



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZAS E INVESTIGACIÓN EN SUELOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

ARBUSTIVAS Y HERBÁCEAS EN PROCESOS DE REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN UN CLIMA SEMISECO

TESIS

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

Presenta:

JESÚS EDUARDO CAHUICH DAMIÁN

Bajo la supervisión de:

DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO



APROBADA



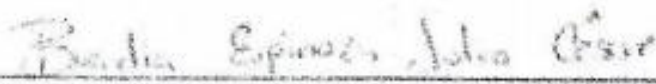
Chapingo, Estado de México, junio de 2020

**ARBUSTIVAS Y HERBÁCEAS EN PROCESOS DE
REHABILITACIÓN ECOLÓGICA EN UN CLIMA SEMISECO**


Tesis realizada por C. Jesús Eduardo Cahuich Damián 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. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO

ASESOR: 
DR. JULIO CESAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR: 
DRA. IRMA DÍAZ AGUILAR

ASESOR: 
DR. PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	v
AGRADECIMIENTOS	vii
DEDICATORIA	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi
1.INTRODUCCION GENERAL	1
1.1 Objetivos.....	3
2 REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Causas de la degradación de suelos.....	3
2.2 Ubicación de los climas secos en México.....	5
2.3 La rehabilitación como estrategia para la recuperación de suelos degradados.....	5
2.3.1 Técnicas de restauración aplicadas en rehabilitación	8
2.4 sobrevivencia.....	9
2.5 Especies forrajeras de uso multiple con potencial para rehabilitar suelos degradados.....	10
2.6 Modelación de nicho ecológico.....	15
2.6.1 Algoritmos para modelación de nichos ecológicos	17
2.7 Referencias bibilográficas.....	19
3 EVALUACIÓN DE LA SOBREVIVENCIA DE ARBUSTIVAS Y HERBACEAS CON LA FINALIDAD DE INTRODUCIR ESPECIES PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS	25
3.1 Resumen	25
3.2 Abstract	26
3.3 Introducción	27
3.4 Materiales y métodos.....	29
3.4.1 Área de estudio	29

3.4.2 Establecimiento de a parcela experimental	30
3.4.3 Producción de arbustivas y herbáceas	32
3.4.4 Establecimiento de la planta en campo	33
3.4.5 Muestreo de vegetación y medición de variables	34
3.4.6 Estimación de sobrevivencia	35
3.5 Resultados y discusión	37
3.5.1 Análisis del crecimiento	37
3.5.2 Sobrevivencia de las arbustivas y herbáceas introducidas	39
3.5.3 Sobrevivencia total en la parcela experimental	42
3.6 Conclusiones	43
3.7 Referencias bibliográficas	44
4 ANALISIS DE ADAPTABILIDAD DE <i>LEUCAENA COLLINSSI</i> EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO	47
4.1 Resumen	47
4.2 Abstract	48
4.3 Introducción	49
4.4 Materiales y métodos.....	51
4.4.1 Localizacion del área de estudio	51
4.4.2 Datos de presencia.....	52
4.4.3 Variables predictivas ambientales	52
4.4.4 Modelado de nichos ecológicos	54
4.4.5 Validación del modelo	54
4.4.6 Evaluación de la sobrevivencia de la especie en campo.....	55
4.5 Resultados y discusión	56
4.6 Conclusiones	60
4.7 Referencias bibliográficas	60
5 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE <i>ATRIPLEX CANESCENS</i>, <i>CYNODON DACTYLON</i> Y <i>LEUCAENA COLLINSII</i> EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO.....	65
5.1 Resumen	65
5.2 Abstract	66
5.3 Introducción	67
5.4 Materiales y métodos.....	69
5.4.1 Área de estudio	69

5.4.2 Registros de presencia de la especies	70
5.4.3 Variables ambientales	71
5.4.4 Modelado de nichos ecológicos	72
5.4.5 Validación del modelo	73
5.4.6 Evaluación de al sobrevivencia de las especies en campo	74
5.5 Resultados y discusión	75
5.5.1 Registros de presencia	75
5.5.2 Modelos de nicho ecológico	76
5.5.3 Evaluacion de modelos	78
5.5.4 Evaluacion de la supervivencia en campo.....	80
5.6 Conclusiones	81
5.7 Referencias bibliográficas.....	81
6 CONCLUSIONES GENERALES.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores de las propiedades físicas y químicas del suelo utilizado como sustrato en la parcela experimental.	32
Cuadro 2. Promedios de la altura, diámetro y cobertura de las especies arbustivas y herbáceas a los 3 y 12 meses después de la plantación.	37
Cuadro 3. Porcentajes de sobrevivencia de las especies arbustivas y herbáceas, introducidas con fines de rehabilitación, obtenidos a los 3 y 12 meses después del trasplante.	40
Cuadro 4. Estimación de la sobrevivencia total de las especies introducidas a nivel de parcela experimental, a los 3 meses (S3M) y 12 meses (S1A) después de la plantación.	42
Cuadro 5. Variables predictivas ambientales utilizadas en MaxEnt para generar el modelo de nicho ecológico de <i>Leucaena collinsii</i> en la microcuenca Tula, México.	53
Cuadro 6. Variables incorporadas en MaxEnt para generar el modelo de nicho ecológico de las tres especies.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posibles intervenciones para abordar la degradación del suelo. Tomado de Valentin (2018).	6
Figura 2. Arbusto de la especie <i>Atriplex canescens</i>	11
Figura 3. Arbusto de la especie <i>Leucaena collinsii</i>	12
Figura 4. Herbácea trepadora <i>Macropitulum atropurpureum</i> (Siratro).	13
Figura 5. Especie herbácea de <i>Cynodon dactylon</i> (Bermuda).	14
Figura 6. Localización del área de estudio.	30
Figura 7. Vistas del área de estudio.	30
Figura 8. A) Recorrido por el área de estudio. B) Delimitación de la parcela experimental y subparcelas.	31

Figura 9. A) Apertura de cajetes en el área de estudio. B) Análisis de suelo utilizado como sustrato en los cajetes.	31
Figura 10. A) Producción de planta en invernadero. B) Traslado de las plantas al sitio de plantación.	33
Figura 11. Representación de la distribución de especies arbustivas y herbáceas en la parcela experimental.	34
Figura 12. Mediciones de las variables A) altura de planta y B) cobertura.	35
Figura 13. Daño severo en <i>Leucaena leucocephala</i> y evidencias de herbivoría por la fauna silvestre.	41
Figura 14. Localización del área experimental.	56
Figura 15. Contribución porcentual de las variables ambientales al modelo de <i>Leucaena collinsii</i>	58
Figura 16. Distribución potencial de <i>Leucaena collinsii</i> en la microcuenca Tula, México.	59
Figura 17. Localización de la parcela experimental en el ejido San Felipe Teotitlán, Estado de México en la microcuenca Tula, México.	70
Figura 18. Prueba de aleatoriedad para sitios registrados <i>Atriplex canescens</i> , <i>Cynodon dactylon</i> y <i>Leucaena collinsii</i> . $G(r)$ = número promedio de registros dentro de un radio r , equivalente a la distancia en grados. La línea continua corresponde a los valores observados, la línea discontinua a los valores teóricos y el área gris a la banda de confianza.	76
Figura 19. Distribución potencial de la especie <i>Atriplex canescens</i> en la microcuenca Tula, México.	77
Figura 20. Distribución potencial de la especie <i>Cynodon dactylon</i> en la microcuenca Tula, México.	77
Figura 21. Distribución potencial de la especie <i>Leucaena collinsii</i> en la microcuenca Tula, México.	78

AGRADECIMIENTOS

El presente documento es resultado del trabajo conjunto de varias instancias y personas, a quienes deseo reconocer su participación de manera puntual y a continuación se mencionan.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado durante la Maestría.

Dra. María Edna Álvarez Sánchez, coordinadora de la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible; por el apoyo brindado.

Dr. David Cristóbal Acevedo, director de tesis, por su asesoría, dedicación, entusiasmo y voluntad para la realización teórica y práctica de este trabajo.

Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández, por su asesoría, dedicación, valentía y voluntad en el proceso teórico-práctico de este documento.

Dr. Julio Cesar Buendía Espinoza, por las sugerencias, amistad y apoyo brindados a lo largo de la investigación.

Dra. Irma Díaz Aguilar, profesora del Colegio de Posgraduados Campus Montecillos por el apoyo brindado para la colecta y apertura al entusiasmo, hacia el fascinante estudio de la mesofauna del suelo.

M.C. Claudio Romero Díaz por su invaluable apoyo, consejos y sapiencia antes y durante la formación del documento.

Al. C. Wilfrido representante legal de la comunidad San Felipe Teotitlán, por la apertura de esta, para realizar el trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A los profesores, **Dr. Julio Cesar Buendía Espinoza** y **Dra. Irma Díaz Aguilar**, no sólo como parte medular del comité y la academia, sino por la valentía, la pasión y el compromiso de inculcar la Agroforestería a las nuevas generaciones y ver hacia nuevos horizontes; horizontes de retos.

A mi esposa **Yanin Saraí Sosa Feria**, por tu amor, paciencia y por la confianza a lo largo de este reto, quien me enseñó que es posible comenzar de nuevo.

A mi amigo, **M.C. Claudio Romero Díaz**, por tu apoyo, hermandad y comprensión en los momentos más difíciles.

Y, por último, pero no menos especiales a todos los que, anónimamente, formaron parte de esta gran aventura.

DATOS BIOGRÁFICOS



Jesús Eduardo Cahuich Damian, de nacionalidad mexicana nació el 05 de agosto de 1988 en la ciudad de San Francisco de Campeche. Se graduó como Ingeniero Agrónomo Especialista en Sistemas Silvopastoriles por el Instituto Tecnológico de Chiná (Chiná, Campeche) en diciembre de 2010, con la tesis titulada “Optimización de los recursos forrajeros, bajo un sistema silvopastoril en el Rancho Xamantún, Campeche”.

En el año 2011, trabajó en el Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Campeche (CESAVECAM) como brigadista en la campaña contra el psilido asiático *Diaphorina citri*, vector responsable de portar a la bacteria *Candidatus liberibacter*, causante de la enfermedad denominada Huanglongbing de los cítricos (HLB). En el periodo 2013-2017, fue auxiliar de campo en el CESAVECAM, participando en el monitoreo, combate y mitigación del ácaro *Raoiella indica* Hirst, plaga cuarentenaria de las palmas a nivel mundial. En el año 2018 ingresó a la Maestría en Ciencias en Agroforestería Para el Desarrollo Sostenible, en la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

Arbustivas y herbáceas en procesos de rehabilitación ecológica en un clima semiseco

La degradación de suelos en climas semisecos es un proceso inducido por las actividades antropogénicas que disminuyen la calidad del suelo. La rehabilitación del suelo es necesaria cuando el suelo es prácticamente improductivo. La introducción de especies arbustivas y herbáceas no nativas, de uso múltiple, pueden restablecer algunos servicios ecológicos en estos suelos. Con el objetivo de proponer un plan de rehabilitación asistida en suelos degradados de la comunidad de San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México, se evaluó la sobrevivencia de las especies arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii*, *Leucaena leucocephala*, *Dalea zimapanica* y de las herbáceas *Macroptilium atropurpureum*, *Oryzopsis hymenoides* y *Cynodon dactylon*. Los resultados mostraron que *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* y *Cynodon dactylon* tuvieron los más altos porcentajes de sobrevivencia (100%), lo que las hace ser una alternativa viable para fines de rehabilitación del suelo, además, de mantener la cobertura vegetal y producir forraje. La microcuenca Tula, México está ubicada en una zona de clima semiseco donde la degradación del suelo tiene un fuerte impacto en el recurso suelo. Por tanto, es importante encontrar las zonas aptas para el desarrollo óptimo de las especies que tuvieron una alta sobrevivencia, en campo, a nivel de microcuenca, utilizando el modelo de nicho ecológico de máxima entropía, MaxEnt. El modelo tuvo una buena capacidad de predicción para *Leucaena collinsii*, $p\text{-valor}=0.013$, con la prueba de Jackknife; sin embargo, indicó que la distribución potencial de la especie es baja, 8% de la superficie de la microcuenca, Tula. *L. collinsii* tiene escasas zonas de adaptabilidad, a pesar de ello, su alta sobrevivencia en campo indica que es una opción para la rehabilitación del suelo, en las áreas de mayor adaptabilidad. En un segundo modelado con MaxEnt, se estimó la distribución potencial de *Atriplex canescens*, y *Cynodon dactylon* en la microcuenca Tula, utilizando 19 variables ambientales, y los registros de presencia de las especies de las bases de datos GBIF, MEXU y SNIB. Los resultados del modelado indicaron que *A. canescens* y *C. dactylon* tienen un considerable potencial de distribución del 55% y 84%, respectivamente, y altos porcentajes de sobrevivencia (80 y 100%). Por tanto, estas especies son una opción para la rehabilitación de suelos en la microcuenca Tula.

Palabras clave: suelos degradados, rehabilitación, arbustivas y herbáceas, sobrevivencia, MaxEnt, distribución potencial, modelación de nicho ecológico

GENERAL ABSTRACT

Shrubs and herbaceous plants in ecological rehabilitation processes in a semi-arid climate

Soil degradation in semi-arid climates is a process induced by anthropogenic activities thereby reducing soil quality. Soil rehabilitation is required when the soil is practically unproductive. The introduction of non-native shrub and herbaceous plants, multipurpose, can restore some ecological services in these soils. In order to propose an assisted rehabilitation project in degraded soils of the community of San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, State of Mexico, it was evaluated the survival of the shrub species *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii*, *Leucaena leucocephala*, *Dalea zimapanica* and the herbaceous *Macroptilium atropurpureum*, *Oryzopsis hymenoides* and *Cynodon dactylon*. The results showed that *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* and *Cynodon dactylon* had the highest survival rates (100%), which makes them a feasible alternative to soil rehabilitation purposes, in addition, to maintain plant cover and to produce forage.

The Tula microwatershed, Mexico is located in a semi-arid climate zone where soil degradation has a strong impact on the soil resource. It is therefore important to find the most suitable areas for the optimal development of the species that have higher survival, in the field, at the microwatershed level, using the maximum entropy ecological niche model, MaxEnt. The model had a good predictive capacity for *Leucaena collinsii*, p-value = 0.013, with the Jackknife test; however, it indicated that the potential distribution of the species is low, 8% of the surface of the Tula microwatershed. *L. collinsii* has few areas of adaptability, despite this, its high survival in the field indicated that it is an option for soil rehabilitation, in the areas of greater adaptability. In a second modeling with MaxEnt, it was estimated the potential distribution of *Atriplex canescens*, and *Cynodon dactylon* in the Tula microwatershed, using 19 environmental variables, and species presence records from the GBIF, MEXU and SNIB databases. The modeling results indicated that *A. canescens* and *C. dactylon* have a considerable distribution potential of 55% and 84%, respectively, and high survival rates (80 and 100%). Therefore, these species are an option for soil rehabilitation in the Tula microwatershed.

Keywords: degraded soils, rehabilitation, shrubs and herbaceous plants, survival, MaxEnt, potential distribution, ecological niche modeling

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Para contribuir a disminuir la degradación de suelos se han buscado estrategias como es la rehabilitación cuyo objetivo es revertir el proceso, pero no tiene la finalidad de devolver al suelo a su estado inicial, de tal modo que se puedan atenuar los efectos de la degradación (Valentin, 2018). Los factores que determinan el éxito de una plantación con fines de rehabilitación en zonas semisecas están condicionados por diversas variables climáticas que pueden provocar el estrés de la vegetación. Tambussi (2004) señala que, ante los posibles efectos del cambio climático, el conocimiento de estos factores de estrés en la vegetación puede resultar decisivo para la elaboración de modelos predictivos de la naturaleza con fines de rehabilitación.

Son precisamente las condiciones ambientales de determinadas zonas del Noroeste del Estado de México, tales como bajas temperaturas, suelos someros, elevada radiación y evaporación y, en especial, la escasez de precipitaciones, las que determinan el éxito de las estrategias de restauración en estas zonas. Aun considerando los riesgos, la vegetación es el componente que más rápidamente evidencia los impactos y las acciones de recuperación de zonas degradadas. Por tanto, la evaluación del establecimiento de plántulas, por medio de estudios de sobrevivencia en campo, permiten avanzar en el conocimiento de patrones espaciales y temporales de colonización de sitios degradados (Pérez, 2013), favoreciendo el establecimiento de una cobertura vegetal.

Por otra parte, la distribución de especies se rige por varios factores entre los más importantes están los ambientales, ya que su sobrevivencia y desarrollo están determinados por un rango de condiciones ambientales, que impactan su nicho ecológico (López, 2007; Peterson et al., 2008; Soberón y Nakamura, 2009). En los últimos años se han desarrollado algoritmos para modelar nichos ecológicos de especies y poder obtener las potenciales áreas para su distribución geográfica (Elith et al., 2006), estos algoritmos se basan en el concepto de nicho ecológico establecido por Hutchinson (1957), para determinar áreas en donde no existen registros de presencia de una especie pero que cumplen con las condiciones adecuadas para su sobrevivencia y

desarrollo (Elith et al., 2010; López, 2007; Soberón y Peterson, 2005). MaxEnt es un algoritmo para hacer predicciones de distribuciones geográficas de especies y da como resultado un valor de idoneidad del hábitat para la especie como una función de las variables ambientales (Phillips et al., 2006).

La presente tesis tuvo como finalidad implementar ensayos de sobrevivencia de especies no nativas, en un ambiente de clima seco y un alto grado de degradación del suelo, con el propósito de ser introducidas con fines de rehabilitación de suelos. La selección de especies se realizó para que fueran plantas de uso múltiple, es decir, mejoradoras del suelo, productoras de forraje y de cubierta vegetal, y que hubieran demostrado una alta capacidad de adaptación en diferentes climas. Las especies arbustivas *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt., *Leucaena collinsii* (Britton & Rose), *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *Dalea zimapanica* S. Schauer, y las herbáceas *Macroptilium atropurpureum* (Moc. & Sesse ex DC), *Oryzopsis hymenoides* Ricker ex Piper y *Cynodon dactylon* (L.) Pers. fueron utilizadas como especies introducidas en la rehabilitación de un área con alto grado de degradación del suelo en la comunidad de San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México.

La microcuenca Tula, México, está ubicada en una zona donde convergen dos diferentes tipos de climas: templado subhúmedos y semisecos (INEGI, 2017). Sin embargo, en el área de clima semiseco es donde la degradación del suelo es muy común y donde la población se ha incrementado. Por consiguiente surge la necesidad de buscar alternativas de rehabilitación de suelos en las áreas que han perdido su productividad. Las especies que en el estudio de campo presentaron alta sobrevivencia se les estimó su distribución geográfica potencial a nivel de microcuenca, mediante modelos de nicho ecológico, utilizando el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt, para seleccionar a las especies, de uso múltiple, que puedan ser una opción para la rehabilitación de suelos en la microcuenca.

El presente manuscrito contiene seis capítulos: el primero es una introducción general del tema en estudio, justificación y objetivos; el segundo, es una revisión de literatura; el tercero es un estudio de campo sobre la sobrevivencia de especies no nativas, para ser utilizadas con fines de rehabilitación en el

área ejidal de San Felipe Teotitlán, municipio de Nopaltepec, Estado de México; y el cuarto y quinto capítulo son acerca de la estimación de la distribución geográfica potencial de las especies, de alta sobrevivencia en campo, en la microcuenca Tula mediante modelos de nicho ecológico, utilizando el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt, para seleccionar especies con fines de rehabilitación de suelos a nivel de microcuenca. El sexto y último capítulo es dedicado a conclusiones generales del documento de titulación.

1.1 Objetivos

Evaluar el crecimiento y la sobrevivencia de especies arbustivas y herbáceas, de uso múltiple, para ser utilizadas con fines de rehabilitación de suelos degradados, en un clima semiseco, en San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México.

Estimar la distribución potencial de especies arbustivas y herbáceas a nivel de microcuenca, a través de modelos de nichos ecológicos, utilizando el algoritmo de máxima entropía de MaxEnt, para seleccionar a las especies con mayor adaptabilidad que puedan utilizarse en la rehabilitación de suelos.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Causas de la degradación de suelos

La degradación del suelo se define como un cambio en el estado del suelo que resulta en una disminución en su capacidad de proporcionar bienes y servicios (FAO, 2019). Las experiencias en diferentes países indican que las actividades antropogénicas son la principal causa de la degradación del suelo que, en gran medida, están relacionados con el incremento de las áreas cultivadas y la intensificación de la agricultura (FAO, 2015).

La primera evaluación global de la pérdida de suelo reportó que el 38 %, o casi 1400 millones de acres, de tierras agrícolas actualmente utilizadas se han degradado (Meadows, Randers y Meadows, 2004). Según los últimos datos publicados por la FAO (2015), el suelo solo mejoraría en un 10% de la

superficie terrestre. En contraste, el 25% seguiría sufriendo una degradación muy severa, el 8% degradación moderada y solo el 26% degradación leve o nula. El resto se dividiría en 18% de suelo desnudo y el 2% las superficies acuáticas. Si solo se considera el 22% de la superficie con potencial agrícola, el 60% ya se vería afectado por diversas formas de degradación del suelo.

Está bien establecido que los suelos ya han sufrido una degradación significativa, vinculada a la intensificación de la agricultura y deforestación. Además de estas causas claramente identificadas, existen las relacionadas con la expansión urbana, el cambio climático y los cambios en el uso del suelo, lo que determina el estado actual de las zonas bajo condiciones de clima seco. En México, desde la década de los 60 se han realizado diversos estudios para contextualizar los problemas de degradación de suelos. Los resultados arrojan que el 45 % de la superficie nacional presenta problemas de suelos degradados debido a la actividad humana (Cotler et al., 2007).

La degradación de suelos en climas semisecos es un tanto mayor debido a la limitación de la precipitación que llega a ser de 260 a 600 mm al año (INEGI, 1981), la baja precipitación es un proceso inducido por las actividades antropogénicas que disminuyen la calidad del suelo, es decir, su capacidad actual y futura, para sostener la productividad vegetal y animal, y mantener la calidad del agua y aire (Doran y Parkin, 1994).

La degradación del suelo es un desafío porque tiene importantes repercusiones en la sostenibilidad y servicios ecosistémicos que proporciona. Sin embargo, el estado de los suelos sigue actualmente estando muy poco caracterizado en la escala global, debido a la falta de una línea base confiable y un sistema para monitorear los indicadores relevantes de las diversas formas de degradación del suelo (Valentin, 2018). Es imperativo que se invierta la curva de degradación para que los suelos continúen sus funciones debido a que las poblaciones de flora y fauna en las áreas de clima seco en rápido crecimiento requieren de suelos capaces de amortiguar dichas poblaciones.

2.2 Ubicación de los climas secos en México

México cuenta con una gran diversidad de climas que, de manera general se clasifican según su temperatura, en cálido y templado y de acuerdo con la humedad, en húmedo, subhúmedo y seco (García, 1990). Teniendo en cuenta la precipitación y temperatura, el clima seco y sus variantes se encuentran en la mayor parte del centro y norte del país, región que comprende el 28.3 % del territorio nacional. Todos estos climas se caracterizan por baja circulación de los vientos, que provocan escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas en promedio de 22 °C a 26 °C; algunas regiones, con temperaturas de 18 °C se consideran climas secos con temperaturas semifrías. Los climas secos varían mucho en cuanto a su temperatura, y en consecuencia se pueden tener climas secos en zonas muy cálidas. Regiones con más de 26° C y precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, se clasifican como climas muy secos y se encuentran en el 20.8 % del país (Baja California, Sonora y Chihuahua) (INEGI, 2005). En el estado de México, la zona con clima semiseco se localiza al noroeste del estado e incluye a los municipios de Temascalapa, San Martín de las Pirámides, Nopaltepec, Tecomac, Zumpango, Teotihuacán, Tezoyuca, Nezahualcóyotl, Acolman, Atenco y Ecatepec (INEGI, 1981).

2.3 La rehabilitación como estrategia para la recuperación de suelos degradados

El ritmo de la pérdida del suelo ha requerido el desarrollo de estrategias que restablezcan la cubierta vegetal de manera rápida y eficiente y a la vez que retenga el suelo. Las prácticas de conservación, restauración, mitigación y rehabilitación dependen de las formas de abordar la degradación del suelo.

La conservación implica el uso de prácticas que mantienen la condición del suelo para prevenir la degradación.

La restauración tiene como objetivo restaurar el suelo a su estado original en todos sus componentes y funciones. Por lo general, solo es posible durante sus primeras fases de degradación.

La mitigación busca ralentizar, y posiblemente revertir, la degradación continua mejorando las funciones de los suelos ya degradados. El término remediación también se usa.

