

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



POTENCIAL DE REHABILITACIÓN Y PRODUCCIÓN DE *Lupinus campestris* Cham. & Schltl. BAJO DOS CONDICIONES AMBIENTALES EN LA ZONA NORTE DE TLAXCALA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA

LAE. CRISTINA MUNIVE MARTÍNEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS

TUTORES

DR. OSCAR VÁZQUEZ CUECUECHA

DR. HÉCTOR S. LUNA ZENDEJAS



IXTACUIXTLA, TLAXCALA, ENERO 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Código: 505-RGE-04

Publicación: Febrero 2018

Revisión: 9001:2015 02

LAE. CRISTINA MUNIVE MARTÍNEZ

CANDIDATA A MCSA

PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de titulación ha revisado el trabajo de investigación titulado: "POTENCIAL DE REHABILITACIÓN Y PRODUCCIÓN DE *Lupinus campestris* Cham. & Schldt. BAJO DOS CONDICIONES AMBIENTALES EN LA ZONA NORTE DE TLAXCALA", realizado bajo la dirección de la Dra. Elizabeth García Gallegos. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. José Luis Martínez y Pérez

M.E.F. Eunise M. Zamora Campos

Dra. Elizabeth García Gallegos

Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha

Dr. Héctor S. Luna Zendejas

M. en C. Gema Lilia Galindo Flores

Dra. Aline López López

Elizabeth García Gallegos

[Signature]

[Signature]

[Signature]

[Signature]

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
Ixtacuixtla, Tlax., 25 de enero de 2019

[Signature]

MSP. Patricia Limón Huitrón
COORDINADORA GENERAL DEL POSGRADO



CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

c.c.p. Expediente



Documento exclusivo para uso de la dependencia responsable o autoridad correspondiente

AGRADECIMIENTOS

Me place dictar un agradecimiento a quienes hicieron posible completar esta investigación de muchas maneras.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico durante los estudios de la maestría que motiva a continuar adquiriendo conocimientos para la vida y mejorar el entorno natural que tanto nos da.

A la Dra. Elizabeth García Gallegos y al Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha por el tiempo, paciencia, y sus conocimientos aplicados a este trabajo de tesis, además de su amistad.

A los catedráticos por su dedicación para transmitir los conocimientos necesarios a cada estudiante. A la Dra. Aline López, la Dra. Claudia Irene Calvario, la M.E.F. Eunise Zamora, el Mtro. Víctor Carrasco y el Dr. Arturo Estrada.

A la Mtra. Emma Soto por su invaluable ayuda técnica y por compartir sus conocimientos de laboratorio.

A la M. en C. Gema Galindo y al Dr. José Luis Martínez y Pérez por su tiempo y agradable compañía.

A mis amigos Zita, Anaí, Carolina, Azucena, Teresa, Ivette, Jaime, Malena, Antonio, Sergio y Julián a quienes tuve la suerte de conocer y que no dudaron en enseñarme lo que desconocía.

A la Sra. María Carmen Rivera por permitir el acceso en su propiedad para realizar el trabajo de campo de esta investigación.

Y a mis papás, Ada y Mariano, que amo y motivan mucho de lo que hago.

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE TABLAS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El sistema suelo	2
1.1.1 Propiedades físicas y químicas del suelo	2
1.2 Tepetate	5
1.3 Rehabilitación	6
1.4 El género <i>Lupinus</i>	8
1.4.1 Importancia del género <i>Lupinus</i>	9
1.4.2 <i>Lupinus campestris</i> Cham. & Schldl.	10
1.5 Factores que afectan el desarrollo vegetal	12
II. ANTECEDENTES	16
III. JUSTIFICACIÓN	21
IV. OBJETIVOS	22
4.1 General	22
4.2 Específicos	22
V. HIPÓTESIS	22
VI. METODOLOGÍA	23
6.1 Hacienda San Antonio Tepetzala	23
6.2 Predio “El Solar”	24
6.3 Muestreo y preparación de muestras de tepetate	25
6.4 Caracterización edáfica del tepetate antes y después del experimento	26
6.5 Propagación de plantas	26
6.6 Diseño experimental e instalación del experimento en campo	29
6.7 Variables a evaluar en planta	29
6.8 Análisis de los datos	30
VII. RESULTADOS	31
7.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental	31
7.2 Variables en planta	32
VIII. DISCUSIÓN	36
8.1. Propiedades edáficas y contenido nutrimental	36
8.2. Supervivencia y características agronómicas	40
IX. CONCLUSIONES	45
X. RECOMENDACIONES	46
XI. LITERATURA CITADA	47

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Procedencia de las poblaciones naturales de semillas de <i>L. campestris</i> en el estado de Puebla.	28
Tabla 2. Análisis de varianza de algunas propiedades edáficas y contenido nutrimental en tepetate de la zona rizosférica de nueve poblaciones de <i>L. campestris</i> en 2017 y 2018.	32
Tabla 3. Supervivencia de <i>L. campestris</i> en el tepetate.	33
Tabla 4. Supervivencia y características agronómicas de <i>L. campestris</i> en Tlaxco, Tlax.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. A. rama; B. pétalos, a. estandarte, b. ala, c. quilla; C. androceo; D. fruto cerrado; E. fruto abierto, d. semilla de <i>Lupinus campestris</i> (Rzedowski y Rzedowski, 2005).	12
Figura 2. Factores de estrés ambiental para la planta (Larcher, 1995).	14
Figura 3. Hacienda de San Antonio Tepetzala, municipio de Atlangatepec.	24
Figura 4. Solar experimental, municipio de Tlaxco.	25
Figura 5. Procedencia de las poblaciones de <i>L. campestris</i>	27

RESUMEN

Lupinus campestris Cham. & Schldl es nativo de la zona centro de México, las plantas crecen en suelos perturbados, como en tepetates, y tiene el potencial de mejorar la fertilidad de los mismos, lo que permite recuperar su capacidad productiva; así mismo, tanto la semilla como el forraje que produce esta especie son de importancia agronómica por su alto contenido en proteína, potencialmente útil en la alimentación humana y animal. El objetivo de la investigación es determinar, bajo dos condiciones ambientales en la zona norte de Tlaxcala, el potencial de rehabilitación y reproducción de diferentes poblaciones de *Lupinus campestris* que proceden de un intervalo altitudinal de la región centro oriente de Puebla. Los sitios donde se establecieron las parcelas son la hacienda de San Antonio Tepetzala, localidad en el municipio de Atlangatepec y en el predio “El Solar” en Tlaxco. En Tepetzala se determinaron algunos parámetros físicos y químicos del tepetate roturado previo al establecimiento del experimento (Tepetate 2017) y 12 meses posterior a él. En el predio “El Solar” se registró la altura de la planta, el número de vainas y la biomasa seca producidas. En ambos sitios se evaluó la supervivencia de cada una de las poblaciones probadas. La supervivencia en el tepetate fue de 12.05 %, no obstante, en el sustrato de la zona rizosférica de *L. campestris* a 12 meses se registró un incremento significativo en los niveles de potasio, calcio, magnesio, fósforo y nitrógeno, respecto al Tepetate 2017. Así mismo un incremento en el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. En “El Solar” la supervivencia fue del 75.61 %. En el anterior sitio, las plantas de las poblaciones Laguna Seca, San Isidro y Barranca Honda, Atzitzintla y Zoapan zona B destacaron en altura con un promedio de 109.12 cm; la producción de biomasa seca fue mayor para las poblaciones de Laguna Seca, San Isidro y Barranca Honda. El potencial de semilla no mostró diferencias significativas entre las poblaciones, con un promedio de 5 716 semillas por planta, sin embargo, se identificó a Zoapan y San Isidro con el potencial de producción de semilla mayor. Estos resultados indican que *L. campestris* propicia un incremento en la concentración de nutrimentos, mejora el pH, la conductividad eléctrica, el porcentaje materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en tepetates, por lo que

podría ser considerado para rehabilitación de suelos degradados, asimismo señalan a esta especie como prometedora productora de proteína en la región.

Palabras clave: Propiedades edáficas, *Lupinus campestris*.

ABSTRACT

Lupinus campestris Cham. & Schltl is a native species from the central zone of Mexico, it grows in disturbed soils, as in tepetates, and it has the potential to improve their fertility, which allows the recovery of their productive capacity; in the same way, lupine seeds as well the forage are important because of its protein content, potentially useful in human and animal feed. The research aim was to determine, under two environmental conditions in the northern zone of Tlaxcala, the potential for rehabilitation and reproduction of different populations of *Lupinus campestris* from an altitudinal range of the central east region of Puebla. The plots were established in two sites: Hacienda San Antonio Tepetzala in Atlangatepec and the particular property "El Solar" in Tlaxco. In Tepetzala, were determined some physical and chemical parameters from ploughing tepetate previous to the experiment establishment (Tepetate 2017) and twelve months after. In "El solar" there was recorded plant height, pod number and dry biomass. In both sites, survival from the tested populations was evaluated. The survival results in tepetate were of 12.05%, however, in the rhizospheric zone of *L. campestris*, 12 months after there was a significant increase of potassium, calcium, magnesium, phosphorus and nitrogen levels, with respect to the Tepetate 2017. As well as, significant increase in pH, electrical conductivity, organic matter and cation exchange capacity were recorded. Survival in "El Solar" was 75.61%. In plants from populations Laguna Seca, San Isidro and Barranca Honda, Atzitzintla and Zoapan zone B, the height average was 109.12 cm. The dry biomass weight was greater in populations of Laguna Seca, San Isidro and Barranca Honda. Although Zoapan and San Isidro populations were the most productive, the seed potential doesn't show significant differences among populations, with an average of 5 716 seed per plants. Results show that *L. campestris* favor an increase in nutrient content, improves pH, electric conductivity, organic matter content and cationic exchange in tepetate, showing this species as a promising legume to rehabilitate degraded soils and to produce protein in the region.

Keywords: Edaphic properties, *Lupinus campestris*.

I. INTRODUCCIÓN

Entre las leguminosas, el género *Lupinus* spp. ha generado gran interés desde el punto de vista agronómico por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que repercute en una mayor productividad (De Felipe-Anton *et al.*, 2006), desde la perspectiva ecológica, algunas especies son pioneras con gran capacidad de adaptación a áreas perturbadas, además funcionan como plantas nodriza creando microclimas que apoyan al crecimiento de otras especies, lo que favorece la sucesión ecológica (Vance, 2001).

Particularmente, *Lupinus campestris* Cham. & Schltld. es nativa de la zona centro de México, crece en suelos poco profundos y áreas perturbadas, además tiene potencial para mejorar la fertilidad del suelo, así como una importante producción de forraje y semillas las cuales llegan a contener hasta 40.5 % de proteína; mientras que, la parte aérea un 25.5 %, lo que le confiere un importante valor nutrimental (Pablo-Pérez *et al.*, 2014). Estas plantas se muestran promisorias para su aprovechamiento sustentable, porque pueden ser empleadas en prácticas de rehabilitación y/o como alternativa proteica para la alimentación humana o animal en nuestro país (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012).

Pérez-Fernández *et al.* (2016) señalaron que muchas veces la degradación del suelo limita el potencial para el restablecimiento de plantas nativas, ya que el proceso de degradación del suelo avanza con mayor rapidez que las medidas tomadas para su prevención y control, esta carencia de protección por la cubierta vegetal da como consecuencia el afloramiento del tepetate en el eje Neovolcánico mexicano; el cual se caracteriza por ser un horizonte endurecido, cuyas características físicas y químicas son restrictivas para el desarrollo de la vegetación (Prat *et al.*, 2003; Gama-Castro *et al.*, 2007).

Entre las alternativas para habilitar este tipo de sustrato, está el uso de leguminosas, las cuales han tenido un papel significativo en los estudios de rehabilitación de suelos degradados, ya que presentan un mejor aprovechamiento de nutrientes y

una mayor capacidad de crecimiento en condiciones adversas del suelo (Dias, 1995). Haulon *et al.* (2007) señalan que la rehabilitación de los tepetates y su incorporación a actividades forestales o agrícolas se ha vuelto una necesidad social para dar respuesta a una demanda creciente de alimentos, así mismo, ambiental con el objeto de mitigar los problemas relacionados con los escurrimientos superficiales.

1.1 El sistema suelo

El suelo es un sistema complejo donde ocurren diversos procesos físicos y biológicos que se ven reflejados en la diversidad de suelos existentes en el planeta. En él se realizan funciones de gran importancia para el sustento de la vida: es fuente nutricional para la producción de biomasa, actúa como medio filtrante, amortiguador y transformador hidráulico, es el hábitat de miles de organismos, y es el espacio donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, en él se llevan a cabo la mayoría de las actividades humanas, sirve como soporte físico y de infraestructura para la agricultura, actividades forestales, recreativas y agropecuarias (Volke-Sepúlveda *et al.*, 2005). El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) definió al suelo como un cuerpo natural constituido de sólidos (materia orgánica y minerales), líquido y gases que acontece en la superficie terrestre, ocupa un espacio y se compone de uno o varios horizontes que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencia y transformaciones de energía y materia, con la capacidad de sostener plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2014).

1.1.1 Propiedades físicas y químicas del suelo

Aun cuando las propiedades del suelo pueden estudiarse de manera aislada, todas ellas están relacionadas entre sí. López-Díaz y Estrada-Medina (2015) reportan que las propiedades físicas son aquellas que pueden observarse y/o medirse sin alterar químicamente la composición del suelo y están relacionadas con el movimiento del

aire, agua, raíces y nutrimentos. En el caso particular de la densidad aparente se establece una relación con otras características del suelo como la materia orgánica. Cuando aumenta el valor de la densidad aparente se incrementa la compactación y por lo tanto se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces, asimismo, es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la textura y materia orgánica presente en el suelo (Espinosa-Ramírez *et al.*, 2011). Las densidades típicas de un suelo, varían entre 1.0 y 1.7 g cm⁻³; generalmente, se incrementan con la profundidad (USDA, 2001 y USDA-NRCS, 2014). La importancia de la textura radica en la capacidad equilibrada de retener agua y funciona como coloide inorgánico (arcilla) que protegen a los nutrimentos de la lixiviación, es decir, determina la capacidad de un suelo para adsorber agua y sales minerales, además de la percolación, lo que dará movilidad al agua y a las sales presentes; la textura se obtiene determinando el porcentaje de arena, limo y arcilla dentro de la composición de un sustrato (López, 2009).

Por otra parte, las propiedades químicas son aquellas que pueden observarse y/o medirse a partir de cambios químicos que ocurren en el suelo. Estas propiedades describen el comportamiento de los elementos, sustancias y componentes que lo integran; entre ellas están el pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica y de elementos (nutritivos o tóxicos). El pH, también llamada reacción del suelo, establece el grado de acidez o de alcalinidad y tiene una gran influencia en otras propiedades (Porta *et al.*, 2003). Esta propiedad química es el indicador principal en la disponibilidad, movilidad, solubilidad y absorción de nutrimentos para las plantas (Jordan-López, 2006).

La capacidad de intercambio catiónico se expresa como la cantidad de cargas negativas presentes en la superficie de los minerales (arcillas e hidróxidos) y componentes orgánicos (materia orgánica) del suelo y representa la cantidad de cationes que la superficie total pueden retener cationes (Ca⁺⁺, K⁺, Na⁺, etc.) y, por lo tanto, la disponibilidad y cantidad potencial de nutrimentos para la planta. La

unidad de medición de la capacidad de intercambio es en centimoles de carga por kg de suelo (Cmol kg^{-1}). Un valor adecuado está entre 15 y 25 Cmol kg^{-1} . Los suelos arenosos y/o pobres en materia orgánica suelen tener bajo intercambio catiónico (López-Díaz y Estrada-Medina, 2015).

