18) y Precipitación del trimestre más frío (BIO19). Además, se utilizó la variable elevación obtenida del mismo sitio con resolución de 30 arcosegundos.

6.4.9 Ajuste y evaluación del modelo predictivo.

La correlación lineal (r) entre las variables edafoclimáticas se verificó mediante el paquete `corrplot` del software R (R Core Team, 2018). Las variables con correlaciones mayores o iguales a 0.80 se eliminaron para evitar la multicolinealidad en el modelo. Las probabilidades de aptitud de las especies se estimaron utilizando MaxEnt, versión 4.4.1, que es un método de aprendizaje automático desarrollado para modelizar las distribuciones de las especies y cartografiar su idoneidad de hábitat con una precisión predictiva notablemente alta basada en los puntos de ocurrencia y las variables edafoclimáticas seleccionadas (Milanesi et al., 2015; Phillips et al., 2017; Warren & Seifert, 2011). La configuración del algoritmo fue la siguiente: se utilizó la opción semilla aleatoria para que en cada repetición se incluyera un conjunto diferente de puntos de prueba, se utilizó el 70 % de los datos para el entrenamiento y el 30 % para las pruebas con remuestreo bootstrap, se utilizaron 100 repeticiones con formato logístico y un número máximo de interacciones igual a 1 000, lo anterior de acuerdo con lo sugerido y validado por autores como Phillips et al. (2006) y Plasencia-Vázquez et al. (2014). La capacidad predictiva de cada uno de los modelos resultantes se evaluó mediante el área bajo la curva (AUC), que indica la capacidad de discriminación de una presencia (sensibilidad) frente a la capacidad de discriminación de una ausencia (especificidad) (Phillips & Dudik, 2008). Considerando que se realizaron 100 réplicas, los valores de AUC se ordenaron con la intención de seleccionar el valor de la mediana para evitar los efectos de los valores extremos (Plasencia-Vázquez et al, 2014). Los valores de AUC superiores a 0.9 se consideran modelos con alta capacidad predictiva, entre 0.6 y 0.9 con buena capacidad predictiva y menos de 0.5 capacidad predictiva

inferior a la esperada al azar modelo (Elith et al., 2006; Peterson et al, 2011). La contribución de cada variable edafoclimática al modelo se estimó mediante la prueba de Jackknife (Phillips et al., 2006).

Los resultados del modelo MaxEnt se importaron al programa ArcGIS para crear los mapas finales, que corresponden al mapa de idoneidad y al mapa de presencia-ausencia. Qin et al. (2017) y Yang et al. (2013) mencionan que valores superiores a 0.6 indican un alto potencial de plantación, valores entre 0.4 y 0.6 indican un buen potencial de plantación y valores inferiores a 0.4 indican un bajo potencial de plantación.

6.4.10 Evaluación de la supervivencia, el crecimiento vegetativo y el riesgo de mortalidad de la de las especies en condiciones de campo

La supervivencia y los riesgos de mortalidad de la plantación de capulín en función de las variables morfológicas de la planta se estimaron de la siguiente manera:

6.4.11 Estimación de la supervivencia

La tasa de supervivencia se estimó con el estimador de Kaplan-Meier, $\hat{S}_{KM}$, también conocido como el estimador de producto límite, el cual es un método estadístico no paramétrico en el que la censura se considera al estudiar el período que es necesario para que ocurra un evento. Éste estimador se utiliza cuando se conocen los tiempos individuales de los censurados y los no censurados, calculando así las tasas de supervivencia cada vez que un individuo muere o llega a su fecha de seguimiento. El estimador Kaplan-Meier se define como:

$$\hat{S}_{KM} = \prod_{t_i < t} \frac{r(t_i) - d(t_i)}{r(t_i)} \quad (1)$$

donde $r(t_i)$ son las plantas vivas, $d(t_i)$ son las plantas muertas y $t_i < t$ es el tiempo en el cual la medida fue hecha (Kaplan & Meier, 1958; Gallardo et al.,

2016; Rivas-Ruiz, et al., 2014). De acuerdo con Kaplan y Meier (1958), la función de supervivencia se define como $S(t) = P(t \geq t), t \geq 0$, donde $S(t)$ es la probabilidad de que ocurra una muerte en el tiempo T al menos o igual al tiempo t (Kaplan & Meier, 1958). Para tal fin, el estado de cada planta (viva o muerta) al final del período de evaluación fue considerado, así como la duración de su vida (meses). La supervivencia se clasificó como “excelente” cuando la tasa de supervivencia fue $\geq 90\%$, “aceptable” entre el 70% y el 89% , “marginal” entre el 50% y el 69% , y “no aceptable” $< 49\%$ (Rodríguez-Echeverry & Leiton, 2020). El análisis se realizó con el software SPSS v25.