La rehabilitación se refiere a suelos ya muy degradados. Su objetivo es revertir la tendencia, pero no tiene la ambición de devolverla a su estado inicial. A menudo requiere inversiones más caras que la restauración y la mitigación.

La compensación puede considerarse, como último recurso, en caso de pérdida inevitable de suelo productivo como resultado de la expansión urbana o la construcción de infraestructura (aeropuerto, autopistas, represas, etc.), ofreciendo a su usuario un suelo equivalente. Sea como fuere, aunque el principio de compensación ecológica ya es difícil de implementar, lo es aún más para los suelos que, a diferencia de la fauna e incluso la flora, no son transportables (Valentin, 2018).

Las prácticas de conservación, restauración, mitigación y rehabilitación dependen de las formas de degradación (Figura 1).



Figura 1. Posibles intervenciones para abordar la degradación del suelo.

Tomado de Valentin (2018).

El grado de degradación del suelo hace que se implementen estrategias para revertir el proceso. Existen varias propuestas, como la conservación, restauración, mitigación y rehabilitación, de recuperar suelos degradados que

involucran diversas metodologías de establecimiento de la vegetación que deben adaptarse a las condiciones ambientales locales como el clima, tipo de suelo, topografía, hidrología, flora y fauna; así como, a varios eventos que a menudo son impredecibles, como la incidencia de plagas y enfermedades y la capacidad de recuperación de las especies cuando se presentan eventos extremos, por ejemplo, incendios, exceso de lluvia, sequías, olas de calor y granizadas. Además de la influencia de las áreas circundantes que influyen en la escorrentía y flujos de sedimentos, fuentes de propágulos, herbivorismo, pastoreo y usos del suelo (Williamson y Johnson, 1981; Ibarra y Moreno-de las Heras, 2005). Sin embargo, una estrategia exitosa requiere una comprensión de las restricciones fisiológicas de las plantas para su establecimiento, adaptabilidad y el crecimiento y que las prácticas de recuperación puedan superar dichas restricciones.

Los planes generales para una estrategia deben formularse en base a evaluaciones detalladas de propuestas que se considerarán viables basándose en estudios experimentales que confirmen que la estrategia es factible. El rango de opciones es amplio, sin embargo, la rehabilitación es una práctica que se ha utilizado ampliamente en la recuperación de suelos muy degradados, cuyo objetivo es revertir la tendencia, pero no tiene la finalidad de devolver al suelo a su estado original.

Es importante enfatizar que, la rehabilitación comparte con la restauración un enfoque fundamental que es tomar a los ecosistemas como modelos o referencias, pero estas dos actividades difieren en sus objetivos y estrategias. La rehabilitación persigue el restablecer la productividad y los servicios de un ecosistema, para suministrar productos, mientras que la meta de la restauración es el restablecimiento de la complejidad de todos los atributos preexistentes del ecosistema en términos de composición, estructura, funciones y servicios (SER, 2004). Generalmente en un ecosistema muy degradado, se comienza por rehabilitar el sitio, para reparar en el menor tiempo posible procesos ecológicos. Una vez realizada la primera etapa de recuperación de estructura, productividad y servicios, posiblemente el área se restablezca y regrese al estado previo al disturbio (Rovere, 2010).

2.3.1. Técnicas de restauración aplicadas en rehabilitación

El objetivo al seleccionar una técnica o combinación de ellas es con el propósito de afrontar las restricciones ambientales existentes y la adaptación de la vegetación de la manera más efectiva y económica en el sitio a rehabilitar. Existe un amplio conjunto de técnicas empleadas en la restauración, sin embargo, en la práctica se utilizan o retoman parte de ellas en la rehabilitación de suelos degradados, algunas de estas se describen a continuación:

Trasposición de suelos: consiste en la trasposición de suelo (mantillo + los primeros 5 cm de suelo) proveniente de un área con una etapa de sucesión más avanzada, hacia el suelo del área degradada. Además de ser de bajo costo, es una técnica simple de realizar y tendrá la ventaja de recuperar el suelo degradado no solamente con semillas, sino además con propágulos y una gran diversidad de microorganismos y micro, meso y macro fauna capaces de proporcionar una regeneración al suelo degradado (Reis et al., 2003).

Núcleos de biodiversidad: este método está basado en el sistema de plantación de árboles en grupos “islas” por Griffith y colaboradores en 1994. Consiste en dos fases: en la primera se plantan a través de la siembra directa grupos de diferentes especies de rápido crecimiento (leguminosas, herbáceas y gramíneas). En la segunda fase, se plantan especies nativas, también en grupos, cuya función es que formen islas verdes de vegetación que atraigan a una gran cantidad de dispersores de semillas, en su mayoría aves y murciélagos, que buscarán alimento y se moverán entre los fragmentos remanentes de áreas aun conservadas y el área en recuperación (Cole, Holl y Zahawi, 2010).

Nucleación: la nucleación aplicada es una opción atractiva porque imita procesos sucesionales naturales para ayudar a la recolonización de plantas leñosas; sin embargo, podría ser efectiva en la restauración de una gran variedad de tipos de hábitats (Corbin y Holl, 2012). Esta consiste en plantar pequeños parches de árboles que formen microhábitats (núcleos) que atraigan dispersores (animales y plantas) que faciliten el establecimiento de

nuevas especies; lo cual favorece la generación de una red de interacciones específicas entre los organismos que aumentara la probabilidad de formar diversas rutas alternativas de sucesión; expandiendo el área boscosa con el tiempo. (Reis, Bechara y Tres, 2010; Corbin y Holl, 2012). En adición, estas especies arbóreas crean una lluvia de semillas y polen que forman un nuevo banco de semillas que posteriormente crearan núcleos de regeneración de alta diversidad, según las condiciones ambientales (Reis et al., 2003).

Lluvia de semillas: esta técnica está basada en imitar la forma de dispersión de semillas como ocurre en la naturaleza; por tanto, la siembra natural es el principal medio de regeneración. La evaluación inicial de la calidad de las semillas (germinación y viabilidad) es uno de los requerimientos que serán fundamentales en las semillas pre-seleccionadas para garantizar el éxito en campo. La regeneración artificial, a través de la plantación de plántulas o siembra directa, se puede usar en lugares donde no hay vegetación arbórea. Sin embargo, es esencial identificar los factores que interfieren con la germinación y el establecimiento de plántulas en condiciones de campo, como competencia con plantas invasoras, características y calidad del suelo, herbivoría y depredación de semillas y plántulas (Botelho y Davide, 2002).

2.4 Sobrevivencia

La sobrevivencia es una variable que permite obtener una medida cuantitativa del éxito de una plantación bajo la influencia de las condiciones ecológicas y edafológicas del lugar donde se establecerá (Rodríguez, 2010), de acuerdo a las características morfológicas y fisiológicas de las plantas para que se desarrolle y adapte al sitio de plantación (Wilson y Jacobs, 2006); lo que repercutirá en altas tasas de sobrevivencia y crecimiento inicial (Orozco et al., 2010). El valor que se desea conocer para evaluaciones de sobrevivencia es la proporción entre el número de plantas establecidas y el número de plantas vivas encontrada al momento de la medición (Ramírez, 2012). Con la evaluación de la sobrevivencia se estima el estado general de las plantaciones, las causas de muerte de las plantas y acciones de manejo para mejorar las plantaciones. La evaluación de la sobrevivencia permite obtener

una medida cuantitativa del éxito de la plantación bajo la influencia de los factores del sitio (Bello y Cibrián, 2000).

2.5 Especies forrajeras de uso múltiple con potencial para rehabilitar suelos degradados

En la conformación de plantaciones con especies de múltiple uso, se debe decidir sobre las especies leñosas y/o herbáceas que se incluirán, esta decisión es compleja ya que se deben de considerar los requerimientos para el crecimiento y desarrollo de las especies y estas puedan adaptarse a las condiciones edáficas y climáticas del lugar y que dichas especies puedan servir como forraje para la alimentación del ganado. Crespo (2008) indica la necesidad de establecer especies forrajeras como una opción viable para integrar recursos forrajeros en zonas de suelos degradados, además de la recuperación paulatina de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Por tanto, la integración de especies no nativas, como las leguminosas y gramíneas, generan la rehabilitación en un suelo degradado por disminuir la erosión e incrementar la retención de humedad y contenidos de materia orgánica (Sánchez-Espinoza, 2010).

A continuación se presenta información las especies arbustivas y herbáceas, que fueron introducidas como especies forrajeras bajo el modelo de un arreglo silvopastoril, para la rehabilitación del suelo de un área degradada comunal del ejido San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México.

***Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.** El género *Atriplex* pertenece a la familia Chenopodeaceae, presenta una amplia distribución mundial, comprende no menos de 250 especies, que pueden ser anuales o perennes y son matorrales o arbustos de poca altura. *A. canescens*, referido comúnmente como chamizo, cenizo o costilla de vaca (Figura 2) es un arbusto de alto valor forrajero, siempre verde, y se le ha considerado como la alfalfa del desierto por su alta palatabilidad y contenido de proteína cruda que puede ser de 7.6 a 23.7% (Urrutia et al., 2007).



Figura 2. Arbusto de la especie *Atriplex canescens*.

Además de ser aprovechada como forraje, retiene el suelo donde se le establece y facilita el establecimiento de otras especies vegetales. En México, se recomienda su establecimiento en climas áridos y semisecos de los estados de Chihuahua, Sonora, Coahuila y Zacatecas para la alimentación de ovinos caprinos y bovinos. Saucedo y Chacón (1999) afirman que la adaptabilidad y capacidad de sobrevivencia en condiciones semisecas y suelos con baja fertilidad hacen del chamizo una especie de suma importancia en trabajos de rehabilitación, ya sean plantadas solas o asociadas a otras especies.

El género ***Leucaena Benth*** es una leguminosa que pertenece a la familia de las Fabaceae y presenta una gran diversidad. El centro de diversidad de estos arbustos es México y cuenta con varias especies (Zárate, 1994; CONABIO, 2018). ***Leucaena collinsii (Britton & Rose)*** ha sido poco estudiada como mejoradora de suelo y como productora de forraje en comparación con *L. leucocephala* que se destaca dentro de la familia como una de las más empleadas en los sistemas silvopastoriles (Mullen et al., 2003; Pinto et al., 2013; Martínez-Hernández et al., 2019). Al respecto, Wencomo y Ortiz (2010) mencionan que es una especie que se destaca por alcanzar 1.50 m de altura en sólo siete meses después del trasplante. Por tanto, su porte arbóreo y rápido crecimiento la hacen una especie recomendable para reforestación, producción de madera y árbol de sombra; aunándose a su gran versatilidad el control de la erosión y la fijación de nitrógeno atmosférico (Wencomo, 2009).

L. collinsii es una especie promisoriosa por ser tolerante a la sequía, resistente al psílido y por poseer concentraciones bajas de taninos y mimosina (Figura 3) (Mullen et al., 2003); productora de forraje de muy buena calidad para rumiantes (Pinto et al., 2013). Debido a su adaptabilidad ha sido cultivada en varios países tropicales (Australia subtropical y clima húmedo tropical de Filipinas) y Trópico seco del sur de México, se le cataloga como una especie de gran interés, debido a su amplio potencial de producción forrajera (Mullen et al., 2003; Pinto et al., 2013). Similar a *L. leucocephala*, su potencial en la rehabilitación de suelos podría ser considerado tanto en zonas tropicales como en zonas secas o semiáridas por el aporte de nitrógeno, debido a su fijación de N, al sistema promoviendo la recuperación y enriquecimiento de suelos degradados por uso agrícola o ganadero (Ibrahim et al., 2006).



Figura 3. Arbusto de la especie *Leucaena collinsii*.

Valpassos, Maltoni, Cassiolato y Nahas (2007) reportaron que al introducir *L. leucocephala* a sistemas degradados favorece la presencia de microorganismos (bacterias, hongos, actinomicetos) y la actividad microbiana respiratoria y ureasa; mejorando la actividad microbiológica en el suelo dando como resultado a una cantidad creciente de carbono orgánico total en los suelos en comparación con suelos sin vegetación (Anguiano et al., 2013; Martínez-Hernández et al., 2019). Sin embargo, a pesar de tener grandes resultados con la utilización de especies del género *Leucaena*, no existe

información disponible sobre su adaptabilidad en climas semisecos, lo cual resulta de relevada importancia.

***Macroptilum atropurpureum* (Moc. & Sesse ex DC).** El género *Macroptilum* pertenece a la familia Fabaceae que agrupa unas 10 especies de plantas erguidas y trepadoras, generalmente trifoliadas, raras veces unifoliadas. *M. atropurpureum* también conocida como siratro (Figura 4), ha sido la especie con mayor difusión de uso como forrajera, crecida en asociación con gramíneas tropicales o sola en forma de banco de proteína, también ha sido sujeta a mejoramiento genético a través de hibridaciones de diferentes ecotipos, mayormente localizados en México (Jones, 2014).



Figura 4. Herbácea trepadora *Macroptilum atropurpureum* (Siratro).

Esta especie crece mejor en verano y principios de otoño en áreas húmedas tropicales y subtropicales, pero puede crecer todo el año en los trópicos (Heike, 2009). Siratro se puede encontrar dentro de los 30 ° N y 22 ° S, desde el nivel del mar hasta una altitud de 1600 m en Kenia, y hasta 2900 m en las áreas tropicales más cálidas en Ecuador (Jones, 2014).

Crece mejor a plena luz solar en áreas donde las temperaturas diurnas son aproximadamente 26-30 ° C con temperaturas mínimas superiores a 16 ° C. Deja de crecer por debajo de 16 ° C. El siratro es sensible a las heladas, las hojas y la parte superior se queman, pero la planta vuelve a crecer a partir de la raíz, que se ha informado que sobrevive a temperaturas tan bajas como - 8.5 ° C (Jones y Mannetje, 1992).

El siratro es relativamente fácil de establecer y crece en una amplia gama de tipos de suelo. Aunque se ve afectado por algunas plagas y enfermedades, en áreas con precipitaciones mayores de 1,400 mm / año, es susceptible al tizón foliar causado por *Rhizoctonia solani*. Es resistente al nematodo agallador de la raíz del género *Meloidogyne*, sin embargo, es afectado por la roya causada por el hongo *Uromyces appendiculatus*; lo cual condujo a la liberación del cv. Azteca, resistente a la roya, el cual es genéticamente similar al cv. siratro (Bray y Woodroffe, 1995).

***Cynodon dactylon* (L.) Pers (bermuda).** Pertenece a la familia de las gramíneas (*Poaceae*) que preferentemente tiene uso ornamental y deportivo. Esta es una variedad de bermuda (Figura 5) de estación cálida que se siembra de semilla, tolerante a bajas alturas de corte y tiene rápida recuperación después del pisoteo (Laurencena et al., 2009); presenta un alto potencial para establecerse en suelos de baja fertilidad y sequía (Bécquer-Granados et al., 2018) además, cubre el suelo rápidamente por la expansión de sus estolones.



Figura 5. Especie herbácea de *Cynodon dactylon* (Bermuda).

De acuerdo a Bécquer-Granados et al. (2018), *Cynodon dactylon* (Tifton 85) es un híbrido resultante del cruce de Tifton 68 con una accesión de bermuda sudafricana. *C. dactylon* es una especie que se desarrolla a temperaturas de 24° C., sobrevive a bajas temperaturas de 2 a -3 °C y los rizomas toleran temperaturas <3 °C. Tiene un amplio rango de tolerancia a diferentes tipos de suelo, pudiendo establecerse en suelos profundos de textura franca, arcillo-

arenoso y franco-arcilloso, siendo los mejores los que tienen buen drenaje, toleran rangos de pH de 5.0 a 8.0. (Hernández y Cuéllar, 2007).

2.6 Modelación de nicho ecológico

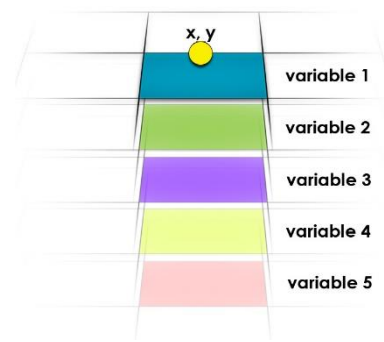
Actualmente, los avances científicos y tecnológicos han desarrollado nuevas herramientas computacionales construidas a partir de información de tipo geográfica, ambiental y estadística, como es la Modelación de Distribución de Especies y el Modelado de Nicho Ecológico (SDM y ENM, siglas en inglés, respectivamente), que han permitido expandir el conocimiento sobre la historia evolutiva y ecológica de las especies, a partir de inferencias en su distribución espacial (Guisan y Zimmermann, 2000; Guisan y Thuiller 2005; Elith y Leathwick 2009).

El término de nicho ecológico es la base teórica de las investigaciones hechas hacia los ENM y SDM. Entender, qué es el nicho ecológico, cómo se representa, qué forma tiene, en dónde se localiza y si es una característica propia de las especies y/o del ambiente, han sido algunos de los objetivos de investigación que se han perseguido desde el siglo pasado. Como ejemplo se tiene, la propuesta de Grinnell (1924), el cual describe al nicho ecológico como la unidad de distribución final, en la que cada especie está restringida por sus limitantes fisiológicas y estructurales; es decir, las diferentes especies tienen características propias de cada una de ellas, por lo que solo pueden ocupar espacios específicos ofrecidos por el medio ambiente (Grinnell 1924). En una visión contrastante, Elton (1927), pondera que la función de una especie se deriva intrínsecamente de las cadenas tróficas, por lo que el nicho ecológico, no toma en cuenta los factores abióticos. El concepto está basado sobre la comunidad biótica y no de los organismos en sí. Por lo tanto, al no limitar a una especie a un espacio geográfico podrían presentar una similitud de nicho, aun cuando las comunidades estuvieran alejadas geográficamente (Elton, 1927).

Por lo general, en la literatura existente se usan los términos de “modelos de nicho ecológico” y “modelo de distribución” que, conceptualmente son muy similares. Por una parte, los modelos de nicho ecológico son utilizados para

desarrollar las interacciones entre las variables ambientales y los datos de presencia, presencia/ausencia, y/o abundancia conocidas y registradas de las especies (Graham et al., 2004). En el caso de los modelos de distribución relacionan las observaciones realizadas en campo para los taxones a evaluar con las variables ambientales, las cuales se basan en una respuesta teórica o estadística (Guisan y Zimmermann, 2000); utilizan el modelo de nicho como base teórica y sirven como herramientas muy útiles para el campo de la ecología aplicada, conservación y biogeografía, por la relación que existe entre las bases ecológicas y evolutivas (Guisan y Thuiller, 2005).

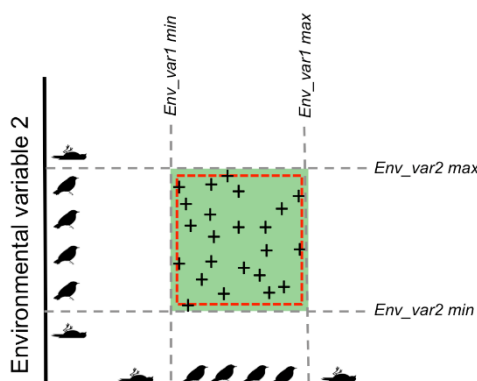
El desarrollo de estos algoritmos permite tener una aproximación más precisa de las relaciones que presentan las diferentes variables ambientales -factores abióticos- (temperatura, precipitación, radiación solar, etc.) y los factores bióticos (tipos de vegetación en donde se pueden encontrar).



Fuente: <http://www.gisandbeers.com/como-estandarizar-capas-para-maxent/>

Entre los diferentes algoritmos, podemos mencionar a Bioclim (Busby, 1991), Maxent (Phillips et al., 2006) y GARP (Stockwell y Peters, 1999), con los cuales hay un acercamiento diferente a cada problema del modelado de nicho, ya sea, por ejemplo, el uso de envolturas climáticas para predecir la relación ambiental-Especie (Bioclim), relaciones genéticas (GARP) o un algoritmo de máxima entropía (Maxent).

2.6.1 Algoritmos para modelación de nichos ecológicos

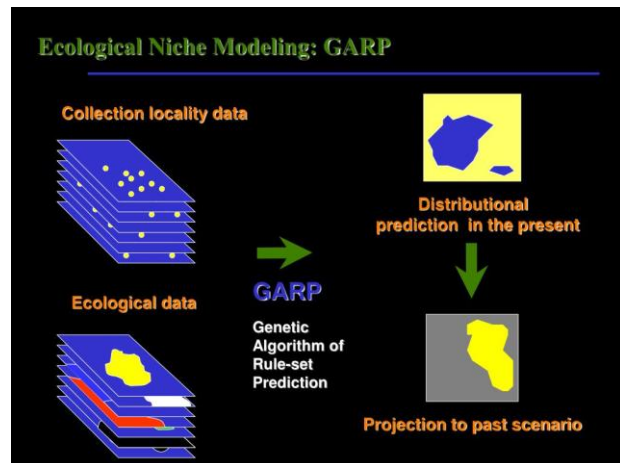


Fuente: <https://support.bccvl.org.au/support/solutions/articles/6000083201-bioclim>

Bioclim es uno de los pioneros en este tipo de modelaciones, utiliza el denominado proceso de envolturas climáticas (climatic envelop) para identificar áreas climáticas similares al de las especies evaluadas, básicamente el algoritmo busca intervalos climáticos dentro de los

que se encuentran las presencias y por cada variable involucrada realiza un análisis de frecuencia. El resultado son superposiciones que muestran la distribución de las especies determinada por el clima, la distribución estadística de las variables climáticas y todas las variables con intervalo de restricción para la especie.

GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction, por sus siglas en inglés) utiliza un algoritmo genético para la búsqueda de asociaciones entre variables ambientales y la ocurrencia conocida de las especies, contrastándola con las características ambientales a lo largo de toda el área de estudio.

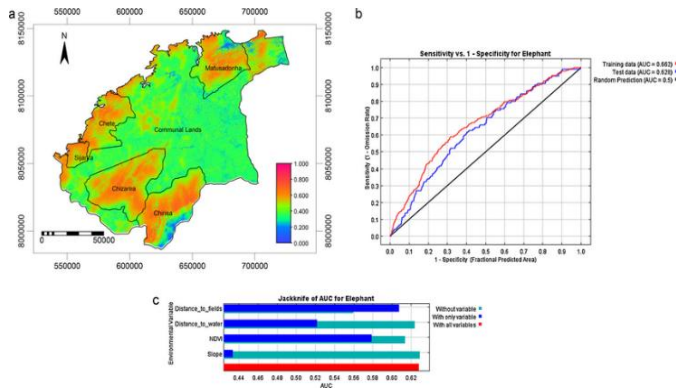


Fuente: <https://www.slideserve.com/mallory-gonzalez/manuel-mavila-loli-biodamaz-iiap-viernes-cient-fico-27-may-2005>

El algoritmo remuestrea automáticamente los datos para crear una población de 1250 puntos de presencia. Un número equivalente de puntos se remuestrea en el resto del área de estudio, en donde la especie no ha sido registrada.

Esto crea un total de 2500 puntos que serán utilizados para realizar los modelos y validarlos (Peterson y Nakazawa, 2008). Una vez realizado, el algoritmo elabora modelos diferentes con las reglas elegidas (atómicas, de intervalos, de intervalos negados y de regresión logística) hasta alcanzar un número determinado de iteraciones (repeticiones de las reglas) o alcanzar un determinado límite de convergencia, es decir, cuando ya no se modifique la precisión de la predicción a partir de nuevas adiciones. Los modelos de nicho ecológico finales serán entonces proyectados en el espacio geográfico como mapas digitales. Este método ha sido ampliamente aplicado en la predicción de la distribución de especies de animales y plantas (eg. Peterson et al. 2002a, b, Illoldi-Rangel et al. 2004, Araújo et al. 2005, Thuiller et al. 2005). El uso de modelos generados en GARP presenta una serie de beneficios: (1) permite la determinación cuantitativa de probabilidades de cualquier dato, incluyendo

aquellos datos únicamente de presencia (i.e. registros de museos); (2) se añade valor al escaso muestreo que existe para algunas especies al incrementar la cobertura y resolución; y (3) permite producir modelos de fácil comprensión basados en reglas para explicar relaciones entre los datos (Peterson y Nakazawa 2008).



