



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
ESTABLECIMIENTO DE PLANTAS MICORRIZADAS DE
MEZQUITE

[*Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C.
Johnst.]

EN CONDICIONES DE INVERNADERO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA:

CLAUDIA FABIOLA SANDOVAL CASILLAS

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN ECOLOGÍA VEGETAL

DIRECTOR Dr. ARCADIO MONROY ATA



Investigación apoyada por la DGAPA, UNAM, mediante el proyecto PAPIIT con clave IN216610.

MÉXICO, D. F.

NOVIEMBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
3. Marco Teórico.....	3
3.1 Zonas áridas y semiáridas de México.....	3
3.2 Micorrizas.....	5
3.3 Hongos micorrizógenos arbusculares.....	5
3.4 Clasificación de los hongos micorrizógenos arbusculares.....	7
3.4.1 Clasificación del phylum <i>Glomeromycota</i>	9
3.5 Importancia de la microbiota del suelo.....	10
3.6 Importancia ecológica.....	12
3.7 Efecto de los hongos micorrizógenos arbusculares sobre el crecimiento de las plantas.....	15
3.8 Restauración ecológica.....	15
3.9 Establecimiento de plantas.....	16
4. <i>Prosopis laevigata</i>	17
4.1 Descripción botánica de <i>Prosopis laevigata</i>	20
4.2 Bioecología de <i>Prosopis laevigata</i>	20
4.3 Origen y distribución de <i>Prosopis laevigata</i>	21
4.4 Usos de <i>Prosopis laevigata</i>	21
4.5 Silvicultura y manejo de <i>Prosopis laevigata</i>	22
4.6 Influencia del ser humano en <i>Prosopis laevigata</i>	23
5. Justificación.....	24
6. Problemática.....	24
7. Hipótesis.....	24
8. Objetivos.....	24

9. Zona de estudio.....	25
10. Metodología.....	28
10.1 Trabajo de campo.....	28
10.2 Trabajo de invernadero.....	28
10.2.1 Germinación de semillas.....	28
10.2.2 Esterilización de suelo y capacidad de campo.....	29
10.2.3 Preparación de macetas.....	30
10.3 Trabajo de laboratorio.....	30
11. Inoculación y trasplante.....	30
11.1 Número de pinnas.....	30
11.2 Temperatura.....	31
11.3Diseño estadístico.....	31
11.4 Tasa de crecimiento relativo.....	31
11.5 Biomasa y cociente R/V.....	32
11.6 Potencial hídrico.....	33
11.7 Porcentaje de supervivencia.....	35
12.Diagrama de flujo de la metodología.....	36
13. Resultados y discusión.....	37
13.1 Germinación de semillas.....	37
13.2 Temperatura.....	37
13.3 Altura de <i>Prosopis laevigata</i>	37
13.4 Número de pinnas de <i>Prosopis laevigata</i>	39
13.5 Cobertura.....	40
13.6 Cociente R/V.....	43
13.7 Potencial hídrico de <i>Prosopis laevigata</i>	43

13.8 Biomasa húmeda del vástago.....	44
13.9 Tasa de crecimiento relativo.....	47
14. Tabla comparativa de cuatro trabajos de <i>Prosopis lavigata</i>	49
14.1 Discusión de cuadro comparativo de cuatro trabajos de <i>Prosopis laevigata</i>	50
15. Cuadro sintético de resultados.....	52
16. Conclusiones.....	53
17.Recomendaciones.....	53
18.Literatura citada.....	54
19. Anexos.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación Del phylum <i>Glomeromycota</i>	9
Cuadro 2. Diagrama de flujo de la metodología.....	36
Cuadro 3. Tabla comparativa de cuatro trabajos de <i>Prosopis lavigata</i>	49
Cuadro 4. Cuadro sintético de resultados.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de <i>Prosopis laevigata</i>	18
Figura 2. <i>Prosopis laevigata</i>	19
Figura 3. Mapa del estado de Hidalgo.....	27
Figura 4. Trasplante de <i>Prosopis laevigata</i>	29
Figura 5. <i>Prosopis laevigata</i> trasplantado	30
Figura 6. Tasa de crecimiento relativo.....	32
Figura 7. Biomasa y cociente R/V.....	33
Figura 8. Determinación del potencial hídrico.....	34
Figura 9. Supervivencia.....	35