6.4.12 Estimación del riesgo de muerte.

La regresión de riesgos proporcionales de Cox (Cox, 1972) se utilizó para estimar el efecto del lugar de plantación y del sistema de producción sobre las variables morfológicas de la planta como covariables. El modelo de riesgos proporcionales se define como:

$$h_i(t) = h_o(t)e^{(\beta_1 t_{i1} + \dots + \beta_k t_{ik})} \quad (2)$$

donde $h_i(t)$ es el riesgo de muerte de un individuo i a un tiempo t , el cual es el producto de la función de riesgo de referencia no especificada, $h_o(t)$, y una función exponencial de k covariables (Allison, 1995). Este modelo estima un coeficiente β para cada factor o covariable y prueba la hipótesis nula que $H_0: \beta = 0$ con el estadístico Chi-cuadrado. Dicho coeficiente explica el efecto de un factor o una covariable en la función de riesgo; es decir, si el coeficiente β es negativo significa que el riesgo de muerte se reduce con el incremento de la covariable, mientras que un coeficiente β positivo indica lo contrario (Williams, 2008). El análisis se realizó mediante el software SPSS v25.

6.4.13 Estimación del crecimiento vegetativo.

La tasa de crecimiento en altura (HGR, cm mes⁻¹) y la tasa de crecimiento en diámetro (DGR, mm mes⁻¹) se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones (Griscom et al. 2005):

$$HGR = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$DGR = \frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

donde H y D representan la altura y el diámetro, respectivamente, en t_1 al inicio del experimento y en t_2 al final del experimento sobre una base mensual. Con la finalidad de interpretar con mayor precisión la respuesta de la especie a las condiciones del sitio de plantación, se enfatizó evaluar las variables marcando un periodo de cada tres meses, obteniendo cuatro periodos de análisis correspondientes con las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno).

6.5 Resultados

6.5.1 Registros de presencia

Dentro de la microcuenca Tula se identificaron ocho registros de presencia; sin embargo, alrededor de su límite se detectaron 156 registros de presencia adicionales. Debido a que la cuenca de Tula se encuentra dentro de la cuenca Pachuca-Ciudad de México, la modelación se realizó para ésta última utilizando los 164 registros de presencia. Posteriormente, los resultados se delimitaron a la microcuenca de Tula mediante el programa ArcGIS.

6.5.2 Ajuste y evaluación del modelo.

Con base en el análisis ROC, los valores de AUC para evaluar la capacidad predictiva del modelo fueron 0.905 y 0.916, respectivamente, para los datos de entrenamiento y para los datos de prueba. Como resultado del análisis de

correlación y análisis de factores de inflación de varianza, que demuestran el grado de multicolinealidad en un conjunto de variables de regresión múltiple (Miles, 2014), se identificaron 6 variables con un grado de correlación menor a 0.8, por lo que se incluyeron para el modelado en MaxEnt: Temperatura media anual (BIO1), Rango Medio Diurno (BIO2), Temperatura mínima del mes más frío (BIO6), Rango anual de la temperatura (BIO7), Precipitación anual (BIO12) y Estacionalidad de la precipitación (BIO15).

La prueba de Jackknife indicó que la temperatura media anual (BIO1, 42.3 %), precipitación anual (BIO12, 16.9 %) y el rango anual de la temperatura (BIO7, 15.7 %) son las variables que más contribuyeron al modelo de distribución de la especie con un 74.9 %, mientras que las tres variables restantes contribuyeron con el 25.1 %, estacionalidad de la precipitación (BIO15, 9.3 %), temperatura mínima del mes más frío (BIO6, 8.1 %) y el rango medio diurno (BIO2, 7.6 %)

La Figura 12 muestra el área óptima de plantación para la especie *Prunus serotina* en la cuenca de Tula, se observó que para el área semiseca templada predomina la categoría buena (entre 0.41 y 0.60) con el 78.9 %, seguida de la categoría alta (entre 0.61 y 1) con el 17.1 % y la categoría baja (entre 0 y 0.4) con apenas el 4 % del área total. Respecto al área con clima templado subhúmedo se observó que predomina la categoría baja con el 73.5 %, seguida de la categoría buena con 25.2 % y finalmente la categoría alta con 1.3 % del área total. La región semiseca templada tiene más potencial para la plantación (96 %) del *Prunus serotina* que las áreas húmedas de la cuenca (26.5 %).