Maxent está fundamentado en el concepto de máxima entropía, utilizando una aproximación mecanicista para realizar predicciones a partir de información incompleta.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/The-elephant-MAXENT-model-results-showing-a-the-probability-distribution-of-elephant-in_fig4_246547785

Maxent estima la distribución más uniforme (de ahí el concepto de máxima entropía) a lo largo del área de estudio con la restricción de que el valor esperado para cada variable ambiental en una distribución concuerda con su promedio empírico (valores promedio para el conjunto de datos de ocurrencia) (Phillips et al. 2004, 2006). Maxent asigna cada característica (variable ambiental) al multiplicarla por una constante, y la divide posteriormente para asegurar valores de probabilidad entre 0 y 1. El programa inicia con una distribución uniforme de probabilidades e iterativamente altera el peso de una variable a la vez para maximizar la similitud de los datos de ocurrencia. El algoritmo está garantizado para converger en la distribución probabilística óptima, y dado que no aleatoriza, los resultados son determinísticos. Las predicciones de Maxent para cada celda analizada hacen referencia a valores acumulativos, representando como porcentaje el valor de probabilidad para la celda en cuestión y todas aquellas con valores iguales o menores de probabilidad. Una celda con valor de 100 es la más adecuada, mientras que celdas con valores cercanos a 0 son las menos adecuadas dentro del área de estudio (Phillips et al., 2004).

2.7 Referencias bibliográficas

- Anguiano, J. M., Aguirre, J., & Palma, J. M. (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* var. *cunningham* y *Peninisetum purpureum* Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(1), 149-160.
- Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 11, 1504-1513.
- Bécquer-Granados, C. J., Ávila-Cordoví, U., Nápoles-Gómez, J. Á., Galdo-Rodríguez, Y., Hernández-Obregón, M., Muir-Rodríguez, I., Álvarez-Figueroa, O., & Medinilla-Nápoles, F. (2018). Productividad de bermuda Tifton 85, inoculada con *Bradyrhizobium* sp. y *Trichoderma harzianum*, sometida a estrés de sequía agrícola. *Pastos y Forrajes*, 41(3), 196-201.
- Bello, L. A., & Cibrián, J. T. (2000). Evaluación técnica de la reforestación 1998. In: I congreso nacional de reforestación. Resúmenes de ponencias. SEMARNAT-PRONARE-CP. Montecillo, Estado de México.
- Botelho, S. A., & Davide, A. C. (2002). Métodos silviculturas para recuperação de nascentes e recomposição de matas ciliares. Anais do V Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas: agua e biodiversidade. Belo Horizonte, Minas Gerais. pp. 123-145.
- Bray, R. A., & Woodroffe, T. D. (1995). *Macroptilium atropurpureum* (DC) Urban (atro) cv. Aztec. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35, 121-121.
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - A Bioclimatic Analysis and Prediction System. En: Margules, C.R., & Austin, M.P. (eds.). *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*. Canberra: CSIRO. pp. 64-68.
- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(4), 329-335.
- Cole, R. J., Holl, K. D., & Zahawi, R. A. (2010). Seed rain under tree islands planted to restore degraded lands in a tropical agricultural landscape. *Ecological Applications*, 20(5), 1255-1269.
- Corbin, Jeffrey & Holl, Karen. (2012). Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology and Management*. 265. 37-46. 10.1016/j.foreco.2011.10.013.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, (83), 5-71.
- CONABIO. (2018). *Leucaena leucocephala*. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/docto

s/44legum26m.pdfhttp://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/44-legum26m.pdf.

- Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Elith, J. H., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A. & Zimmermann, N. E. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330-342.
- 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.
- Elton, C. (1927). Animal ecology. New York: Macmillan Company.
- FAO (2015). Status of the world's soil resources – Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>, 2015.
- FAO. (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Retrieved April 7, 2019, from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/es/>
- García, E. (1990). Climas, 1: 4000 000. IV.4.10 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Graham, C.H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C., & Peterson, A.T. (2004). New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution*, 19(9), 497- 503.
- Griffith, J.J., Días, I. E., & Jucksch, I. (1994). *Nuevas estrategias para la revegetación de áreas mineras en Brasil*. Simposio sur-americano, 1, Simposio Nacional sobre Recuperación de Áreas degradadas, 2., Foz do Iguacu. Anais, Curitiba, Fundacao de Pesquisas Florestais do Parana, pp. 31-34.
- Grinnell, J. (1924). Geography and evolution. *Ecology*, 5(3), 225-229.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009.
- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Hernández, R. P., & Cuéllar V. E de J. (2007). *Zacate Bermuda Tifton 68: nueva opción para el establecimiento de praderas bajo riego en el norte de Coahuila*. INIFAP-CIRNE. Sitio Experimental Zaragoza. Folleto Técnico No. 15. Zaragoza, Coahuila. México.
- Heike, V. (2009). Malezas de México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/bouteloua-gracilis/fichas/ficha.htm>

- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427.
- Ibarra, J. M. N., & Moreno de las Heras, M. (2005). Opencast mining reclamation. En S. Mansourian, D. Vallauri, N. Dudley (eds.), *Forest restoration in landscapes, beyond planting trees*. New York: Springer Science. pp. 370-378.
- Ibrahim, M., Villanueva, C., Casasola, F., & Rojas, J. (2006). Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y restauración de la integridad ecológica de paisajes ganaderos. *Pastos y Forrajes*, 29(4), 383-419.
- Illoldi-Rangel P, Sánchez-Cordero, V., & Peterson, A.T. (2004). Predicting distributions of Mexican mammals using ecological niche modeling. *Journal of Mammalogy*, 85(4), 658-662.
- INEGI (1981). Síntesis geográfica del Estado de México. Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. pp. 9-12.
- INEGI (2005). Guía para la interpretación de cartografía: climatológica. 2005. ISBN 970-13-4508-8.
- INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 30 abril, 2019. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF.pdf
- Jones, R.M., & 't Mannetje, L. (1992). *Macroptilium atropurpureum* (DC.) Urban. En: 't Mannetje, L. & Jones, R.M. (eds) *Plant Resources of South-East Asia No. 4. Forages*. Wageningen: Pudoc Scientific Publishers. pp. 155-157.
- Jones, R. M. (2014). The rise and fall of Siratro (*Macroptilium atropurpureum*) – what went wrong and some implications for legume breeding, evaluation and management. *Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales*, 2(2), 154-164.
- Laurencena, M. I., Carponi, M. S., Reinoso, P. D., Butus, M., Scorciapino, C., Galli, M., & Pérez, G. (2009). Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 39, 129-141.
- López, G. M. A. 2007. Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental. Tesis de Maestría en Ciencias en Probabilidad y Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. Guanajuato, Gto., México.
- Martínez-Hernández, P. A., Cortez-Díaz, E., Purroy-Vásquez, R., Palma-García, J. M., Del Pozo-Rodríguez, P. P., & Vite-Cristóbal, C. (2019). *Leucaena leucocephala* (LAM.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22, 331-357.

- Meadows, D., Randes, J., & Meadows, D. (2004). A sinopsis. Limits to growth. The 30-year update. White River Junction: Chelsea Green Publishing Company.
- Mullen, B. F., Gabunada, F., Shelton, H. M., & Stür, W. W. (2003). Agronomic evaluation of *Leucaena*. Part 2. Productivity of the genus for forage production in subtropical Australia and humid-tropical Philippines. *Agroforestry Systems*, 58(2), 93-107.
- Orozco, G., Muñoz, H. J., Villaseñor, F., Ruedas, A., Sigala, J. A., & Prieto, J. A. (2010). *Diagnóstico de calidad de planta en los viveros forestales del estado de Colima. Campo Experimental Uruapan*. INIFAP. Uruapan, Mich., México. Folleto técnico Núm. 1. 60 p.
- Pérez, D.R. (2013). Restauración de ecosistemas áridos y semiáridos patagónicos: Implementación desde un enfoque ecológico y social. En: Pérez, D. R., Rovere, A. E y Rodríguez Araujo, M. E. (eds.) *Restauración ecológica en al diagonal árida de la Argentina*. Buenos Aires: Vázquez Mazzini Editores. pp. 50-60.
- Peterson, A.T., Ball, L.G., & Cohoon, K. P. (2002a). Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods. *Ibis* 144 (on-line): E27–E32
- Peterson, A. T., Papeş, M. & Soberón, J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63-72.
- Peterson, A. T., & Nakazawa Y. (2008). Environmental data sets matter in ecological niche modeling: An example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography*, 17, 135-144.
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: Brodley, CE (ed.), *Machine Learning: Proceedings of the Twenty-first Century International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada: ACM Press. pp. 655-662.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- Pinto, R. R., Medina, F. J., Gómez, H., Guevara, F., & Ley, A. (2013). Caracterización nutricional y forrajera de *Leucaena collinsii* a diferentes edades de corte en el trópico seco del sur de México. *Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ*, 31, 78-99.
- Ramírez, M. (2012). Metodologías para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales (Aspectos técnicos), Comisipón Nacional Forestal (CONAFOR).
- Reis, A., Bechara, F. C., & Tres, D. R. (2010). Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola*, 67(2), 244-250.

- Reis, A., Bechara, F. C, Espíndola, M. B, Vieira, N. K., & Lopes, de S. L. (2003). Restauração de áreas degradadas: a nucleação como base para os processos sucessionais. *Natureza & Conservação*, 1, 28-36.
- Rodríguez, L. R. (2010). Manual de prácticas de viveros forestales. Colección de manuales de ingeniería forestal. Área Académica de Ingeniería Forestal. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hgo., México. 51 pp.
- Rovere, A. E. (2010). Conceptos de restauración y rehabilitación. En: Pérez, D.R., Rovere, A. E., & Farinaccio, F. M. (2010). *Rehabilitación en el desierto. Ensayos con plantas nativas en Aguada Pichana, Neuquén, Argentina*. Buenos Aires: Vázquez Mazzini Editores. pp. 21-23.
- Sánchez-Espinoza, D. N. (2010). Bases para la rehabilitación ambiental y paisajística de los pasivos ambientales mineros en el distrito de Hualgayoc, Cajamarca, Perú. Tesis de Máster en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saiz Montes de Oca" Facultad de Forestal y Agronomía Departamento Forestal, Pinar del Río, Cuba.
- Saucedo, T. R. A., & Chacón, R. R. (1999). *Crecimiento y sobrevivencia en plantaciones de chamizo (Atriplex canescens) como efecto de la distancia entre plantas*. Folleto Científico No. 2. Chihuahua, Chih., México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Norte Centro. Campo Experimental La Campana.
- SER (Society for Ecological Restoration International), Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(2), 19644-19650.
- Soberón, J., & Peterson, A. T. 2005. Interpretation of model of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2(1), 1-10.
- Stockwell, D., & Peters, D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *Geographical Information Science*, 13(2), 143-158.
- Tambussi, E. A. (2004). Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Memoria de Doctor en Biología. Divisió de Ciències Experimentals i Matemàtiques, Facultat de Biologia, Departament de Biologia Vegetal, Universitat de Barcelona. Barcelona, España.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2, 8245-8250.
- Urrutia, M. J., Beltrán, L. S., Loredó, O. C., Díaz, G. M. O. y Gámez, V. H. G. (2007). *Chamizo: forraje de calidad en zonas semiáridas*. INIFAP-

CIRNE-Campo Experimental San Luis. Folleto Técnico No. 30. San Luis Potosí, S.L.P., México.

- Valentin, C. (2018). The state and future of soils. En: Valentin, C. (ed.). *Soils as a key component of the critical zone 5. Degradation and rehabilitation*. Hoboken: John Wiley & Sons. pp. 1-20.
- Valpassos, M. A. R., Maltoni, K. L., Cassiolato, A. M. R., & Nahas, E. (2007). Recovery of soil microbiological properties in a degraded area planted with *Corymbia citriodora* and *Leucaena leucocephala*. *Scientia Agricola*, 64(1), 68-72.
- Wencomo, H. B. (2009). Efecto de la inclusión de *Leucaena* spp. en el comportamiento de la comunidad vegetal. *Pastos y Forrajes*, 32(4), 1-1.
- Wencomo, H. B., & Ortiz, R. (2010). Comportamiento de 23 accesiones de *Leucaena* spp. en condiciones de establecimiento. *Pastos y Forrajes*, 33(3), 1-1.
- Williamson, A., & Johnson, M. S (1981). Reclamation of metalliferous mine wastes. En N. W. Lepp (ed.). *Effect of heavy metal pollution on plants*. vol. 2. *Metals in the environment*. Barking, Essex, Applied Science Publishers. pp. 185-212.
- Wilson, B. C., & Jacobs, D.F. (2006). Quality assessment of temperate zone deciduous hardwood seedlings. *New Forest*, 31, 417-433.
- Zárate, P. S. (1994). Revisión del género *Lecauena* en México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México Serie Botánica*, 65(2), 83-162.

3 EVALUACIÓN DE LA SOBREVIVENCIA DE ARBUSTIVAS Y HERBÁCEAS PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELOS

3.1 Resumen

La degradación de suelos en climas semisecos es un proceso inducido por las actividades antropogénicas que disminuyen su calidad, es decir, su capacidad actual y futura, para sostener vegetación. La rehabilitación del suelo es necesaria cuando está degradado y es prácticamente improductivo. La introducción de especies arbustivas y herbáceas no nativas, de uso múltiple, pueden restablecer algunos servicios ecológicos como disminuir las pérdidas del suelo e incrementar la cubierta vegetal, seleccionando especies forrajeras. La evaluación del crecimiento y la sobrevivencia permite obtener una medida cuantitativa de la adaptación de una especie bajo la influencia de las condiciones ambientales y edafológicas de un lugar. Con el objetivo de proponer un plan de rehabilitación asistida por medio de la introducción de arbustivas y herbáceas de múltiple propósito, en suelos degradados de la comunidad de San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México, se evaluó la sobrevivencia y el crecimiento de las especies arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii*, *Leucaena leucocephala*, *Dalea zimapanica* y de las herbáceas *Macroptilium atropurpureum*, *Oryzopsis hymenoides* y *Cynodon dactylon*. El crecimiento y sobrevivencia en la etapa de establecimiento (tres meses después de la plantación) fue lento y solamente sobrevivieron las arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena leucocephala* y *Leucaena collinsii*, y las herbáceas *Macroptilium atropurpureum* y *Cynodon dactylon*. Sin embargo, a los doce meses después de la plantación, *Leucaena leucocephala* y *Macroptilium atropurpureum* fueron adversamente afectadas por las condiciones ambientales y daños causados por la fauna silvestre. Los resultados mostraron que *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* y *Cynodon dactylon* pueden ser una alternativa viable para fines de rehabilitación del suelo, además, de mantener la cobertura vegetal y producir forraje.

Palabras clave: suelos degradados, especies introducidas, crecimiento, climas semisecos, sobrevivencia.

EVALUATION OF THE SURVIVAL OF SHRUBS AND HERBACEOUS FOR SOIL REHABILITATION

3.2 Abstract

Soil degradation in semi-arid climates is a process induced by anthropogenic activities thereby reducing soil quality, that is, its current and future capacity, to support vegetation. Soil rehabilitation is required when the soil is already degraded and has become practically unproductive. The introduction of non-native shrub and herbaceous plants, multipurpose, can reestablish some ecological services such as reducing soil losses and increasing vegetation cover, for selecting forage species. The evaluation of growth and survival allows to obtain a quantitative measure of the adaptation of a species under the influence of the environmental and soil conditions of a place. With the objective of proposing an assisted rehabilitation project through the introduction of multi-purpose shrubs and herbaceous plants in degraded soils of the community of San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, State of Mexico, it was evaluated the survival and growth of the shrub species *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii*, *Leucaena leucocephala*, *Dalea zimapanica* and the herbaceous *Macroptilium atropurpureum*, *Oryzopsis hymenoides* and *Cynodon dactylon*. Growth and survival in the establishment phase (three months after planting) were slow and only survived the shrubby *Atriplex canescens*, *Leucaena leucocephala* and *Leucaena collinsii*, and the herbaceous *Macroptilium atropurpureum* and *Cynodon dactylon*. However, twelve months after planting, *Leucaena leucocephala* and *Macroptilium atropurpureum* were adversely affected by environmental conditions and damage caused by wildlife. Results revealed that *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* and *Cynodon dactylon* can be a feasible alternative to soil rehabilitation purposes, in addition to maintain plant cover and to produce forage.

Keywords: degraded soils, introduced species, growth, survival, rehabilitation

3.3 Introducción

El rápido crecimiento de la población, el uso de la tierra para la agricultura, la urbanización, la rápida degradación del suelo y la alta tasa de deforestación marcan el estado actual de las zonas bajo condiciones de clima seco. En México, desde la década de los 60 se han realizado diversos estudios para contextualizar los problemas de degradación de suelos. Los resultados arrojan que el 45 % de la superficie nacional presenta problemas de suelos degradados debido a la actividad humana (Cotler et al., 2007).

La degradación de suelos en climas semisecos es mayor debido a la limitación de la precipitación que llega a presentar valores de 260 a 600 mm al año (INEGI, 1981) y a que es un proceso inducido por las actividades antropogénicas que disminuyen la calidad del suelo, es decir, su capacidad actual y futura, para sostener la productividad vegetal y animal, y mantener la calidad del agua y aire (Doran y Parkin, 1994). Además, el suelo es en donde se llevan a cabo los ciclos biogeoquímicos permitiendo así el reciclaje de nutrientes en la biósfera y fijación de carbono.

La rehabilitación es necesaria cuando un suelo está degradado hasta tal punto que su uso original ya no es posible y se ha convertido prácticamente en improductivo. En consecuencia se necesitan estrategias de manejo para poder obtener algún impacto. Lo que conlleva a la implementación de técnicas de rehabilitación y/o recuperación, donde la revegetación asistida en sistemas degradados son una opción (Fernández et al., 2010), a través de la introducción de especies arbustivas y herbáceas de uso múltiple.

La introducción de especies arbustivas y arbóreas no nativas generalmente busca restablecer en zonas degradadas algunos servicios ecológicos importantes, por ejemplo, beneficios con respecto a minimizar pérdidas del suelo por escorrentía, de la materia orgánica y la biodiversidad del suelo (Sánchez-Espinoza, 2010). El reconocimiento de la importancia de la vegetación, en un ecosistema con problemas de degradación, es conveniente para adaptar prácticas o tecnologías con especies introducidas que puedan utilizarse en procesos de rehabilitación y que tengan una gran proyección de

usos múltiples, además, que puedan adaptarse a las condiciones climatológicas de una zona (Ruiz-Gracia et al., 2019). Es posible involucrar la utilización y el manejo de dos o más especies, similar a los sistemas agroforestales, donde al menos una de éstas es una planta leñosa, árbol o arbusto, que pueden tener distintos arreglos espaciales (Nair, 1983), que aseguren la continuidad del estrato arbóreo en el tiempo (Soler y Chillo, 2018).

El decidir sobre que especies leñosas y/o herbáceas de uso múltiple se incluirán, es una decisión compleja ya que se deben de considerar los siguientes aspectos: requerimientos para el crecimiento y desarrollo de las especies y que estas puedan adaptarse a las condiciones edáficas y climáticas del lugar y que dichas especies sean una opción viable para introducirlas en zonas degradadas (Crespo, 2008).

La evaluación de la sobrevivencia es una herramienta que permitirá obtener una medida cuantitativa del éxito de la plantación bajo la influencia de las condiciones ecológicas y edafológicas del lugar donde se establecerán (Rodríguez, 2010; Bernaola-Paucar et al., 2015), lo que repercutirá en altas tasas de sobrevivencia y crecimiento inicial (Orozco-Gutiérrez, et al., 2010), que indiquen su potencial adaptación en el sitio de plantación de acuerdo a su morfología y fisiología (Wilson y Jacobs, 2006; Landis et al., 2010); en base a la medición de los individuos que están vivos con respecto a los que fueron plantados (Ramírez, 2012).

La finalidad de proponer una metodología de rehabilitación asistida por medio de la introducción de arbustivas y herbáceas, de propósito múltiple, en los suelos de la comunidad de San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, en el noreste del estado de México, el cual presenta una topografía constituida por llanuras onduladas correspondiente a lomas y pequeños cerros, en su mayoría con escasa profundidad de suelo y condiciones de degradación (INAFED, 2015), será generar información pertinente a la toma de decisiones en procesos de rehabilitación de suelos degradados en las pendientes de la zona. Por otro lado, en la localidad no existe diversidad de cultivos agrícolas, donde el nopal de tuna y maguey son los predominantes, debido a que el área presenta características semidesérticas con escasas posibilidades de explotación, por

lo cual los cultivos son exclusivamente de temporal (Ponciano, 2015). En Adición, la escasa cobertura vegetal, atenuada por las condiciones meteorológicas del sitio, incrementan los procesos erosivos de la localidad. Debido a lo mencionado anteriormente, el objetivo del estudio fue evaluar la sobrevivencia de las especies arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii*, *Leucaena leucocephala*, *Dalea zimapanica* y de las herbáceas *Macroptilium atropurpureum*, *Oryzopsis hymenoides* y *Cynodon dactylon*, utilizadas como especies introducidas en la rehabilitación de un área con alto grado de degradación del suelo en la comunidad de San Felipe Teotitlán, Nopaltepec, Estado de México.

3.4 Materiales y métodos

Este estudio se realizó en dos etapas: la primera fue la producción de plántulas bajo condiciones de invernadero y la segunda fue el trasplante de plantas en la parcela experimental y dar seguimiento al establecimiento de las especies; por medio de la medición de variables de crecimiento y la evaluación de la sobrevivencia de las especies.

3.4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el ejido de San Felipe Teotitlán, perteneciente al municipio de Nopaltepec, Estado de México (Figura 6), ubicado entre las coordenadas geográficas 19°48'10" de latitud norte y 98° 42'5" de longitud oeste, a una altitud de 2456 msnm. El clima en la región se clasifica como templado semiseco con lluvias escasas en verano y otoño; con un rango de precipitación de 500-700 mm (INEGI, 2009). El municipio se encuentra enclavado en un valle con suelos derivados de cenizas y tobas volcánicas. Los suelos son de textura media y la fase del suelo, la cual es una limitante para el desarrollo de las plantas, es dúcica (duripan o tepetate) y el tipo de suelo es un Feozem (Sotelo et al., 2011). El relieve se caracteriza por presentar llanuras con ondulaciones proporcionadas por lomas y pequeños cerros de suelos muy delgados y tepetatosos en donde se cultiva nopal tunero, maguey y granos básicos de temporal (INEGI, 2009).

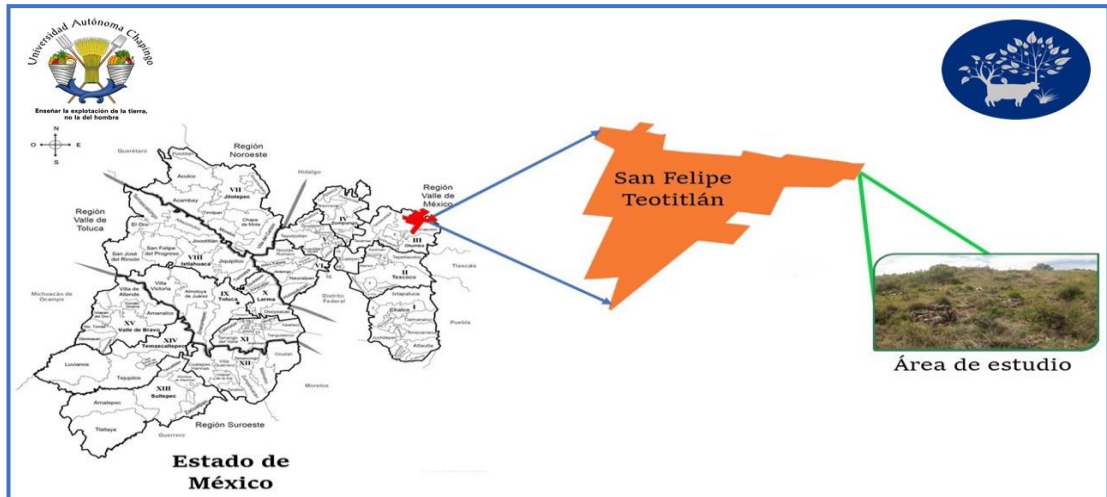


Figura 6. Localización del área de estudio.



Figura 7. Vistas del área de estudio.

3.4.2 Establecimiento de la parcela experimental

A través de un recorrido de campo con las autoridades del ejido de San Felipe Teotitlán, se seleccionó un área con un alto grado de degradación del suelo, escasa cubierta vegetal y ausencia de vegetación arbórea. Cuyo objetivo era que fuera un primer proyecto de demostración de un área rehabilitada con especies arbustivas y herbáceas introducidas. Se delimitó la parcela experimental en un área de 1500 m² (50 m x 30 m) la cual se subdividió en 5 subparcelas de (10 m x 30 m) (Figura 8). Las subparcelas se establecieron como repeticiones y para el control sobre las observaciones de campo y recolección de datos.