La conductividad eléctrica, es la capacidad de la solución acuosa del suelo para transportar corriente eléctrica y es directamente proporcional al contenido de sales disueltas o ionizadas contenidas en la solución (Doerge *et al.*, 2015). Generalmente la conductividad se expresa en unidades de deciSiemens por metro (dS m^{-1}), esta propiedad puede ser útil como un indicador de la salinidad del suelo. La materia orgánica, son las hojas, madera, excretas, macro y microorganismos muertos y otros tantos elementos de la naturaleza donde el intemperismo y los organismos degradadores como bacterias y hongos realizan un fraccionamiento que se incorpora al suelo para mejorar la capacidad de retención de agua (Porta *et al.*, 2014). La materia orgánica de un suelo se calcula a partir del contenido de carbono orgánico de la muestra multiplicada por 1.724, factor que se obtiene de considerar que en promedio la materia orgánica contiene un 58 % de carbono (Vela-Correa *et al.*, 2012). El nivel de materia orgánica en suelos agrícolas es por lo general menor a 2 % (Jaramillo, 2002).

Los nutrimentos en el suelo son sustancias químicas que permiten a las plantas su desarrollo y crecimiento, cuando no son suficientes propician que la planta no se desarrolle debidamente, que se vuelva propensa a enfermedades o ataques de insectos. Las plantas necesitan elementos minerales que se clasifican en macro (N, P, K, S, Mg y Ca) y micronutrimentos (Zn, Fe, Mn, Cl, Cu, B y Mo) los primeros se requieren en grandes cantidades y los últimos en muy pequeñas concentraciones (Hall, 2008; Jhonson, 2009).

1.2 Tepetate

Gama-Castro *et al.* (2007) definieron al tepetate como un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, que se encuentra normalmente en los paisajes volcánicos de México, bajo los suelos o bien aflorando en superficie. Este horizonte constituye un elemento que participa activamente en la dinámica ambiental, ya que sus características físicas, mecánicas y químicas (alta densidad, baja conductividad hidráulica y retención de humedad, así como baja fertilidad), son restrictivas para el desarrollo de la vegetación, por consiguiente, bajo los suelos, producen discontinuidades litológicas, impiden la infiltración del agua y favorecen el escurrimiento lateral donde promueve los deslizamientos. Debido principalmente a la textura limo-arenosa que presenta este material derivado de la fragmentación de las cenizas volcánicas endurecidas, ya que no contiene materia orgánica ni minerales arcillosos (Podwojewski *et al.*, 2008).

En este sentido, respecto a sus características físicas, Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) reportaron que este material puede presentar una densidad aparente de 1.46 a 2.08 g cm⁻³, con una tendencia a incrementarse, lo que repercute en una reducción en el número de poros (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2004). En cuanto a las características químicas puede presentar un pH de neutro a ligeramente alcalino (6.9 a 7.8), baja conductividad eléctrica (0.09 dS m⁻¹), una capacidad de intercambio catiónico media de 16.7 Cmol(+) kg⁻¹, lo que depende de la cantidad y tipo de coloides orgánico e inorgánico presentes, ya que presenta contenidos muy bajos de materia orgánica, nitrógeno (0.01 a 0.07 %) y fósforo (1.0 a 13.5 mg kg⁻¹), así como escasas poblaciones de microorganismos, lo que dificulta su incorporación a la producción agrícola (Álvarez-Solís *et al.*, 2000). Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) reportan que en horizontes superficiales existe una capacidad de cambio de 18.6 y 20.9 Cmol(+) kg⁻¹ y una concentración pobre de materia orgánica (2.9 a 4.6 %) de acuerdo a la normatividad mexicana para suelos volcánicos en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2002).

1.3 Rehabilitación

La rehabilitación se entiende como un detonador de la sucesión natural que propicia una trayectoria de reparación congruente en lo posible, con los rasgos generales del entorno (Sánchez *et al.*, 2005). Se aplica a la composición, la estructura o procesos de un ecosistema existente pero degradado (Stanturf *et al.*, 2014). Busca el enfoque fundamental de volver a un ecosistema preexistente o histórico e implica costos que a largo plazo se reflejarán en beneficios que permitirán mantener la calidad del ambiente y con ello optimizar la capacidad de manejo del suelo (Lima *et al.*, 2016). Dentro de las prácticas a realizar para mejorar las condiciones donde ha aflorado el tepetate se reportan en primera instancia la roturación y nivelación para posteriormente llevar a cabo bordes, agregar fertilizantes que pueden ser químicos, incorporar plantas nativas o buscar la adaptación de especies que permitan incrementar la productividad del sustrato (Báez-Pérez *et al.*, 2008).

A partir de la época de la conquista en México, la explotación maderera tuvo un aumento considerable, origen de pérdida de suelos; más en la década de los 80's la depresión económica, la globalización en el comercio, la llegada de transnacionales y la ley de desmonte, provocaron degradación ambiental general; en parte, por la proliferación de basura, y la deforestación extrema. El programa de reajuste estructural de la economía de México, creado por el FMI (Fondo Monetario Internacional), obligó al gobierno a canalizar la recuperación económica a las exportaciones, con un laxo reglamento ambiental, mano de obra barata y devaluación del peso, la industria extranjera hizo explotación libre de los recursos naturales, lo que redujo la diversidad biológica (Challenger, 1998).

Más allá de plantar árboles, las reforestaciones requieren de una preparación para formar parte de una rehabilitación. Para comenzar debe existir la delimitación de una ecoregión, se establece que paisajes requieren de intervención y en estos se determina los sitios a trabajar. Un paso importante a seguir es determinar que se va

a realizar en el sitio, una restauración ecológica; rehabilitación o reclamación, lo que depende de las condiciones del sitio (Mansourian, 2005).

La deforestación ha ocasionado la pérdida del suelo, condición que adquiere particular relevancia en la zona denominada Eje Volcánico Transversal, cuyos suelos de origen volcánico y con alto contenido de sílice, cuando quedan expuestos se compactan y se propicia la aparición de los tepetates (Werner, 1992), donde el establecimiento de la vegetación natural se complica, en algunos casos, prácticamente es nula, la incorporación de materia orgánica aún en dosis moderadas incrementa significativamente la estabilidad de agregados, independientemente de los años de rehabilitación (Haulon *et al.*, 2007). Se han empleado especies de coníferas y latifoliadas para tratar de restablecer este tipo de sustratos; sin embargo, se reporta el uso de especies con potencial de adaptación a condiciones edáficas extremas, entre las que destacan las plantas nativas o introducidas (Rondón y Vidal, 2005).

La plantación de especies suculentas y/o leñosas perennes en hileras transversales, complementada con cobertura herbácea densa y excavación de zanjas de infiltración se identificó como una práctica adecuada para mejorar las condiciones del tepetate. Este tipo de especies son clave debido a que proveen estabilidad física del suelo y promueven interacciones biológicas y químicas benéficas (Callo-Concha, 2013). Por otro lado, las especies leguminosas forestales se caracterizan por ser especies pioneras y persistentes, con elevada producción de biomasa y ocurrencia en una amplia gama de condiciones climáticas y edáficas, estas plantas han tenido un papel significativo en los estudios de recuperación/rehabilitación de suelos degradados; como el caso de los tepetates. Pero pueden presentar un mejor aprovechamiento de nutrimentos y mayor capacidad de crecimiento cuando se asocian a hongos micorrízicos y bacterias fijadoras de nitrógeno (Dias *et al.*, 1995; García-Oliva, 2005). Al respecto, Pérez-Fernández *et al.* (2016) reportaron que leguminosas como *Cytisus balansae*, *Cytisus multiflorus*, *Cytisus striatus* y *Genista florida* inoculadas con bacterias

fijadoras de nitrógeno mejoró su rendimiento. Mientras que, en ausencia de leguminosas, la fertilidad del suelo y la comunidad de plantas no mejoraron significativamente. Por compatibilidad entre huésped-hospedero y de adaptación a diversos ambientes, la selección de leguminosas es crucial para lograr una mayor capacidad de fijación de nitrógeno por vía biológica (Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2010).

1.4 El género *Lupinus* L.

El género *Lupinus* L. esta ampliamente distribuido en el mundo, pertenece a la familia Fabaceae, subfamilia Faboideae y tribu Genistae. Conformado por aproximadamente 267 especies anuales y perennes a nivel mundial con diferentes hábitos: hierbas, arbustos y árboles, la mayoría de ellas se encuentra en el Nuevo Mundo, donde existen dos centros de diversificación reconocidos: América del Norte (aproximadamente 100 especies) y los Andes (85 especies), mientras que, en el Viejo Mundo, este género está representado por solo 14 especies. Las plantas del género *Lupinus* muestran una gran plasticidad ecológica, lo que les permite crecer en una amplia diversidad de hábitats, desde el nivel del mar hasta las elevaciones alpinas (Bermúdez-Torres *et al.*, 2015). En México, las especies se distribuyen en altitudes que van de 0 a 4 000 m snm (Ruiz-Moreno *et al.*, 2000). La mayor concentración se localiza en el Eje Neovolcánico Transversal, en el Valle de México y al menos dos variedades en la montaña de Tláloc, México (Rzedowski y Rzedowski, 2005), por ejemplo, Alderete-Chávez *et al.* (2008) reportan en esta misma zona la existencia de *Lupinus leptophyllus*, *Lupinus montanus*, *Lupinus potosinus*, *Lupinus uncinatus*, *Lupinus versicolor* en altitudes de 2 800 a 3 700 m snm.

Como se ha mencionado anteriormente, la familia Fabaceae a la cual pertenece *Lupinus* tiene un papel ecológico importante, debido a que provee condiciones favorables para el desarrollo de organismos en el suelo y a su vez mejora sus propiedades físicas y químicas. El lupino blanco (*L. albus* L.) es una de las especies

más estudiadas, debido a que se adapta a suelos ácidos y crece satisfactoriamente en aquellos que presentan una deficiencia importante de fósforo; por otro lado, *Lupinus montanus* ha sido empleada al Sur de América y Guatemala para incrementar la fertilidad del suelo y mejorar las plantaciones forestales, debido a su capacidad de fijar nitrógeno (Andrist-Rangel *et al.*, 2007). Las especies del género *Lupinus* establecen simbiosis con bacterias del género *Bradyrhizobium*, para el cual sólo hay una especie definida: *Bradyrhizobium japonicum* y es una bacteria de crecimiento lento (De Felipe-Anton *et al.*, 2006).

La descripción botánica del género *Lupinus* se detalla a continuación. Son plantas herbáceas o arbustivas, anuales o perennes; presentan tallos solitarios, con abundantes ramificaciones, de 5 cm a 3 m de alto; hojas alternas, estipuladas, de 4 a 17 foliolos; flores en racimos de 3 a 5 cm de largo, vascular de germinación epigea, es dicotiledónea, de la familia Fabaceae (Rzedowski y Rzedowski, 2005). Pablo-Pérez *et al.* (2015) reportan que la etapa de floración de *Lupinus* en México, en especies que se localizan a 2 886 y 3 442 msnm, es durante mayo a agosto. La espiga se autopoliniza, la inflorescencia es de tamaño variable de 10 a 60 cm de altura, los frutos son vainas dehiscentes, comprimidas, verdes, pubescentes y sedosas, que pueden medir hasta 13 cm de largo produciendo un número variable de semillas con un peso promedio de 220 a 625 g por planta. Por otro lado, Kurlovich y Kartuzova (2002) mencionan que *Lupinus albus* L. tiene una etapa de crecimiento vegetativo de 170 a 180 días.

1.4.1. Importancia del género *Lupinus*

El género es de gran importancia por su valor nutrimental, debido principalmente a que el contenido de proteína en sus semillas es superior al 40 % (Rodríguez-Ambriz *et al.*, 2005). Por lo anterior, las especies han sido domesticadas en regiones como el Mediterráneo, en los Andes y en Australia (Wolko *et al.*, 2011; Eastwood *et al.*, 2008). Por ejemplo, en *L. mutabilis* (en los Andes), las características como sus

vainas dehiscentes, semillas grandes y su permeabilidad al agua, han permitido una homogeneidad en el cultivo, conllevando a la domesticación (Eastwood *et al.*, 2008).

Otra de las virtudes del género es que las especies se distribuyen en climas diversos, desde muy fríos de alta montaña, semidesérticos, así como en subtropicales (Gladstones, 1998), lo que ha permitido la selección de genotipos para su aprovechamiento con diferentes propósitos. Habita en sitios preferentemente de ácidos a neutros; sin embargo, *Lupinus mariae-josephi* H. Pascual, se ha reportado en suelos calcáreos (Pascual 2004; Pascual *et al.*, 2006). Destaca su utilidad en la rehabilitación de suelos, lo anterior, gracias a su asociación con *Bradyrhizobium* spp, bacteria fijadora de nitrógeno, que le permite la colonización en suelos pobres (Jambrina, 1996).

Los marcadores de tipo fenotípico han sido de gran utilidad para la diferenciación entre especies, de manera particular los lupinos han mostrado una gran complejidad taxonómica, por lo cual se han buscado alternativas de identificación, una opción ha sido el desarrollo de perfiles químicos, a través del contenido de alcaloides los cuales sirven de defensa contra depredadores como herbívoros o microorganismos; compuestos que también resultan limitantes para el consumo humano (Bermúdez-Torres *et al.*, 2009; Rodríguez-Ambriz *et al.*, 2005; Montes Hernández *et al.*, 2011), la identificación permitió la determinación de más de 170 alcaloides en diferentes especies del género (Wink, 1988; Wink, 1993).

1.4.2 *Lupinus campestris* Cham. & Schldl.

También llamada *Lupinus pulchellus* Sweet es una leguminosa anual típica de suelos perturbados de regiones de clima de montaña de los estados de Jalisco, Michoacán, México, Morelos, Veracruz y Oaxaca (Dunn, 2001). Especie considerada maleza, que normalmente se encuentra a la orilla de caminos y parcelas en descanso en la Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Jalisco, Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Villaseñor y Espinosa, 1998). En el estado de Puebla

específicamente, *L. campestris* se localiza entre los 2 600 y 3 052 msnm, en bordes de cultivos de maíz y haba o áreas de bosque de *Juniperus deppeana*, *Pinus* spp. y *Abies religiosa* en los valles de Libres y Serdán (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012).

L. campestris presenta una germinación epígea, muestra dos cotiledones a la superficie y al llegar a los 4 cm su crecimiento se vuelve lento mientras se establece (Siddique y Sykes, 1997). La temperatura óptima para su germinación oscila entre los 20 a 25 °C (Martínez *et al.*, 2008). Tallo sólido de 15 a 60 cm de alto, médula fibrosa (con pelos de color blanco a blanco-grisáceo), erecto, ramificado en la parte superior a manera de arbusto. Las hojas presentan pecíolos de 4 a 8 cm de largo, esparcidamente canescentes, foliolos de las hojas más grandes 6 a 8, foliolos más grandes de 4.5 a 8 cm de largo, de 9 a 15 mm de ancho, elípticos a elíptico-oblanceolados, ápice generalmente agudo, en ocasiones obtuso, termina en una proyección corta, formada por la extensión del nervio medio, de color verde intenso en el haz y esparcidamente estrigosos, pálidos en el envés y fina a densamente canescente; estípulas a menudo moradas, de 5 a 12 mm de largo. La inflorescencia son racimos densos, las yemas jóvenes forman un cono compacto, brácteas pequeñas, filiformes, apenas visibles, de 3 a 5.4 mm de largo, caducas. Las flores con cálices finamente canescentes por fuera, con pocos pelos marginales por dentro, labio superior de 3.4 a 4.8 mm de largo, entero o con hendidura de 0.1 mm de profundidad, anchamente triangular; estandartes orbiculares, sus ápices con una hendidura, de 10.5 a 12.5 mm de largo, de 9 a 12.5 mm de ancho, alas de 11.5 a 14 mm de largo, quillas con ángulo de 80 a 90°, con pocos cilios o esparcidamente ciliadas a lo largo de márgenes superiores debajo del acumen (ápice o punta de la hoja u otro órgano similar); óvulos 7 a 9. El fruto es una legumbre de 4 a 5 cm de largo, de 8 a 9 mm de ancho, densamente canescentes (Figura 1); anual, bienal o perenne de vida corta (Rzedowski y Rzedowski, 2005).