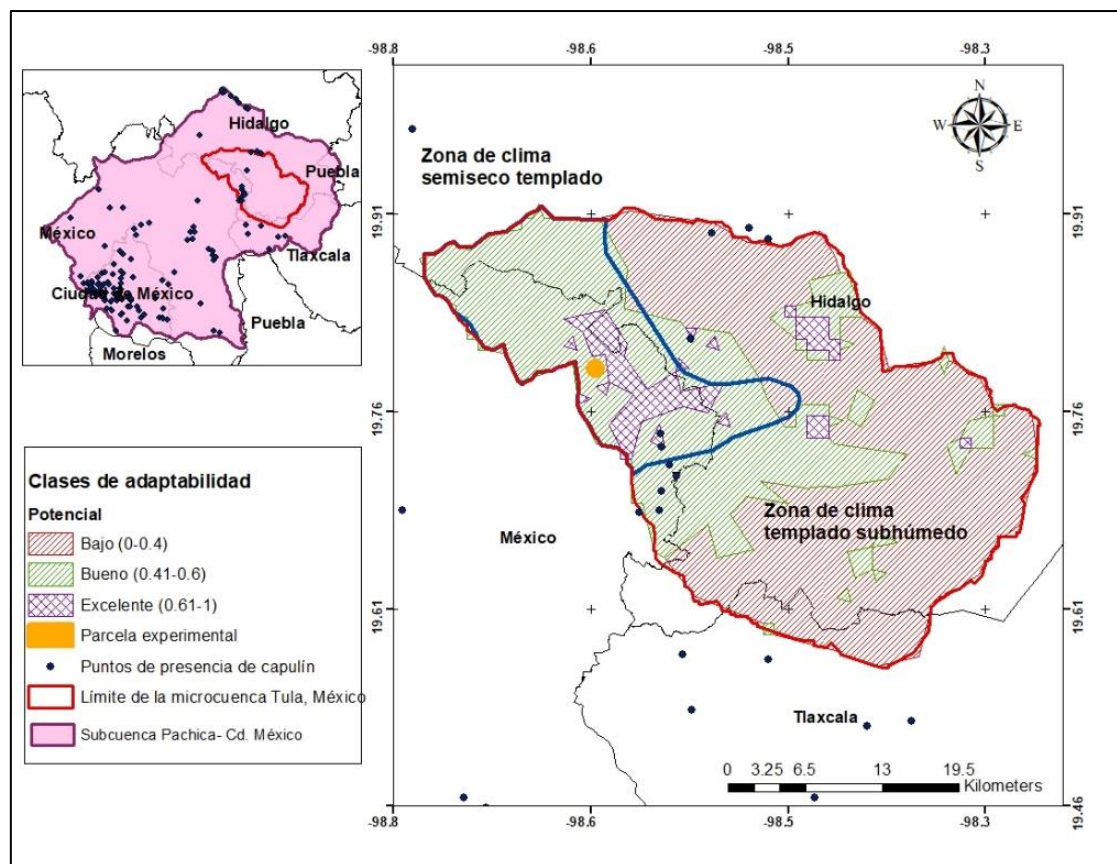


Figura 12. Hábitat potencial para la especie *Prunus serotina*, en la cuenca de Tula, México, utilizando MaxEnt.

6.5.3 Estimación de la supervivencia

Con respecto a la supervivencia del *Prunus serotina*, se puede observar que, de los 41 individuos establecidos en la parcela, se estima un porcentaje de supervivencia de 68.3 % durante los 12 meses que duró el periodo de evaluación (

Cuadro 1). En la Figura 13, se observa que durante los primeros cuatro meses de evaluación se mantuvo el 100 % de supervivencia, posteriormente esta comenzó a disminuir hasta alcanzar el porcentaje mencionado.

Cuadro 1. Estimación de la supervivencia mediante el estimador de Kaplan-Meier para la especie *Prunus serotina* evaluada durante julio de 2021 a junio de 2022.

Especie	Número total	Número de eventos	Censurado	
			Número	Porcentaje
<i>Prunus serotina</i>	41	13	28	68.3 %

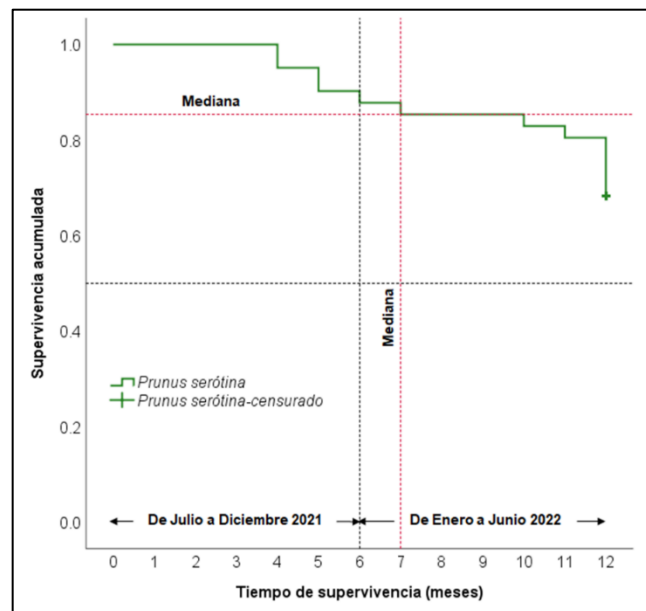


Figura 13. Función de supervivencia estimada $[S(t)]$ del capulín durante el periodo de julio de 2021 a junio de 2022.

Para los individuos que no murieron (censurados), el riesgo acumulado de supervivencia aumentó del mes 4 (octubre) al mes 7 (enero) en un 15 % y concluyó en un 22 % en el mes 12 (junio).