Figura 8. A) Recorrido por el área de estudio. B) Delimitación de la parcela experimental y subparcelas.

Debido a que el suelo es muy somero, en cada subparcela se excavaron cajetes de 30 cm de profundidad por 30 cm de diámetro (Figura 9 A), formando una línea y a una distancia de 2 metros entre cajetes, en cada subparcela. Entre líneas la separación de los cajetes fue de 6 metros, teniéndose 5 cajetes por línea, 5 líneas de cajetes por subparcela y un total de 25 cajetes por subparcela. A los cajetes se les agregó suelo proveniente de un sitio cercano, de los límites de la comunidad de Santa María, Nopaltepec, para crear las condiciones que favorecieron el desarrollo radicular de las especies introducidas.



Figura 9. A) Apertura de cajetes en el área de estudio. B) Análisis de suelo utilizado como sustrato en los cajetes.

Se analizaron las propiedades físicas y químicas del suelo utilizado como sustrato, tomándose 5 réplicas de una misma muestra, en los laboratorios de

la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (Figura 9 B), de acuerdo a las metodologías de análisis de suelo de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Los resultados del análisis de suelo que fue utilizado como sustrato en la parcela experimental se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de las propiedades físicas y químicas del suelo utilizado como sustrato en la parcela experimental.

Propiedades químicas	Valor	Propiedades físicas	Valor
pH H ₂ O (1:2)	8.2	Densidad (g/cm ³)	Aparente 1.35
C.E (μS/cm)	119.2		Real 2.52
MO (%)	2.2	Agregados estables (%)	22.14
CIC cmol/kg	12.5	Humedad (%)	0.3 atm 22.14
N (mg kg ⁻¹)	10.5		15 atm 13.58
P (mg kg ⁻¹)	14.9		Arena 57.5
K (mg kg ⁻¹)	766.4	Textura (%)	Limo 32.5
Ca (mg kg ⁻¹)	41.8		Arcilla 10.0
Mg (mg kg ⁻¹)	16.2	Clase textural	Franco arenoso
S (mg kg ⁻¹)	9.3	Porosidad (%)	46.43
Fe (mg kg ⁻¹)		Macroporosidad (%)	16.54
Mn (mg kg ⁻¹)		Microporosidad (%)	29.89
Cu (mg kg ⁻¹)	1.2	Humedad aprovechable (%)	8.56
Zn (mg kg ⁻¹)	1.4		
B (mg kg ⁻¹)	1.7		

Nota: De acuerdo a los resultados de los análisis realizados, los suelos son en su mayoría Feozems, los análisis cumplen con el contenido de materia orgánica y pH, pero no se tiene el % de saturación de bases en acetato de amonio, para corroboración (Comunicación personal del Dr. Erasto Sotero Ruiz).

3.4.3 Producción de arbustivas y herbáceas

En los invernaderos de forrajes en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) se produjeron las plántulas de las especies arbustivas y herbáceas que fueron introducidas en el área de estudio para iniciar el proceso de rehabilitación. La primera semana del mes de abril de 2018 se inició con la limpieza de charolas de poliestireno de 200 cavidades y con el tamizado de suelo, para eliminar piedras, raíces y restos vegetales. En la segunda semana del mes se seleccionó la semilla de las cuatro especies arbustivas: *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt., *Leucaena collinsii* (Britton & Rose), *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *Dalea zimapanica* S. Schauer, y de las dos especies herbáceas: *Macroptilium atropurpureum* (Moc. & Sesse ex DC) y *Oryzopsis*

hymenoides Ricker ex Piper. De cada especie arbustiva o leñosa, se sembraron tres semillas por cavidad de la charola. Una vez que las plántulas alcanzaron un tamaño adecuado se trasplantaron, 50 plántulas por especie, en bolsas de polietileno de 10 cm de ancho por 15 cm de altura. Las plantas permanecieron 60 días en el invernadero hasta su traslado y plantación en el mes de julio de 2018 en la parcela experimental (Figura 10). Debido a que la propagación de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. es vía vegetativa, la producción de plantas fue a partir de los estolones en el mes de julio de 2019.



Figura 10. A) Producción de planta en invernadero. B) Traslado de las plantas al sitio de plantación.

3.4.4 Establecimiento de la planta en campo

En cada una de las subparcelas se trasplantaron las especies *A. canescens*, *D. zimapanica*, *L. collinsii*, *L. leucocephala* y *M. atropurpureum*, formando hileras de cinco plantas y a una separación de 6 metros entre especies (Figura 11). La distribución de las especies arbustivas y la herbácea trepadora en cada subparcela se asignó de forma aleatoria, conformando un diseño experimental completamente al azar con 5 tratamientos y 5 repeticiones por subparcela. La especie herbácea *O. hymenoides* fue plantada entre los espacios de 6 metros que separan las líneas de cajetes donde se sembraron las arbustivas y la herbácea trepadora. Debido a que *O. hymenoides* no tuvo éxito en su establecimiento, la especie *C. dactylon* fue sembrada vía estolones en el mes de julio de 2019, en los mismos espacios que dividen a las especies arbustivas y a la herbácea trepadora *M. atropurpureum* (Figura 11).

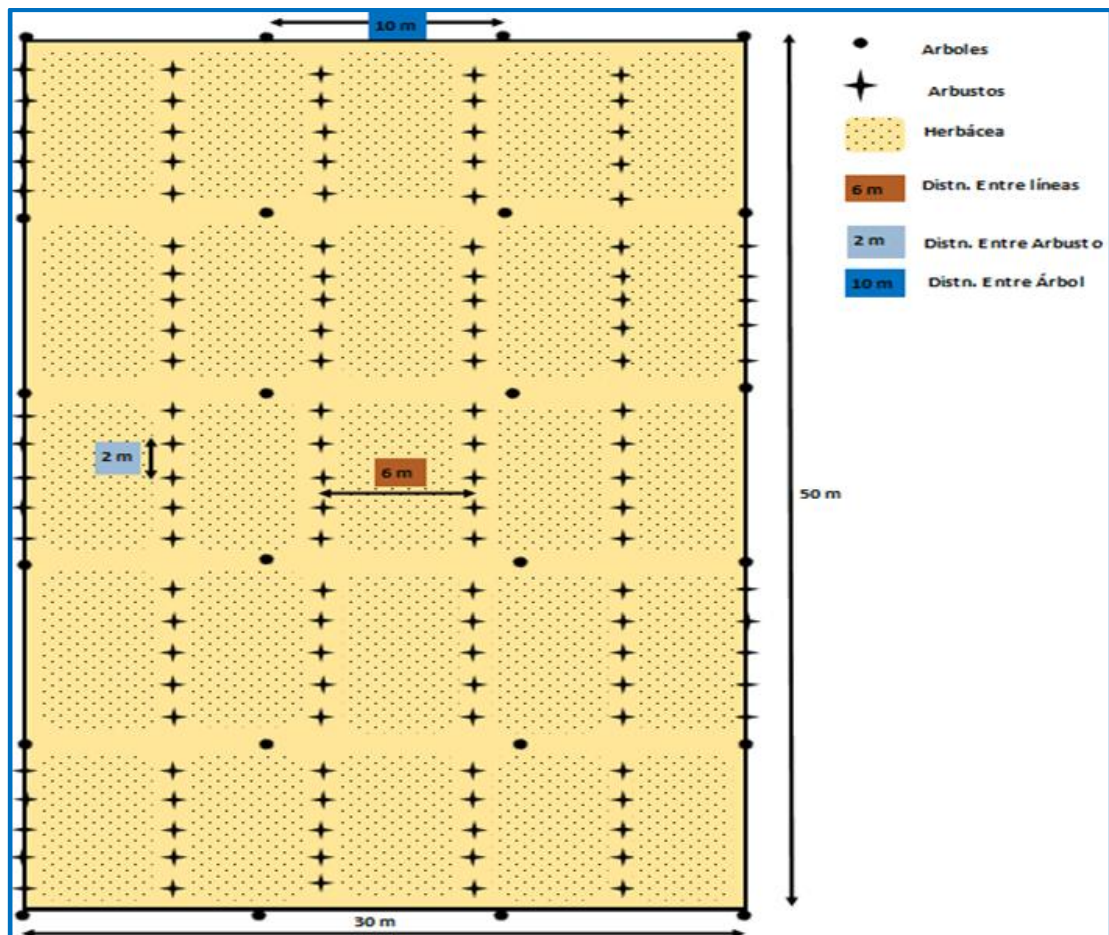


Figura 11. Representación de la distribución de especies arbustivas y herbáceas en la parcela experimental.

3.4.5 Muestreo de la vegetación y medición de variables

Para evaluar el crecimiento y desarrollo de las especies introducidas con fines de rehabilitación, se realizan muestreos a los 3 meses (etapa de establecimiento) y a los 12 meses después de la plantación, octubre 2018 y octubre 2019, respectivamente. En cada muestreo se midieron las variables altura de la planta, diámetro del tallo y la cobertura o área ocupada por plantas.

Altura (cm): se midió con un flexómetro desde la base del árbol hasta el ápice del brote vertical dominante.

Diámetro del tallo (cm): Se midió con un vernier a los 10 centímetros sobre el nivel del suelo.

Cobertura (%): se utilizó el método de cuadrantes utilizando una cuadrícula de nylon de 1 m², dividida en cuadrantes de 10 cm x 10 cm (Figura 12); se estimó

el porcentaje de cobertura por especie de acuerdo con el número de cuadros que ocupen en la cuadrícula.

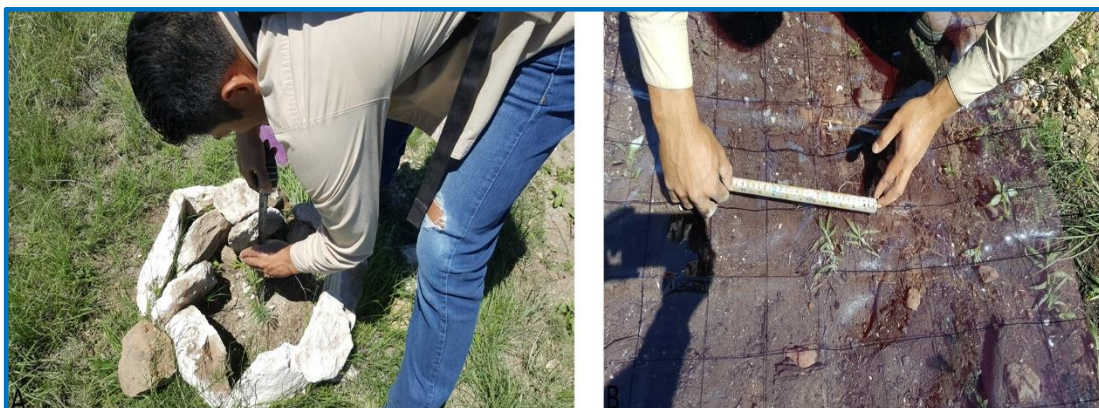


Figura 12. Mediciones de las variables A) altura de planta y B) cobertura.

3.4.6 Estimación de sobrevivencia

La evaluación de la sobrevivencia permite obtener un valor cuantitativo del éxito de la plantación bajo la influencia de las condiciones ambientales del sitio (Ramírez, 2012). Para registrar el número de individuos vivos y poder calcular el porcentaje de sobrevivencia de cada especie trasplantada con respecto al porcentaje de plantas (100%) al momento de la plantación se crearon las siguientes variables respuesta: S3M para referirnos al porcentaje de sobrevivencia de cada especie a los 3 meses de plantación (etapa de establecimiento) y S1A para referirnos a los 12 meses o al año de evaluación. Los valores de S se calculan con utilizando la fórmula: $S = \frac{N_f}{N_i} * 100$, donde N_i es el número de plantas al momento de la plantación y N_f , será el número de las plantas vivas al momento de la evaluación.

La sobrevivencia se evaluó por subparcela, en una superficie de 300 m², en donde las especies fueron plantadas con un espaciamiento de 2m x 6m, entre plantas; teniéndose un total de 25 plantas entre las hileras. Para la evaluación de la sobrevivencia de los pastos se escogieron 5 plantas al azar por subparcela.

Para calcular la proporción de arbustos vivos respecto a los arbustos trasplantados en la parcela experimental, se evaluó la sobrevivencia del total

de arbustos en el total de la plantación, utilizando las ecuaciones propuestas por Scheaffer et al. (1987), descritas por Ramírez (2012).

Estimador de la proporción de sobrevivencia (p) y de la varianza estimada de (p):

$$1.-: \mathbf{p} = \frac{\sum_{i=1}^n ai}{\sum_{i=1}^n mi}$$

$$2.- \mathbf{v(p)} = \left(N - \frac{n}{Nnm^2}\right) \left[\sum_{i=1}^n \frac{(ai-Pmi)^2}{n-1}\right]$$

Estimación del límite para el error de estimación (LIM):

$$\sum_{i=1}^n (ai - Pmi)^2 = \sum_{i=1}^n ai^2 - 2p \sum_{i=1}^n aimi + p^2 \sum_{i=1}^n mi^2$$

$$3.- \mathbf{LIM} = 2\sqrt{\mathbf{v(p)}} = 2\sqrt{\left(N - \frac{n}{Nnm^2}\right) \left[\sum_{i=1}^n \frac{(ai-Pmi)^2}{n-1}\right]} \text{ y}$$

Estimación del número promedio de árboles plantados por sitio en la muestra (\bar{m}):

$$4.-: \bar{\mathbf{m}} = \frac{\sum_{i=1}^n mi}{n}$$

donde: \mathbf{p} : proporción estimada de árboles vivos, \mathbf{q} : proporción estimada de árboles muertos (1-p), $\mathbf{a_i}$: número de árboles vivos en el sitio i , \mathbf{N} : número total de sitios, que al ser de forma rectangular, será igual a 300 m², \mathbf{n} : número total de sitios que se evalúan, tamaño de la muestra (5 subparcelas), $\mathbf{m_i}$: número de árboles plantados en el sitio i , \mathbf{m} : número promedio de árboles plantados por sitio en la muestra, $\mathbf{v(p)}$: varianza estimada de \mathbf{p} y \mathbf{LIM} : límite de error para la estimación de p o p' o p'' , según el caso, con una confiabilidad del 95%.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Análisis del crecimiento

Como se muestra en el Cuadro 2 a los 3 y 12 meses de establecidas las especies en la parcela experimental, se observaron diferencias en el crecimiento de las especies. Solamente las especies arbustivas *Atriplex canescens* y *Leucaena collinsii* presentaron diferencias con respecto a la altura de las plantas, diámetro del tallo y cobertura a los 12 meses de establecidas, lo que indica que el crecimiento depende de las condiciones ambientales del área y de la especie.

Cuadro 2. Promedios de la altura, diámetro y cobertura de las especies arbustivas y herbáceas a los 3 y 12 meses después de la plantación.

Especie	Altura de planta (cm)		Diámetro del tallo (cm)		Cobertura (%)	
	3	12	3	12	3	12
<i>Atriplex canescens</i>	14.9	23.8	0.9	1.4	13.3	19.7
<i>Leucaena collinsii</i>	31.1	52.4	2.5	3.8	25.1	26.8
<i>Leucaena leucocephala</i>	14.7	-	2.0	-	11.9	-
<i>Dalea zimapanica</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Macroptilum atropurpureum*</i>	14.5	-	-	-	8.8	-
<i>Oryzopsis hymenoides</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Cynodon dactylon</i>	3.3	-	-	-	32.4	-

Valores promedio de 25 plantas

*Valores promedio de 23 plantas

Al respecto, Saucedo y Chacón (1999) reportaron un crecimiento de *A. canescens*, sembradas a 2 metros de distancia entre plantas, a los 6 y 15 meses después de la plantación de 20.3 y 49.9 cm, respectivamente, bajo condiciones de clima seco en Chihuahua. Los resultados de altura obtenidos en este estudio a los 12 meses fueron de 23.8 cm, los cuales son similares a los de Saucedo y Chacón (1999) pero obtenidos a los 6 meses después de la plantación, lo que indica que el crecimiento del chamizo es más lento en el área de San Felipe Teotitlán. Estas diferencias pueden ser debido a que su crecimiento se ve limitado por la disminución de temperaturas y heladas en los meses de invierno y por la falta de humedad, debido a que los chamizos

jóvenes (menores de 20 meses) sus raíces tienen poco desarrollo (Saucedo y Chacón, 1999), y el alto porcentaje de arena (57.5%) del suelo utilizado como sustrato, podría influenciar en almacenar escasa humedad. A este respecto, Briones et al. (1996) menciona que el crecimiento es limitado por el agua, recurso bastante escaso en climas secos.

Por otra parte, Membreño (1996) menciona que *L. collinsii*, var. 45-85 originaria de Chiapas, México, alcanzó un promedio de altura de 1.69 m y 2.07 cm de diámetro del tallo a los 12 meses de establecida en una zona de transición de bosque tropical seco a bosque tropical subhúmedo en Nicaragua. El género *Leucaena* se caracteriza por ser arbustos de crecimiento rápido que se desarrollan favorablemente en los trópicos y subtrópicos (CATIE, 1986). Sin embargo, a pesar de haber alcanzado una menor altura y un mayor diámetro del tallo en el clima semiseco de San Felipe Teotitlán (Cuadro 2), *L. collinsii* mostró adaptabilidad al lugar; debido a que su sistema radicular permite penetrar subsuelos duros, facilita la acumulación de la humedad y disminuye la escorrentía del suelo, además, de fijar nitrógeno atmosférico (CATIE, 1991).

Arbustos del género *Leucaena* crecen naturalmente en laderas de montañas y al lado de los caminos como especie colonizadora de superficies desnudas de suelo y, además, de prosperar en áreas con sequías prolongadas la convierte en una especie promisoría para la rehabilitación de suelos y establecimiento de la cubierta vegetal (CATIE, 1986, 1991). A pesar de que a *L. leucocephala* se le ha detectado considerable variación en hábitos de crecimiento (CATIE, 1991); sin embargo, sus requerimientos climáticos están restringido a las zonas tropicales y subtropicales libre de heladas. En sitios con heladas esta especie perdía de hojas y muerte regresiva de tallos y ramas (CATIE, 1986). Lo cual posiblemente fue la causa de que no se adaptara en el área de estudio, debido a que después de las heladas ocurridas en los meses de noviembre a enero en la zona, la planta interrumpió su crecimiento.

Por otra parte, *Macroptilium atropurpureum* dejó de presentar crecimiento debido a que le afectaron las bajas temperaturas de invierno. Contrario a lo

reportado por Jones (1969), *M. atropurpureum* no se regeneró a partir de la corona una vez terminadas las heladas; además, Jones y t Mannelje (1992) mencionaron que el siratro deja de crecer por debajo de 16 ° C y es sensible a las heladas por observarse quemaduras en las hojas y la parte superior del follaje.

Cynodon dactylon es considerada una especie forrajera fundamentalmente de regiones semiáridas, aunque posee la desventaja de que durante el invierno, se secan sus hojas debido a las bajas temperaturas (Oakley, 1999). De acuerdo con Hernández y Cuéllar (2007), el tiempo que tarda el bermuda Tifton 68 (una variedad de *C. dactylon* de rápido crecimiento) en alcanzar 35 centímetros de altura para ser pastoreada o cortada (tiempo de establecimiento), es de alrededor de 3 meses después del riego de trasplante. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio indican que a los 3 meses *C. dactylon* alcanzó una altura de 3.3 centímetros, lo cual indica que el crecimiento es un resultado del genotipo, procedencia de la especie y su adaptación a las condiciones edáfico-climáticas.

3.5.2 Supervivencia de las arbustivas y herbáceas introducidas

La supervivencia de las especies en la etapa de establecimiento (3 meses después de la plantación), mostró que no todas las especies pudieron adaptarse a las condiciones ambientales del área de estudio, especialmente la arbustiva *Dalea zimapanica* y la herbácea *Oryzopsis hymenoides* no sobrevivieron en esta etapa (Cuadro 3). A los 12 meses después del trasplante, se observó que únicamente las especies arbustivas *Atriplex canescens* y *Leucaena collinsii* mantuvieron una supervivencia del 100% (Cuadro 3). Estos valores son más altos a los registrados por Saucedo y Chacón (1999) quienes cuantificaron una supervivencia de *A. canescens*, bajo condiciones de clima seco en Chihuahua, del 71 al 85 %. Sin embargo, los valores más bajos de supervivencia a los 3 meses después de la plantación fueron los obtenidos por Ríos-Saucedo et al. (2012); del 65.4% y 63,9% a los 60 y 150 días, respectivamente, bajo un sistema silvopastoril en áreas degradadas de Chihuahua, México.

Cuadro 3. Porcentajes de sobrevivencia de las especies arbustivas y herbáceas, introducidas con fines de rehabilitación, obtenidos a los 3 y 12 meses después del trasplante.

Especies	S3M					Total	SE %
	P1	P2	P3	P4	P5		
<i>Atriplex canescens</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Leucaena collinsii</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Leucaena leucocephala</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Macroptilium atropurpureum</i>	5	4	5	5	4	23	92
<i>Dalea zimapanica</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cynodon dactylon</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Oryzopsis hymenoides</i>	0	0	0	0	0	0	0
Sobrevivencia observada por parcela	3.57	3.43	3.57	3.57	3.43	3.51	
Especies	S1A					Total	SE %
	P1	P2	P3	P4	P5		
<i>Atriplex canescens</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Leucaena collinsii</i>	5	5	5	5	5	25	100
<i>Leucaena leucocephala</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Macroptilium atropurpureum</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Dalea zimapanica</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cynodon dactylon</i>*	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oryzopsis hymenoides</i>	0	0	0	0	0	0	0
Sobrevivencia observada por parcela	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	

*no se evaluó su sobrevivencia a los 12 meses porque se trasplanto en julio del 2019.

S3M= muestreo a los 3 meses y S1A= muestreo a los 12 meses, después de la plantación.

P= número de plantas por especie por subparcela, y SE= porcentaje de sobrevivencia.

Similarmente a los resultados obtenidos en este estudio, Membreño (1996) reportó que el promedio de sobrevivencia de *L. collinsii* var. 45-85, procedente de la parte central de Chiapas, a los 12 meses de establecida fue de 94%; calificándola como una de las variedades con una alta sobrevivencia. Es de importancia mencionar que el área de estudio correspondía a una zona de transición entre bosque tropical seco y bosque tropical subhúmedo en Nicaragua. *A. canescens* y *L. collinsii* fueron las especies arbustivas que mejor se adaptaron a las condiciones ambientales semisecas de San Felipe Teotitlán.

Aunque *Leucaena leucocephala* a diferencia de otros ecotipos ha sido plantada en una gran variedad de suelos y condiciones climáticas, su mejor adaptación es a una temperatura media anual entre 20 y 30 °C (CATIE, 1991). De acuerdo a los requerimientos ambientales de *L. leucocephala*, esta no debe plantarse arriba de 900 o 1000 msnm, debido a que las bajas temperaturas se vuelven un factor limitante para su desarrollo (CATIE, 1991); posible factor ambiental que condicione la sobrevivencia de *L. leucocephala*,

durante el invierno (noviembre-enero) en el área de estudio. Al respecto, Membreño (1996) menciona que *L. leucocephala* var.32-88, una variedad gigante proveniente de Hawaii, fue una de las variedades que presento una sobrevivencia del 74%; calificándola como una variedad con algunos problemas de adaptabilidad en el bosque tropical seco y bosque seco subtropical.

Otro factor determinante en la sobrevivencia de las especies trasplantadas en este estudio fue el daño por roedores y lagomorfos, encontrándose evidencias de herbivoría en *L. leucocephala* (Figura 13). Las especies herbáceas *Dalea zimapanica* y *Oryzopsis hymenoides* disminuyeron considerablemente sus poblaciones debido a que sufrieron una severa defoliación por la fauna nativa, lo que determino su mortandad durante la etapa de establecimiento.



Figura 13. Daño severo en *Leucaena leucocephala* y evidencias de herbivoría por la fauna silvestre.

De las especies herbáceas introducidas, *Cynodon dactylon*, una especie extremadamente rustica y agresiva, capaz de colonizar suelos pobres en ambientes de clima adverso (Hernández y Cuéllar, 2007), se estableció con éxito durante los primeros meses de evaluación. Sin embargo, al igual que todas las especies de climas cálidos, la especie entró en dormancia durante el periodo invernal, cuando descendieron las temperaturas, teniendo lugar el rebrote a la primavera siguiente como lo reportaron Crespo (2008) y Laurencena et al. (2009).