Figura 10. Registro de temperatura máxima y mínima.....	37
Figura 11 Altura de <i>Prosopis laevigata</i>	37
Figura 12. Diferencia de alturas en distintas etapas del experimento.....	38
Figura 13. Número de pinnas.....	39
Figura 14. Fotografías de la diferencia en el número de pinnas entre plantas micorrizadas y no micorrizadas.....	40
Figura 15. Cobertura <i>Prosopis laevigata</i>	41
Figura 16. Fotografías de la cobertura de <i>Prosopis laevigata</i>	41
Figura 17. Cociente R/V de <i>Prosopis laevigata</i>	43
Figura 18. Potencial hídrico caulinar.....	44
Figura 19. Fotografías del tallo de <i>Prosopis laevigata</i> dentro de la cámara Schollander.....	44
Figura 20. Biomasa húmeda del vástago.....	45
Figura 21. Fotografía de la biomasa húmeda del vástago.....	45
Figura 22. Biomasa húmeda de la raíz.....	46
Figura 23. Fotografías de la biomasa húmeda de raíz y vástago.....	46
Figura 24. Tasa de crecimiento relativo.....	47
Figura 25. Fotografía de la tasa de crecimiento relativo.....	48

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me abrió sus puertas a la Prepa 6 “Antonio Caso” y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional.

A todos los profesores que me brindaron su tiempo, conocimientos y sobre todo por heredarme el amor a la Biología.

A mis sinodales:

Dr. Arcadio Monroy Ata, gracias por su tiempo, apoyo, conocimientos, por su paciencia, por su amistad y por darme la oportunidad de regresar después de tres años y recibirme con la misma calidez.

Dra. Esther Matiana García Amador, gracias por el apoyo, por aceptar ser mi sinodal cuando estaba de sabático y por los consejos para realizar la tesis.

Biól. Marco Antonio Hernández Muñoz, gracias por darme consejos para hacer más robusto mi escrito y por sus puntos de vista que me ayudaron a mejorarlo.

Biól. Elvia García Santos, gracias por felicitarme por ser de las pocas personas a las que no les corrige mucho, gracias también porque me dio la idea de ponerle más color a mi trabajo con imágenes demostrando el proceso biológico más que estadístico.

Dra. Bárbara Susana Luna Rosales, gracias por el apoyo, por los consejos que me fueron muy útiles, de hecho creo que mi tesis es el primer proyecto que compara trabajos de mezquite.

A las personas que sin saberlo me ayudaron:

Mamá, papá Denisse y Fer que insistieron para que después de tres años de haber terminado la carrera hiciera un último esfuerzo para ser una Licenciada, los amo, Biól. Maribel Flores, gracias por tu amistad, por tu

apoyo, consejos, por darme ánimos cuando todo se veía turbio, gracias amiga.

DEDICADA A:

Mi abuela Blanca Tejada Castañeda porque aunque no me vio convertirme e Bióloga ella creía en mí, me amaba a su manera, me cuidó y me consintió, también me regañó cuando no estaba centrada, por ser una mujer muy fuerte a la que nunca vi llorar, pero sé que estaría orgullosa de mi y aunque no esté físicamente sé que está conmigo siempre, te amo Abue.

A mi madre Blanca Casillas Tejada por darme la vida, por el apoyo económico y moral que siempre me has brindado, ser la mujer más fuerte del mundo por los regaños, por los desvelos, por los altibajos, por enseñarme a ser fuerte, por hacer de mí una mujer responsable, por ser mi apoyo en todo momento, por ser mi ejemplo a seguir, porque te la jugaste por mí desde antes de que naciera, porque eres mi fuerza y mi pilar para seguir adelante, por estar cuando te necesito y sobre todo por amarme sobre todas las cosas te amo mami gracias.

A mi padre Carlos Sandoval Quintero, por darme la vida, por el apoyo económico y moral que siempre he recibido de ti, por ser el mejor hombre del mundo, por los regaños que hicieron que ahora sea una mujer de bien, por todo lo malo que has pasado y sin embargo sigues siendo mi héroe, por darme todo lo que he necesitado siempre, por ser el pilar de la familia, por ser mi ejemplo y sobre todo por ser mi padre te amo papi.