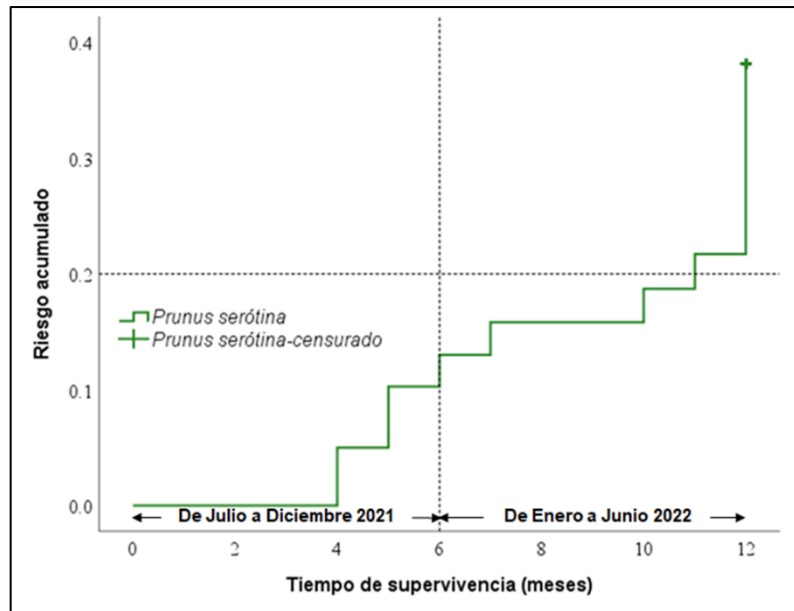


Figura 14. Función de riesgo estimada durante el periodo de julio de 2021 a junio de 2022.

6.5.4 Estimación del riesgo de muerte

El modelo de riesgos proporcionales de Cox fue estadísticamente significativo para el conjunto de datos analizados, ya que se obtuvo un valor de $\chi^2 = 19.626$, $p = 0.003 < 0.05$, rechazando entonces la hipótesis nula: $H_0: \beta = 0$, lo que significa que el modelo contiene por lo menos una covariable que permite explicar el tiempo de supervivencia.

Los resultados de la regresión de Cox (

Cuadro 2) indican que la variable predictora diámetro final (Diafin) tiene un efecto positivo sobre la supervivencia en la especie *Prunus serotina*; es decir, un aumento de 1 cm en el diámetro reduce el riesgo de muerte en un 100 % ($1 - 0.00$), siempre que el resto de las variables permanezcan constantes. La tasa de crecimiento en altura (TCA), el diámetro inicial (Diaini) y la tasa del crecimiento del diámetro (TCD) aumentaron el riesgo de muerte del *Prunus serotina* en más del 100 % cada una según el análisis de regresión de Cox.

Cuadro 2. Variables morfológicas que influyen en el riesgo de muerte en (*Prunus serotina*)

Variables	B	SE	Wald	Df	Sig.	Exp(B)	95.0 % CI para Exp(B)	
							Inferior	Superior
TCA	10.517	4.900	4.607	1	.032	36954.226	2.493547686617.237	
Diaini	8.306	4.237	3.843	1	.050	4048.876	1.001 16373812.823	
Diafin	-8.518	3.962	4.623	1	.032	.000	.000	.471
TCD	94.292	43.199	4.764	1	.029	8.926E+4015115.062	5.272E+77	

6.5.5 Estimación del crecimiento vegetativo.

Los Cuadro 3, 4, 5 y 6 presentan las tasas medias de crecimiento de la altura de la planta y el diámetro del tallo para la especie durante el periodo de evaluación. Durante el ciclo de verano, *Prunus serotina* presentó tasas de crecimiento positivas en altura y diámetro, con 1.033 cm mes⁻¹ y 0.201 cm mes⁻¹ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 1: Ciclo verano.

Especie	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (cm)	
	1	3	1	3
<i>Prunus serotina</i>	93.122	96.220	9.011	9.615

Especie	HGR	DGR
	(cm mes ⁻¹)	(cm mes ⁻¹)
<i>Prunus serotina</i>	1.033	0.201

Durante el segundo período, que corresponde al ciclo otoño, la especie mostró tasas de crecimiento positivas en altura y diámetro del tallo, con 0.134 cm mes⁻¹ y 0.176 cm mes⁻¹, respectivamente (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 2: Ciclo otoño.

Especie	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (cm)	
	1	3	1	3
<i>Prunus serotina</i>	96.785	97.186	9.875	10.144

Especie	HGR (cm mes ⁻¹)	DGR (cm mes ⁻¹)
<i>Prunus serotina</i>	0.134	0.176

En el ciclo de invierno, que corresponde al tercer periodo, la especie mostró tasas de crecimiento positivas para la altura y el diámetro del tallo, con 0.201 cm mes⁻¹ y 0.135 cm mes⁻¹, respectivamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 3: Ciclo invierno.