Particularmente las semillas de *L. campestris* llegan a tener hasta un 40.5 % de proteína; mientras que, la parte aérea un 25.5 %; previa eliminación de alcaloides y compuestos fenólicos, posee alto valor nutrimental comparado a otras semillas de

leguminosas de grano e incluso mayor a otros lupinos, lo que sin duda pueden promover su aprovechamiento sustentable, aunado a la importancia del género por la fijación de nitrógeno atmosférico (Pablo-Pérez *et al.*, 2014).

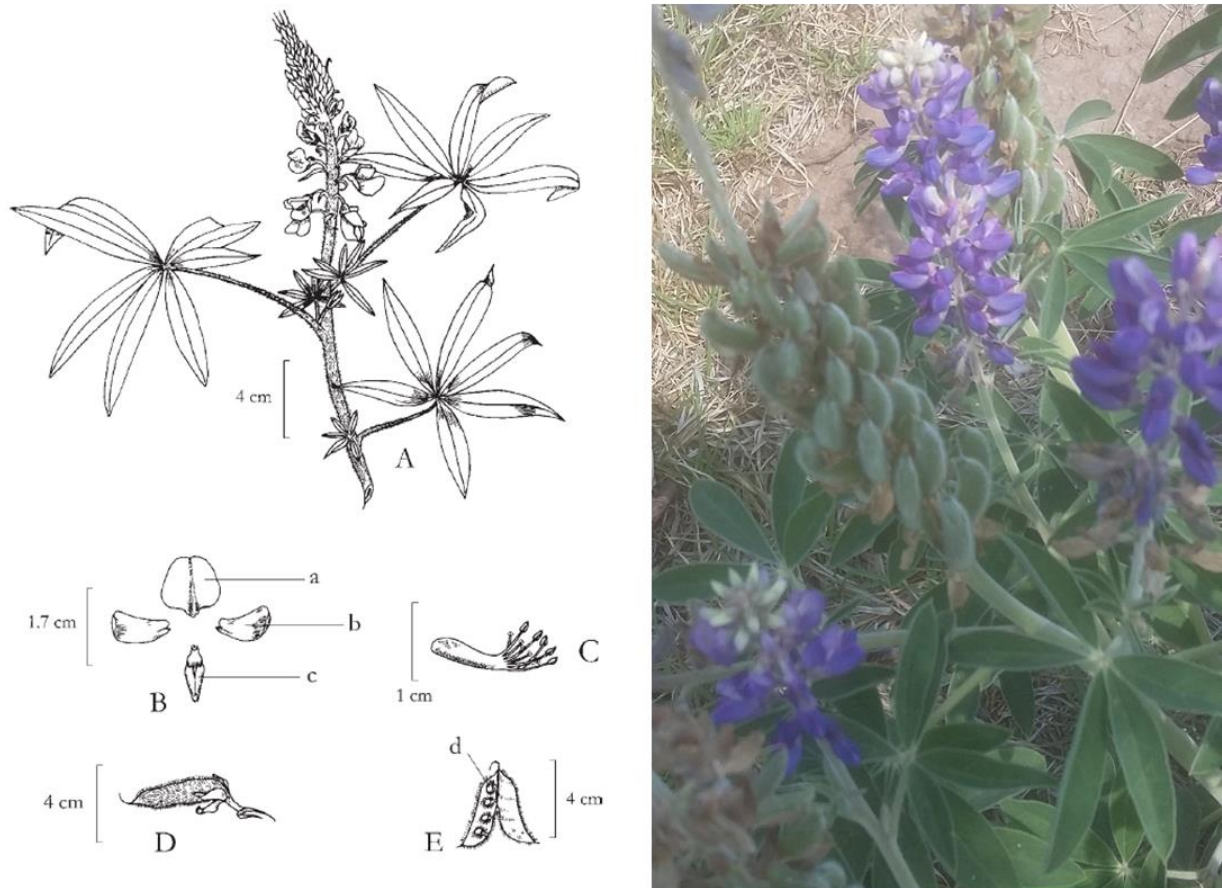


Figura 1. A. rama; B. pétalos, a. estandarte, b. ala, c. quilla; C. androceo; D. fruto cerrado; E. fruto abierto, d. semilla de *Lupinus campestris* (Rzedowski y Rzedowski, 2005).

1.5 Factores que afectan el desarrollo vegetal

Las plantas se adaptaron a un suelo, al aire y agua con ayuda de microorganismos, animales, a la incursión de factores físicos y químicos, todo ello formó una interacción con el ambiente, favorable o no, las condiciones externas actuaron sobre la vida de los organismos en un biotopo. La ecofisiología está definida como la respuesta de los organismos a estas condiciones ambientales y el análisis causal de los correspondientes mecanismos fisiológicos ecológicamente dependientes

(diversidad estructural y funcional). La fenología indica el cambio que ocurre por etapas en un organismo en un clima definido, en una planta son la germinación de semilla, formación de tallos, de las hojas, inflorescencia, pérdida de hojas, llenado de semilla y senescencia, y se correlacionan directamente con el clima. Las condiciones climáticas pueden atrasar o adelantar fases fenológicas, ya que la adaptación y creación de un biotopo ocurrió durante años en cada especie (Walker, 2011).

En adición a factores externos, se presentan la diferenciación anatómica y la morfogénesis, asimismo, la formación química de los tejidos (como el almacenaje energético) y la bioquímica (actividades enzimáticas). Cuando los cambios ambientales son muy agudos, se presenta un estado de estrés en el organismo, este se define como la desviación de las condiciones óptimas para la vida que provoca respuestas de todos los niveles funcionales del organismo pudiendo ser reversible o no. La vitalidad de la planta se debilita en el intento por reajustarse, hasta crearse heridas, desarrollar enfermedad o daño irreversible. No obstante, la presencia de estrés extremo promueve el desarrollo de genotipos mejor adaptados. El estrés, en poblaciones expuestas por largo tiempo promueve estrategias de reproducción, la selección natural gradualmente salta y trasciende de la estrategia reproductiva (estrategia r) a una estrategia de supervivencia de conservación (estrategia K); en hábitats abióticos propicios, la presión competitiva lleva a estrés por hacinamiento, mientras que en hábitats marginales el estrés es provocado por el hábitat abiótico, lo que puede observarse en la figura 2 (Larcher, 1995).

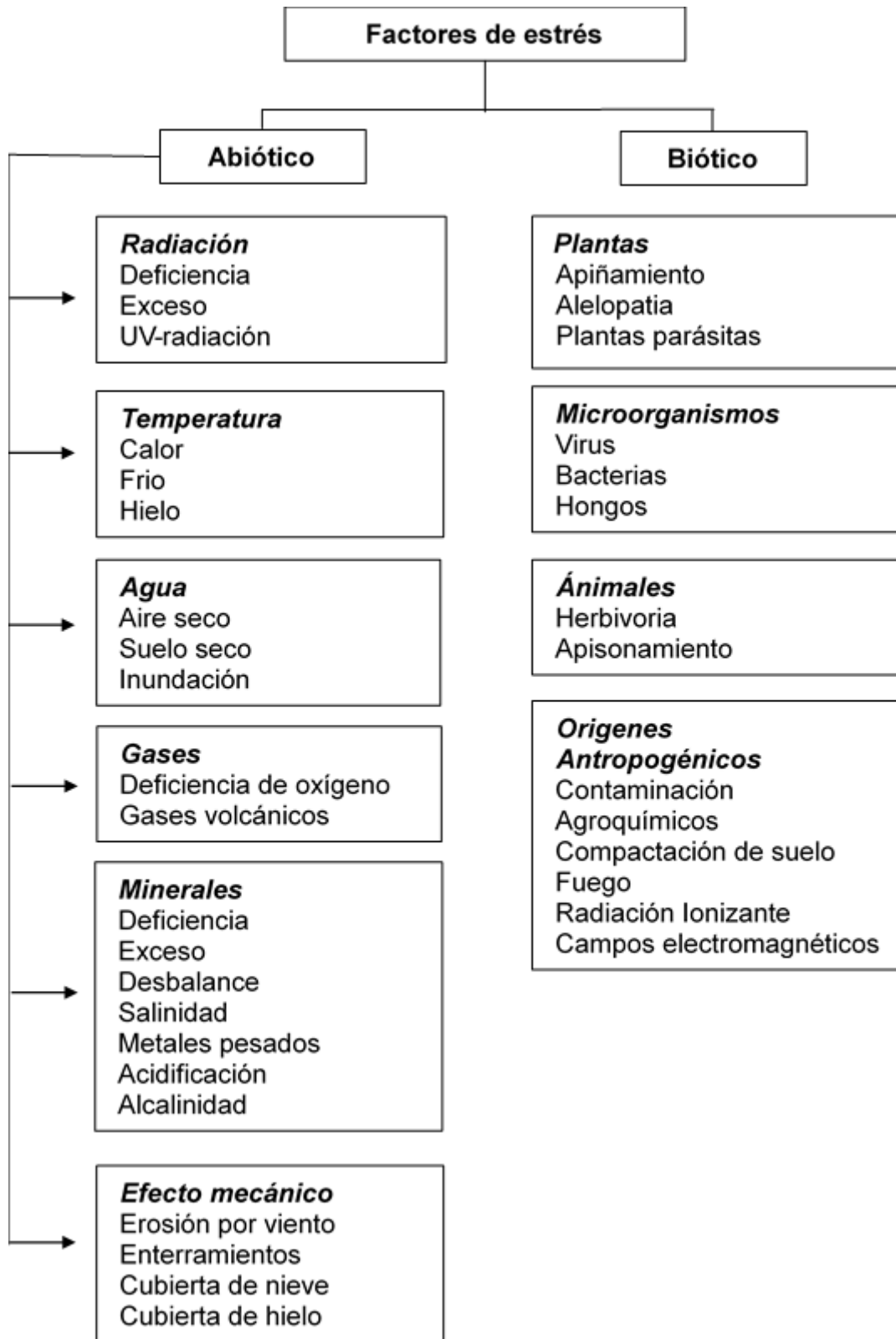


Figura 2. Factores de estrés ambiental para la planta (Larcher, 1995).

Para las especies que se pueden utilizar con fines de rehabilitación, es importante considerar la biología reproductiva (Rondón y Vidal, 2005). El desarrollo en el género es complejo, la etapa de crecimiento conlleva a adquirir tamaño, número de hojas y crecimiento de tallos y raíces. El crecimiento se relaciona directamente con la fotosíntesis; esta se da adecuadamente cuando dispone de agua y luz solar directa, mientras que el desarrollo está determinado por la variedad, el fotoperiodo y la temperatura (Walker, 2011). Muchas de las respuestas de las plantas a situaciones desfavorables son dependientes del tiempo, estas pueden neutralizar o compensar daños mediante procesos de naturaleza homeostática que conducen a la normalización de las funciones vitales de las plantas y al incremento de su poder de resistencia (Retuerto *et al.*, 2003).

Vázquez (2017) identificó algunas diferencias entre poblaciones de *L. campestris*, como número, ancho y longitud de foliolos; longitud de estípula y peciolo; de inflorescencia y de vaina, ancho de vaina y cantidad de semillas por vaina, ya que el hábitat natural de cada población presenta ambientes particulares, existe variación de altitudes, ecosistemas o dispersores lo que provoca una respuesta específica, aunado al hecho de que una población aislada puede provocar depresión endogámica. Por su parte Lagunes-Espinoza *et al.* (2012) encontraron diversidad morfológica entre los individuos de una misma población, en cuanto a altura, número de foliolos y forma de las estípulas y la cantidad de proteína producida.

II. ANTECEDENTES

A lo largo de los años ha sido posible reunir un conjunto de elementos de manejo, suficientes para definir condiciones óptimas para el restablecimiento de los tepetates. El control de la erosión, la adecuada selección de cultivos, la rotación, la asociación de gramíneas con leguminosas (Callo-Concha, 2013), la adaptación de especies de cactáceas, pinos, leguminosas (leñosas, herbáceas) (Dias, 1995; Alderete-Chavez *et al.*, 2009; Ávila-Campuzano *et al.*, 2011), la adición de abonos químicos y orgánicos (compostas, lombricompostas) en cantidades definidas en función de la demanda (Pérez-González *et al.*, 2011), microorganismos (bacterias, micorrizas) (Pajares-Moreno *et al.*, 2010; Flores-Román *et al.*, 2011) y las técnicas de captación de agua de lluvia, para incrementar la humedad han sido indispensables para obtener buenos resultados (Haulon *et al.*, 2007).

La importancia de rehabilitar a los tepetates radica en que presentan una densidad aparente de 1.47 g cm^{-3} , lo que indica una reducción del espacio poroso, 0.01 % de materia orgánica, 0.001 % de N total y $0.80 \text{ mg P kg}^{-1}$, valores considerados como bajos, por lo que se han implementado estrategias para aumentar su productividad, utilizando hongos micorrízicos arbusculares en la leguminosa *Cassia tomentosa* para favorecer su resistencia al trasplante, lo que la convierte en una excelente candidata para mejorar las condiciones del tepetate (García-Gallegos *et al.*, 2009).

Las prácticas de roturación y manejo agrícola de un tepetate, después de cuatro años, llegan a incrementar el espacio poroso, igual o superior al existente en un suelo agrícola, gracias a la formación de agregados, debido al establecimiento de una asociación de maíz (*Zea mays* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.) y haba (*Vicia faba* L.), plantas que mejoraron las condiciones edáficas del tepetate (Prat *et al.*, 2003). Carvalho *et al.* (FAO, 2001) reportan que la concentración de nitrógeno en suelos degradados se obtiene con el establecimiento de *Racosperma mangium* Willd (ex *Acacia mangium* Willd), leguminosa arbórea que presentó una buena adaptación, además de ayudar en el control de la erosión e incrementar la fijación de nitrógeno. En muchos sitios perturbados, los árboles

fijadores de nitrógeno pueden crecer mejor que los no-fijadores e incluso mejor que plantas herbáceas fijadoras de nitrógeno. Entre estos árboles que fijan nitrógeno existen especies tolerantes a los distintos tipos de estrés propios de los suelos degradados, como, sequía, deficiencias de nutrientes, inundación, compactación y encostramiento. Estos árboles son capaces de reciclar importantes cantidades de materia orgánica y nutrientes a través de la descomposición de la hojarasca, lo que constituye una buena alternativa para la rehabilitación de suelos (Ferrari y Wall, 2004).

Los tepetates presentan contenidos muy bajos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como escasas poblaciones de microorganismos, lo cual dificulta su incorporación a la producción agrícola. Álvarez-Solís *et al.* (2000) concluyeron que la incorporación de abono verde (veza, *Vicia villosa* Roth) y de rastrojos de un policultivo de maíz-frijol-haba (*Zea mays* L.-*Phaseolus vulgaris* L.-*Vicia faba* L.) sobre la mineralización del nitrógeno en tepetate con un ciclo de cultivo después de su roturación con o sin incorporación previa de estiércol de bovino, la concentración de nitrógeno inorgánico mineralizado fue de 73 y 22 mg kg⁻¹, respectivamente. El uso de veza como abono verde o la incorporación de rastrojos de policultivo y estiércol, contribuyen al proceso de habilitación de tepetates.

Especies de *Lupinus* que se localizan en la zona oriente del cerro de Tláloc en la Sierra Nevada, México (*Lupinus uncinatus* Schlecht, *Lupinus leptophyllus* Schlecht. & Cham., *Lupinus versicolor* Sweet, *Lupinus montanus* H.B.K., *Lupinus potosinus* Rose) a una altura de 2 932 a 3 640 m snm se desarrollan en suelos que presentan un intervalo de pH de 6.2 a 6.7, un porcentaje de materia orgánica de 3.32 a 8.91, nitrógeno total de 0.13 a 0.27 % y fósforo de 4.82 a 14.70 mg kg⁻¹, lo que muestra que estas especies se pueden desarrollar en diversos ambientes ecológicos, lo que beneficiaría a la rehabilitación de áreas degradadas (Alderete-Chávez *et al.*, 2008). Alderete-Chávez *et al.* (2009) reportaron que *L. montanus* y *L. leptophyllus* son especies que al crecer en suelos derivados de cenizas volcánicas promueven la solubilización de nutrientes como el nitrógeno y fósforo a 120 días de crecimiento.