A mi hermana Denisse Sandoval Casillas, por ser mi mejor amiga y confidente, porque aunque no siempre coincidimos sé que siempre estaremos la una para la otra, por darme el ejemplo de ser Licenciada, porque eres una mujer fuerte y decidida, por ser mi hermana y estar ahí cuando no hay nadie más, te amo enana.

A mi novio Fernando Juárez Logra, por llegar a mi vida cuando menos lo esperaba, por ser mi apoyo cuando más lo he necesitado, por apoyarme

para titularme, por amarme con todos mis defectos y a pesar de ellos seguir aquí, te amo cielo.

A toda mi familia que ha estado en los buenos y los malos momentos gracias a todos y cada uno.

A mis amigos de la universidad Rodolfo, Hugo, César, Luis, Luis Manuel, Roberto, Lenin, Gina, Arely, Chabela, Jenny, Cris, Clara, a todos ellos que compartieron cinco años de su vida conmigo, con los que aprendí a amar la biología, con los que me divertí, llore, y aprendí lo que es la verdadera amistad.

A mis amigos de vida, gracias por todos los buenos y malos momentos por lo que me han enseñado todos y cada uno de ustedes.

1. Resumen

Las zonas áridas y semiáridas de México presentan cierto grado de deterioro de su cubierta vegetal, debido principalmente a actividades antropogénicas como sobrepastoreo, tala, desmonte, fuego, etc., lo que altera la estructura y dinámica de los procesos ecológicos y biológicos; además, un factor limitante en estos ambientes es la baja y e irregular precipitación pluvial. Un componente edáfico importante en ecosistemas con escasez de agua para las plantas son los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), ya que éstos contribuyen al suministro hídrico de sus hospederos mediante la captación de humedad edáfica y de nutrimentos, a través de una red hifal, la cual explora un mayor volumen de suelo en comparación con las raíces de la planta. Así la problemática del presente trabajo fue la siguiente: ¿La inoculación de HMA en plantas de *Prosopis laevigata* aumenta significativamente su tasa de crecimiento relativo? ¿La micorrización de *Prosopis laevigata* cambia significativamente el cociente de biomasa radical/biomasa del vástago? Por ello, en este trabajo se caracterizó el crecimiento de plantas de mezquite, una especie que medra en el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo, con y sin inóculo de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA). Para esto, se recolectaron semillas de *P. laevigata* en el Valle del Mezquital, se germinaron en cajas Petri, se sembraron en macetas que contenían una mezcla homogénea de suelo esterilizado y arena sílica en relación 2:1 (v/v) y se cultivaron en condiciones de invernadero por 320 días. El diseño experimental consistió en cultivar cuarenta plántulas sin micorrizas que sirvieron como plantas testigo y cuarenta con micorrizas, para registrar su desarrollo bajo los dos tratamientos. Durante el cultivo en invernadero se registró la altura, cobertura, número de hojas mensualmente y después de 320 días de cultivo se registró la tasa de crecimiento relativo (TCR), biomasa radical y del vástago (R/V) y potencial hídrico caulinar. El diseño experimental consistió en un ANOVA de un factor para las variables ecofisiológicas y del desarrollo vegetal.

Los resultados muestran diferencias significativas a favor de las plantas micorrizadas en los parámetros: altura, cobertura, tasa de crecimiento relativo (TCR), potencial hídrico caulinar (ψ_w), biomasa húmeda de la raíz y del vástago, número de pinnas y cociente de biomasa raíz/vástago. Esto ocurrió, seguramente, por el mayor aporte hídrico y de nutrimentos a la planta debido a la simbiosis con los HMA, ya que las hifas de éstos exploran el sustrato más allá del alcance de raíces y raicillas, contrario a lo que sucede con las plantas no micorrizadas, que limitan su absorción solo al alcance de su sistema radical. Por lo anterior se concluye que las plantas inoculadas con HMA tienen una mayor probabilidad de establecimiento en condiciones de invernadero y que posiblemente pueden ser competidoras exitosas en programas de restauración ecológica en zonas semiáridas deterioradas del país.

2. Introducción

Las zonas áridas se consideran aquellas cuya precipitación media anual es menor de 250 mm, donde la distribución de lluvias suele ser irregular durante todo el año, con una temperatura media anual que oscila entre los 15 y 25 °C, y cuya cubierta vegetal es menor del 70% del suelo.