Especie	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (cm)	
	1	3	1	3
<i>Prunus serotina</i>	97.400	97.400	10.225	10.629

Especie	HGR (cm mes ⁻¹)	DGR (cm mes ⁻¹)
<i>Prunus serotina</i>	0.201	0.135

Durante el cuarto período, que corresponde al ciclo primavera, la especie no mostró cambios en las tasas de crecimiento tanto en la altura (0.00 cm mes⁻¹) como en el diámetro del tallo (-0.007 cm mes⁻¹). La especie *Prunus serotina* mostró la mayor reducción en altura y diámetro en este período con respecto a los tres ciclos estacionales anteriores (Cuadro 6).

Cuadro 6. Tasas de crecimiento promedio de la altura de la planta y el diámetro del tallo. Periodo 4: Ciclo primavera.

Especie	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (cm)	
	1	3	1	3
<i>Prunus serotina</i>	97.968	97.968	10.986	10.965
Especie	HGR		DGR	
	(cm mes ⁻¹)		(cm mes ⁻¹)	
<i>Prunus serotina</i>	0.000		-0.007	

6.6 Discusión

6.6.1 Determinación de las áreas potenciales de plantación de la especie

Con base en los valores de AUC de entrenamiento (0.905) y prueba (0.916) obtenidos del modelo, se observó que éste presenta una alta capacidad predictiva para diferenciar entre sitios con alto y bajo potencial de plantación (Elith et al., 2006; Peterson et al, 2011). El modelo indicó que las zonas semisecas de la cuenca presentaron el mayor porcentaje de zonas con buen potencial de plantación, lo que concuerda con la tasa de supervivencia obtenida en el sitio experimental que fue marginalmente aceptable. Esto indica que los sitios de plantación encontrados se correlacionaron positivamente con las condiciones ambientales encontradas en sus hábitats naturales. Estos sitios se caracterizan por tener temperaturas medias de 14 °C y precipitaciones medias de 500-600 mm por año. Los suelos predominantes son phaeozem háplico (alta materia orgánica, poco profunda, pedregosa y extremadamente inestable) y cambisol eutrófico (suelos extremadamente productivos con un alto grado de susceptibilidad a la erosión), ambos de textura media (franco) (INEGI, 2008). El buen potencial de plantación estuvo fuertemente relacionado con la temperatura media anual (BIO1), la precipitación anual (BIO12) así como la estacionalidad entre estas. Los regímenes de precipitación tienen un impacto significativo en la supervivencia de las plantas (Del Campo, 2002; Hernández et al., 2010).

6.6.2 Evaluación de la supervivencia

El crecimiento vegetativo y el riesgo de mortalidad de la de las especies en condiciones de campo. La tasa de supervivencia obtenida en el sitio experimental fue marginalmente aceptable (68.3 %). Cerrillo et al. (2006), Margolis y Brand (1990), establecen que el éxito de una reforestación depende en gran medida de la supervivencia durante la etapa de establecimiento ya que es en ésta donde las plantas reanudan sus funciones esenciales tras la adaptación a las condiciones del sitio. La supervivencia de las plantas en los sitios de plantación puede verse afectada por diversos factores, entre los que se encuentran factores abióticos como la precipitación, temperatura, humedad, radiación, humedad, propiedades fisicoquímicas del suelo (Omary, 2011; Vallejo et al., 2012), así como factores bióticos (competencia, plagas, enfermedades) y factores antropogénicos que van desde las técnicas de plantación hasta otros factores externos (Ortega et al., 2006).

Durante los tres primeros meses de establecimiento de la plantación (julio a septiembre) se observó que la especie *Prunus serotina* obtuvo un crecimiento positivo tanto en altura como en diámetro, con $1.033 \text{ cm mes}^{-1}$ y $0.201 \text{ cm mes}^{-1}$, respectivamente. Existe una estrecha relación entre esto y la estación de lluvias en la zona de estudio, que mantiene la humedad del suelo y mitiga el exceso de radiación que podría afectar al desarrollo del capulín (Villar et al., 2008). Pimienta-Barrios et al. (2002) observaron resultados análogos en especies de pitayo, donde observaron un crecimiento significativo de las ramas durante los periodos de mayor humedad del suelo. Por otra parte, Pineda-Herrera et al. (2015) encontraron que el ancho de las zonas de crecimiento se correlacionó positivamente con los meses en los que la humedad del suelo fue mayor para las especies *Schizolobium parahyba* y *Vochysia guatemalensis*.

Durante las estaciones de otoño e invierno (octubre a marzo) posteriores a la estación lluviosa, las tasas de crecimiento tanto de la altura como del diámetro disminuyeron, aunque siguieron mostrando un crecimiento positivo. La disminución de la tasa de crecimiento ha sido más marcada en altura que en

diámetro, principalmente porque durante estos periodos en los que las temperaturas medias se sitúan entre 12 y 13 °C, las mínimas entre 5 y 6 °C y la humedad ambiental disminuye (Weatherspark, 2023), se promueve la senescencia en hojas provocando que los procesos de crecimiento entren en latencia como resultado de una reducción en las concentraciones de hormonas de crecimiento como auxinas, giberelinas y citoquininas, y un aumento en la producción de hormonas como el ácido abscísico (Díaz-Montenegro, 2002). Como medida de adaptación a periodos de estrés hídrico o escasez de nutrientes, se produce una acumulación de reservas principalmente en tallos y raíces como resultado de la translocación de nutrientes (Díaz-Montenegro, 2002).