L. montanus solubilizó nitrógeno de 0.13 a 0.65 %, *L. leptophyllus* de 0.13 a 0.64 %; por otro lado, en cuanto al fósforo, *L. montanus* solubilizó de 14.70 a 22 mg kg⁻¹, *L. leptophyllus* de 14.70 a 23 mg kg⁻¹, lo que convierte a estas especies idóneas para la restauración de suelos.

Se utilizó la herbácea pionera *Lupinus mexicanus* quien incrementó significativamente su crecimiento y supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en campo, esto tiene implicaciones directas en la habilitación de sitios altamente degradados con fuertes problemas de erosión y presencia de numerosas cárcavas. Las leguminosas son de gran importancia en la rehabilitación por resistir a condiciones limitantes, como la baja fertilidad, debido a que presentan la ventaja de fijar nitrógeno (Gómez-Romero *et al.*, 2013).

Uno de los principales objetivos de la rehabilitación de suelos consiste en seleccionar especies de plantas con alta supervivencia, crecimiento rápido y larga persistencia, la tasa relativa de crecimiento, definida como la ganancia de biomasa en el tiempo, es una de las principales variables para el análisis del crecimiento en plantas. El desempeño de las plantas se incrementa a través de adaptaciones morfológicas y fisiológicas cuando están en diferentes ambientes (Mayo-Mendoza *et al.*, 2018). Soto-Correa *et al.* (2015) encontraron que la respuesta de las plantas a los gradientes altitudinales depende de varios factores y puede variar entre estrategias de vida, exploraron la respuesta a la sequía de diferentes procedencias de *Lupinus elegans*, obtenidas de un gradiente altitudinal. Los resultados indican que hay una diferenciación entre procedencias, pero que siendo esta especie perenne de vida corta (5 años), es más sensible a las condiciones microclimáticas que a las condiciones determinadas por patrones a escalas mayores como son los gradientes altitudinales, lo que debe de ser considerado para prácticas de manejo como la restauración ecológica o rehabilitación.

Figuroa (2017) incorporó biomasa fresca de *Lupinus bilineatus* Benth como abono verde al suelo en un huerto de nogal, se comparó suelo con pollinaza y un grupo

control; suelo de parcelas de maíz en descanso con *Lupinus* spp. silvestres y parcelas con manejo intensivo sin *Lupinus* y en bosque. Los resultados entre el suelo más abono verde y suelo más pollinaza fueron similares en cuanto al contenido de nitrógeno total y fósforo extractable, lo que indicó que *L. bilineatus* puede ser empleada como abono verde. En los suelos de las parcelas se requiere que *Lupinus* spp. permanezca por más tiempo de para registrar una diferencia; sin embargo, el análisis en las plantas de *Lupinus* spp. registró mayor contenido de nitrógeno.

Por otro lado, el alto nivel proteico en la semilla de *Lupinus* le permite ser aprovechada para la alimentación humana o animal. Clements *et al.* (2005) mencionan que a nivel mundial *L. albus* L., *L. angustifolius* L., *L. luteus* L. y *L. mutabilis* Sweet. han sido mejoradas para uso comestible, ya que su nivel de alcaloides se ha reducido a un 0.03 %. A diferencia de los lupinos de Europa, norte de África y de América del Sur, donde su cultivo para uso alimenticio data desde hace más de 4 000 años, en México son escasos los reportes del uso de la semilla, debido probablemente a la preferencia de otras fuentes de proteína (Bermúdez-Torres *et al.*, 2000). Los análisis sobre calidad nutritiva de la semilla de *L. campestris* y *L. exaltatus* han demostrado su alto potencial como fuente de proteína para ser utilizadas como complemento en la alimentación humana y animal, previa eliminación de alcaloides por medios físicos (Jiménez-Martínez *et al.*, 2009; Ruiz-López *et al.*, 2006).

Lagunes-Espinoza *et al.* (2012) realizaron un estudio para caracterizar la diversidad morfológica y determinar la concentración de proteína en semillas del género *Lupinus* (Fabaceae) en los ecosistemas agrícola y forestal de la región centro oriental del estado de Puebla. Las poblaciones de *Lupinus* se ubicaron entre 2 600 y 4 000 msnm. Dichas poblaciones mostraron una gran variabilidad morfológica. Cuatro especies fueron identificadas con base en sus características morfológicas e intervalo altitudinal: *L. campestris*, localizada entre 2 600 y 3 052 msnm, en bordes de cultivos de maíz y haba o áreas con bosque de *Juniperus deppeana*, *Pinus* spp.

y *Abies religiosa*; se registraron concentraciones altas de proteína en una población de *L. campestris* de 339 a 481 g kg⁻¹ de materia seca.

III. JUSTIFICACIÓN

El tepetate es un sustrato restrictivo para crear cubierta vegetal, a lo largo de la historia de México ha ido aflorando por pérdida de suelo en las zonas volcánicas del país, lo que ha llevado a un difícil establecimiento de plantas que procuren una cubierta protectora y con ello a otras pérdidas ecosistémicas, como la incapacidad de captación pluvial, de flora y fauna; esto es un problema social y económico, ya que por la baja fertilidad del sustrato se limita la productividad derivando en abandono. En sitios donde la participación de la CONAFOR ha realizado intervenciones, como roturación y zanjeo para retener agua, se pueden implementar técnicas sostenibles como es el uso de leguminosas. Es por ello que se optó por utilizar a *Lupinus campestris*, dada su capacidad de rehabilitar suelos. Es una planta pionera en suelos con perturbación por incendios, tiene la facultad de mineralizar nitrógeno, fósforo y potasio (Alderete-Chávez *et al.*, 2009). Como una planta introducida que proviene de diferentes ecosistemas y altitudes, pero nativa del Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, puede adaptarse a diversas condiciones edáficas, lo que podría reducir la densidad aparente, incrementar el contenido de materia orgánica y contenido nutrimental; además de producir semilla. Con el presente estudio sobre aspectos agronómicos de varias poblaciones de *L. campestris* bajo este tipo de condiciones, permitirá la selección de una población o poblaciones para la zona norte del estado de Tlaxcala.

IV. OBJETIVOS

4.1 General

Determinar el potencial de rehabilitación y reproducción de diferentes poblaciones de *Lupinus campestris* Cham. & Schltld. que proceden de un intervalo altitudinal de la región centro oriente de Puebla bajo dos condiciones ambientales en la zona norte del estado de Tlaxcala.

4.2 Específicos

1. Determinar textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, N, P, K, Ca y Mg del tepetate tras la rehabilitación previa y al finalizar el ciclo biológico de *L. campestris*, para comprobar la eficiencia de las poblaciones de esta leguminosa en tepetate.
2. Valorar la adaptación de las diferentes poblaciones de *L. campestris*, a través de variables agronómicas y algunos parámetros reproductivos para identificar la población más apropiada para suelos de la zona norte del estado de Tlaxcala.

V. HIPÓTESIS

Si las poblaciones de *L. campestris* que proceden de un intervalo altitudinal de la región centro oriente de Puebla se reproducen a las altitudes de Atlangatepec y Tlaxco, entonces se tendrá una mejora en las condiciones edáficas y nutrimentales del tepetate y los parámetros reproductivos no se verán disminuidos.

VI. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este trabajo de investigación se realizaron dos experimentos comparativos, uno se estableció en los tepetates de la Hacienda San Antonio Tepetzala, localizada dentro del municipio de Atlangatepec y el segundo en suelo agrícola en el predio conocido como “El Solar” ubicado en el municipio de Tlaxco. Ambos experimentos en la zona norte de Tlaxcala.

6.1 Hacienda San Antonio Tepetzala

La Hacienda de San Antonio Tepetzala se localiza en las coordenadas 19°32'08.41" N 98°06'41.73" O, a una altitud de 2 532 msnm (Figura 3). Cuenta con una superficie de 200 ha y donde el tepetate ha aflorado en 64 ha en un perímetro de 4 411 km. La Hacienda se localiza en el municipio de Atlangatepec, el cual colinda al norte con el municipio de Tlaxco; al sur con los municipios de Muñoz de Domingo Arenas y Tetla de La Solidaridad, al oriente se establece lindero con el municipio de Tetla de la Solidaridad y al poniente con los municipios de Muñoz de Domingo Arenas y Hueyotlipan. El municipio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, una baja probabilidad de ocurrencia de tormentas y de días nublados, casi nula presencia de días con granizo, aunque se tiene cierto riesgo de heladas, la precipitación media anual es de 680.1 mm; la precipitación máxima en 24 h es de 63 mm, en un intervalo de T °C de 12 a 14 °C. Los suelos dominantes son del orden Feozem (54 %), Durisol (32 %) y Vertisol (4 %) (INEGI, 2009).

Las principales actividades de la Hacienda de San Antonio Tepetzala a la fecha han sido la producción de ganado de lidia y el cultivo de avena, maíz, cebada y trigo; sin embargo, ha surgido el interés por la conservación ecológica y recuperación de los suelos (Comunicación personal, Doña Carmen Rivera Vda. de Sánchez Piedras, Marzo, 2017).

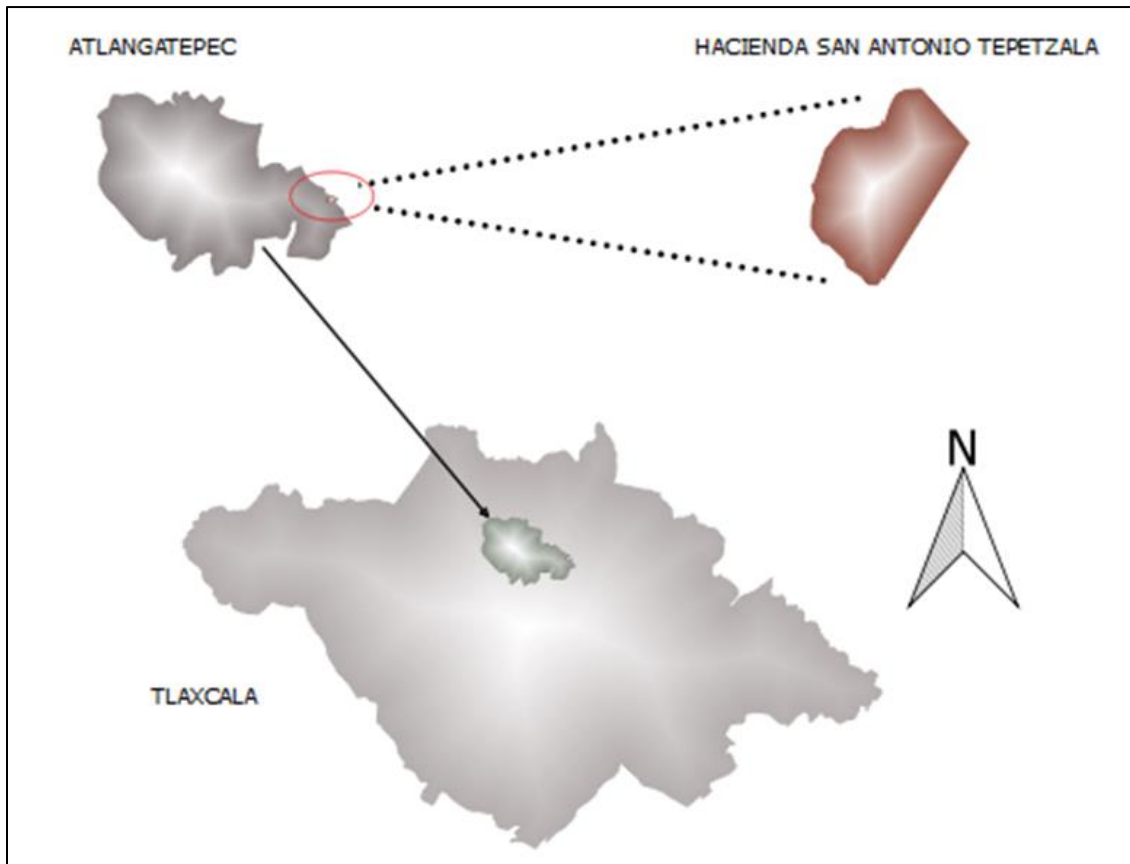


Figura 3. Hacienda de San Antonio Tepetzala, municipio de Atlangatepec.

6.2 Predio “El Solar”

Se localiza en el municipio de Tlaxco en las coordenadas 19° 37' 04.7" N; 98° 06' 52.4" O; a una altitud de 2 514 msnm (Figura 4). Tlaxco colinda al norte con los estados de Hidalgo y Puebla; al este con el estado de Puebla y los municipios de Emiliano Zapata, Lázaro Cárdenas y Tetla de la Solidaridad; al sur con los municipios de Lázaro Cárdenas, Tetla de la Solidaridad, Atlangatepec, Muñoz de Domingo Arenas y Hueyotlipan; al oeste con los municipios de Hueyotlipan, Benito Juárez y el estado de Hidalgo. La temperatura es de 10 a 14°C, una precipitación de 600 a 900 mm, clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (74 %), templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (17 %), semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (5 %), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (4 %). El orden de suelo que

predomina es Feozem (66 %), Andosol (28 %), Vertisol (2 %) y Durisol (1%) (INEGI, 2009).

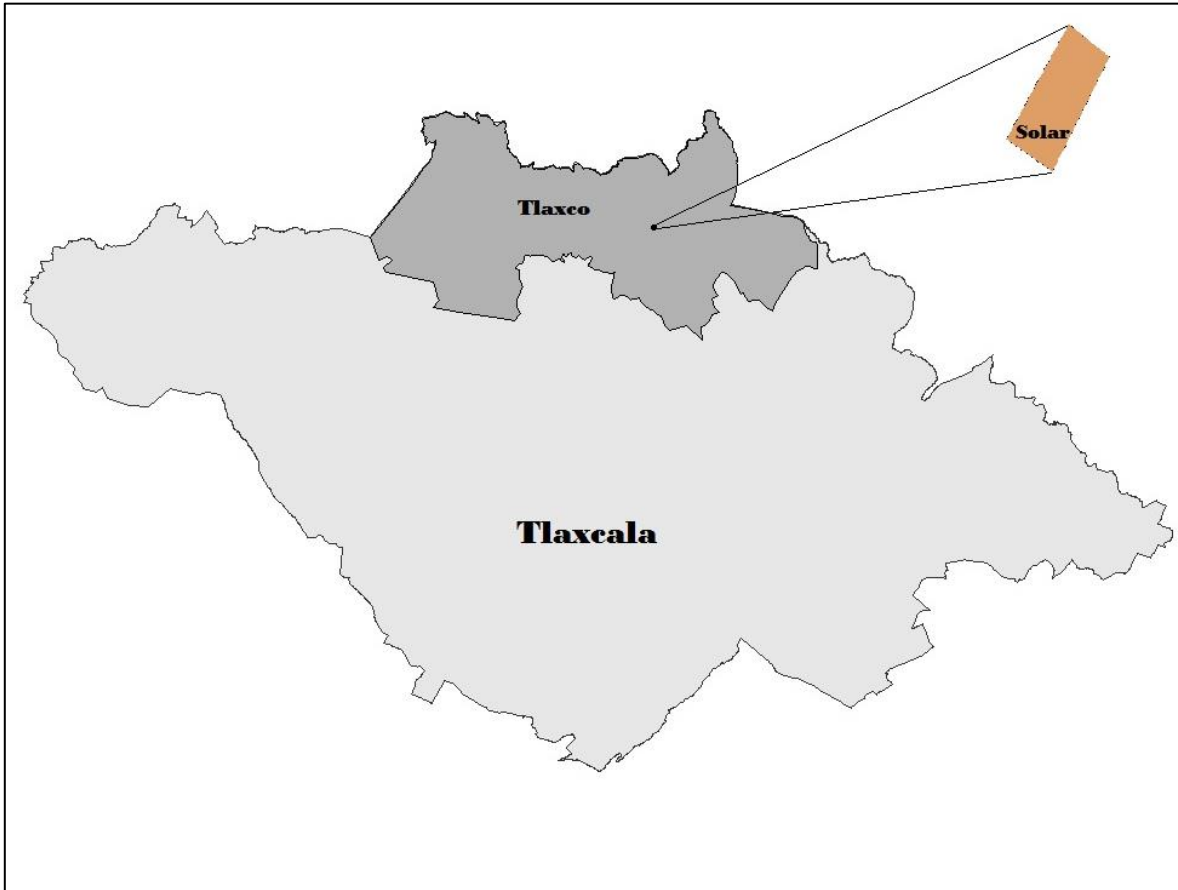


Figura 4. Predio El Solar, municipio de Tlaxco.