Las zonas semiáridas se caracterizan por una precipitación pluvial que varía de los 250 y 400 mm al año, en donde la cubierta vegetal es superior al 70% y la vegetación dominante está formada por matorrales y pastizales (Nobel, 1998). Las zonas áridas y semiáridas de México ocupan entre el 50 y 60% de la superficie total del país.

Los ecosistemas áridos y semiáridos en México poseen una elevada diversidad, de alrededor de 6000 especies, y un porcentaje importante de endemismos: 65% de los géneros y 60% de las especies que medran en estos ambientes. (Rzedowski, 1991). Sin embargo, las zonas áridas y semiáridas mexicanas presentan señales de deterioro en amplios territorios del país, debido a distintas causas.

Una zona que ejemplifica esta situación es el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, donde los recursos bióticos han sido utilizados continuamente desde la época prehispánica por grupos de la etnia otomí (ñhañhù). Una de las unidades fisiográficas que conforman esta región semidesértica es el Valle de Actopan, en el cual se encuentran diversos tipos de vegetación, siendo el matorral xerófilo el más abundante; este tipo de recursos requieren urgentemente programas de rehabilitación o de restauración ecológicas.

En esta región coexisten especies leñosas de las familias Fabaceae, Agavaceae, Cactaceae y Liliaceae, con hierbas como gramíneas (Poaceae) y compuestas (Asteraceae), siendo las especies leñosas *Acacia farnesiana* (huizache o acacia) y *Prosopis laevigata* (mezquite) las más importantes de la región por su dominancia en el pasado.

Por otra parte, la restauración ecológica es una disciplina que estudia los procesos que promueven la reconstrucción de ecosistemas deteriorados y analiza técnicas que favorecen la sucesión ecológica, la descontaminación del suelo y agua, la reintroducción de especies, la rehabilitación edáfica, la captación y retención de humedad en el suelo y el establecimiento de una nueva cubierta vegetal, además de favorecer la absorción de nutrientes y su retención en plantas fijadoras. En el caso particular de los ecosistemas áridos y semiáridos, se ha reportado que el establecimiento vegetal se incrementa cuando se utilizan plantas micorrizadas, las cuales tienen mayor protección y tolerancia a las condiciones adversas del suelo y del clima (Caravaca *et al.*, 2003).

Uno de los principales problemas ecológicos a nivel mundial, es la degradación de los suelos debido a la disminución de la fertilidad y el deterioro de las propiedades físicas y biológicas de este sustrato, que constituye un gran obstáculo para la regeneración de los ecosistemas. México es una de los países más afectados por la erosión del suelo con un 50% de su superficie. Las actividades más

frecuentes y redituables en estos ecosistemas son: la agricultura de temporal en algunos microambientes, ganadería extensiva, tala inmoderada, las cuales aunadas a un intenso calor y suelos poco desarrollados, han dado como resultado una cubierta vegetal dispersa, perturbada, con baja capacidad de recuperación natural y con pérdida de la fertilidad del suelo (Allen, 1999).

Entre las simbiosis de los vegetales con microorganismos, la de mayor importancia por su amplia distribución en los ecosistemas, así como su asociación con la mayoría de los vegetales, son los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), que es la asociación de hongos del *phylum* Glomeromycota con las raíces de las plantas. Las especies que pertenecen a los géneros *Glomus*, *Acaulospora*, *Kuklospora*, *Gigaspora*, *Scutellospora*, *Paraglomus*, *Archaeospora*, *Intraspora*, *Entrophospora*, *Diversispora*, *Otospora*, *Ambispora* y *Pacispora*, son ampliamente conocidos como hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), por formar asociaciones simbióticas con las raíces de más del 80% de las plantas superiores (Espinosa, 2000; Rosenblueth *et al.* 2001; Schuñler *et al.*, 2001; Gladstone *et al.*, 2006; Rosendahl, 2008).

3. Marco teórico

3.1 Zonas áridas y semiáridas de México

México es el tercer país en extensión territorial de América Latina, después de Brasil y Argentina, y el segundo por su población que asciende a 104 millones de habitantes. La población rural se estima en 21 millones de personas de las cuales el 60% vive en condiciones de extrema pobreza. De su superficie total, de aproximadamente 2 millones de km², solo puede destinar a la producción agrícola poco más del 10%. Sus zonas áridas y semiáridas desérticas abarcan aproximadamente la mitad de su territorio. Se consideran zonas áridas, aquellas áreas donde la precipitación promedio anual es menor a la evaporación potencial máxima anual poniendo en evidencia un déficit hídrico.