3.5.3 Supervivencia total en la parcela experimental

Para la evaluaci3n de la supervivencia en una plantaci3n con fines de restauraci3n, es importante cuantificar la supervivencia total de las especies introducidas, en este estudio, se realiz3 a nivel de parcela experimental. En el Cuadro 4 se presentan los resultados de las proporciones estimadas de supervivencia a los 3 y 12 meses despu3s de la plantaci3n, la varianza estimada de supervivencia, el l3mite del error de estimaci3n, as3 como, el n3mero total de plantas en cada subparcela.

Cuadro 4. Estimaci3n de la supervivencia total de las especies introducidas a nivel de parcela experimental, a los 3 meses (S3M) y 12 meses (S1A) despu3s de la plantaci3n.

Muestreo	p	$v(p)$	LIM	\bar{m}
S3M	0.988	0.0000417	0.0129	35
S1A	0.42	0.000016	0.0079	35

p = proporci3n estimada de supervivencia, $v(p)$ = varianza estimada de supervivencia, LIM = l3mite del error de estimaci3n y \bar{m} = n3mero de especies por subparcela evaluada.

Los resultados indican que la estimaci3n de la proporci3n de supervivencia a los 3 meses de la plantaci3n de las especies fue del 98.8 %, con un error de estimaci3n de 0.0129 (1.29%), es decir, que la supervivencia en toda la parcela experimental se estima entre un rango de 0.975 (97.5 %) y 1.0009 (100 %). A los 12 meses despu3s de la plantaci3n la estimaci3n mostr3 que la proporci3n de supervivencia disminuy3 hasta un 42 %, con un error de estimaci3n de 0.0079 (0.79 %), es decir, que la supervivencia a los 12 meses estuvo se estima un rango de 0.4121 (41.21 %) y 0.4279 (42.79 %).

El error de estimaci3n para este estudio satisface la precisi3n requerida ya que 3ste fue menor a 0.05 (5 %), con una confiabilidad del 95 %, en ambos tiempos de evaluaci3n. En las condiciones estudiadas, las arbustivas *Atriplex canescens* y *Leucaena collinsii* son las que presentaron un 100 % de supervivencia individualmente e influyeron significativamente en el 42 % de supervivencia a nivel de parcela experimental, a los 12 meses despu3s de la plantaci3n, lo que las hace especies de 3xito en una plantaci3n, bajo las condiciones clim3ticas del sitio (Ram3rez, 2012).

Con respecto a *Cynodon dactylon*, esta especie presentó una alta sobrevivencia y adaptación en el área de estudio en la etapa de establecimiento (3 meses después de la plantación), similar a otras variedades utilizadas como césped (Laurencena et al., 2009), lo que la hace ser una especie con potencial para introducirse con fines de rehabilitación. Sin embargo, dentro del género *Cynodon* existe una importante variabilidad que es necesario considerar, dado que ésta probablemente condiciona respuestas diferenciales a los efectos ambientales y antrópicos para su establecimiento (Oakley, 1999).

3.6 Conclusiones

El crecimiento y sobrevivencia fueron las variables que permitieron evaluar que durante la etapa de establecimiento, a los tres meses de la plantación, las especies arbustivas y herbáceas presentaron un crecimiento lento y solamente las arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena leucocephala* y *Leucaena collinsii*, y las herbáceas *Macroptilium atropurpureum* y *Cynodon dactylon* presentaron una alta sobrevivencia; *Dalea zimapanica* y *Oryzopsis hymenoides* no sobrevivieron durante la etapa de establecimiento. Sin embargo, a los doce meses después de la plantación, la especie arbustiva *Leucaena leucocephala* y la especie herbácea *Macroptilium atropurpureum* fueron adversamente afectadas por las condiciones ambientales y la calidad del suelo del área de estudio; aunándose el daño por la fauna silvestre. Los resultados mostraron que *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* y *Cynodon dactylon* puedan ser una alternativa viable para ser introducidas con fines de rehabilitación en las áreas de suelo degradadas de San Felipe Teotitlán, además, de que mantendrán la cobertura vegetal y producirán forraje.

3.7 Referencias bibliográficas

- Bernaola-Paucar, R. M., Pimienta-Barrios, E., Gutiérrez-González, P., Ordaz-Chaparro, V. M., & Alejo-Santiago, G., & Salcedo-Pérez, E. (2015). Efecto del volumen del contenedor en la calidad y sobrevivencia de *Pinus hartwegii* Lindl. en sistema doble trasplante. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(28),174-187.
- Briones, O., Montaña, C., & Ezcurra, E. (1996). Competition between three Chihuahuan desert species: evidence from plant size-distance relations and root distribution. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 453-460.
- CATIE (1986). Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 86. Departamento de Recursos Naturales Renovables. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- CATIE (1991). *Leucaena*, *Leucaena leucocephala* (Lam. de Wit.): especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 166. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S., & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83), 5-71.
- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(4), 329–335.
- Doran, J.W., & Parkin T.B. (1994). Defining and assessing soil quality. En: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. C. Bezdicek, & Stewart B. A. (eds.). *Defining and assessing soil quality for sustainable environment*. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. Special Publication Number 35. pp. 3-21.
- Fernández, I., Morales, N., Olivares, L., Salvatierra, J., Gómez, M., & Montenegro, G. (2010). Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales. Gráfica LOM, Santiago, Chile.
- Hernández, R. P. y Cuéllar V. E de J. (2007). *Zacate Bermuda Tifton 68: nueva opción para el establecimiento de praderas bajo riego en el norte de Coahuila*. INIFAP-CIRNE. Sitio Experimental Zaragoza. Folleto Técnico No. 15. Zaragoza, Coahuila. México.
- INAFED (2015). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. [En línea], disponible en internet: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15061a.html> [fecha de acceso 15-diciembre-2019].
- INEGI (1981). Síntesis geográfica del Estado de México. Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. pp. 9-12.

- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Nopaltepec, México. Clave geoestadística 15061. [fecha de acceso 15-diciembre-2019], disponible en internet: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15061.pdf.
- Jones, R. M. (1969). Mortality of some tropical grasses and legumes following frosting in the first winter after sowing. *Tropical Grasslands*, 3,57-63.
- Jones, R.M., & 't Mannetje, L. (1992). *Macroptilium atropurpureum* (DC.) Urban. En: 't Mannetje, L. & Jones, R.M. (eds) *Plant Resources of South-East Asia No. 4. Forages*. Wageningen: Pudoc Scientific Publishers. pp. 155-157.
- Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2010). *The container tree nursery manual, Volume seven: Seedling processing, storage and outplanting*. Agricultura Handbook 674. Washington, DC: USDA Forest Service.
- Laurencena, M. I., Carponi, M. S., Reinoso, P. D., Butus, M., Scorciapino, C., Galli, M., & Pérez, G. (2009). Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 39, 129–141.
- Membreño, M. J. J. (1996). Evaluación de 11 especies y 24 variedades de *Leucaena* a los 12 y 18 meses de establecidas en cuatro sitios de Nicaragua. Tesis de Licenciatura. Departamento de Silvicultura, Escuela de Ciencias Forestales, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua.
- Nair, P. K. R. 1993. An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 499.
- Oakley, L. J. (1999). Botánica y sistemática de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19, 3–10.
- Orozco-Gutiérrez, G., Muñoz-Flores, J., Villaseñor-Ramírez, F., Rueda-Sánchez, A., Sigala-Rodríguez, J. A., & Prieto-Ruiz, J. A. (2010). *Diagnóstico de calidad de planta en los viveros forestales del estado de Colima*. Folleto técnico Núm. 1. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, Campo Experimental Uruapan. INIFAP. Uruapan, Mich., México. 60 p.
- Ponciano, P. E. P. (2015). Monografía político-administrativa del municipio de Nopaltepec estado de México. Tesis de Licenciatura. Centro universitario Texcoco, Universidad Autónoma del Estado de México, Texcoco, Estado de México.
- Ramírez, D. M. (2012). Metodología para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales (Aspectos técnicos). Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- Rodríguez, L. R. (2010). Manual de prácticas de viveros forestales. Colección de Manuales de Ingeniería Forestal. Área Académica de Ingeniería Forestal, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hgo., México. 51 pp.

- Ríos-Saucedo, J. C., Valenzuela-Nuñez, L. M., Rivera-González, M., Trucios-Caciano, R., & Sosa-Pérez, G. (2012). Diseño de un sistema silvopastoril en zonas degradadas con mezquite en Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, 6(3), 174-180.
- Ruiz-Gracia, P., Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Uribe, M. (2019). Tecnologías agroforestales para una Selva Baja Caducifolia: propuesta metodológica. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10 (55), 79-107.
- Sánchez-Espinoza, D. N. (2010). Bases para la rehabilitación ambiental y paisajística de los pasivos ambientales mineros en el distrito de Hualgayoc, Cajamarca, Perú. Tesis de Máster en Ciencias Forestales. Departamento Forestal, Facultad de Forestal y Agronomía, Universidad de Pinar del Río "Hermandad Saiz Montes de Oca", Pinar del Río, Perú.
- Saucedo, T. R. A. y Chacón, R. R. (1999). *Crecimiento y sobrevivencia en plantaciones de chamizo (Atriplex canescens) como efecto de la distancia entre plantas*. Folleto Científico No. 2. Chihuahua, Chih., México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Norte Centro. Campo Experimental La Campana.
- Scheaffer, R., Mendenhall, W., & Ott, L. (1987). *Elementos de muestreo*. Grupo Editorial Iberoamérica, México.
- SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Diario Oficial. México.
- Soler, R., & Chillo, V. (2018). Sinergias y antagonismos entre manejo agroforestal y conservación en paisajes multi-funcionales en Latinoamérica. *Ecosistemas*, 27(3), 1-3.
- Sotelo Ruíz, E. D., González Hernández, A., Cruz Bello, G., Moreno Sánchez, F., & Cruz Cárdenas, G. (2011). Los suelos del Estado de México y su actualización a la base referencial mundial del recurso suelo 2006. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 71-84.
- Wilson, B.C., & Jacobs, D.F. (2006). Quality assessment of temperate and deciduous hardwood seedlings. *New Forests*, 31, 417-433.

4 ANÁLISIS DE ADAPTABILIDAD DE *LEUCAENA COLLINSII* EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO

4.1 Resumen

En las últimas décadas, el deterioro de los recursos naturales en México se ha incrementado, debido a los cambios del uso del suelo y a la urbanización creciente en áreas de alta vulnerabilidad ecológica y bajos niveles de productividad. La microcuenca Tula, México está ubicada en una zona de clima semiseco donde la degradación del suelo y el incremento de la población están ejerciendo un fuerte impacto en la conservación del suelo. El objetivo de este estudio fue determinar las zonas aptas para el desarrollo óptimo de la especie *Leucaena collinsii* Britton & Rose en la microcuenca tula, a través del modelo de nicho ecológico de máxima entropía, MaxEnt, con fines de rehabilitación del suelo. Para el modelado, se utilizaron 19 variables ambientales y 8 registros de presencia, obtenidas de las bases de datos GBIF y MEXU. Los resultados de la modelación indicaron que las variables con mayor contribución fueron la temperatura y la evapotranspiración, y que el modelo tiene una buena capacidad de predicción (p -valor=0.013), de acuerdo a la prueba de significancia con un nivel $\alpha = 0.05$, basada en la técnica de Jackknife. En el modelo, la distribución potencial de la especie fue baja, con apenas 8% de la superficie de la microcuenca, pero se registró una alta sobrevivencia (100%), en la validación experimental. Se concluyó que existen escasas zonas de adaptabilidad para la especie, en la microcuenca Tula; sin embargo, su alta sobrevivencia en la parcela experimental determinó que su introducción es una opción para la rehabilitación del suelo.

Palabras clave: distribución potencial, modelado de nicho ecológico, sobrevivencia, degradación del suelo, rehabilitación

ADAPTABILITY ANALYSIS OF *LEUCAENA COLLINSII* IN THE TULA WATERSHED, MEXICO

4.2 Abstract

In the last decades, the deterioration of natural resources in Mexico has increased due to changes in land use and increasing urbanization in areas of high ecological vulnerability and low levels of productivity. The Tula microwatershed, Mexico is located in a semidry climate zone where soil degradation and population increase are having a strong impact on soil conservation. The goal of this study was to determine the areas suitable for the optimal development of the *Leucaena collinsii* Britton & Rose species in the Tula microwatershed, through the maximum entropy ecological niche model, MaxEnt, for soil rehabilitation purposes. For the modeling, 19 environmental variables and 8 presence records were used, obtained from the GBIF and MEXU databases. The modeling results indicated that the variables with the greatest contribution were temperature and evapotranspiration, and that the model has a good predictive capacity (p-value = 0.013), according to the significance test with a level $\alpha = 0.05$, based on the Jackknife technique. In the model, the potential distribution of the species was low, with just 8% of the surface of the microwatershed, but a high survival (100%) was registered, in the experimental validation. It was concluded that there are few adaptability zones for the species, in the Tula microwatershed; however, its high survival in the experimental plot, determined that its introduction is an option for soil rehabilitation.

Keywords: Potential distribution, ecological niche modeling, survival, soil degradation, rehabilitation

4.3 Introducción

En las últimas décadas, el deterioro de los recursos naturales en México se ha incrementado, el cual en muchos casos es irreversible. Los ritmos actuales del cambio del uso del suelo han subestimado los daños que las tecnologías y actividades agropecuarias y forestales producen en los recursos naturales. Aunado a lo anterior, el proceso de urbanización como tendencia creciente en áreas de alta vulnerabilidad ecológica y bajos niveles de productividad, como son las zonas de climas seco y semiseco, y suelos someros en lomeríos y/o con pendientes pronunciadas. Una cuenca que presenta las características mencionadas anteriormente es la de Tula, México ubicada en una zona donde convergen dos diferentes tipos de climas: templado subhúmedos y semisecos (INEGI, 2017a). Sin embargo, en el área de clima semiseco es donde la degradación del suelo es una característica común y donde la población de los 14 municipios que la conforman se ha incrementado en un promedio del 2% anual, alcanzando un total de 288 196 habitantes en al año 2010 (INEGI, 2013a). Este incremento en la población ha causado una mayor presión sobre los recursos naturales de la región, además de problemas asociados al cambio de uso del suelo (Zamora et al., 2020). También, las áreas de extracción de materiales para construcción, las superficies agrícolas y la mancha urbana han aumentado (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c), provocando una mayor degradación del suelo debido a la pérdida de la cobertura vegetal. Por consiguiente, surge la necesidad de buscar alternativas de rehabilitación, recuperación y conservación de suelos en estas áreas que han perdido su productividad, además de prácticas agronómicas o vegetativas (Zavala-Cruz et al., 2011). Una alternativa es la introducción de plantas de uso múltiple (e.g., producción forrajera, cubierta vegetal y conservación del suelo), que tengan un óptimo desarrollo en la región.

La especie *Leucaena collinsii* Britton & Rose se distribuye del sur de México hasta Guatemala y pertenece a la familia Fabaceae (Zárate-Pedroche, 1998). En México, ésta es utilizada como forraje (por su bajo contenido de taninos y mimosina y alta capacidad de rebrote), en reforestaciones para el control de erosión, como árbol de sombra y fijadora de nitrógeno (Mullen et al., 2003;

Pinto et al., 2013; Wencomo y Ortiz, 2010; Zárata-Pedroche, 1998). Entre sus características principales destacan su notable tolerancia al estrés hídrico debido a su sistema radical pivotante que le permite alcanzar la humedad en las capas profundas del suelo, resistencia al psílido (insecto fitófago, *Heteropsylla cubana*) que es una de las plagas principales de su género y su adaptación en una amplia variedad de suelos, desde neutros hasta alcalinos (Hernández et al., 1987; Martínez-Hernández et al., 2019; Zárata-Pedroche, 1998). Sin embargo, hasta la fecha, no ha habido intentos por determinar su distribución geográfica potencial a escalas finas, a pesar de que, es una especie de distribución cosmopolita, y que se pueden introducir en áreas con precipitaciones escasas. Por tanto, conocer la distribución de esta especie ayudaría a determinar las áreas en las que es conveniente introducirla con fines de rehabilitación del suelo.

Por otra parte, la distribución de especies se rige por varios factores entre los más importantes son los ambientales, ya que su sobrevivencia y desarrollo está determinado por un rango de condiciones ambientales, que son los indicadores para determinar su respectivo nicho ecológico entre otros factores (López, 2007; Peterson et al., 2008; Soberón y Nakamura, 2009). en los últimos años se han desarrollado más de 15 algoritmos para modelar nichos ecológicos de especies y poder obtener su distribución potencial (Elith et al., 2006), estos algoritmos se basan en el concepto de nicho ecológico establecido por Hutchinson (1957), quien relaciona la información biológica con la información ambiental, para determinar áreas en donde no existen registros de presencia de una especie pero que cumplen con las condiciones adecuadas para la sobrevivencia y desarrollo de la especie (Elith et al., 2010; López, 2007; Soberón y Peterson, 2005). MaxEnt es un algoritmo para hacer predicciones de distribuciones geográficas de especies (Phillips et al., 2006) y se considera uno de los mejores algoritmos para modelar nichos ecológicos (Contreras-Medina et al., 2010; Elith et al., 2010), por determinar la relación entre las variables ambientales y los registros de presencia de una especie (Broennimann et al., 2007; Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014). Es un método de inteligencia artificial que estima la probabilidad de ocurrencia de la especie buscando la distribución de máxima entropía (lo más uniforme

posible) sujeta a la condición de que el valor esperado de cada variable ambiental según esta distribución coincide con su media empírica (Flores-Maldonado, 2014; López, 2007). El resultado del modelo expresa el valor de idoneidad del hábitat para la especie como una función de las variables ambientales (Phillips et al., 2006). Un valor alto de la función de distribución en una celda determinada indica que ésta presenta condiciones muy favorables para la presencia de la especie (Flores-Maldonado, 2014; López, 2007). La modelación de nichos ecológicos con MaxEnt ha sido empleada en varios estudios entre los que se encuentran, el de Peralta et al. (2013) con *Quercus rotundifolia*; Cruz-Cárdenas et al. (2014) con *Liquidambar styraciflua* L., *Quercus rubra* Trel., y *Roldana robinsoniana* (Greenm.) H. Rob. & Brettell.; Quesada-Quirós et al. (2016) con *Comarostaphylis arbutoides* (Lindl.), *Ilex pallida* (Standl.), *Myrrhidendron donnellsmithii* (J.M. Coult. & Rose), *Quercus costaricensis* (Liebm.) y *Vaccinium consanguineum* (Klotzsch) y Reynoso et al. (2018) con *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. De los anteriores estudios se demostró que el modelado de nichos ecológicos facilitó el entendimiento de los patrones potenciales de distribución de una especie y las zonas de mayor idoneidad ambiental para su establecimiento y desarrollo. Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo determinar las zonas aptas de distribución potencial para el desarrollo óptimo de la especie *Leucaena collinsii* Britton & Rose en la microcuenca tula, a través del modelo de nicho ecológico por máxima entropía, MaxEnt, con fines de rehabilitación del suelo.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1 Localización del área de estudio

La microcuenca Tula se ubica en las coordenadas geográficas 19°55'31.05'' y 19°34'28.74'' latitud norte y 98°39'59'' y 98°28'16.39'' latitud oeste, con una superficie de 1037.66 km² (103 766 hectáreas) y abarca territorio tres estados de la República Mexicana: Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Se encuentra inmersa en la Región hidrológica 26. Cuenca del río Panuco, y pertenece a la provincia fisiográfica del eje Neovolcánico; con un rango altitudinal que varía entre 2 333 a 3 223 m snm. Los tipos de clima son

templado subhúmedo con lluvias en verano y semiseco templado, la precipitación media anual es de 600 mm, con una temperatura media anual de 14°C y el suelo que predomina es el feozem háplico abarcando un 65% y litosol con 20% de la superficie en la microcuenca (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c). Presenta diversos tipos de vegetación: bosque de táscate, bosque de pino, bosque de encino y matorral crasicauale (INEGI, 2017d).

4.4.2 Datos de presencia

Los registros de presencia de la especie *L. collinsii*, obtenidos de la base de datos de Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF) y del Herbario Nacional de México (MEXU), se depuraron con la finalidad de eliminar aquellos registros ubicados fuera de los límites del territorio nacional, datos duplicados, y aquellos que presentaron inconsistencias, o en su caso, sin coordenadas geográficas como lo indica Martínez-Méndez et al. (2016).

4.4.3 Variables predictivas ambientales

Se recopilaron y procesaron los datos de 19 variables climáticas, estacionales, propiedades del suelo, atributos topográficos, e índices normalizados de vegetación, para la modelación, manteniendo un control de calidad como lo indica Hijmans et al. (2005). Se generaron 5 variables climáticas (BIO1, BIO3, BIO4, BIO12 Y BIO15, ver Cuadro 5) obtenidas de datos de la plataforma WorldClim Versión 1.4 (<http://www.worldclim.org/>) y derivadas de los valores mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, que representan las condiciones de un periodo de tiempo de 1959 al 2000. Además, se generaron siete variables estacionales de acuerdo a lo indicado por Sánchez y Carvacho (2011), a partir de las 5 variables anteriores con el modelo de Turc (1954), estimándose variables relacionadas con la evapotranspiración (ETRA, ETRH, ETRS), precipitación (PH, PS) y temperatura (TH, TS), correspondientes a los meses húmedos (mayo-octubre) y secos (noviembre-abril) (Cuadro 5). Se incluyeron tres variables de las propiedades del suelo (MO, CE y pH), de acuerdo a las recomendaciones de Cruz-Cárdenas et al. (2014), generadas a partir del Conjunto de Datos de Perfiles de Suelo 1:250000 Serie II (INEGI, 2013b) y dos atributos

topográficos: orientación (ASP) y altitud (ELEV), generados a partir del Modelo Digital de Elevación, con un tamaño de pixel de 120 m, el cual se encuentra en las bases de INEGI dentro del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI, 2013c). Por último, se calcularon dos índices normalizados de vegetación generados a partir de imágenes de satélite MODIS TERRA de la NASA (Didan, 2015), en periodos de los meses húmedos (INV_H agosto 2019) y en los meses secos (INV_s Enero 2019) (Cuadro 5). Todas las capas fueron homogenizadas a un tamaño de pixel de 1 km² (0.54 arco minutos).

Cuadro 5. Variables predictivas ambientales utilizadas en MaxEnt para generar el modelo de nicho ecológico de *Leucaena collinsii* en la microcuenca Tula, México.

a) Variables climáticas		
BIO1	=	Temperatura Media Anual
BIO3	=	Isotermalidad (BIO1/BIO7) *100
BIO4	=	Temperatura Estacional (Desviación estándar*100)
BIO12	=	Precipitación Anual
BIO15	=	Precipitación Estacional
b) Variables estacionales		
ETRA	=	Evapotranspiración Real Anual
ETRH	=	Evapotranspiración Real Meses Húmedos
ETRS	=	Evapotranspiración Real Meses Secos
PPH	=	Precipitación Meses Húmedos
PPS	=	Precipitación Meses Secos
TH	=	Temperatura Meses Húmedos
TS	=	Temperatura Meses Secos
c) Propiedades del Suelo		
CE	=	Conductividad Eléctrica
MO	=	Materia Orgánica
pH	=	Potencial Hidrogeno
d) Atributos topográficos		
ASP	=	Orientación del terreno
ELEV	=	Elevación
e) Índice Normalizado de Vegetación		
INV _H	=	Índice Normalizado de Vegetación Mes Húmedo
INV _s	=	Índice Normalizado de Vegetación Mes Seco

La evapotranspiración real anual (ETRA) se calculó con base en el modelo de Turc (1954): $ETRA = P / [0.9 + (P/L)^2]^{1/2}$, donde P = Precipitación total anual (mm), L = 300 + 25T + 0.05T³ y T = Temperatura media anual (°C).

4.4.4 Modelado de nichos ecológicos

La modelación de la distribución potencial de la especie *L. collinsii* se realizó con el programa Maxent ver. 3.4.0, que utiliza la técnica de aprendizaje automático para seleccionar el modelo más consistente a partir la información de las variables disponibles (Phillips y Dudík, 2008; Phillips et al., 2006), además, de generar buenas predicciones aun cuando se utilicen muestras pequeñas, menores de 10 datos de presencia (Pearson et al., 2007; Phillips et al., 2006). Las 19 capas de las variables edafo-climáticas y los registros de presencia de la especie fueron utilizados para generar su modelo de nicho ecológico potencial. En la modelación, la configuración utilizada en el algoritmo MaxEnt fue la característica Lineal-Cuadrática, con un multiplicador de regularización igual a 1, para los modelos ($n=8$), ya que registros de presencia reducidos no permiten evaluar combinaciones de complejidad, por lo que se optó por un enfoque conservador. El formato de salida elegido para los modelos fue "raw", que posteriormente se configuró en el algoritmo MaxEnt donde todos los modelos tuvieran el formato de salida del tipo logística, debido a la facilidad de interpretación en el sistema de información geográfica (Phillips y Dudík, 2008).