6.3 Muestreo y preparación de muestras de tepetate

Se realizó un recorrido en la zona de tepetates de la hacienda para establecer el lugar donde se establecería el experimento. En el área rehabilitada por parte de la CONAFOR en el año 2012 con roturación e introducción de especies de *Pino* y *Opuntia*, se seleccionó una superficie de 324 m² para recolectar cuatro muestras simples de sustrato de 500 g cada una a través del método del zig-zag (DOF, 2012) a una profundidad de 0-30 cm denominada Tepetate 2017.

Concluido el experimento al término del ciclo vegetativo de *L. campestris* en el año 2018, se tomaron tres muestras simples de tepetate de la zona rizosférica de la planta en cada uno de los bloques. Todas las muestras se colocaron en bolsas de plástico y se etiquetaron con información del área, fecha y número de muestra. Una vez en el laboratorio se colocaron sobre papel Kraft para secarse a temperatura ambiente y a la sombra por 24 h, posteriormente se tamizaron con malla de 2 mm para obtener un tamaño de partícula homogéneo como lo establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

6.4 Caracterización edáfica del tepetate antes y después del experimento

A cada una de las muestras de tepetate previo al experimento (Tepetate 2017) y tepetate de la zona rizosférica de la planta al término del actual experimento, se les determinó el pH en una suspensión de suelo:agua (1:2 p/v), materia orgánica (MO) por el método de Walkley-Black; conductividad eléctrica en una suspensión de suelo:agua (1:5 p/v) (Álvarez-Sánchez y Marín-Campos, 2011); capacidad de intercambio catiónico (CIC) por titulación con HCl 0.05 N (Fuentes, 1971); concentración de N total por el método Kjeldahl; los cationes intercambiables (K, Ca y Mg) por la técnica con acetato de amonio y el P extractable por (Álvarez-Sánchez y Marín-Campos, 2011). Textura por el método de Bouyoucos (Rodríguez y Rodríguez, 2002) y densidad aparente por el método de la probeta que establece la NMX-FF-109-SCFI-2008 (DOF, 2008).

6.5 Propagación de plantas

Se seleccionaron 200 semillas de cada población de nueve poblaciones de la zona centro-oriente de Puebla (Tabla 1) (Figura 5), las cuales fueron desinfectadas con peróxido de hidrógeno al 10 % durante 10 min. Se enjuagaron tres veces con agua común. Con una pinza de disección se perforó la testa para homogeneizar el inicio de la absorción de humedad en el sustrato.



Figura 5. Procedencia de las poblaciones de *L. campestris*.

Tabla 1. Procedencia de las poblaciones naturales de las semillas de *L. campestris* en el estado de Puebla.

	Población	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
1	Poxcoatzingo, Zacatlán	19°57'13.0"	98°00'33.5"	2 481
2	Laguna de Atexca, Zacatlán	19°57'09.0"	98°01'25.0"	2 503
3	Zoapan A, Tlachichuca	19°04'32.3"	97°20'18.1"	3 200
4	Zoapan B, Tlachichuca	19°04'34.8"	97°22'04.2"	3 112
5	Laguna Seca, Tlachichuca	19°03'30.5"	97°19'0.06"	2 669
6	San Isidro, Atzitzintla	18°54'33.6"	97°18'26.4"	2 794
7	Barranca Honda, Chalchicomula de Sesma	19°01'46.0"	97°22'43.1"	2 903
8	Tlalmotolo, Ixtacamaxtitlán	19°34'27.4"	97°43'38.5"	2 980
9	Atzitzintla	18°53'40.0"	97°17'57.8"	2 747

Se utilizó sustrato compuesto por corteza de pino, aserrín y agrolita en una proporción de 2:1:1 (p/p/p) esterilizando por vaporización durante 30 min, una vez frío se adicionaron 2 kg de osmocote (fertilizante de liberación prolongada de NPK). Los tubetes para germinación previamente se lavaron con detergente común y desinfectaron con hipoclorito de sodio al 5 %, se rotularon con la clave de identificación de acuerdo a los tratamientos a establecer y se rellenaron con la mezcla de sustrato en 180 mL de volumen en cada tubete (Vázquez, 2017). Posteriormente 648 semillas de nueve procedencias se sembraron (324 para cada área de estudio) de forma directa en el sustrato a una profundidad de 0.5 cm con riego constante. Se adicionó captán al 0.02 % en agua común al riego cada tres días por 20 días.

A los 20 días de crecimiento se aplicó una fertilización foliar con el fertilizante 7-40-17 (NPK) denominado iniciador, que duró 40 días y se aplicó dos veces por semana, 3 g diluidos en 20 L de agua. Se mantuvieron las plántulas a humedad constante (60 %) por 30 días bajo condiciones de invernadero y 30 días en el exterior bajo condiciones de vivero con fertilización foliar.

6.6 Diseño experimental e instalación del experimento en campo

A los 2 meses de crecimiento en condiciones controladas, las plántulas se trasladaron al tepetate de la hacienda San Antonio Tepetzala en Atlangatepec y al predio “El Solar” en Tlaxco. Se realizaron cepas de 20 x 20 cm a una profundidad de 30 cm para realizar el trasplante de *L. campestris* de acuerdo al diseño experimental a una distancia de un metro entre cada planta.

El diseño se estableció en bloques completamente al azar con seis repeticiones. Se aplicaron nueve tratamientos (poblaciones), cada tratamiento fue conformado por seis plantas en una cepa común, lo que representó una unidad. Se realizó un monitoreo de supervivencia de la planta por mes y hasta que se recolectó semilla.

6.7 Variables a evaluar en planta

Supervivencia. Se realizó un conteo de plantas vivas a los 12 meses que duró el ciclo vegetativo de *L. campestris*, para obtener la supervivencia total de las poblaciones por año (Vázquez, 2017).

Altura de planta. La medición de la altura (cm) de *L. campestris* se realizó a los 12 meses con un flexómetro marca Truper ®.

Número de vainas. Se llevó a cabo el corte de las vainas maduras cada semana durante los meses de mayo, junio y julio de 2018. Se transportaron en bolsas de papel, previamente etiquetadas para llevarlas a condiciones de secado en invernadero por una semana. Al término se efectuó el conteo de vainas. Para la longitud y ancho de vaina se consideraron tres muestras, con ayuda de un vernier digital graduado en mm de acuerdo a González-Andrés y Ortiz (1996).

Biomasa seca. Una vez cosechada la vaina, para esta variable se cortó la planta desde la base con el apoyo de una pala recta (se excluyó raíz y vainas). Las plantas

se transportaron en bolsas de papel de estraza y posteriormente se colocaron en un horno de secado marca Riossa ® a 70 °C por 48 h. Al término se obtuvo el peso (mg) en una balanza analítica marca ADAM ®.

6.8 Análisis de los datos

Los datos de las variables edáficas (pH, CE, MO, CIC, Nt, P, K, Ca y Mg) y variables en planta (supervivencia, altura, biomasa, vainas totales, potencial de semillas y medidas de vaina) se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Previo al análisis de varianza se determinaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Los datos se analizaron bajo el siguiente modelo lineal de efectos mixtos:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + P_j + B_iP_j + \varepsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = es igual a las observaciones

μ = es el efecto de la media general;

B_i = es el efecto del i-ésimo bloque;

P_j = es el efecto de la j-ésima población

ε_{ijk} = error experimental.

Los datos de supervivencia por no cubrir los supuestos fueron sometidos a un análisis de Kruskal Wallis; las variables pH, CE, MO, CIC, Nt, P, K, Ca y Mg; y de planta: altura, biomasa, vainas totales, potencial de semillas, longitud y ancho de vaina y semillas en vaina, no cubrieron los supuestos por lo que fueron transformados a rangos (Quinn y Keough, 2002). Una vez hecho lo anterior se realizó el análisis de varianza. Para los análisis se empleó el programa InfoStat-Statistical Software versión 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2015).

VII. RESULTADOS

En el presente apartado en primer lugar se muestran los resultados de las propiedades edáficas y contenido nutrimental, debido al bajo porcentaje de supervivencia de *L. campestris* en el tepetate de la hacienda San Antonio Tepetzala, situación que impidió medir las variables agronómicas, debido principalmente al efecto de la temporada invernal del año 2017. Aun con una baja supervivencia al finalizar el ciclo biológico de la planta se determinó del suelo rizosférico los parámetros edáficos y contenido nutrimental. No así en Tlaxco, en este sitio solo se determinaron las variables agronómicas de *L. campestris*.

7.1 Propiedades edáficas y contenido nutrimental

En la tabla 2 se observa que el tepetate (Tepetate 2017) previo a establecer las diferentes poblaciones de *L. campestris* fue significativamente diferente ($p \leq 0.05$) al tepetate posterior a la cosecha de la planta en cuanto a las variables edáficas y nutrimentales. No hubo diferencias entre los bloques o las poblaciones en el tepetate rehabilitado. El tepetate presentó un mayor porcentaje de la fracción arena, en cuanto a la densidad aparente, ésta fue en promedio de 1.19 g cm^{-3} , ligeramente mayor a lo que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) para suelos derivados de cenizas volcánicas.

De acuerdo a la clasificación que señala la misma NOM-021 acerca del potencial de hidrógeno, éste fue neutro en el tepetate previo a colocar el experimento y al final del experimento en el sustrato con la población Atzitzintla; mientras que, el tepetate con el resto de las poblaciones de *L. campestris* se incrementó, pasó de neutro al inicio a moderadamente alcalino.

El contenido total de sales determinado a través de la conductividad eléctrica indica que en las dos condiciones (Tepetate 2017 y el tepetate al final del experimento en 2018) existen cantidades mínimas de sales. El porcentaje de materia orgánica fue

relativamente bajo, con base en la normatividad mexicana. Respecto a la capacidad de intercambio catiónico, su valor se considera bajo, tanto en el tepetate previo como en donde se establecieron las diferentes poblaciones de *L. campestris* de Atzitzintla, Barranca Honda, Laguna de Atexca, Poxcoatzingo y San Isidro; en cambio fue medio con las poblaciones Laguna Seca, Tlalmololo, Zoapan zona A y Zoapan zona B.

Tabla 2. Análisis de varianza de algunas propiedades edáficas y contenido nutrimental en tepetate de la zona rizosférica de nueve poblaciones de *L. campestris* en 2017 y 2018.

Población	pH	CE dS m ⁻¹	MO (%)	CIC Cmol(+)kg ⁻¹	N total (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	Ca (mg kg ⁻¹)	Mg (mg kg ⁻¹)
NOM-021	6.6-8.5	< 1	< 4.0	5-25	< 0.30	< 15	< 0.40	< 500	< 15
ATZ	7.19a	0.07a	0.73a	14.26a	0.03a	3.61a	3.55a	18.93a	9.97a
BAH	7.77a	0.07a	0.40a	11.13a	0.03a	3.55a	3.68a	18.57a	9.35a
LAT	7.55a	0.08a	0.40a	14.38a	0.03a	3.61a	3.20a	18.93a	8.67a
LSC	7.74a	0.06a	0.35a	15.38a	0.03a	3.59a	3.60a	19.42a	8.82a
POX	7.67a	0.09a	1.01a	12.38a	0.03a	3.57a	3.52a	18.57a	8.43a
SIS	7.60a	0.06a	0.45a	14.51a	0.03a	3.56a	3.50a	18.25a	8.65a
TLAL	7.53a	0.06a	0.64a	16.88a	0.03a	3.60a	3.53a	18.42a	9.63a
ZOA	7.74a	0.06a	0.40a	16.75a	0.03a	3.67a	3.48a	19.10a	8.98a
ZOB	7.49a	0.07a	0.78a	16.88a	0.03a	3.64a	3.38a	19.43a	9.02a
*Tepetate 2017	6.94b	0.04b	0.30b	10.98b	0.02b	2.93b	2.15b	13.63b	7.90b

Significancia: Bloques p= 0.0001; años p= 0.0001. Medias con distinta letra en la misma columna son estadísticamente diferentes (p≤0.05). *Tepetate 2017=Tepetate previo a establecer el experimento.

7.2. Variables en planta

Supervivencia

A los 12 meses de haber establecido las poblaciones de *L. campestris* con base al diseño experimental (mayo, 2018) se obtuvo la supervivencia en el tepetate de la hacienda de San Antonio Tepetzala (Tabla 3), la cual fue en promedio del 12.04 %.

Tabla 3. Supervivencia de *L. campestris* en el tepetate.

Población	Supervivencia (%)
Laguna Seca	22.22±13.61 a
Zoapan A	19.44±12.55 a
Zoapan B	13.89±19.48 a
San Isidro	13.89±16.39 a
Atzitzintla	11.11±13.61 a
Tlalmotolo	8.33± 9.13 a
Barranca Honda	8.33±13.94 a
Poxcoatzingo	5.56± 8.61 a
Laguna de Atexca	5.56± 8.61 a

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).
Media de Tukey \pm E.E. $n = 6$.

En cambio, en el predio “El Solar” ubicado en Tlaxco, la supervivencia promedio de las poblaciones fue del 75.61 %, mayor a la que se obtuvo en Tepetzala, por lo que se pudieron medir las variables agronómicas. La población que presentó el mayor valor de supervivencia fue Poxcoatzingo, y la menor se presentó en la población Barranca Honda (Tabla 4).

Características agronómicas

En la mayoría de las variables determinadas en *L. campestris* de las diferentes poblaciones mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Las poblaciones Laguna Seca, San Isidro, Barranca Honda, Atzitzintla y Zoapan zona B, produjeron plantas con alturas similares, en promedio 109.12 cm, diferente de Poxcoatzingo. La población de Tlalmotolo, al igual que Laguna de Atexca, con valores menores (Tabla 4).

La cantidad de biomasa producida en Laguna Seca, San Isidro y Barranca Honda, fue superior a la que se obtuvo en la población de Laguna de Atexca y Tlalmotolo. En cuanto a la producción de vainas totales, no hubo diferencia significativa entre las poblaciones, sin embargo, a partir de la cantidad de vaina se calculó el potencial de producción de semillas de cada población, que no mostró diferencias

significativas entre poblaciones, siendo todas potencialmente productoras, en promedio 5 716 semillas en una sola planta.

Respecto a la vaina, la población procedente del sitio Barranca Honda destacó por presentar una mayor longitud en vaina. En la anchura de la vaina Poxcoatzingo fue la de mayor valor, pero con similitud a Laguna de Atexca, Zoapan zona A y Barranca Honda, con diferencia a Zoapan zona B, San Isidro y Tlalmotolo. Zoapan en sus dos zonas de recolecta (A y B). Laguna de Atexca y San Isidro registraron valores mayores de espacios de semillas en vainas (Tabla 4).

Tabla 4. Supervivencia y características agronómicas de *L. campestris* en Tlaxco, Tlaxcala.