Durante los últimos meses de evaluación, que correspondieron al final del invierno, se observó que no hubo crecimiento tanto en altura como en diámetro, lo que puede explicarse porque las especies con características caducifolias concentran la energía almacenada para romper la dormancia del invierno e iniciar el crecimiento de las yemas (Viveros-Viveros & Vargas-Hernández, 2007). El sitio de estudio está asociado a altas temperaturas y bajas precipitaciones desde abril y mayo, cuando las temperaturas medias son de 17 °C y las precipitaciones superiores a 50 milímetros. Al aumentar la concentración de hormonas de crecimiento y el transporte de fotosintatos para activar las yemas, se crean condiciones opuestas a las del periodo invernal (Díaz-Montenegro 2002; Villar et al., 2008). Pineda-Herrera et al., (2015) encontraron resultados similares en dos especies forestales en Oaxaca, México, donde observaron una fase mínima de crecimiento entre octubre y mayo para todas las curvas o periodos de reposo, y un incremento al inicio de la temporada de lluvias.

Los individuos que sufrieron daños mecánicos causados por actividades antropogénicas mostraron un comportamiento análogo en la respuesta de crecimiento para altura y diámetro, siendo el diámetro la variable en la que se observó una reducción menos marcada en las tasas de crecimiento, lo cual concuerda con Villar et al. (2008) quienes mencionaron que los tallos y raíces contienen mayor cantidad de carbohidratos bajo condiciones de estrés.

Basándose en la regresión de riesgos proporcionales de Cox, se determinó que la variable de diámetro final era la que reducía el riesgo de muerte en un 100% por cada centímetro de crecimiento del diámetro siempre que todas las demás variables permanecieran constantes. Los resultados obtenidos son consistentes con los reportados por Fontes (1999), quien indica que algunas especies pueden dedicar una mayor cantidad de recursos al desarrollo del diámetro durante sus primeras etapas de desarrollo, por lo que el crecimiento del diámetro estaría relacionado con la adaptación de las especies a diferentes ambientes.

6.7 Conclusiones

A partir de este estudio, es posible determinar si una especie puede adaptarse a las condiciones edafoclimáticas donde está establecida. Teniendo en cuenta la modelación de zonas aptas de distribución, la supervivencia, el crecimiento vegetativo y el riesgo de muerte, se puede recomendar el uso de especies de uso múltiple en arreglos agroforestales como un método de manejo de la tierra en suelos degradados que beneficie a la sociedad en su conjunto, así como al desarrollo rural. La especie *Prunus serotina* mostró una capacidad adecuada de plantación con respecto a las condiciones edafoclimáticas del área de estudio, de acuerdo con el modelo. La tasa de supervivencia de la especie obtenida en el sitio experimental fue marginalmente aceptable (68.3 %). Las condiciones estacionales del sitio afectaron las tasas de crecimiento de las variables morfológicas de las especies evaluadas en diversos grados. Durante el periodo de lluvias se mostró un crecimiento positivo tanto en altura como en diámetro. Las condiciones climáticas durante el otoño y el invierno promovieron la senescencia en hojas, lo que derivó en un periodo de latencia donde se acumularon reservas en tallo y se redujo la tasa de crecimiento en altura. En el periodo de primavera, no hubo crecimiento para las variables estudiadas debido a que la planta utiliza las reservas de nutrientes para romper el periodo de dormancia. Las variables morfológicas de la especie también determinaron su riesgo de muerte. La variable diámetro redujo el riesgo de muerte en 100 % por

cada centímetro de incremento, esto último considerando que las demás variables permanezcan constantes.

6.8 Literatura citada

- Adriano-Morán, C.C., and McClung de Tapia, E. (2008). Trees and shrubs: the use of wood in prehispanic Teotihuacan. *Journal of Archaeological Science*, 35(11), 2927-2936. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.001>
- Aguilos R, Marquez C, Adornado H, Aguilos M (2020) Domesticating commercially important native tree species in the Philippines: Early growth performance level. *Forests* 11(8):885. <https://doi.org/10.3390/f11080885>
- Allison, P. D. 1995. *Survival Analysis Using the SAS System: A Practical Guide*. SAS Institute, Cary, North Carolina.
- Bradburn MJ, Clark TG, Love SB, Altman DG (2003) Survival Analysis Part II: Multivariate data analysis—an introduction to concepts and methods. *British Journal of Cancer* 89, 431–436. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6601119>
- Cerrillo, R. M. N., del Campo García, A., & Segarra, J. C. (2006). Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. In *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: estado actual de conocimientos* (pp. 31-46). Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Challenger, A., & Dirzo, R. (2009). Tendencias de cambio y estado de la biodiversidad, los ecosistemas y sus servicios. Estado de conservación y tendencias de cambio. *Capital Natural de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México, 35-72.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2011). *Ficha técnica Prunus serotina*. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/60-rosac6m.pdf. (Consultada el 16 de junio de 2021)
- Cox DR. (1972). Regression Models and Life-Tables. *Journal of the Royal Statistical Society* 34:187–220.
- Crawley MJ. (2007). *The R Book*; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA.
- Davies, J., Poulsen, L., Schulte-Herbrüggen, B., Mackinnon, K., Crawhall, N., Henwood, W.D., Dudley, N., Smith, J. y Gudka, M. (2012). *Conserving dryland biodiversity. International Union for Conservation of Nature, United Nations Environment Programme–World Conservation Monitoring Programme and United Nations*. Convention to Combat Desertification.
- Del Campo AD. (2002). *Régimen de cultivo, desarrollo en vivero, calidad de planta y respuesta al establecimiento en cuatro especies de frondosas mediterráneas*. (Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba, España). p 310.