4.4.5 Validación del modelo

De acuerdo con Guisan y Zimmermann (2000), el rendimiento de un modelo se evalúa con un conjunto de datos de presencia independiente del que se ha usado, para calibrar el modelo. Sin embargo, esto es complicado de hacer mediante el Área Bajo la Curva, AUC, cuando se tienen datos de presencia limitados, menores a 20, porque se tendrían que utilizar el mayor número de estos en su calibración. En consecuencia, se realizó una prueba de significancia, basada en la técnica de Jackknife, para evaluar el rendimiento predictivo de un modelo con menos de 20 datos de presencia a través de verificar si los modelos propuestos son mejores a los realizados aleatoriamente. El método consistió en construir n modelos separados con los n registros de presencia depurados ($n=8$), cada uno con $n - 1$ individuos ($n-1=7$), y evaluar la capacidad de cada uno de ellos para predecir el dato excluido del conjunto de datos. Con el registro que se excluyó para cada

modelo, se verificó el éxito o fracaso de la predicción, si coincidía en el área de distribución tomaba valor de 1 (éxito) en caso contrario 0 (fracaso). Los valores de éxito o fracaso para cada modelo, complementado con su proporción de área predicha fueron ingresados a la prueba de significancia p-value (Pearson et al., 2007), a un nivel de significancia de 0.05. El proceso fue realizado en el ejecutable p-value Pearson en el software R (R Development Core Team, 2019).

Respecto a la evaluación de las variables ambientales, ésta se realizó con la prueba de Jackknife, con el propósito de evaluar de forma individual el aporte de cada una de ellas en el modelo e identificar la variable con información más útil por si misma (Phillips y Dudík, 2008).

4.4.6 Evaluación de la sobrevivencia de la especie en campo

La evaluación de sobrevivencia permite obtener una medida cuantitativa del éxito de la plantación bajo la influencia del ambiente del sitio (Ramírez, 2011), y se define como el cociente, expresado en porcentaje, entre el número de plantas que sobreviven al finalizar el control de seguimiento, y el número de plantas emergidas, expresada en porcentaje (Ramos-Font et al., 2015). Durante los años 2018 y 2019, se estimó la sobrevivencia de la especie, en un área con alto grado de degradación del suelo, en una parcela experimental de 1500 m² (30 x 50 m de ancho y largo, respectivamente). La parcela experimental estaba ubicada dentro de la microcuenca Tula (Figura 14) entre las coordenadas geográficas 19°50'24 y 19°49'00'' de latitud norte y 98°42'00'' de longitud oeste, a una altitud de 2473 m snm, en el Ejido de San Felipe Teotitlán, en el municipio de Nopaltepec, limitando al sur con el municipio de Axapusco, en el Estado de México. Durante el mes de julio del 2018, se trasplantaron 25 plántulas de *L. collinsii*, de 3 meses de edad, distribuidas en forma aleatoria en la parcela experimental, a una distancia de 6 metros entre líneas y 2 metros entre plantas. La estimación de la sobrevivencia se realizó en la etapa de establecimiento (3 meses después del trasplante), en octubre del 2018 y al año después del trasplante, en octubre del 2019.

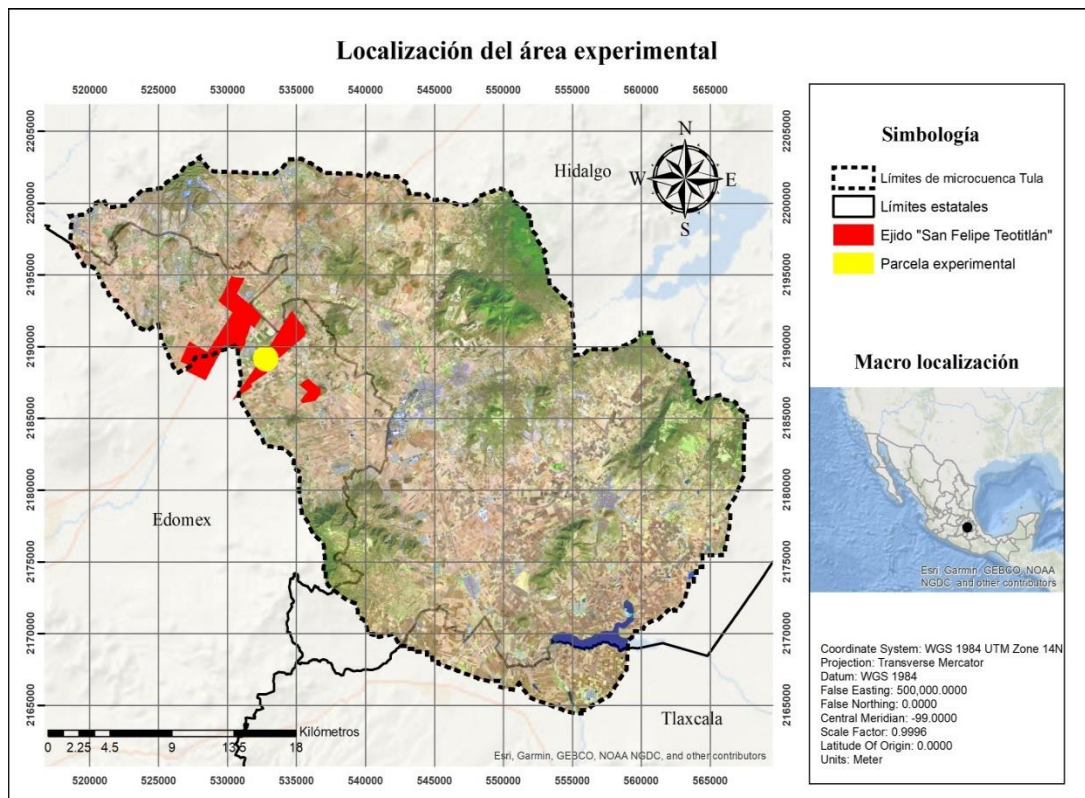


Figura 14. Localización del área experimental.

4.5 Resultados y discusión

El número final de datos de presencia de *L. collinsii*, obtenidos de la base de datos del MEXU y GBIF, mediante el software QGIS 2.14.3, fue de 8, después del proceso de depuración de 84 registros, pertenecientes al estado de Chiapas. Los requerimientos ambientales de dicha especie se encuentran dentro de los rangos de las variables ambientales de la microcuenca Tula (Pinto et al., 2013 y Zárate-Pedroche, 1998). Respecto a la configuración, elegida en el algoritmo MaxEnt, ésta fue con la característica Lineal-Cuadrática y el multiplicador de regularización igual 1, para los $n = 8$ modelos. Debido a que registros reducidos no permiten evaluar combinaciones de complejidad, se optó por un enfoque conservador que permitió un mejor desempeño en el modelado de la especie. El formato de salida elegido para los modelos fue "raw". Los $n = 8$ modelos generados se les aplicó un umbral basado en el método del "valor más bajo predicho" de idoneidad de hábitat en base a los registros de entrenamiento, generando modelos binarios con valor de 1 para las zonas de distribución potencial. El valor de umbral fue de 0.13,

el cual se utilizó para generar el mapa de distribución potencial de *L. collinsii* en el software ArcMap 10.5, como resultado se obtuvo un mapa de tipo booleano.

En relación con la evaluación del rendimiento del modelo, el resultado de la prueba de significancia, basada en la técnica de Jackknife, mostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de modelos indicadas por el p -valor=0.013, con un nivel de significancia de 0.05. Esto significa que los modelos propuestos fueron mejores que los modelos realizados aleatoriamente, es decir, que los primeros tienen un buen rendimiento o capacidad de predicción y pueden servir de base como una primera aproximación para identificar zonas potenciales de establecimiento de *L. collinsii* (Pearson et al., 2007). El modelo final obtenido fue con los 8 registros como entrenamiento y la característica Lineal-Cuadrática con multiplicador de regularización igual a 1, con formato de salida del tipo logística, debido a la facilidad de interpretación en el sistema de información geográfica (Phillips y Dudík, 2008).

La prueba de Jackknife indicó que las variables ambientales de mayor contribución al modelo fueron BIO 4 (Temperatura estacional, °C), con 36%, y la ETRAH (Evapotranspiración real anual de los meses húmedos, mm año⁻¹), con 31% (Figura 15). Mostrando la importancia de la precipitación de los meses húmedos (mayo-octubre) y de la temperatura estacional en la sobrevivencia y desarrollo de la especie (Martínez-Hernández et al., 2019; Pinto et al., 2013; Wencomo y Ortiz, 2010). Posiblemente, en sitios donde no haya una escasa profundidad del suelo (variable que no fue evaluada) sea favorable para su desarrollo en la microcuenca Tula. Al respecto, Hernández et al. (1987) mencionan que *L. collinsii* tiene una alta capacidad de rebrote, después de las sequías, debido a su sistema radical pivotante que puede alcanzar la humedad en las capas profundas del suelo.

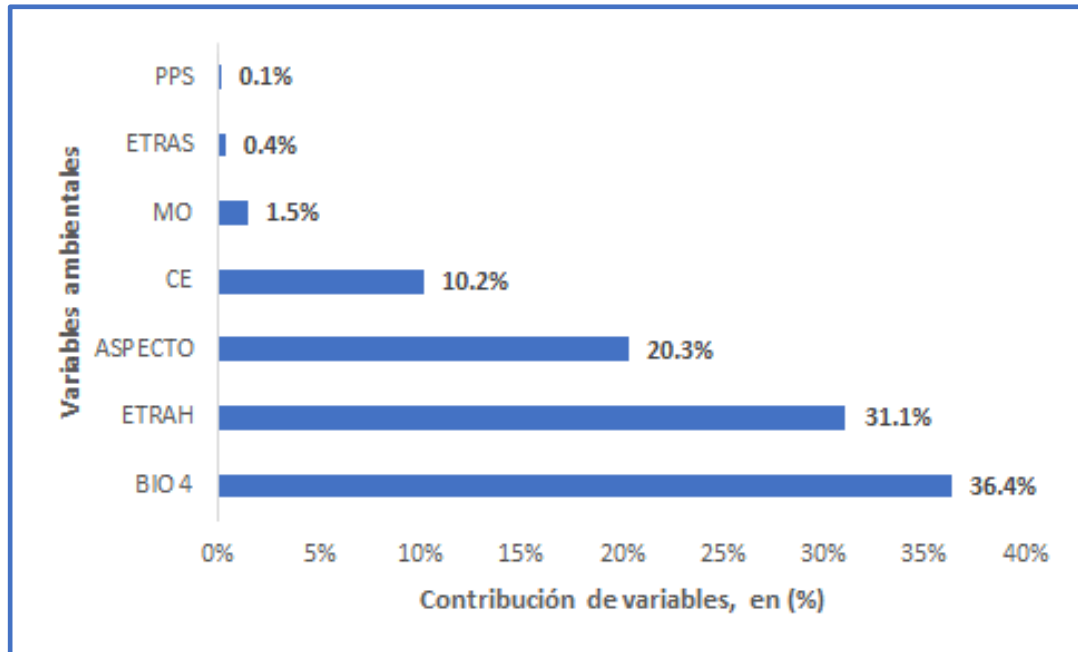


Figura 15. Contribución porcentual de las variables ambientales al modelo de *Leucaena collinsii*.

De la modelación del nicho ecológico de *L. collinsii*, se obtuvo que por las características ambientales de la microcuenca, la superficie de presencia, que es la superficie en donde es posible que se desarrolle la especie, fue de 81.9755 km² (8 197.55 ha), equivalente al 8% de la superficie de la superficie total, indicando una baja distribución respecto a la superficie de ausencia de 955.6844 km² (95 568.44 ha), equivalente al 92% de la superficie total (Figura 16). Las regiones con mejores características bioclimáticas y ambientales para el favorecimiento de su adaptabilidad fueron los municipios de Apan, Almoloya, Emiliano Zapata, Tepeapulco y Singuilucan en el estado de Hidalgo; Benito Juárez, Calpulalpan y Sanctórum de Lázaro Cárdenas del estado de Tlaxcala y el municipio de Axapusco (cerca del lugar donde se llevó a cabo la validación en campo), en el estado de México, ya que pertenecen a zonas de transición climática del régimen semiseco, al templado subhúmedo, donde se presentan condiciones de precipitación y temperatura posiblemente más idóneas para el establecimiento de *L. collinsii*.

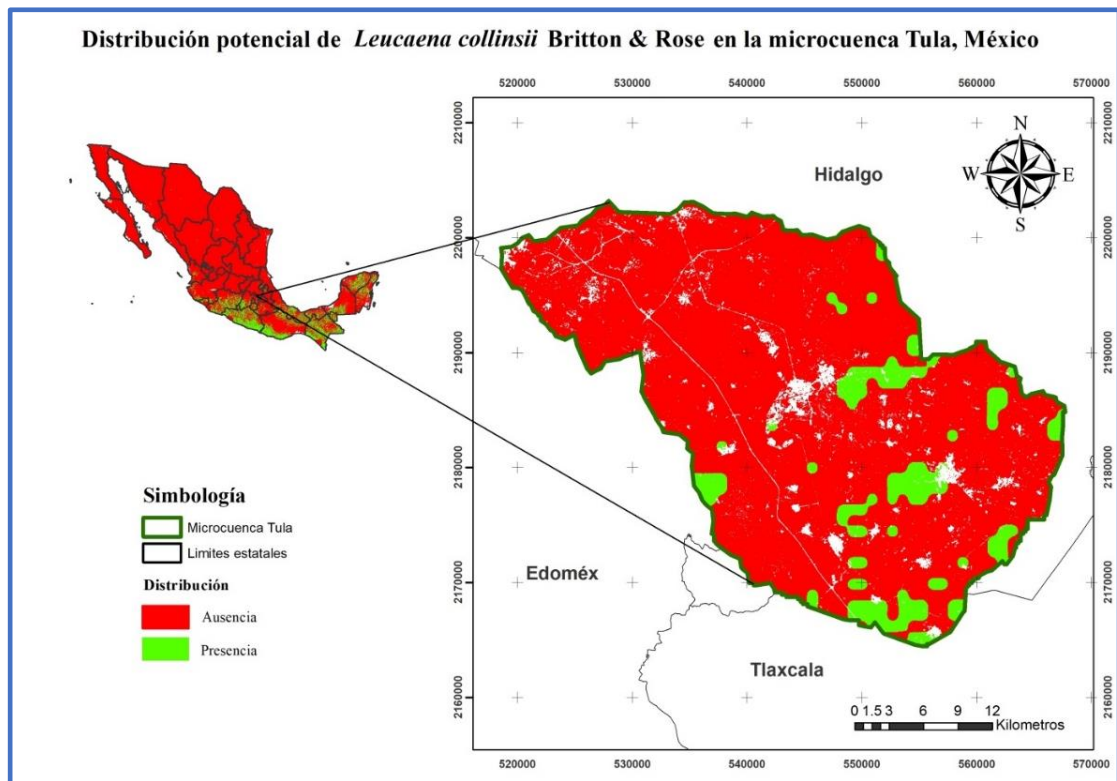


Figura 16. Distribución potencial de *Leucaena collinsii* en la microcuenca Tula, México.

Respecto a la evaluación de la sobrevivencia de la especie en campo, la cual permite medir cuantitativamente el éxito de la plantación bajo la influencia de los factores del sitio (Ramírez, 2011), ésta fue de 100% (25 individuos), al año de trasplantada (Octubre 2019). Esto coincide con lo reportado para otras especies de su género, como lo es *L. leucocephala*, la cual se ha estudiado en el valle del altiplano semiárido del centro-norte de México como parte de un sistemas agroforestal formando barreras de muro vivo con nopal (Osuna-Ceja et al., 2019). La alta sobrevivencia de *L. collinsii* posiblemente se debió a que tuvo una sobrevivencia alta (100%) en la etapa de establecimiento, prácticas de manejo y una buena distribución del temporal en esos años. Sin embargo, en la época de frío sufrió daños pero debido a su alta capacidad de rebrote (Hernández et al., 1987), pudo recuperarse. Esto significa que es una alternativa de gran interés para ser introducida con fines de rehabilitación en la microcuenca Tula, debido a que puede incrementar la fertilidad del suelo (Crespo, 2008), debido a su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico a través de la simbiosis con *Rhizobium* y a su capacidad de favorecer la actividad

microbiana (Valpassos et al., 2007), Pinto et al. (2013) mencionan que *L. collinsii* es una especie con potencial para ser utilizada como forraje en los sistemas de alimentación de rumiantes en el trópico seco del sur de México. Sin embargo, aún se desconocen los factores que controlan su sobrevivencia en climas secos, con heladas, elevadas altitudes, entre los 2300-2500 msnm, y suelos someros. En este estudio el modelo de nichos ecológicos mostró que para la microcuenca Tula su posible distribución es baja, pero en campo mostró alta capacidad de sobrevivencia.

4.6 Conclusiones

El modelaje de nichos ecológicos con datos reducidos de presencia (menos de 20) demostró ser una herramienta confiable para determinar áreas con aptitud para especies arbustivas con fines de rehabilitación del suelo. La especie arbustiva evaluada *L. collinsii* depende principalmente de la estacionalidad de temperatura (BIO 4) y la evapotranspiración real anual de los meses húmedos (ETRAH), para su distribución potencial, la cual fue escasa, con apenas el 8% de la superficie total de la microcuenca tula. Sin embargo, registró una alta sobrevivencia en la parcela experimental, lo que hace posible su introducción como una opción para rehabilitación de suelos degradados, pero hace falta realizar más estudios y determinar si la sobrevivencia en la etapa de establecimiento es un factor que debe considerarse para mantener un alto porcentaje de sobrevivencia después de un año del trasplante.

4.7 Referencias bibliográficas

- Broennimann, O., Treier, U. A., Müller-Schärer, H., Thuiller, W., Peterson, A. T., & Guisan, A. 2007. Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters*, 8(10), 701-709. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01060.x>
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. A. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(3), 421-433. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2010000300009>

- Crespo, G. 2008. Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 4(42), 329-335.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J. L., & Ortiz, E. 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 189-199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Didan, K. 2015. MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>
- Elith, J. H., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., & Zimmermann, N. E. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>
- Flores-Maldonado, J. J. 2014. Análisis de los patrones de diversidad de leguminosas arbustivas del río Sabinas, Coahuila, México; bajo el enfoque del modelado de nichos ecológicos. Tesis de Doctor en Ciencias con Acentuación en Manejo de Vida Silvestre y Desarrollo Sustentable. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. 122p.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Hernández, C.A., Alfonso, A., & Duquesne, P. 1987. Producción de carne basada en pastos naturales mejorados con leguminosas arbustivas y herbáceas II. Ceba final. *Pastos y Forrajes*, 1(10), 246-252.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. 2005. Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-457.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2013a. Censo de población y vivienda 2010. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2013b. Continuo de datos de perfiles de suelos. Escala 1:250 000 .Serie II (Continuo Nacional). <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/default.html#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2013c. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM).

<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2017a. Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2017b. Anuario estadístico y geográfico de México 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097912>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2017c. Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/TLAX_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. 2017d. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- López, G. M. A. 2007. Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental. Tesis de Maestría en Ciencias en Probabilidad y Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. Guanajuato, Gto., México. 93 p. <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/87/2/TE244.pdf>
- Martínez-Hernández, P. A., Cortez-Díaz, E., Purroy-Vásquez, R., Palma-García, J. M., Del Pozo-Rodríguez, P. P., & Vite-Cristóbal, C. 2019. *Leucaena leucocephala* (LAM.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22 (1), 331-357.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. 2016. Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94 (1), 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Mullen, B. F., Gabunada, F., Shelton, H. M., & Stür, W. W. 2003. Agronomic evaluation of *Leucaena*. Part 2. Productivity of the genus for forage production in subtropical Australia and humid-tropical Philippines *Agroforestry Systems*, 58(2), 93-107.
- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Gamiño, M. A., & Pimentel-López, J. 2019. Un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 22, 89-103.
- Palma-Ordaz, S., & Delgadillo-Rodríguez, J. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), 587-597.

- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Peterson, A. T. 2007. Predicting species distribution from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Peralta, J., Zepeda, N. A., & Imbert, J. B. 2013. ¿Puede haber carrascales en el sur de Navarra? Una aproximación mediante la modelización de distribución de especies. *Ecosistemas*, 22(3), 58-65. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.09>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and comprehensive evaluation. *Ecography*, 31 (2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Pinto, R. R., Medina, F. J., Gómez, H., Guevara, F., & Ley, A. 2013. Caracterización nutricional y forrajera de *Leucaena collinsii* a diferentes edades de corte en el trópico seco del sur de México. *Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ*, 1(31), 78-99.
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D., & Rodríguez-González, A. 2016. Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 34(14), 01-12. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.2991>
- R Development Core Team. 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 213 p.
- Ramírez, D. M. (2012). Metodología para realizar y presentar los informes de sobrevivencia inicial (ISI) de las plantaciones forestales comerciales (Aspectos técnicos). Comisipón Nacional Forestal, México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=6&articulo=1564>
- Ramos-Font, M. E., González, R. J. L., & Robles, C. A. B. 2015. Dispersión endozoócora de leguminosas silvestres: desde la recuperación hasta el establecimiento en campo. *Ecosistemas*, 24(3), 14-21.
- Reynoso, S. R., Pérez H., M. J., López B., W., Hernández R., J., Muñoz F., H. J., Cob U., J. V., & Reynoso S., M. D. 2018. El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 48 (9), 47-68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.114>
- Sánchez, M. M., & Carvacho, B. L. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la

Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171-186.

- Soberón, J., & Nakamura, M. 2009. Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(2), 19644-19650. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901637106>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. 2005. Interpretation of model of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Turc, L. 1954. Le bilan d'eau des sols: Relations entre les précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, 491-595.
- Valpassos, M. A. R., Maltoni, K. L., Cassiolato, A. M. R., & Nahas, E. 2007. Recovery of soil microbiological properties in a degraded area planted with *Corymbia citriodora* and *Leucaena leucocephala*. *Scientia Agricola*, 64(1), 68-72. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100010>
- Wencomo, H. B., & Ortiz, R. 2010. Comportamiento fenológico de 23 accesiones de *Leucaena spp.* *Pastos y Forrajes*, 4 (33), 1-12.
- Zamora E., M. C., Buendía E., J. C., Martínez H., P. A., & García N., R. M. (2020). Diagnóstico del uso del suelo y vegetación en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 57-68. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2213>
- Zárate-Pedroche, S. 1998. La domesticación de *Leucaena* (Fabaceae, Mimosoideae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62(1), 141-151. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1557>
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Fernández-Cabrera, C. R., López-Castañeda, A., & Shirma-Tórres, E. 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. 89 p.

5 DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *ATRIPLEX CANESCENS*, *CYNODON DACTYLON* Y *LEUCAENA COLLINSII* EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO

5.1 Resumen

La microcuenca Tula, México está ubicada en una zona de clima semiseco donde la degradación del suelo y el incremento de la población están ejerciendo un fuerte impacto en la conservación del suelo. El objetivo de este estudio fue estimar la distribución potencial de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt, *Cynodon dactylon* (L.) Pers. y *Leucaena collinsii* Britton & Rose, en la microcuenca tula, mediante modelos de nicho ecológico, utilizando el algoritmo de máxima entropía, MaxEnt, para seleccionar plantas de uso múltiple, con fines de rehabilitación de suelos. Para el modelado, se utilizaron 19 variables ambientales, y los registros de presencia de las tres especies fueron obtenidos de las bases de datos GBIF, MEXU y SNIB. Los resultados de la modelación indicaron que la especie *A. canescens* y *C. dactylon* tienen un considerable potencial de distribución (55% y 84%); y un alto porcentaje de supervivencia (80 y 100%). en contraste, la modelación indicó que no existen áreas con condiciones ambientales adecuadas para la especie *L. collinsii*, aunque registró una alta supervivencia (100%). Debido al considerable potencial de distribución y la alta supervivencia de *A. canescens* y *C. dactylon*, su introducción se consideró una opción para la rehabilitación de suelos en la microcuenca.