Población	Supervi- vencia (%)	Altura (cm)	Planta		Potencial de semillas	Longitud (mm)	Vaina	
			Biomasa seca (g)	Vainas totales			Ancho (mm)	Semilla en vaina (cantidad)
Significancia	0.0246	<0.0001	<0.0001	0.2029	0.6783	0.0021	<0.0001	0.0005
Poxcoatzingo	91.67 a*	78.83 e	210.89 ab	666.56 a	4629.00 a	38.78 ab	7.25 a	7.11 ab
Laguna de Atexca	77.78 ab	78.61 de	158.78 b	684.22 a	4339.22 a	36.50 abc	7.24 ab	6.15 b
Zoapan zona A	83.33 ab	96.82 bcd	222.25 ab	890.44 a	6508.19 a	37.21 abc	6.38 abc	7.27 a
Zoapan zona B	75 ab	101.00 abc	341.53 ab	877.00 a	6388.40 a	37.35 abc	6.12 c	7.27 a
Laguna Seca	77.78 abc	111.83 a	352.88 a	919.83 a	6325.11 a	37.67 abc	6.27 bc	6.87 ab
San Isidro	83.33 ab	110.50 ab	354.75 a	1065.00 a	6573.75 a	35.68 bc	6.16 c	6.19 b
Barranca Honda	50 c	111.00 ab	277.38 a	825.67 a	5677.58 a	39.39 a	6.41 abc	6.86 ab
Tlalmotolo	83.33 ab	90.06 cde	168.88 b	852.82 a	5666.82 a	34.40 c	5.90 c	6.61 ab
Atzitzintla	58.33 bc	111.25 ab	316.25 ab	675.00 a	5337.67 a	36.36 abc	6.29 bc	7.10 ab
Promedio	75.61	98.88	267.07	828.50	5 716.19	37.04	6.45	6.83

* Medias con distinta letra en la misma columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

VIII. DISCUSIÓN

8.1. Propiedades edáficas y contenido nutrimental

Los valores de las propiedades edáficas van de bajo a medio con base en la NOM-021; no obstante, es ligeramente notoria la mejora a un año de establecer diferentes poblaciones de *L. campestris* en el tepetate, propiedad de la hacienda San Antonio Tepetzala (Tabla 3). La importancia de rehabilitar a los tepetates a través de la incorporación de especies vegetales es una estrategia útil para aumentar su productividad (García-Cruz *et al.*, 2008), lo que se observó con *L. campestris*. Las plantas tienen una influencia significativa sobre las características del tepetate, ya que disgregan y agregan el material, además de aportar al sustrato compuestos orgánicos susceptibles de ser usados por la biota o en los procesos de estructuración (Velázquez-Rodríguez *et al.*, 2001).

Las leguminosas presentan una elevada producción de biomasa y se establecen en una amplia gama de condiciones climáticas y edáficas, lo que les confiere un papel significativo en los estudios de recuperación de suelos degradados, debido principalmente a que presentan un mejor aprovechamiento de nutrientes y mayor capacidad de crecimiento en condiciones adversas; siendo mayor cuando están asociadas a hongos micorrízicos arbusculares y bacterias fijadoras de nitrógeno (Dias *et al.*, 1995). El género *Lupinus* establece simbiosis con el rizobio de crecimiento lento, denominado *Bradyrhizobium*, se ha estimado que por ciclo fenológico de la planta la cantidad total de nitrógeno fijado es de 102 a 252 kg ha⁻¹ gracias a esta simbiosis; además el sistema radical expansivo de *Lupinus* le da la capacidad de solubilizar fósforo, lo que le confiere gran importancia ecológica (Vielma, 1999), situación que se comprobó con la incorporación de *L. campestris* en los tepetates de la hacienda, en cuanto al incremento de la concentración de nutrientes con respecto al Tepetate 2017.

Respecto a las características químicas del tepetate éste puede presentar un pH de neutro a ligeramente alcalino (6.9 a 7.8), bajo contenido de sales (0.09 dS m^{-1}), una capacidad de intercambio catiónico media de $16.7 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, lo que depende de la cantidad y tipo de coloides orgánico e inorgánico presentes y respecto a la concentración de nutrimentos, el contenido de nitrógeno puede ser del 0.01 a 0.07 %, de fósforo entre 1.0 a 13.5 mg kg^{-1} y la de potasio de 1.18 a $2.37 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Álvarez-Solís *et al.*, 2000), valores que concuerdan con los encontrados en el tepetate de la hacienda, después del establecimiento de las diferentes poblaciones de *L. campestris*. Respecto al contenido de materia orgánica, Prat *et al.* (2003) reportaron que en tepetates roturados y con una asociación maíz-haba más una aplicación de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de estiércol se incrementó a 1.58 % de materia orgánica y se tuvo un pH de 7.3, lo que indica que las prácticas de manejo mejoran de forma sustancial las condiciones de las propiedades edáficas, tanto químicas como físicas; tal es el caso de la densidad aparente. En este sentido, Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) reportaron que puede presentar este material una densidad aparente de 1.46 a 2.08 g cm^{-3} , con una tendencia a incrementarse, lo que repercute en una reducción en el número de poros (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2004).

Los suelos de origen volcánico cuentan con características físicas que favorecen una buena estabilidad estructural y una importante resistencia a la degradación, entre las que se pueden mencionar una baja porosidad y elevada densidad aparente. La densidad aparente es una propiedad que tiene relación con otras características del suelo y con algunos parámetros biológicos. Cuando la densidad aparente aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad, limitando a su vez el crecimiento de las raíces, debido a que disminuye la porosidad, lo que se presenta en los tepetates de la hacienda. La densidad aparente es afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo (Espinosa-Ramírez *et al.*, 2011), propiedad que se incrementó a los 12 meses de establecer las poblaciones de *L. campestris*.

Existe información de tepetates provenientes del Estado de México donde se observan incrementos en el valor de la capacidad de intercambio catiónico de 28.1 Cmol (+) kg⁻¹ (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2004), la cual es relativamente mayor a la del tepetate de la rizósfera de las diferentes poblaciones de *L. campestris* aquí evaluadas. Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) reportan que en horizontes superficiales de tepetate existe una capacidad de cambio de 18.6 y 20.9 Cmol (+) kg⁻¹ y una concentración pobre de materia orgánica (2.9 a 4.6 %) de acuerdo a la normatividad mexicana para suelos volcánicos (DOF, 2002). Aunque no se tuvieron diferencias significativas entre poblaciones con respecto al contenido de materia orgánica, el suelo rizósferico de la población de *L. campestris* que procedió de Poxcoatzingo presentó un porcentaje de 1.01, lo que significa un incremento importante a doce meses de establecer en este caso la población al comparar con el valor de 0.30 % de Tepetate 2017.

El contenido de materia orgánica del suelo es un buen indicador de su fertilidad, principalmente de su capacidad para proporcionar nutrimentos como nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros, a los cultivos. Además, tal contenido indica la capacidad relativa del suelo para retener nutrimentos contra pérdidas por lixiviación; la estabilidad de su estructura y susceptibilidad a la erosión; el movimiento del agua y aireación (importante para el sistema radical); la capacidad amortiguadora del suelo para resistir variaciones de pH o salinidad, y las condiciones de manejo del suelo. El contenido de materia orgánica está, muchas veces en función, entre otros factores, del clima, de la vegetación presente y del manejo, los factores ecológicos como la temperatura y precipitación influyen en la producción de restos vegetales que se incorporen, así como su velocidad de mineralización (Rodríguez y Rodríguez, 2002). El tepetate es un sustrato que presenta bajas concentraciones de materia orgánica, por lo que se hace indispensable la incorporación de esta para mejorar las condiciones edáficas y nutrimentales (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2004). Para el caso del tepetate de la hacienda, se tuvo un incremento si bien no significativo entre poblaciones, si fue diferente con respecto al Tepetate 2017.

Por la parte nutrimental, se encontró que la concentración de N total del tepetate con *L. campestris* no tuvo un aumento significativo al comparar el valor con el del Tepetate 2017, previo a establecer la planta (Tabla 3). Rodríguez y Rodríguez (2002) mencionan que la mayor parte del nitrógeno se encuentra en los suelos en forma orgánica. Por lo general se presentan cantidades relativamente pequeñas en forma de compuestos de amonio y nitratos, que son las formas asimilables. Especies de *Lupinus* que se localizan en la zona oriente del cerro de Tláloc en la Sierra Nevada, México (*Lupinus uncinatus* Schlecht, *Lupinus leptophyllus* Schlecht. & Cham., *Lupinus versicolor* Sweet, *Lupinus montanus* H.B.K., *Lupinus potosinus* Rose) promueven el incremento de nitrógeno total de 0.13 a 0.27 % y fósforo de 4.82 a 14.70 mg kg⁻¹, lo que muestra que estas especies se pueden desarrollar en diversos ambientes ecológicos, lo que beneficiaría a la rehabilitación de áreas degradadas (Alderete-Chávez *et al.*, 2008).

Por su parte, Alderete-Chávez *et al.* (2009) reportaron que *L. montanus* y *L. leptophyllus* son especies que al crecer en suelos derivados de cenizas volcánicas promueven la solubilización de nutrimentos como el nitrógeno y fósforo a 120 días de crecimiento. *L. montanus* solubilizó nitrógeno de 0.13 a 0.65 %, *L. leptophyllus* de 0.13 a 0.64 %; por otro lado, en cuanto al fósforo, *L. montanus* solubilizó de 14.70 a 22 mg kg⁻¹, *L. leptophyllus* de 14.70 a 23 mg kg⁻¹, lo que convierte a estas especies idóneas para la rehabilitación de suelos. Las leguminosas de este género tienen la capacidad de solubilizar fósforo, debido a su sistema radical expansivo y a su potencial de supervivencia en suelos degradados (Vielma, 1999), lo que concuerda con lo obtenido con *L. campestris* en los tepetates de la hacienda, en cuanto al incremento de nutrimentos con respecto al Tepetate 2017.

Autores como Gama-Castro *et al.* (2007) reportaron una concentración de N total de 0.03 % en tepetate de Glacis de Buenavista, Morelos, lo que coincide con lo encontrado en los tepetates de la rizósfera de las diferentes poblaciones de *L. campestris* establecidas en Tepetzala (Tabla 3). Por otra parte, al establecer en tepetate *Cassia tomentosa*, una leguminosa que se emplea como forraje para

alimentación animal, se reporta en el sustrato una concentración de 0.001 % de N total, 0.80 mg kg⁻¹ de fósforo y 249.1 mg kg⁻¹ de potasio (García-Gallegos *et al.*, 2009), valores inferiores a lo que tuvo el tepetate de la zona rizosférica de *L. campestris*; a excepción de la concentración de potasio, lo que sugiere que esta leguminosa puede influir en la solubilidad de los nutrimentos. Al respecto, Núñez (2007) menciona que una concentración de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas se eleva con el incremento de la temperatura media anual, al prolongarse la época seca del año; decrece al aumentar la altitud y a mayor precipitación.

Para el caso particular de Mg, si bien no hubo diferencias entre poblaciones de *L. campestris*, si existió un incremento con respecto al Tepetate 2017 (Tabla 3). En suelos dentro del Parque Nacional La Malinche en Tlaxcala, Vela-Correa *et al.* (2012) reportaron una concentración de magnesio en el horizonte superficial de 0.5 Cmol (+) kg⁻¹, valor menor a lo que se obtuvo en el tepetate de la rizósfera de *L. campestris*. Flores (1993) mencionó que las concentraciones de magnesio se atribuyen a la alteración provocada por los factores climáticos en los minerales ferromagnesianos y silicatos de magnesio, materiales comunes en los piroclastos que conforman los suelos de origen volcánico. Por su parte la concentración de Ca se incrementó con respecto al Tepetate 2017 (Tabla 3). Al respecto, Acevedo-Sandoval *et al.* (2003) reportaron en tepetate valores de Ca de 3.5 Cmol (+) kg⁻¹, menor a lo encontrado en este trabajo. En el caso del contenido nutrimental, el N total fue bajo en todos los casos de acuerdo a la clasificación que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) para suelos volcánicos y con base en la clasificación de Vázquez-Alarcón (1997) las concentraciones que se obtuvieron de K, Ca y Mg fueron muy pobres.

8.2. Supervivencia y características agronómicas

La supervivencia reportada en los dos sitios (hacienda 12.04 % y solar 75.61 %) son diferentes a lo reportado por Vázquez-Cuecuecha (2017) de 25 % para la misma especie considerando que algunas poblaciones provienen de los mismos sitios. El

valor de supervivencia puede deberse a las condiciones ambientales, pero en especial al sustrato o al suelo donde crecieron. Un valor importante es el pH para este género, los valores pueden ser de neutro a ácido (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012; Alderete-Chávez *et al.*, 2009; Gladstones, 1970), además, hay otras características propias del suelo que afectan su desarrollo en las poblaciones, como materia orgánica y potasio (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012).

La calidad nutrimental en el suelo es determinante, como lo reportado por Figueroa (2017) con *L. bilineatus*, quien menciona una diferencia de 5.04 % de supervivencia entre fertilizado y no fertilizado, sin embargo, los valores son menores (21.96 %), a lo reportado en este estudio en “El Solar” de Tlaxco. Por otro lado, en el caso de poblaciones que se bajaron en altitud, pudieron experimentar estrés debido a una mayor temperatura (Venier, 2013), que propicia una tasa mayor de evapotranspiración por el sitio más caluroso (Allen *et al.*, 2006). Pero, además es importante mencionar que la condición genética es determinante para la supervivencia (Walker y Lockett, 2011). Las plantas del género *Lupinus* muestran una gran plasticidad, lo que les permite crecer en una amplia diversidad de hábitats, desde el nivel del mar hasta las elevaciones alpinas. La alta adaptabilidad de este género de Fabaceae se ve favorecida por la asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Bradyrhizobium*. Sin embargo, a nivel de especie, se observa una alta especialización con algunas especies restringidas a un rango altitudinal estricto. El impacto de los cambios de temperatura puede llevar a tales especies de tierras bajas a expandir su área de distribución mucho más al norte y las de gran elevación pueden simplemente desaparecer debido a una restricción de sus nichos ecológicos (Bermúdez-Torres *et al.*, 2015).

Con respecto a la altura de la planta, los valores son similares para la misma especie, reportado por Vázquez-Cuecuecha (2017) de forma *ex-situ*. Sin embargo, de manera natural los valores son menores, en un intervalo de 50-90 cm (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012). En comparación con otras especies, algunas poblaciones como Zoapan, Laguna Seca, San Isidro, Barranca Honda y Atzitzintla en promedio

son similares a *L. exaltatus* y *L. elegans* Kunth (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012; Soto-Correa *et al.*, 2012). Las diferencias entre las poblaciones indican que las poblaciones podrían estar marcadas genéticamente (Soto-Correa *et al.*, 2012), debido a que no muestran una plasticidad fenotípica ante las condiciones ambientales. Sin embargo, el menor crecimiento de algunas plantas correspondientes a algunas poblaciones podría interpretarse como una estrategia para evadir el estrés por sequía (Levitt, 1980; Sikuku *et al.*, 2010). Aunado a lo anterior, el crecimiento de la planta puede aumentar o disminuir por factores como la densidad de siembra, como se ha observado en especies como *L. angustifolius* y *L. albus* (Pospíšil y Pospíšil, 2015; Mülayim *et al.*, 2002).