- Díaz-Montenegro Daniel H. (2002). *Fisiología de árboles frutales*. AGT Editor. ISBN 9684631057. Pp 390
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 40, 677-697.
- Elith, J., C. Graham, R. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. Hijmans, F. Huettmann, J. Leathwick, A. Lehmann, L. Jin, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. T. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz and N. E. Zimmermann. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29(2):129-151.
- Estenssoro Saavedra, F. (2010). Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente complejo para América Latina. *Universum (Talca)*, 25(2), 57-77.
- FAO. (2017). *Agroforestería para la restauración del paisaje*. Roma, Italia. Consultada en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/4c40fe3e-df0b-479a-8c75-bb4877a4d4e8/>.
- Fick, S.E., and R.J. Hijmans, (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Fontes LMA. (1999). Padroes alométricos em espécies arbóreas pioneiras tropicais. *Scientia Forestalis* 1(55):79–87.
- Gallardo Allen, E., Molina-Delgado, M., & Cordero Cantillo, R. (2016). Aplicación del análisis de sobrevivencia al estudio del tiempo requerido para graduarse en educación superior: El caso de la Universidad de Costa Rica. *Páginas de Educación*, 9(1), 61-87.
- Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló, et al. (Eds). (2014). Atlas de suelos de América Latina y el Caribe. Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg.
- GBIF.org. (4 November 2022). *GBIF Occurrence Download*. <https://doi.org/10.15468/dl.4euu6b>.
- Giannini, T. C., Siqueira, M. F., Acosta, A. L., Barreto, F. C., Saraiva, A. M., & Santos, I. A. D. (2012). Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia*, 63, 733-749. <https://doi.org/10.1590/s2175-78602012000300017>
- Griscom, H. P., Ashton, P.M.S., & Berlyn, G.P. (2005) Seedling survival and growth of native tree species in pastures: Implications for dry tropical forest rehabilitation in central Panama. *Forest Ecology and Management* 218:306–318. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.026>

- Guevara, M., C. Aguilar, C. Arroyo, F. González y J. Larson. (2012). La diversidad de los datos sobre los suelos de México: perfiles y clases, escalas y modelos continuos. *Conabio. Biodiversitas* 105: 13-16.
- Hernández El, Vilagrosa A, Bellot J, Pausas JG. (2010). Morphological traits and water use strategies in seedlings of Mediterranean coexisting species. *Plant Ecology* 207:233–244.
- Instituto Nacional de Ecología. (2004). *Perspectivas del Medio Ambiente en México: GEO México 2004*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2007). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Precipitación media anual*. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267544>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Consultado en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250000. Serie VI*. Consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Kaplan EL and Meier P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association* 53(282):457–481.
- Ma, B., and Sun, J. (2018). Predicting the distribution of *Stipa purpurea* across the Tibetan Plateau via the MaxEnt model. *BMC Ecology*, 18(10), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12898-018-0165-0>
- Margolis HA and Brand DG. (1990). An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Canadian Journal of Forest Research* 20:375–390.
- Milanesi, P.; Holderegger, R.; Caniglia, R.; Fabbri, E.; Randi, E. (2015). Different habitat suitability models yield different least-cost path distances for landscape genetic analysis. *Basic Appl. Ecol.*, 17, 61–71.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis, Washington (DC): Island Press*.
- Oldeman, L. (1998). *Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation*. Wageningen: ISRIC.
- Olszewska, M. (2007). Quantitative HPLC analysis of flavonoids and chlorogenic acid in the leaves and inflorescences of *Prunus serotina* ehrh. *Acta chromatographica*, 19, 253-269.
- Omary, A. A. (2011). Effects of aspect and slope position on growth and nutritional status of planted Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in a degraded land semi-arid areas of Jordan. *New Forests*, 42(3), 285-300.