Palabras clave: MaxEnt, modelación de nichos ecológicos, supervivencia, arbustivas y herbáceas

POTENTIAL DISTRIBUTION OF *ATRIPLEX CANESCENS*, *CYNODON DACTYLON* AND *LEUCAENA COLLINSII*, IN THE TULA MICROWATERSHED, MEXICO

5.2 Abstract

The Tula microwatershed in Mexico is located in a semi-dry climate zone where soil degradation and population increase are having a strong impact on soil conservation. The goal of this study was to estimate the potential distribution of *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt, *Cynodon dactylon* (L.) Pers. and *Leucaena collinsii* Britton & Rose, in the Tula microwatershed, through ecological niche models, using the maximum entropy algorithm, MaxEnt, for selecting multiple-use plants for soil rehabilitation purposes. For the modeling, 19 environmental variables were used, and the presence records of the three species were obtained from the GBIF, MEXU and SNIB databases. The modeling results indicated that the species *A. canescens* and *C. dactylon* have considerable distribution potential (55% and 84%); and a high percentage of survival (80 and 100%). In contrast, the modeling indicated that there are no areas with adequate environmental conditions for the *L. collinsii* species, although it recorded high survival (100%). Due to the considerable distribution potential and high survival of *A. canescens* and *C. dactylon*, their introduction was considered an option for soil rehabilitation in the microwatershed.

Keywords: MaxEnt, Ecological Niche Modeling, Survival, shrubs and herbaceous plants.

5.3 Introducción

En las últimas décadas, el deterioro de los recursos naturales en México ha ido incrementándose, el cual en muchos casos es irreversible. Los actuales ritmos del cambio del uso del suelo han subestimado los daños que las tecnologías y actividades agropecuarias y forestales producen en los recursos naturales. Aunado a lo anterior, el proceso de urbanización como tendencia creciente en áreas de alta vulnerabilidad ecológica y bajos niveles de productividad, como son las zonas de climas seco y semiseco, y suelos someros en lomeríos y/o con pendientes pronunciadas. La microcuenca Tula, México está ubicada en una zona donde convergen dos diferentes tipos de climas: templado subhúmedos y semisecos (INEGI, 2017a). Sin embargo, en el área de clima semiseco es donde la degradación del suelo es muy común y donde la población se ha incrementado en un promedio del 2% anual, alcanzando total 288 196 habitantes en al año 2010 (INEGI, 2013a). Este incremento en la población ha causado una mayor presión sobre los recursos naturales de la región, además de problemas asociados al cambio de uso del suelo (Zamora et al., 2020).

También, las áreas de extracción de materiales para construcción, las superficies agrícolas y la mancha urbana han aumentado (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c), provocando un mayor deterioro del suelo y de la cobertura vegetal. Por consiguiente surge la necesidad de buscar alternativas de conservación, recuperación y rehabilitación de suelos en las áreas que han perdido su productividad, a través de prácticas agronómicas o vegetativas (Zavala-Cruz et al., 2011). Una alternativa es la introducción de plantas de uso múltiple (e.g., producción forraje y conservación del suelo), que tengan un óptimo desarrollo en la región.

La especie *atriplex canescens* (pursh) nutt es una planta originaria de las zonas áridas de américa del norte, que se distribuye desde Canadá hasta el centro de México, pertenece a la familia Amaranthaceae y subfamilia Chenopodiaceae (Urrutia et al., 2007). *Cynodon dactylon* (L.) Pers. Es una especie posiblemente originaria de las regiones de áfrica tropical, eurasia, india y malasia, que se distribuye ampliamente en las regiones tropicales y

subtropicales del mundo, pertenece a la familia Poaceae (Oakley, 1999; Vibrans, 2009) y la especie *Leucaena collinsii* Britton & Rose se distribuye del sur de México hasta Guatemala y pertenece a la familia Fabaceae (Zárate-Pedroche, 1998). las tres especies son utilizadas como forraje en México y son tolerantes al estrés hídrico (Pinto et al., 2013; Romero-Paredes y Ramírez-Lozano 2003; Zárate-Pedroche, 1998;). además, *C. dactylon* puede tener un impacto ecológico debido a que se encuentra frecuentemente en áreas con disturbio (Vibrans, 2009). sin, embargo, hasta la fecha, no ha habido intentos por determinar su distribución geográfica potencial a escalas finas, a pesar de que son especies de distribución cosmopolita, y que se pueden introducir en áreas con precipitaciones escasas. por tanto, conocer la distribución de estas especies ayudaría a determinar las áreas en las que es conveniente introducirlas con fines de rehabilitación del suelo.

Por otra parte, la distribución de especies se rige por varios factores entre los más importantes son los ambientales, ya que su supervivencia y desarrollo está determinado por un rango de condiciones ambientales que son los indicadores para determinar su respectivo nicho ecológico entre otros factores (López, 2007; Peterson et al., 2008; Soberón y Nakamura, 2009). En los últimos años se han desarrollado más de 15 algoritmos para modelar nichos ecológicos de especies y poder obtener su distribución geográfica (Elith et al., 2006), estos algoritmos se basan en el concepto de nicho ecológico establecido por Hutchinson (1957), en donde se relaciona la información biológica con la información ambiental, para determinar áreas en donde no existen registros de presencia de una especie pero que cumplen con las condiciones adecuadas para la supervivencia y desarrollo de la especie (Elith et al., 2010; López, 2007; Soberón y Peterson, 2005).

MaxEnt es un método para hacer predicciones de distribuciones geográficas de especies (Phillips et al., 2006) y se considera uno de los mejores algoritmos para modelar nichos ecológicos y obtener la distribución potencial de una especie (Contreras-Medina et al., 2010; Elith et al., 2010), el cual determina la relación entre las variables ambientales y los registros de presencia de una especie (Broennimann et al., 2007; Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez,

2014). Este algoritmo estima la distribución de probabilidad de máxima entropía (lo más uniforme posible) sujeta a la restricción de que el valor esperado de cada variable ambiental bajo esta distribución estimada coincide con la función bajo una distribución empírica (Flores-Maldonado, 2014; López, 2007). La modelación de nichos ecológicos con MaxEnt ha sido empleada en varios estudios entre los que se encuentran los de Cruz-Cárdenas et al. (2014), Martínez-Méndez et al. (2016), Quesada-Quirós et al. (2016), Reynoso et al. (2018) y Peralta et al. (2013) con diferentes especies forestales. De donde se infiere que en los anteriores estudios, el modelado de nichos ecológicos facilitó el entendimiento de los patrones potenciales para el establecimiento de una especie y las zonas de mayor idoneidad ambiental para su desarrollo. Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo estimar la distribución geográfica potencial de *A. canescens*, *C. dactylon* y *L. collinsii* en la microcuenca Tula, México a través de la modelación nichos ecológicos para contribuir en la selección de especies para rehabilitación de suelos.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Área de estudio

La microcuenca Tula se ubica en las coordenadas geográficas 19°55'31.05'' y 19°34'28.74'' latitud norte y 98°39'59'' y 98°28'16.39'' latitud oeste, con una superficie de 1037.66 km² y abarca territorialmente 14 municipios correspondientes al Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala (Figura 17). Se encuentra dentro de la Región hidrológica 26. Cuenca del río Panuco, en la provincia fisiográfica del eje Neovolcánico; con un rango altitudinal que varía entre 2 333 a 3 223 m snm. Los tipos de clima son templado subhúmedo con lluvias en verano y semiseco templado, la precipitación media anual es de 600 mm, con una temperatura media anual de 14°C y los suelos predominantes son feozem háplico abarcando un 65% y litosol con 20% de la superficie en la microcuenca. Presenta diversos tipos de vegetación: bosque de táscate, bosque de pino, bosque de encino, matorral crasicaule (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d).

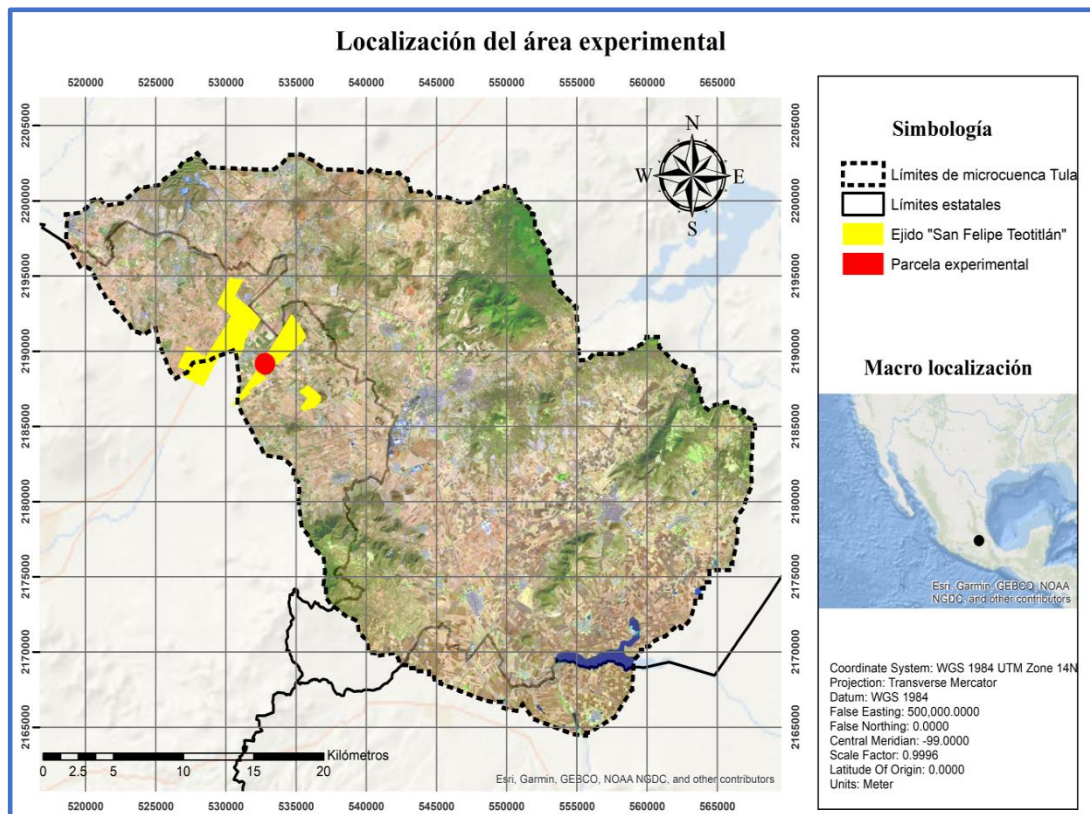


Figura 17. Localización de la parcela experimental en el ejido San Felipe Teotitlán, Estado de México en la microcuenca Tula, México.

5.4.2 Registros de presencia de especies

Los registros de presencia de las especies *A. canescens*, *C. dactylon*, y *L. collinsii* fueron obtenidos de las bases de datos del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB), y verificados con las bases de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y del Herbario Nacional de México (MEXU). Adicionalmente, los registros obtenidos por especie se sometieron a un análisis de aleatoriedad, utilizando los programas R, Ilwis 3.43 y QGIS 3.12, con el propósito de disminuir o eliminar la autocorrelación inherente en sus registros espaciales. Los registros que presentaron autocorrelación espacial se les aplicó pruebas de aleatoriedad (Bivand et al., 2008), seguidas de un análisis de patrones, por especie. Si la prueba de aleatoriedad realizada a los registros verificados era positiva, el 75% de estos se utilizaban para entrenar el modelo y el 25% para su validación. Si ésta era negativa, un análisis de patrones se aplicaba a los registros conforme al método propuesto por Cruz-Cárdenas et al. (2014a), con

el propósito de estimar la distancia a la que es posible encontrar un registro con un máximo probabilidad, y en el que los registros no muestren autocorrelación espacial (Hengl, 2007). El análisis de patrones se realizó utilizando el software ILWIS 3.43 (<http://52north.org/ilwis>).

5.4.3 Variables ambientales

Las 19 variables ambientales (climáticas, estacionales, propiedades del suelo, atributos topográficos, e índices normalizados de vegetación), utilizadas en la modelación (Hijmans et al., 2005b), se obtuvieron y generaron de la siguiente manera: 5 variables climáticas (BIO1, BIO3, BIO4, BIO12 Y BIO15) obtenidas de la plataforma WorlClim Versión 1.4 (<http://www.worldclim.org/>) y derivadas de los valores mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, que representan las condiciones de un periodo de tiempo de 1959 al 2000; siete variables generadas, de acuerdo a lo indicado por Sánchez y Carvacho (2011), a partir de las 5 variables anteriores con el modelo de Turc (1954) (Turc, 1954), y estas son Evapotranspiración (ETRA, ETRH, ETRS), Precipitación (PH, PS) y Temperatura (TH, TS), correspondientes a los meses húmedos (mayo-octubre) y secos (noviembre-abril); tres variables de las propiedades del suelo (MO, CE, pH) generadas a partir de las recomendaciones de Cruz Cárdenas et al. (2014), mediante el Conjunto de Datos de Perfiles de Suelo 1:250000 Serie II; dos atributos topográficos (orientación, altitud) generados a partir del Modelo Digital de Elevación, con un tamaño de pixel de 120 m, el cual se encuentra en las bases de INEGI dentro del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI, 2013b); y finalmente, dos índices normalizados de vegetación generados a partir de imágenes de satélite MODIS TERRA (Didan, 2015) de la NASA, en periodos de los meses húmedos (INV_H agosto 2019) y en los meses secos (INV_s enero 2019) (Cuadro 6). Todas las capas fueron homogenizadas a un tamaño de pixel de 1 km² (0.54 arco minutos).

Cuadro 6. Variables incorporadas en MaxEnt para generar el modelo de nicho ecológico de las tres especies.

a) Variables climáticas		
BIO1	=	Temperatura Media Anual
BIO3	=	Isotermalidad (BIO1/BIO7) *100
BIO4	=	Temperatura Estacional (Desviación estándar*100)
BIO12	=	Precipitación Anual
BIO15	=	Precipitación Estacional
b) Variables estacionales		
ETRA	=	Evapotranspiración Real Anual
ETRH	=	Evapotranspiración Real Meses Húmedos
ETRS	=	Evapotranspiración Real Meses Secos
PPH	=	Precipitación Meses Húmedos
PPS	=	Precipitación Meses Secos
TH	=	Temperatura Meses Húmedos
TS	=	Temperatura Meses Secos
c) Propiedades del Suelo		
CE	=	Conductividad Eléctrica
MO	=	Materia Orgánica
pH	=	Potencial Hidrogeno
d) Atributos topográficos		
ASP	=	Orientación del terreno
ELEV	=	Elevación
e) Índice Normalizado de Vegetación		
INV _H	=	Índice Normalizado de Vegetación Mes Húmedo
INV _s	=	Índice Normalizado de Vegetación Mes Seco

La evapotranspiración real anual (ETRA) se calculó con base en el modelo de Turc (1954): $ETRA = P / [0.9 + (P/L)^2]^{1/2}$, donde P = Precipitación total anual (mm), L = 300 + 25T + 0.05T³ y T = Temperatura media anual (°C).

5.4.4 Modelado de nichos ecológicos

La modelación de la distribución potencial se realizó con el programa Maxent ver. 3.4.0, que utiliza la técnica de aprendizaje automático para seleccionar el modelo más consistente a partir la información disponible (Phillips et al., 2006; Phillips y Dudik, 2008), con el propósito de determinar la relación entre las variables (climáticas, estacionales, propiedades del suelos, atributos topográficos, índices normalizados de vegetación) y los registros de las especies (Guisan y Thuiller, 2005; Jarvis et al., 2005). Las 19 capas de las variables edafoclimáticas y los registros de presencia de la especie fueron utilizadas para generar su modelo de nicho ecológico potencial. Para la modelación, la configuración utilizada en el algoritmo MaxEnt fue la

establecida por defecto (Phillips y Dudík, 2008), a excepción de la inhabilitación del módulo “Extrapolate” y “Do clamping” (Martínez-Méndez et al., 2016), para evitar extrapolaciones artificiales en los valores extremos de las variables ecológicas (Elith et al., 2010), dado que nuestras especies están restringidas a zonas montañosas. El formato de salida elegido para el modelo fue logístico (Phillips y Dudík, 2008), los valores oscilan de 0 a 1, siendo los valores cercanos a 1 los que indican un buen desempeño del modelo (Ortiz-Yusty et al., 2014; Phillips et al., 2006). Para el modelado de la distribución potencial de las especies, se empleó el 75% de los registros de las especies aleatoriamente distribuidas para entrenar el modelo y el 25% restantes para validarlo. Los mapas resultantes fueron exportados al programa ESRI ArcGIS 10.5, con el propósito de realizar los mapas finales del modelo potencial donde los valores de 0 (nula) a 1 (alta) indican la probabilidad de ocurrencia para cada especie.

5.4.5 Validación del modelo

De acuerdo con Guisan y Zimmermann (2000), el rendimiento de un modelo se evalúa con un conjunto de datos de presencia independiente del que se ha usado para calibrar el modelo. La curva operada por el receptor (ROC) evalúa la habilidad predictiva de los modelos de distribución por medio del área bajo la curva (AUC), la cual mide la capacidad del modelo para clasificar correctamente a una especie como presente o ausente (Hanley y McNeil, 1982). Los valores del AUC pueden ser interpretados como la probabilidad de que, cuando se seleccione al azar un punto de presencia y uno de ausencia, el punto de presencia tendrá un valor mayor de idoneidad o probabilidad sobre el modelo. De acuerdo a Araujo y Guisan (2006), los valores de AUC para clasificar la precisión de los modelos es: 0.50-0.60 = insuficiente; 0.61-0.70 = pobre; 0.71-0.80 = regular; 0.81-0.90 = bueno; 0.91-1 = excelente. Aunque, valores del AUC entre 0.7 y 0.9 se consideran modelos con buena precisión (Peterson et al., 2011). Adicionalmente, se realizó una prueba de significancia, en la que se supone que los modelos son mejores que el azar cuando arrojan un valor de $p < 0.05$. Esta consistió en contar el número registros de validación con valores logísticos por arriba del umbral de corte del valor

logístico de referencia estimado por MaxEnt, que es del 10% de error de omisión (Liu et al., 2005, Pearson et al., 2007), evaluarlos con una prueba binomial mediante el software R (R Development Core Team, 2019). Respecto a la evaluación de las variables ambientales, ésta se realizó con la prueba Jackknife, con el propósito de evaluar de forma individual el aporte de cada una de ellas en el modelo e identificar la variable con información más útil por sí misma (Phillips y Dudík, 2008).

5.4.6 Evaluación de la sobrevivencia de las especies en campo

Ésta permite obtener una medida cuantitativa del éxito de la plantación bajo la influencia de los factores del sitio (Ramírez, 2011), y se define como el cociente, expresado en porcentaje, entre el número de plantas que sobreviven al finalizar el control de seguimiento, y el número de plantas emergidas, expresada en porcentaje (Ramos-Font et al., 2015). Durante los años 2018 y 2019, la evaluación de la supervivencia de la especie se realizó en un área 30 x 50 m de ancho y largo, respectivamente, ubicada entre las coordenadas geográficas 19°50'24 y 19°49'00'' de latitud norte y 98°42'00'' de longitud oeste, a una altitud de 2473 msnm, en el Ejido de San Felipe Teotitlán, que abarca parte de los municipios de Axapusco y Nopaltepec, en el Estado de México, dentro de la microcuenca Tula (Figura 17). En dicha superficie, se plantaron 25 plántulas *L. collinsii* de 2 años, 25 plántulas de *A. canescens*, producidas en el invernadero de forrajes, en el Departamento de Zootecnia, en la Universidad Autónoma Chapingo durante los meses de mayo-julio del año 2018, a una distancia de 6 metros entre líneas y 2 metros entre plantas, durante el mes de julio del 2018. La especie *C. dactylon*, también producida en el invernadero de forrajes, en el Departamento de Zootecnia, en la Universidad Autónoma Chapingo durante los meses de mayo-julio del año 2019, fue introducida al año de establecidas las especies arbustivas. Su establecimiento se realizó con base a lo indicado por Chaturvedi et al. (2014), quienes mencionan que los pastos deben introducirse después de un año de que los árboles y arbustos están establecidos. Los estolones fueron plantados en campo a la misma distancia que las otras especies. Finalmente, la

evaluación de la supervivencia se realizó en las especies arbustivas y la de la herbácea, en el mes de noviembre del 2018, y en el mes de octubre del 2019.

5.5 Resultados y discusión

5.5.1 Registros de presencia

Los datos de presencia de *A. canescens*, *C. dactylon* y *L. collinsii*, obtenidos de las bases de datos del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB), y verificados con las bases de datos del Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y del Herbario Nacional de México (MEXU) a través del programa QGIS 2.14.3, fueron de 428, 1 452, y 74, respectivamente. Para *A. canescens*, sus registros se ubican principalmente en Coahuila, San Luis Potosi, Baja California, Sonora, Chihuahua, Baja California Sur, Nuevo León, Zacatecas y Estado de México. Mientras que, para *C. dactylon*, sus registros se ubican principalmente en todos los estados de la República Mexicana. Finalmente, para *L. collinsii*, sus registros se ubican en Chiapas, Estado de México y Oaxaca. Cabe destacar que se encontró un alto grado de concordancia en los registros de presencias, entre las fuentes y los datos obtenidos en relación a los requerimientos ambientales de las especies y las condiciones climáticas de la microcuenca Tula. Los registros encontrados de *A. canescens* coinciden con los reportados por Romero-Paredes y Ramírez-Lozano (2003); Saucedo y Chacón (1999) y Urrutia et al. (2007). Mientras que los registros de *C. dactylon* concuerdan con lo reportado por Laurencena et al. (2009) y los de *L. collinsii* por reportados por Pinto et al., (2013) y Zárate-Pedroche (1998).

La prueba de aleatoriedad aplicada a los registros verificados de cada especie indicó que los registros de las tres especies muestran patrones espaciales agregados, ya que los valores observados (línea continua) se distribuyeron hacia arriba y fuera de las bandas de confianza estimadas a cualquier distancia (radio, r). Por lo general, este tipo de agregaciones se presenta en la recolección de los datos de las diferentes fuentes, e incluso por la transformación de estos. Finalmente, los registros de las tres especies muestran una agregación fuerte, porque a distancias entre 27.7 km (0.25 grados) y 44.4 km (0.4 grados) la probabilidad de encontrar un registro es alta

($G(r) \approx 0.9$) (Figura 18). Después del análisis de aleatoriedad y patrones, el número de registros finales para evitar sobreajustes en los modelos fue de 150 para *A. canescens*, 486 para *C. dactylon* y 36 para *L. collinsii*.

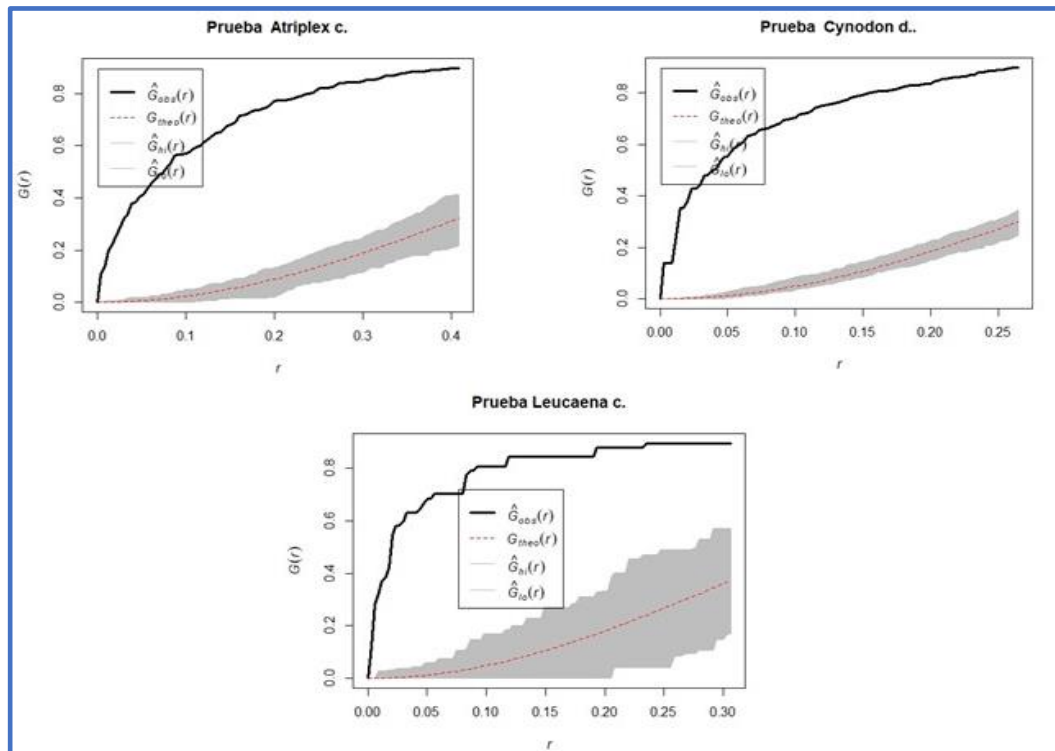


Figura 18. Prueba de aleatoriedad para sitios registrados *Atriplex canescens*, *Cynodon dactylon* y *Leucaena collinsii*. $G(r)$ = número promedio de registros dentro de un radio r , equivalente a la distancia en grados. La línea continua corresponde a los valores observados, la línea discontinua a los valores teóricos y el área gris a la banda de confianza.