El peso de la planta al igual que la altura, está influida por factores ambientales, así como por el manejo, especialmente por la densidad de siembra, donde la productividad (biomasa) puede disminuir. En promedio la producción de biomasa fue de 2.67 t ha⁻¹, valor menor a lo reportado para *L. albus* (11.2 t ha⁻¹), y *L. mutabilis* Sweet (9.8 t ha⁻¹), en densidades de 100 y 120 semillas m² respectivamente (Mikić *et al.*, 2013), lo cual podría indicar que, al aumentar la densidad de siembra incrementaría también la productividad tanto para el género como para la especie estudiada. Algo importante que destacar en esta parte, las poblaciones de altitud similar a la zona de experimentación (2 600 msnm) presentan valores mayores (Tabla 4), mostrando un patrón de adaptabilidad. Sin embargo, en poblaciones como Poxcoatzingo proveniente de una altitud de 2 503 msnm y Tlalmotolo de 2 903 msnm la productividad se vio afectada, lo cual podría indicar que la temperatura es determinante, además de las propias características genéticas, como resultado de una diferenciación y como respuesta al ambiente, propiciando una respuesta en el desarrollo (Rehfeldt, 2004; Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

Para la productividad de vaina/planta, los valores fueron mayores (828.50 vainas en planta en promedio) en comparación con la misma especie y en las mismas poblaciones de forma natural de 172 a 479 vainas por planta (Águila-Sánchez *et al.*, 2018). En especies domesticadas como *L. albus* y *L. angustifolius* con valores de 4-

9 vainas/planta y 5-7 en *L. barkeri* y *L. marchallianus* (Vázquez-Cuecuecha, 2017; Pospíšil y Pospíšil, 2015); sin embargo, en otras variedades de *L. albus* el número reportado fue de 14 a 25 en la región del Mediterráneo y en la Península Ibérica (González-Andrés *et al.*, 2007; Annicchiarico *et al.*, 2010).

El proceso de domesticación en algunas especies vegetales ha llevado a la reducción de la producción, no obstante, ha conllevado a una mejora en el tamaño y/o resistencia a las condiciones ambientales como suelos alcalinos (Jayasundara *et al.*, 1998). Por otro lado, si bien la producción de vainas es producto de la parte genética de cada especie, selección artificial y de la evolución en especies nativas, de igual forma, depende de factores ecológicos, tales como, la interacción con especies polinizadoras (Walker y Luckett, 2011), además de las horas frío que en el género *Lupinus* es indispensable para el desarrollo de las estructuras florales.

El potencial de semillas por planta depende del número de semillas por vaina, la producción es considerablemente alta (Tabla 4). No presentó diferencias entre poblaciones ($p=0.687$), a pesar de mostrar diferencias en otras características fenotípicas que podrían reflejarse en la producción, lo cual puede indicar que su potencial es propio como especie, y que no ha sufrido una diferenciación genética entre poblaciones hasta el momento. En comparación con otras especies, el valor reportado en este estudio es alto (5 716) vs. *L. mutabilis* Sweet con 102 semillas por planta (Plata, 2016). Sin embargo, con la misma especie y en las mismas poblaciones, pero de forma natural, también los valores fueron menores, por ejemplo, Atzitzintla presentó 1 953 semillas como valor mayor y Zoapan zona A 188 semillas (Águila- Sánchez *et al.*, 2018).

En promedio, *L. campestris* tiene un potencial para generar 5 716 semillas, valor de gran importancia para su propagación y producción de proteína (Lagunes-Espinoza *et al.*, 2012), al compararla con otras especies el valor proteico es superior. Como es el caso de *Lupinus albus* L., la cual reportan Anastasova *et al.* (2018) un porcentaje de proteína cruda de 29.68, promedio de 23 cultivares de *Lupinus*

analizados. Por otra parte, Mera-Zúñiga *et al.* (2018) evaluaron la composición química de semilla de *Lupinus angustifolius* descascarillada, este proceso aumentó el contenido de proteína (25 a 31.1 %), lo que le permite un uso como sustituto de harina de soya para dietas de pollos de engorda.

Para las características de vaina, en la misma especie, en longitud, los valores fueron similares, reportado por Lagunes-Espinoza *et al.* (2012) entre 33.0 y 40.0 mm y Vázquez-Cuecuecha (2017) 39.1 mm. Las diferencias entre lo reportado en la investigación y otros autores, podría deberse a las condiciones ambientales (Pospišil y Pospišil, 2015; Annicchiarico *et al.* 2010). Alderete-Chávez *et al.* (2008) reportó para *L. montanus* y *L. leptophyllus* de 40 a 50 mm en longitud de vaina. En especies como *L. mutabilis* los valores son mayores, entre 20 y 120 mm (Caicedo y Peralta, 2001).

En cuanto al ancho de vaina, el promedio fue menor a lo reportado por Lagunes-Espinoza *et al.* (2012) con 8.0 a 9.0 mm; Vázquez-Cuecuecha (2017) reportó 6.3 mm de ancho de vaina, similar a lo encontrado en este trabajo en la misma especie (6.45); además, es similar entre especies investigadas con similitud a valores en *L. exaltatus* (6.3 mm) y en *L. montanus* (7.1 mm). Alderete-Chávez *et al.* (2008) registraron ancho de vaina de 8 a 9 mm en poblaciones naturales de *L. leptophyllus* Schlecht & Cham. y de 9 a 10 mm en *L. montanus* en Sierra Nevada.

IX. CONCLUSIONES

El uso de *L. campestris* como una práctica de rehabilitación propició un incremento en la concentración de nutrimentos (N, P, K, Ca y Mg), así como de algunas propiedades edáficas del tepetate; tales como, materia orgánica, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico, con respecto al tepetate previo a establecer la planta, lo que permite una importante retención de agua de lluvia, además de un incremento en la actividad microbiana; por lo que convierte a esta leguminosa en una excelente candidata para la rehabilitación de zonas donde aflora el tepetate.

Las condiciones ambientales de la Hacienda San Antonio Tepetzala no permitieron una supervivencia de *L. campestris*. En cambio, en el predio el "Solar" las poblaciones Laguna Seca, San Isidro, Barranca Honda, Atzitzintla y Zoapan zona B, produjeron la mayor altura. En cuanto a la cantidad de biomasa producida en Laguna Seca, San Isidro y Barranca Honda, fue superior. La producción de semilla no mostró diferencias entre poblaciones; sin embargo, la población de San Isidro, Zoapan zona A, Zoapan zona B y Laguna Seca presentaron la mayor producción de semilla, por lo que las coloca como candidatas para el establecimiento de plantaciones para la producción de semilla en la zona norte de Tlaxcala y a su vez emplearlas para la rehabilitación de suelos degradados o donde aflora el tepetate.

X. RECOMENDACIONES

En la hacienda San Antonio Tepetzala es importante continuar con los trabajos de rehabilitación de los tepetates con las poblaciones de *L. campestris* Laguna Seca, San Isidro y Zoapan, ya que fueron las que presentaron la mayor altura, biomasa seca y producción de semilla; sin embargo, es indispensable sumar otras prácticas sustentables que sean promisorias para mejorar la condición edáfica y nutrimental del sustrato, como lo es la incorporación de enmiendas orgánicas, abonos verdes, entre otras. Por otro lado, se pueden establecer plantaciones con las poblaciones Laguna Seca, Zoapan y San Isidro, para contar con germoplasma en un futuro para la zona norte de Tlaxcala.

XI. LITERATURA CITADA

- Acevedo-Sandoval, O. A., Ortiz-Hernández, L. E., Flores-Román, D., Velásquez-Rodríguez, A. S., Flores-Castro, K. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del Estados de México. *Agrociencia* 37:435-449.
- Águila-Sánchez, I., Vázquez-Cuecuecha, O. López-Upton, J. López-López, A., Martínez-Romero, E., García-Gallegos, E. y Zamora-Campos, E. M. 2018. Variación morfológica y reproductiva de nueve poblaciones naturales de *Lupinus campestris* Cham. & Schlttdl. De la region centro oriente de Puebla, México. *Biológico Agropecuario Tuxpan*. 6 (2) 2137-2143.
- Alderete-Chávez, A., Espinosa-Hernández, V., Ojeda, E., Ehsan, M., Pérez-Moreno, J., Cetina, V. M., Rodríguez-Trejo, D. A. y De la Cruz-Landero, N. 2008. Natural distribution and principal characteristics of *Lupinus* in the oriental face of Tláloc Mountain in Sierra Nevada, México. *J. Biol. Sci.* 8: 604-609.
- Alderete-Chávez, A., Espinosa-Hernández, V., De la Cruz-Landero, N., Ojeda-Trejo, E., Brito-Vega, H. 2009. Evaluation of two *Lupinus* species native from Central Mexico in relation with solubilization of Nitrogen, Phosphorus and Pottasium in an Andosol. *Journal of Applied Sci.* 9 (8): 1583-1587.
- Álvarez-Solís, J. D., Ferrera-Cerrato, R. Etchevers-Barra, J. D. 2000. Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34: 523-532.
- Álvarez-Sánchez. M. E. y Marín-Campos, A. 2011. Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta. Laboratorio de química. Departamento de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo. México. pp 4-26.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Crops evapotranspiration; Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 6 Rome, Italy, FAO. 174 p.
- Anastasova G. N., Ivanov K. V., Genov G. N., Butnariu M. 2018. Morphological and biological characteristics of white lupine cultivars (*Lupinus albus* L.). *Romanian Agricultural Res.* 35: 1-11.
- Andrist-Rangel, Y., Edwards, A. C., Hillier, S. y Born, I. O. 2007. Long term K dynamics in organic and convetional mixed cropping systems as related to management and soil properties. *Agric. Ecosyst. Environ.* 122: 413-426.
- Annicchiarico, P., Harzic, N. y Melchiorre, A. 2010. Adaptation, diversity, and exploitation of global white lupin (*Lupinus albus* L.) landrace genetic resources. *Field Crops Res.* 119: 114-124.
- Ávila-Campuzano, G. R., Gutiérrez-Castorena, Ma. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Angeles-Cervantes, E. y Sánchez-Guzmán, P. 2011. Evaluación de las reforestaciones en la formación de suelo a partir de tepetates. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17 (3): 303-312.
- Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Prat, C. Márquez-Ramos, A. y Ascencio-Zapata, E. 2008. Manejo agronómico de suelos endurecidos (tepetates) del eje Neovolcánico de México. Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Memoria Red POCAIBA integrada por: Red Rifyqa (Red Iberoamericana de Física y Química Ambiental), y del apoyo de la S.E.U.I. (Ministerio de Educación y Ciencia español) pp. 69-84.
- Bermúdez-Torres, K., N. Robledo-Quintos, J. Martínez-Hernández, A. Tei y M. Wink. 2000. Biodiversity of the genus *Lupinus* in Mexico. In: E. van Santen, M. Wink, S. Weissman y P. Roemer (eds.). *Lupin an Ancient Crop for the New Millenium*. International Lupin Association. Canterbury, New Zealand. pp. 294-296.

- Bermúdez-Torres K., Ferval M., Legal L. 2015. *Lupinus* species in central Mexico in the era of Climate Change: Adaptation, Migration, or Extinction? In: Öztürk M., Hakeem K., Faridah-Hanum I., Efe R. (eds) Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems. Springer, Cham DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_8
- Caicedo, V. C. y Peralta, I. E. 2001. El cultivo de chocho *Lupinus mutabilis* Sweet: fitonutrición, enfermedades y plagas, en el Ecuador. Boletín técnico n°103. Estación experimental Santa Catarina, Programa Nacional de Leguminosas. p 2-3.
- Callo-Concha, D. 2013. Prácticas agroforestales y especies de uso múltiple para la rehabilitación y conservación de suelos volcánicos en Adolfo López Mateos, Tlaxcala: percepción de los agricultores. Nota de investigación. Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente 13 (4): 117-134.
- Carvalho, M. M., Xavier, D. F. y Alvim, M. J. 2001. Use of tree legumes for the recovery of degraded pastures in the Atlantic forest región of Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SILVOPASTORAL SYSTEMS, San José, Costa Rica. Proceedings... San José: CATIE, p. 12-18. <http://www.fao.org/3/a-x6342s.pdf>
- Clements, J. C., Buirchell, B. J., Yang, H., Smith, P. M. C., Sweetingham, M. W. and Smith, C. G. 2005. Chapter 9: Lupin. In: Singh, R. and Jauhar, P. (Eds.), Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement grain legumes. Volume I. CRC Press, LLC. eBook. Boca Raton, Florida, USA.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. CONABIO. UNAM. 322.
- Dias, L. E., Franco, A. A., Campello, E., De Faria, S. M. y Da Silva, E. M. 1995. Leguminosas forestales: aspectos relacionados con su nutrición y uso en la recuperación de suelos degradados. Bosque 16(1): 121-127.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. González, M. Tablada, y C.W. Robledo. 2015. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- De Felipe-Anton, M. R., Fernández-Pascual, M., Lucas, S. M. M., Fedorova, E., Golvano-Herrero, M. P., Gonzalez-Sama, A., Guasch-Pereira, L., De Lorenzo, C., De María, N., Pozuelo-Guanche, J. M., Pueyo-Dabad, J. J. and Vivo, A. 2006. Structural, biochemical and molecular factors of the simbiosis Bradyrhizobium sp. (*Lupinus*)-*Lupinus*. An. R. Acad. Nac. Farm. 72 (3): 423-442.
- Doerge T, Kitchen NR y Lund ED. 2015. Mapeo de Conductividad Eléctrica del suelo. Traducido y adaptado para Colombia por Alberto Lobo-Guerrero Sanz, LOGEMIN S.A. Recuperado el 16 de abril de 2015 de: http://www.logemin.com/eng/Download/df/39_mapeo_conductividad_electrica.pdf
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. NOM-021- SEMARNAT-2000 Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2008. Humus de lombriz (lombricomposta) – especificaciones y métodos de prueba. 21 p.
- Dunn, D. B. 2001. *Lupinus*. En: Calderón de R., G. R., y J. Rzedowski. Flora Fanerogámica del Valle de México. Ed. Instituto de Ecología, A. C., CONABIO. Pátzcuaro, Michoacán México. pp: 290-300.
- Eastwood, J. R., C. S. Drummond, M. T. Schifino-Witmann, y C. E. Huges. 2008. Diversity and evolutionary of *Lupinus* insights from New Phylogenies. Proceedings 12th International Lupin Conference. International Lupin Association, Canterbury, New Zealand. pp: 348-354.
- Espinosa-Ramírez, M., Andrade-Limas, E., Rivera-Ortíz, P. y Romero-Díaz, A. 2011. Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. Papeles de Geografía. 53-54: 77-78.