- Ortega, U., Majada, J., Mena-Petite, A., Sanchez-Zabala, J., Rodriguez-Iturrizar, N., Txarterina, K., ... & Duñabeitia, M. (2006). Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests*, 31(1), 97-112.
- Palma-Ordaz, S., y Delgadillo-Rodríguez, J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92, 587-597.
- Peterson, A.T.; Soberón, J.; Pearson, R.G.; Anderson, R.P.; Martínez-Meyer, E.; Nakamura, M.; Araujo, M.B. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions*; Princeton University Press: Princeton, NJ, USA.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S., and Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S.J.; Anderson, R.P.; Dudík, M.; Schapire, R.E.; Blair, M.E. (2017). Opening the Black Box: An Open-Source Release of Maxent. *Ecography* 40, 887–893.
- Pimienta-Barrios, E., Robles-Murgía, C., & Pimienta-Barrios, E. (2002). Crecimiento primario en plantas silvestres de pitayo (*Stenocereus queretaroensis* (Weber) Buxbaum) y su relación con temperatura, lluvia y micorrizas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25(2), 219-219.
- Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J. I., López-López, M. Á., Manzano-Méndez, F., & Salgado-Ugarte, I. H. (2015). Incremento en diámetro y periodicidad de anillos de crecimiento de dos especies arbóreas en una selva húmeda del norte de Oaxaca, México. *Madera y bosques*, 21(3), 55-68.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Nopaltepec [PMDU]. (2019). Disponible en: <https://seduo.edomex.gob.mx/sites/seduo.edomex.gob.mx/files/files/PMDU%20NOPALTEPEC%202019.pdf>
- Plasencia-Vázquez, Alexis Herminio, Escalona-Segura, Griselda, & Esparza-Olguín, Ligia Guadalupe. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta zoológica mexicana*, 30(3), 471-490.
- Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R.W., Ma, F., Jian, Z., Xu, G., & Pei, S. (2017). Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch, an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 10, 139-146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2017.02.004>

- R Core Team. (2018) R: *A language and Environment for Statistical Computing (Version 3.4.4)*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.
- Raya-Pérez, J. C., Aguirre-Mancilla, C. L., Tapia-Aparicio, R., Ramírez Pimentel, J.G., & Covarrubias-Prieto, J. (2012). Storage proteins characterization and mineral composition of black Cherry seed (*Prunus serotina*). *Polibotánica*, 34, 203-215.
- Regos A., Gagne, L., Alcaraz, S. D., Honrado, J. P., & Domínguez, J. (2019). Effects of species traits and environmental predictors on performance and transferability of ecological niche models. *Scientific Reports*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40766-5>
- Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., Palacios, L., & Talavera, J. O. (2014). Investigación clínica XXI Del juicio clínico al análisis de supervivencia. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 52(3), 308-315.
- Rodríguez-Echeverry J y Leiton M (2020) Estrategias de restauración para el páramo de frailejones perturbado por incendios en el norte de Ecuador. *Ecosistemas* 29(3):2018. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2018>
- Rosa-Mera, C. J. D. L., y Monroy-Ata, A. (2006). Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 9, 96-100.
- SEMARNAT y CP. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000*. México
- SEMARNAT. (2002). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales*. Edición 2002.
- SEMARNAT. (2015). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde*. Edición 2015.
- Sigala RJA, González TMA, Prieto RJA (2015) Survival of *Pinus pseudostrobus* Lindl. plantations in terms of the production system and pre-conditioning in the nursery. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6:20–31
- Society for Ecological Restoration International. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Disponible en: https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/SER_Primer/ser-primer-spanish.pdf.
- Starfinger, U., Kowarik, I., Rode, M., & Schepker, H. (2003). From desirable ornamental plant to pest to accepted addition to the flora – the perception of an alien tree species through the centuries. *Biological Invasions*, 5, 323-335. <https://doi.org/10.1023/B:BINV.0000005573.14800.07>
- Syfert, M. M., Smith, M. J., & Coomes, D. A. (2013). The effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models. *PLOS ONE*, 8(7), 10.1371/annotation/35be5dff-7709-

4029-8cfa-f1357e5001f5. <https://doi.org/10.1371/annotation/35be5dff-7709-4029-8cfa-f1357e5001f5>

- Vallejo VR, Smanis A, Chirino E, Fuentes D, Valdecantos A, Vilagrosa A. (2012). Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forest* 43:561–579. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9325-9>
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J. L., Poorter, H., Valladares, F., & Marañón, T. (2008). Capítulo 7: Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. *En: Valladares F (ed). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid, España, pp. 193–230.
- Viveros-Viveros, H. y Vargas-Hernández, J. J.(2007). Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13 (2): 131-135. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62913206>
- Warren D. L., and Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21, 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Weatherspark. (2023). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Nopaltepec*. <https://es.weatherspark.com/y/6612/Clima-promedio-en-Nopaltepec-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Williams, C. S. (2008). Surviving survival analysis. An applied introduction. *SESUG 2008: The Proceedings of the South East SAS Users Group, St Pete Beach, FL*. Disponible en: <http://analytics.ncsu.edu/sesug/2008/ST-147.pdf>
- Yang, X.Q.; Kushwaha, S.P.S.; Saran, S.; Xu, J.; Roy, P.S. (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecol. Eng.*
- Zamora E., M. C., Espinoza B., J. C., García, A. M., Hernández M., P. A., & Núñez G., R. M. (2020). Distribución potencial de dos especies de leguminosas en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 1299-1310.