5.5.2 Modelos de nicho ecológico

En este estudio se obtuvieron los modelos de los nichos ecológicos óptimos para determinar la distribución potencial de las especies forrajeras arbustivas *A. canescens* y *L. collinsii* y de la herbácea *C. dactylon* en la microcuenca Tula. Los resultados obtenidos de modelación con MaxEnt por cada especie indican que la superficie de presencia, es decir, donde es posible que se desarrolle la especie *A. canescens*, fue de 594.37 km², equivalente al 55.15% de la superficie total de la microcuenca, con un umbral de corte de 0.254, lo que indica una distribución media respecto a la superficie de ausencia que fue de 465.85 km², equivalente al 44.85% de la superficie total de la microcuenca

(Figura 19); para la especie *C. dactylon*, la superficie de presencia fue de 870.04 km² (83.85%), con un umbral de corte de 0.332, lo que indica una distribución alta respecto a la superficie de ausencia que fue de 167.62 km² (16.15%) (Figura 20); y para la especie *L. collinsii*, la superficie de presencia fue del 0% dentro de la cuenca (Figura 21). Las superficies de distribución potencial obtenidas del modelo indican que la especie *C. dactylon* pueden ser una opción de introducción en la microcuenca, seguida de *A. canescens*.

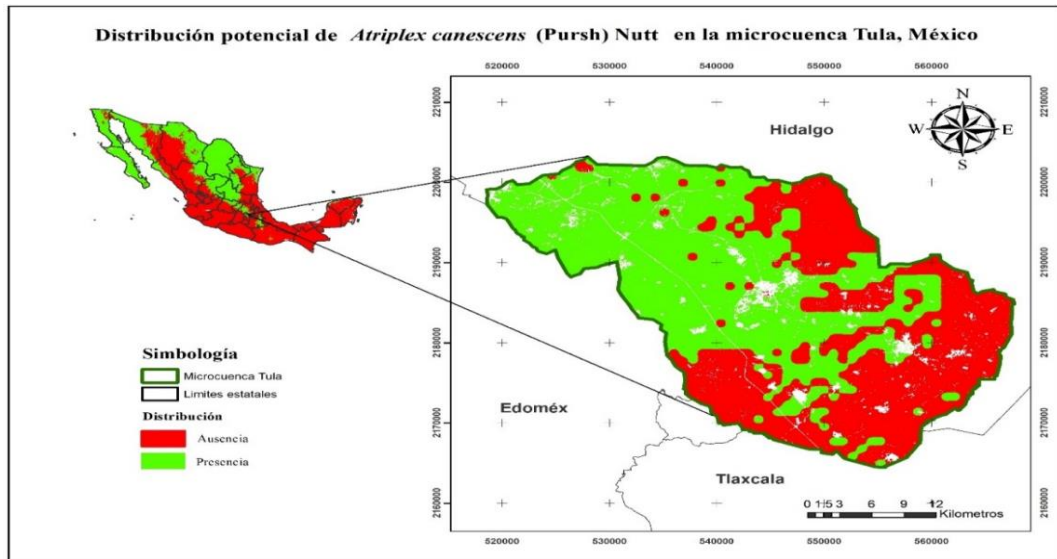


Figura 19. Distribución potencial de la especie *Atriplex canescens* en la microcuenca Tula, México.

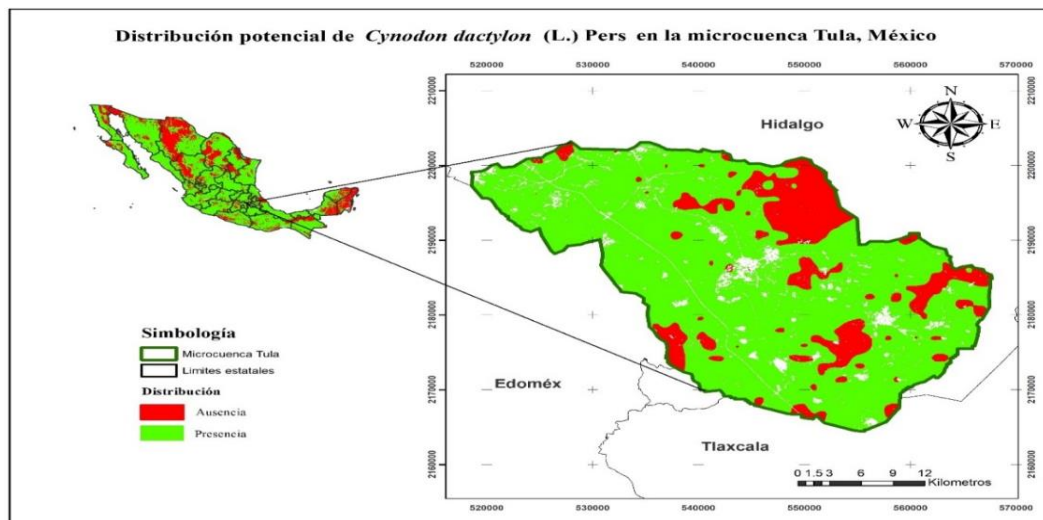


Figura 20. Distribución potencial de la especie *Cynodon dactylon* en la microcuenca Tula, México.

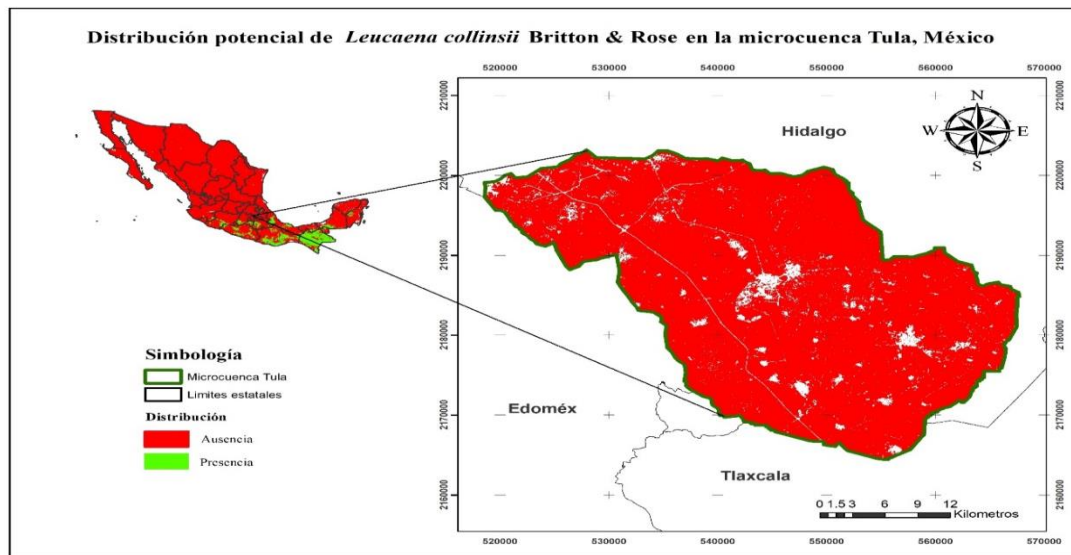


Figura 21. Distribución potencial de la especie *Leucaena collinsii* en la microcuenca Tula, México.

Sin embargo; para la especie *L. collinsii*, el modelo indicó que no existen superficies que ambientalmente cumpla con sus requerimientos, a pesar de su notable tolerancia a la sequía, su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico a través de la simbiosis con *Rhizobium*, su capacidad de favorecer la actividad microbiana en la rizosfera (Valpassos et al., 2007), y a que es considerada una alternativa de gran interés, para la recuperación del suelo e incremento de su fertilidad (Crespo, 2008).

5.5.3 Evaluación de modelos

Los valores del AUC, obtenidos para la evaluación de la precisión de predecir de los modelos, para *A. canescens* y *L. collinsii*, fue de 0.845 y 0.992, para los datos de entrenamiento, y 0.867 y 0.997, para los de prueba, respectivamente. Dichos valores indicaron que los modelos tienen una buena precisión de predecir (Araujo y Guisan, 2006; Peterson et al., 2011; Phillips y Dudík, 2008). Mientras que para *C. dactylon*, el valor AUC fue de 0.721 para los datos de entrenamiento y de 0.697 para la prueba, valor que indica una regular precisión de predecir. Adicionalmente, el resultado de la prueba de significancia, basada en la técnica de Jackknife, de la evaluación del rendimiento de los modelos de nicho ecológico en las especies de *A. canescens* y *C. dactylon*, indicó que existen diferencias estadísticamente

significativas entre los modelos propuestos y los realizados al azar, para un nivel de significancia de 0.05; es decir, que fueron mejor los modelos propuestos que los modelos realizados al azar. Para la especie *A. canescens*, se obtuvo una probabilidad de éxito del 0.96 con un p -valor de 2.2×10^{-16} ; para el caso de *C. dactylon*, la probabilidad de éxito fue del 0.92 con un p -valor de 1.455×10^{-11} ; y finalmente, para *L. collinsii* no hubo probabilidad de éxito debido a las condiciones de desarrollo de la misma especie.

Respecto a las variables ambientales, la prueba de Jackknife indicó que las variables ambientales con mayor contribución en el modelo de distribución de la especie *A. canescens* fueron la precipitación en los meses más húmedos (PPH, 52.9%), el pH del suelo (12.5%) y el índice normalizado de vegetación (INV_s, 9.3%). Al respecto, Romero-Paredes y Ramírez-Lozano (2003) mencionan que ciertas condiciones climáticas permiten adaptarse a las especies y para *A. canescens* la baja precipitación y alta evaporación son condiciones que permiten su desarrollo. Para *C. dactylon*, las variables ambientales que determinaron su distribución fueron la temperatura en los meses secos (TS, 15.4%), el índice normalizado de vegetación (INV_s, 15%), la elevación (12%), la precipitación estacional (BIO15, 11.9%), la temperatura media anual (BIO01, 10.2%), y el índice normalizado de vegetación (INV_H, 7.8%).

Se resalta su capacidad de adaptarse a gran diversidad de suelos y climas de temperatura tropical a cálida, pero es muy común en regiones subtropicales de México (Northam et al., 1991); siendo importante la temperatura para la sobrevivencia de los rizomas (Hernández y Cuéllar, 2007). Es de importancia resaltar que la altitud fue una de las variables que condicionó la distribución de *C. dactylon*; la media altitudinal de la microcuenca Tula es de 2 778 msnm, la cual fue favorable a pesar de que se reporta que se desarrolla en zonas tropicales que generalmente se encuentran a bajas altitudes. Lo anterior corrobora su carácter de ser una especie cosmopolita (Vibrans, 2009). En el caso de la especie *L. collinsii* las variables con la mayor contribución en la modelación fueron la precipitación en los meses secos (PPH, 32.7%), la elevación (11.1%), la precipitación estacional (BIO15, 10.6%), la temperatura

en los meses secos (TS, 10.1%), y la temperatura estacional (BIO4, 9.4%), lo que es indicativo de la importancia de la precipitación y la temperatura en la distribución de la especie (Martínez-Hernández et al., 2019; Pinto et al., 2013; Wencomo y Ortiz, 2010). A pesar de que la especie tiene una alta capacidad de rebrote en épocas de sequía, debido a su sistema radical pivotante que puede alcanzar la humedad en las capas profundas del suelo (Hernández et al., 1987). Posiblemente la escasa profundidad del suelo (variable que no fue evaluada) no fue favorable para su desarrollo en la microcuenca Tula.

5.5.4 Evaluación de la supervivencia en campo

Ésta permite medir cuantitativamente el éxito de la plantación bajo la influencia de los factores del sitio (Ramírez, 2011), y fue de 80% para *A. canescens*. Valor que está en el intervalo de 71-85% reportado por Saucedo y Chacón (1999), en un clima seco en Chihuahua, pero es mayor que el intervalo de 63.9-65.4% registrado por Enríquez-Carrillo et al. (2011) y Ríos-Saucedo et al. (2012), quienes indicaron que dicho intervalo fue determinado por las condiciones climáticas, factores bióticos (herbivoría por fauna) y factores abióticos (incendios). Para *C. dactylon*, la supervivencia fue de 100%, valor que está por encima del valor de 75% reportado por Laurencena et al. (2009), para zonas tropicales y templadas. Finalmente, para *L. collinsii*, la supervivencia fue de 100%, lo que coincide con lo reportado para otras especies de su género, como lo es *L. leucocephala*, que ha sido estudiada en el valle del altiplano semiárido del centro-norte de México como parte de un sistemas agroforestal formando barreras de muro vivo con nopal (Osuna-Ceja et al., 2019). Además, su alta supervivencia posiblemente se debió a la edad que tenían cuando fueron plantados y a las prácticas de manejo que se le proporcionaron. Pinto et al. (2013) mencionan que *L. collinsii* puede considerarse como una especie con potencial para ser utilizada en los sistemas de alimentación de rumiantes en el trópico seco del sur de México. Sin embargo, aún se desconocen los factores que controlan su supervivencia

en otros climas y en este estudio el modelo de nichos ecológicos mostró que para la microcuenca Tula su distribución es nula con una alta supervivencia.

5.6 Conclusiones

La modelación de los nichos ecológicos mostró ser una herramienta confiable para predecir áreas potenciales de distribución de especies de uso múltiple (arbustiva o herbácea) con fines de rehabilitación de suelos. De las especies evaluadas, la arbustiva *A. canescens* y la herbácea *C. dactylon* fueron las que presentaron una amplia distribución, simultáneamente con un alto porcentaje de supervivencia, indicando que la microcuenca tula presenta condiciones ambientales idóneas para su óptimo desarrollo; y que pueden ser introducidas como posible alternativa para la rehabilitación de sus suelos. En contraste, el modelo de distribución potencial para *L. collinsii* indicó que no existen áreas donde se presenten condiciones ambientales para su óptimo desarrollo, en la microcuenca, a pesar de haber obtenido una alta supervivencia, en la parcela experimental. Sin embargo, hace falta realizar más estudios y determinar si la edad de la planta es un factor que debe considerarse al momento de la siembra para mantener un alto porcentaje de supervivencia de esta especie.

5.7 Referencias bibliográficas

- Araujo, M. B., & Guisan, A. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33, 1677-1688. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>
- Bivand, R. S., Pebesma, E. J., & Gómez-Rubio, V. (2008). *Applied spatial data analysis with R*. New York: Springer.
- Broennimann, O., Treier, U. A., Müller-Schärer, H., Thuiller, W., Peterson, A. T., & Guisan, A. (2007). Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters*, 10, 701-709. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01060.x>
- Chaturvedi, O. P., Kaushal, R., Tomar, J. M. S., Prandiyal, A. K., & Panwar, P. (2014). Agroforestry for Wasteland Rehabilitation: Mined, Ravine, and Degraded Watershed Areas. En J. C. Dagar, A. K. Singh y A. Arunachalam (Eds.). *Agroforestry for Wasteland Rehabilitation: Mined, Ravine, and Degraded Watershed Areas* (Vol. 10, pp. 233-271). India: Springer.
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. A. (2010). Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena*

de *Historia Natural*, 83, 421-433. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2010000300009>

- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42, 329-335.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J. L., & Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 189-199. <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>
- Didan, K. (2015). MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A2.006>
- Elith, J., H. Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., et al., (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29, 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>
- Enríquez-Carrillo, E., Parra-Galindo, M. A., & Ramírez-Moreno, F. (2011). Producción y valor nutritivo de forraje de *Atriplex* en un suelo salino. *Revista Biotecnia*, 13, 29-34.
- Flores-Maldonado, J. J. (2014). Análisis de los patrones de diversidad de leguminosas arbustivas del río Sabinas, Coahuila, México; bajo el enfoque del modelado de nichos ecológicos. Tesis de Doctor en Ciencias con Acentuación en Manejo de Vida Silvestre y Desarrollo Sustentable. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- Guisan, A., & Thuiller, W. 2005. Predicting Species Distribution: Offering More than Simple Habitat Models. *Ecology Letters*, 8, 993-1009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Jarvis A., Williams K., Williams D., Guarino L., Caballero P.J., & Mottram G. 2005. Use of GIS for optimizing a collecting mission for a rare wild pepper (*Capsicum fl exuosum* Sendtn.) in Paraguay. Genetic Resources and Crop Evolution.
- Hanley J.A., & McNeil B.J. 1982. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*.
- Hengl, T. (2007). A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. Scientific and Technical Research Series ISSN 1018-5593. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Hernández, R. P., & Cuéllar V. E de J. (2007). *Zacate Bermuda Tifton 68: nueva opción para el establecimiento de praderas bajo riego en el norte*

de Coahuila. Folleto Técnico No. 15. Zaragoza, Coahuila. México: INIFAP-CIRNE. Sitio Experimental Zaragoza.

- Hernández, C.A., Alfonso, A., & Duquesne, P. (1987). Producción de carne basada en pastos naturales mejorados con leguminosas arbustivas y herbáceas. II. Ceba final. *Pastos y Forrajes*, 10, 246-252.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-457.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2013a). Censo de población y vivienda 2010. Recuperado el 30 abril, 2019, de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2013b). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado el 18 mayo, 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017a). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 30 abril, 2019 de: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017b). Anuario estadístico y geográfico de México 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 30 abril, 2019 de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097912>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017c). Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 30 abril, 2019 de: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/TLAX_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017d). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. Recuperado el 22 mayo, 2019 de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Laurencena, M. I., Carponi, M. S., Reinoso, P. D., Butus, M., Scorciapino, C., Galli, M., & Pérez, G. (2009). Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 39, 129-141.
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P., & Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28, 385-393.
- López, G. M. (2007). Descripción y caracterización de nichos ecológicos: una visión más cuantitativa del espacio ambiental. Tesis de Maestría en

Ciencias en Probabilidad y Estadística. Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. Guanajuato, Gto., México. <https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/87/2/TE244.pdf>

- Martínez-Hernández, P. A., Cortez-Díaz, E., Purroy-Vásquez, R., Palma-García, J. M., Del Pozo-Rodríguez, P. P., & Vite-Cristóbal, C. (2019). *Leucaena leucocephala* (LAM.) de Wit especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22, 331-357.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94, 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Northam, F. E., Callihan, R. H., & Old, R.R. (1991). Range extensions of four introduced grasses. *Journal of the Idaho Academy of Science*, 27, 19-21.
- Oakley, L. J. (1999). Bótanica y sistemática de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19, 3-10.
- Ortiz-Yusty, C., Restrepo, A., & Páez, V. P. (2014). Distribución potencial de *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climático global. *Acta Biológica Colombiana*, 19, 471-481. <https://doi.org/10.15446/abc.v19n3.40909>
- Osuna-Ceja, E. S., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Gamiño, M. A., & Pimentel-López, J. (2019). Un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 22, 89-103.
- Palma-Ordaz, S., & 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.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Peterson, A. T. (2007). Predicting species distribution from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34, 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Peralta, J., Zepeda, N. A., & Imbert, J. B. (2013). ¿Puede haber carrascales en el sur de Navarra? Una aproximación mediante la modelización de distribución de especies. *Ecosistemas*, 22, 58-65. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.09>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, N., Soberon, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martinez-Mayer, E., Nakamura, M., & Araujo, M. B. 2001. Ecological Niches and

Geographic Distributions. Princeton University Press, New Jersey.

- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x>
- 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>
- Pinto, R. R., Medina, F. J., Gómez, H., Guevara, F., & Ley, A. (2013). Caracterización nutricional y forrajera de *Leucaena collinsii* a diferentes edades de corte en el trópico seco del sur de México. *Revista de la Facultad de Agronomía-LUZ*, 31, 78-99.
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D., & Rodríguez-González, A. (2016). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14, 01-12. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v14i34.2991>
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado el 15 abril, 2019 de: <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez D., M. (2011). Metodología para realizar y presentar informes (ISI) de las plantaciones forestales comerciales. México: Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=6&articulo=1564>
- Ramos-Font, M. E., González, R. J. L., & Robles, C. A. B. (2015). Dispersión endozoócora de leguminosas silvestres: desde la recuperación hasta el establecimiento en campo. *Ecosistemas*, 24, 14-21.
- Reynoso, S. R., Pérez, H. M. J., López, B. W., Hernández, R. J., Muñoz, F. H. J., Cob, U. J. V., & Reynoso, S. M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 47-68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.114>
- Ríos-Saucedo, J. C., Valenzuela-Nuñez, L. M., Rivera-González, M., Trucios-Caciano, R., & Sosa-Pérez, G. (2012). Diseño de un sistema silvopastoril en zonas degradadas con mezquite en Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, 6, 174-180.
- Romero-Paredes, R. J. I., & Ramírez-Lozano, R. G. (2003). *Artiplex canescens* (Purch, Nutt), como fuente de alimento para las zonas áridas. *Ciencia UANL*, 6, 85-92.
- Sánchez, M. M., & Carvacho, B. L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171-186.
- Saucedo, T. R. A., & Chacón, R. R. (1999). *Crecimiento y sobrevivencia en plantaciones de chamizo (Atriplex canescens) como efecto de la distancia entre plantas*. Folleto Científico No. 2. Chihuahua, Chih.,

México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Norte Centro. Campo Experimental La Campana.

- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 19644-19650. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901637106>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of model of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Turc, L. (1954). Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 5, 491-569.
- Urrutia, M. J., Beltrán, L. S., Loredó, O. C., Díaz, G. M. O., & Gámez, V. H. G. (2007). Chamizo: forraje de calidad en zonas semiáridas. INIFAP-CIRNE-Campo Experimental San Luis. Folleto Técnico No. 30. San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Valpassos, M. A. R., Maltoni, K. L., Cassiolato, A. M. R., & Nahas, E. (2007). Recovery of soil microbiological properties in a degraded area planted with *Corymbia citriodora* and *Leucaena leucocephala*. *Scientia Agricola*, 64, 68-72. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100010>
- Vibrans, H. (2009). Malezas de México, ficha-Cynodon dactylon (L.) Pers. Recuperado el 05 diciembre, 2019 de: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/cynodon-dactylon/fichas/ficha.htm>
- Wencomo, H. B., & Ortiz, R. (2010). Comportamiento fenológico de 23 accesiones de *Leucaena spp.* *Pastos y Forrajes*, 33, 1-12.
- Zamora E, M. C., Buendía E, J. C., Martínez H, P. A., & García N, R. M. (2020). Diagnóstico del uso del suelo y vegetación en la microcuenca Tula, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 57-68. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2213>
- Zárate-Pedroche, S. (1998). La domesticación de *Leucaena* (Fabaceae, Mimosoideae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62, 141-151. <https://doi.org/10.17129/botsci.1557>
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Fernández-Cabrera, C. R., López-Castañeda, A., & Shirma-Tórres, E. (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.

6 CONCLUSIONES GENERALES

Durante la etapa de establecimiento, a los tres meses después de la plantación, las arbustivas *Atriplex canescens*, *Leucaena leucocephala* y *Leucaena collinsii*, y las herbáceas *Macroptilium atropurpureum* y *Cynodon dactylon* presentaron una alta sobrevivencia; *Dalea zimapanica* y *Oryzopsis hymenoides* no sobrevivieron durante esta etapa. *Leucaena leucocephala* y *Macroptilium atropurpureum* fueron adversamente afectadas por las condiciones ambientales, aunándose el daño por la fauna silvestre. *Atriplex canescens*, *Leucaena collinsii* y *Cynodon dactylon* presentaron un alta sobrevivencia lo que indicó que estas especies son una alternativa viable para ser introducidas con fines de rehabilitación en las áreas de suelo degradadas de San Felipe Teotitlán, además, de que mantendrán la cobertura vegetal y producirán forraje.

La modelación de nichos ecológicos con el algoritmo de MaxEnt, basado en la máxima entropía, mostró ser una herramienta útil para determinar áreas con máxima aptitud para especies con fines de rehabilitación del suelo en la microcuenca Tula. El modelado mostró que *L. collinsii* depende principalmente de la estacionalidad de temperatura y la evapotranspiración real anual de los meses húmedos, para su distribución potencial, sin embargo, esta fue escasa, con apenas el 8% de la superficie total de la microcuenca. Su alta sobrevivencia en campo hace posible que sea introducida como arbustiva de uso múltiple, en las áreas donde presente mayor adaptación. En un segundo modelado, las especies *A. canescens* y *C. dactylon* presentaron una amplio potencial de distribución 55% y 84%, respectivamente, y un alto porcentaje de supervivencia (80 y 100%), indicando que la microcuenca Tula presenta condiciones ambientales idóneas para su óptimo desarrollo. Estas especies son una alternativa para la rehabilitación de suelos en zonas de climas semisecos.