- Ferrera-Cerrato, R. y Alarcón, A. 2010. Microbiología Agrícola. Trillas. 225 p.
- Ferrari, A. E. & Wall, L. G. 2004. Utilization of nitrogen fixing trees for revegetation of degraded soils. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 63-87.
- Figueroa, R. M. I. 2017. Efecto de especies nativas y silvestres de *Lupinus* sobre la fertilidad del suelo agrícola. Tesis de Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos. Instituto Politécnico Nacional. 107 p.
- Flores R. 1993. Informe de la visita de reconocimiento por arcilla o barro al predio "San José Teteltitla, Municipio de Yahuquemecan, Tlaxcala". Archivo técnico 29008 (en línea). En: Consejo de Recursos Minerales. Gerencia Regional Zona Sur. México. 13 p. <http://es.coremisgm.gob.mx/informes/pendientes/t2993fobr0001.pdf>. Consultado el 20 de mayo de 2015.
- Flores-Román, D., Muñíz-Irigoyen, C. G., Galicia-Palacios, M. del S., Ferrera-Cerrato, R. y Zenteno, G. 2011. Enmiendas orgánicas y durazno, *Prunus pérsica* (L.) Batsch, en el mejoramiento de una capa endurecida, tepetate tipo duripán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.* 63, 3, 479-486.
- Fuentes, R. 1971. Comportamiento de la CIC en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis M.S.C. Turrialba, Costa Rica, IICA, 107 pp.
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., Díaz-Ortega, J. 2007. Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIX, 1: 133-145.
- García-Cruz, A., Flores-Román, D., García-Calderón, N. E. y Ferrera-Cerrato, R. 2008. Efecto de enmiendas orgánicas, higuera y micorriza sobre las características de un tepetate. *Terra Latinoamericana.* 26: 309-315.
- García Gallegos, E., Gómez Cruz, G., Vázquez Cuecuecha, O.G., Zamora Campos, E.M. 2009. Respuesta de *Cassia tomentosa* desarrollada en tepetate con inoculación micorrízica. *Revista UDO Agrícola* 9 (4): 816-825
- García-Oliva, F. 2005. Algunas bases del enfoque ecosistémico para la restauración. En: Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdéz, M., y Azuara, D. (eds.). *Temas sobre restauración ecológica.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, U. S. Fish and Wildlife Service, Unidos para la conservación, A. C. México. pp. 101-111.
- Gladstones, J. S. 1998. Distribution, origin, taxonomy, history and importance. In: Gladstones, J. S., Atkins, C., Hamblin, J. (eds) *Lupins as crop plants. Biology: production and utilization.* CABI, Oxon, pp 1–39.
- González-Andrés, F. y Ortíz, J. M. 1996. Morphometrical characterization of *Cytisus* and *Allies* (*Genisteeae: Leguminosae*) as an aid in taxonomic discrimination. *Israel Journal of Plant Sci.* 44: 95-114.
- González-Andrés, F., Casquero, P. A., San-Pedro, C. y Hernández-Sánchez, E. 2007. Diversity in white lupin (*Lupinus albus* L.) landraces from northwest Iberian plateau. *Genetic Resources and Crop Evolution.* 54: 27-44.
- Gómez-Romero, M., De la Barrera, E., Villegas, J. y Linding-Cisneros, R. 2013. Fertilización y asociación con especies pioneras herbáceas en el crecimiento de *Pinus pseudostrabus*. *Revista Internacional de Botánica experimental* 82: 135-143.
- Haulon, M., Werner, G., Flores-García, G., Vera-Reyes, A. y Félix-Henningsen, P. 2007. Assessment of erosion rates during rehabilitation of hardened volcanic soils (tepetates) in Tlaxcala, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* 24 (3): 498-509.
- Hall, R. E. 2008. *Soil essentials: managing your farm's primary asset.* CSIRO PUBLISH-ING. Collingwood, Australia, 192 pp.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Atlangatepec, Tlaxcala. Clave geoestadística 29003.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tlaxco, Tlaxcala. Clave geoestadística 29034.
- Jambrina, J. L. 1996. El Altramuz. En: F. F. Jubete, & A. R. Monreal, El cultivo de las leguminosas de grano en Castilla y León. Valladolid: Junta de Castilla y León, Consejería de Agricultura y Ganadería. pp. 27-75
- Jaramillo, J. D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. facultad de Ciencias. Medellín, Colombia.
- Jayasundara, H.P.S., Thomson, B.D., Tang, C., 1998. Responses of cool season grain legumes to soil abiotic stresses. *Adv. Agron.* 63: 77–151.
- Jhonson, C. 2009. *Biology of soil science*. Oxford Book Company, Jaipur, India. 308 pp.
- Jiménez-Martínez, C., Campos-Mendiola, R., Sánchez-Espíndola, M. E., Jiménez-Aparicio, A., Gutiérrez-López, G. y Dávila-Ortiz, G. 2009. Microstructural changes in *Lupinus campestris* seed in response to three thermal debittering treatments. *Journal of the Science of Food and Agricultural* 89: 2399-2404.
- Jordan-López, A. 2006. Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Minerología y Química Agrícola. Universidad de Sevilla, España. pp. 119-120.
- Kurlovich, B. S., Kartuzova, L. T. 2002. Lupin breeding. Chapter 13. In: BS Kurlovich, ed. *Lupins (Geography, classification, genetic resources and breeding)*. OY International North Express. St. Petersburg, Russia - Pellosniemi, Finland. pp 351-374.
- Lagunes-Espinoza, L. D. C., López-Upton, J., García-López, E., Jasso-Mata, J., Delgado-Alvarado, A., García de los Santos, G. 2012. Diversidad morfológica y concentración de proteína de *Lupinus* spp. En la región centro-oriental del estado de Puebla, México. *Acta Botánica mexicana* 99: 73-90.
- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Springer. 1, 311, 321, 331, 332.
- Lima, A. T., Mitchell, K., O'Connell, D. W., Verhoeven, J. and Van-Capellen, P. 2016. The legacy of Surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*. 66: 227-233.
- Levitt, J. 1980. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. Vol II. Water, radiation, salt and others. Academic Press, New York. 606 p.
- López, R. G. F. 2009. *Ecofisiología de árboles*. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 331-357.
- López-Díaz, M. y Estrada-Medina, H. 2015. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrociencias* 8 (1):3-11.
- Mansourian, S. Overview of forest Restoration Strategies and Terms. 2005. In: *Forest Restoration in Landscapes, Beyond Planting Trees*. Mansourian, S., Vallauri, D. y Dudley, N. (Edits.) Springer-WWF. 8-11 pp.
- Martínez, J. M., Rodríguez-Trejo, D.A., Guizar-Nolazco, E. y Bonilla-Beas, R. 2008. Escarificación Artificial y Natural de la Semilla de *Lupinus bilineatus* Benth. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del ambiente* 14 (2):73-79.
- Mayo-Mendoza, M., Romo-Campos, R. L. y Medina-Fernández, P. 2018. Tasa relativa de crecimiento de herbáceas con potencial de Restauración en suelos degradados del bosque La Primavera, Jalisco, México. *Acta Universitaria* 28 (2):58-66.
- Mera-Zúñiga F., Pro-Martínez A., Zamora-Natera J. F., Sosa-Montes E., Guerrero-Rodríguez J. de D., Mendoza-Pedroza S. I., Cuca-García J. M., López-Romero R. M., Chan-Díaz D., Becerril-Pérez C. M., Vargas-Galicia A. J., Bautista-Ortega J. 2018. Soybean meal substitution by dehulled lupine (*Lupinus angustifolius*) with enzymes in broiler diets. *Asian-Australas J Anim Sci*. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0340>.

- Mikić, A., B. Čupina, V. Mihailović, Đ. Krstić, S. Antanasović, L. Zorić, V. Đorđević, V. Perić, and M. Srebrić. 2013. Intercropping white (*Lupinus albus*) and Andean (*Lupinus mutabilis*) lupins with other annual cool season legumes for forage production. *South African Journal of Botany* 89: 296-300.
- Mülayim, M., A. Tamkoc, and M. Babaoglu. 2002. Sweet white lupins versus local bitter genotype: Agronomic characteristics as affected by different planting densities in the Göller region of Turkey. *European Journal of Agronomy* 17: 181-189.
- Montes Hernández E., M.L. Corona Rangel, E. E. Corona, J.A. Cantor del Angel, J. A. Sánchez López, F. Spores, M. Wink, Bermúdez Torres K. 2011. Quinolizidine alkaloid composition in different organs of *Lupinus aschenbornii*. *Revista Brasileira de farmacognosia*. 21(5): 824-828.
- Núñez E. R. 2007. El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. En: Alcántar G. G. y Trejo L. I. (Coords.). *Nutrición de cultivos*. 2a. reimpresión. Mundi Prensa. México, D.F. pp. 93-149.
- Pascual H. 2004. *Lupinus mariae-josephi* (Fabaceae), new and surprising species discovered in Spain. *An Jard Bot Madr* 61:69–72.
- Pascual, H., Muguerza N. B. y Laberge, G. 2006. *Lupinus mariae-josephi* H. Pascual – a new lupin species adapted to calcareous soils. *Grain Legum* 46(2):8–9
- Pablo-Pérez, M., Lagunes-Espinoza, L. C., Ramos-Juárez, J., López-Upton, J., Aranda-Ibáñez, E. M. y Vargas-Villamil, L. 2014. Ruminal degradation of aerial biomass and sedes of wild species of *Lupinus*. *Ciencia e Investigación Agraria*. 41 (1): 5-12.
- Pablo-Pérez, M., Lagunes-Espinoza, L. C., López-Upton, J., Aranda-Ibáñez, E. M. y Ramos-Juárez, J. 2015. Composición química de especies silvestres del género *Lupinus* del Estado de Puebla, México. 38 (1): 49-55.
- Pajares-Moreno, S., Gallardo-lancho, J. F., Marinari, S. y Etchevers-Barra, J. D. 2010. Indicadores bioquímicos de calidad en tepetates cultivados del Eje Neovolcánico Mexicano. *Agrociencia* 44: 121-134.
- Pérez-Fernández, M. A., Calvo-Magro, E. y Valentine, A. 2016. Benefits of the symbiotic association of shrubby legumes for the rehabilitation of degraded soils under mediterranean climatic conditions. *Land Degrad. & Develop.* 27: 395-405.
- Pérez-González, L. del C., García-Gallegos, E., Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., Hernández-Acosta, E., Juárez-Santacruz, L. y García-Nieto, E. 2011. Grano de café y lombricomposta como alternativa de rehabilitación para tepetate. *Investigaciones sobre Ciencias Ambientales: proyectos de maestría*. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México. 45-57.
- Plata, A. J. M. 2016. Comportamiento agronómico de dos variedades de tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet), bajo tres densidades de siembra en la comunidad Marka Hilata Carabuco, La Paz. Tesis de Ingeniería en Agronomía. Facultad de agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
- Podwojewski, P., Janeau, J. L. y Leroux, Y. 2008. Effects of agricultural practices on the hydrodynamics of a deep tilled hardened volcanic ash–soil (*Cangahua*) in Ecuador, *Catena*, 72 (1): 179-190.
- Porta, C. J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. p. 56. 929.
- Porta, C. J., López-Acevedo, M. y Poch, M. R. 2014. *Edafología: uso y protección de suelos*. 3ª edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 607 p.
- Pospišil, A., and M. Pospišil. 2015. Influence of sowing density on agronomic traits of lupins (*Lupinus* spp.). *Plan Soil Environ* 9: 422-425.
- Prat, Ch., Ordaz, Ch. V. y Rugama, U. J. A. 2003. Impacto de la roturación y el manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. *Terra* 21: 109-115.

- Quinn, G. P. y Keough, M. J. 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge University Press, New York.
- Rehfeldt, G. E. 2004. Interspecific and intraspecific variation in *Picea engelmannii* and its congeneric cohorts: biosystematics, genecology and climate change. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-134. USDA For. Serv. 18 p.
- Retuerto, R., Rodríguez-Roiloa, S., Fernández-Lema, B. y Obeso, J. R. 2003. Respuestas compensatorias de plantas en situaciones de estrés. *Ecosistemas* 2003/1 (URL: <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/investigacion4.htm>).
- Rondón, R. J. A. y Vidal, R. 2005. Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas (Principios y Métodos). *Revista forestal Latinoamericana* 20 (38): 63-82.
- Rodríguez-Ambriz, S. L., A. L. Martínez-Ayala, F. Millan, y G. Dávila-Ortíz. 2005. Composition and properties of *Lupinus campestris* protein isolates. *Plant Foods for Human Nutrition* 60: 99-107.
- Rodríguez, F.H. y J. Rodríguez, A.J. 2002. *Métodos de análisis de suelos y plantas*. Trillas. México, D.F. p 196.
- Rodríguez-Tapia, S., Ortiz-Solorio, C. A., Hidalgo-Moreno, C. y Gutiérrez-Castorena, M. del C. 2004. Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: saprolita, sin endurecimiento pedológico. *Terra Latinoamericana*. 22:11-21.
- Ruiz-López, M. A., Rodríguez M. R., y Navarro P. S. 2006. Evaluación químico-nutricional de *Lupinus exaltatus* Zucc, del nevado de Colima, México, como fuente potencial de forraje. *Interciencia* 31(10): 758-761.
- Ruiz-Moreno, J. J., Ruiz-López, M. A. y Zamora-Natera, J. F. 2000. The genus *Lupinus*: taxonomy and distribution in Jalisco, México. In: Van Santen, E., Wink, M., Weissman, S. y Roemer, P. (eds.). *Lupin an ancient crop for the new millennium*. Proceeding of the 9th International Lupin Conference. 20-24 June, 1999. Klink, Alemania. Pp. 297-300.
- Rzedowski, G. C. de, y Rzedowski, J. 2005. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2ª ed., 1ª reimp., Instituto de Ecología, A. C. y Comisión nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro (Michoacán), 1406 pp.
- Sánchez O., Peters E., Márquez H. R., Vega E., Portales G., Váldez M. y Azuara D. 2005. *Temas sobre restauración ecológica*. SEMARNAT, INE. 257 p.
- Siddique, K. H. M., and Sykes, J. 1997. Pulse production in Australia past, present and future. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 37, 103-111.
- Sikuku P. A., G. W. Netondo, J. C. Onyango and D. M. Musyimi. 2010. Effects of water deficit on physiology and morphology of three varieties of nerica rainfed rice (*Oryza sativa* L.). *J. Agric. Biol. Sci.* 5(1): 23-28.
- Soil Survey Staff, 2014. *Claves para la Taxonomía de Suelos*. USDA-NRCS. 12a ed. pp 1.
- Soto-Correa, J. C., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., Sánchez-Vargas, N. y Cruz-de-León, J. 2012. Variación Genética entre procedencias de *Lupinus elegans* Kunth, zonificación altitudinal y migración asistida. *Agrociencia*. 46 (6) 593-608.
- Soto-Correa, J. C., Sáenz-Romero C., Paz H. y Lindig-Cisneros, R. 2015. Estrés por sequía en *Lupinus elegans* procedentes de diferentes altitudes. *Maderas y Bosques* 21(1): 35-43.
- Stanturf, J. A., Palik, B. J. y Kasten-Dumroese, R. 2014. Cintemporary forest restoration: A review emphasizing function. *Forest Ecology and Management*. 331: 292-323.
- USDA. 2001. *Soil Quality Test Kit Guide*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Natural Resources Conservation Service. Soil quality Institute.
- USDA-NRCS. 2014. *Soil Health – Bulk Density/Moisture/Aeration*. Guides for Educators. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- Vance, C.P. 2001. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. *Plant nutrition in a world of declining renewable resources*. *Plant Physiol.* 127: 390-397.

- Vázquez-Alarcón, A. 1997. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 31 p
- Vázquez-Cuecuecha, O. G. 2017. Variabilidad morfológica y genética de especies del género *Lupinus* en el Estado de Puebla. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados Campus Montecillos. Texcoco, Edo. de México, pp 14, 86-105.
- Vela-Correa, G., López-Blanco, J., y Rodríguez-Gamiño, M. L. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 77: 18-30.
- Velázquez-Rodríguez, S., Flores-Román, D. y Acevedo-Sandoval, O. A. 2001. Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales: Agrociencia, 35: 311-320.
- Venier, P., Cabido, M., Mangeaud, A. y Funes, G. 2013. Crecimiento y supervivencia de plántulas de cinco especies de Acacia (Fabaceae), que coexisten en bosques secos neotropicales de Argentina, en distintas condiciones de disponibilidad de luz y agua. Rev. Biol. Trop. 61 (2): 501-514.
- Vielma, A. M. 1999. Caracterización de cepas autóctonas de *Bradyrhizobium* spp. Aisladas de *Lupinus* spp. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ) 16: 495- 508.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez Valverde, and A. Santacruz-Varela. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. Forest Ecology and Management 257: 836-846.
- Villaseñor R., J. L. y Espinosa G. F. J., 1998. Catálogo de malezas de México. Ediciones Científicas Universitarias. Serie texto Científico Universitario. Universidad Nacional Autónoma de México. Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario. Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México. pp.449.
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J. A. y De la Rosa-Pérez, D. 2005. Suelos contaminados por metales pesados y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. 1ª edición. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D.F.
- Walker, J. y Lockett, D. 2011. Desarrollo reproductivo en: Lupin, Growth & Development. ProCrop, p. 48.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. Terra 10: 318-331.
- Wink, M. 1988. Plant breeding: importance of plant secondary metabolites for protection against pathogens and herbivores. Theor Appl Genetics 75: 225-233.
- Wink, M. 1993. Allelochemical properties and the raison d'être of alkaloids. In: Cordell G (ed.) *The Alkaloids*. Academic press, vol. 43, p. 1-118.
- Wolko B., J. C. Clements, B. Naganowska, M. N. Nelson, and H. Yang. 2011. *Lupinus*. In: B. Kole. Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources, Legume Crops and Forages. Springer-Verlag, Berlin. pp: 154-205.