Estas regiones se caracterizan por una escasez de agua, con una distribución de la precipitación pluvial altamente errática y que ocurre en pocos eventos y de tipo torrencial. Situación que limita sustancialmente el desarrollo de las actividades agropecuarias.

Así mismo, México junto con India, Zaire, China, Madagascar, Indonesia, Australia, Brasil, Estados Unidos de América, Colombia, Ecuador y Perú constituyen los países megadiversos del mundo. La variedad de especies botánicas que se han logrado adaptar a los desiertos es enorme, no obstante las características extremas que prevalecen en los mismos.

En México, las zonas con sequía están ubicadas en los estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Durango, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora, Zacatecas, Tamaulipas, Hidalgo, Oaxaca, Puebla y Querétaro, donde los matorrales xerófitos son los tipos de vegetación más extensa (Rzedowski, 1988). En las zonas áridas y semiáridas existe un elevado endemismo de las plantas por que se consideran como áreas con alto potencial en la obtención de recursos naturales originales, como materias primas para la industria farmacéutica, alimentaria, textil, etc. (Montaño, *et al.* 2000; Monroy, 2002).

En estos ambientes secos, los ejemplos de plantas con potencial forestal son el mezquite (*Prosopis* spp.), ocotillo (*Fouquieria splendens*), y diferentes tipos de yucas (*Yucca* spp.), entre otros; plantas con potencial forrajero como los pastos y el nopal (*Opuntia* spp.).

En ecosistemas áridos y semiáridos, los HMA exploran grandes volúmenes de suelo a mayores profundidades y distancias de lo que lo hacen las raíces de las plantas, para suministrar agua y nutrimentos a sus asociados vegetales; por ello, en algunos desiertos, quizás la lluvia total anual, por sí misma, no puede explicar los altos niveles alcanzados en la producción primaria de los ecosistemas locales. Asimismo, se ha demostrado que gracias a sus micobiontes, numerosas especies de plantas de zonas secas adquieren beneficios nutrimentales y de protección contra parásitos y sustancias alelopáticas; igualmente, se ha mostrado el papel funcional de los HMA en la construcción de una red hifal que conecta físicamente a las plantas que conforman una comunidad o un “parche” de vegetación, en donde se aprovechan los recursos disponibles con alta eficiencia. En ambientes áridos, con elevada presión de selección para las plantas, el enunciado que señala que “en la naturaleza sólo lo óptimo sobrevive”, adquiere una vigencia continua (Montaño *et al.*, 2007)

Así la vegetación de los ecosistemas áridos y semiáridos normalmente soporta condiciones adversas como largos periodos de sequía, intensas temperaturas y evaporación, suelo con alto contenido de sales, suelos arenosos con alto grado de erosión, suelos con bajos niveles de nutrimentos y de agua, entre los factores principales; lleva a pensar que los HMA son un factor que permite a las plantas resistir estas condiciones adversas. En estas condiciones adversas, las hifas de los HMA son fisiológicamente más efectivas para la absorción de agua y nutrimentos que las raíces mismas. Esta característica incrementa la tolerancia de las plantas a la sequía y a la captación de nutrimentos que son relativamente inmóviles como el P y, por lo tanto, son necesarias para el crecimiento y supervivencia de las plantas en el desierto (Montaño *et al.*, 2007).

Las zonas áridas y semiáridas se clasifican dentro de los climas BW y BS respectivamente según Köpen (García, 1973). Las plantas xerófilas son plantas adaptadas a las condiciones extremas de temperatura, sequía y escasa humedad durante periodos prolongados de tiempo y deben ser capaces de sobrevivir en suelos pedocálcicos y con escasa humedad, textura gruesa y bajo contenido de material orgánico (Cloudsley-Thompson, 1979). El matorral xerófilo ocupa aproximadamente el 40% de la superficie del país, es el más vasto de todos los tipos de vegetación. En esta clase de matorral es notable la diversidad de plantas suculentas, plantas de hojas arrosetadas o concentradas hacia los extremos de los talos, plantas afilas, plantas gregarias o coloniales, especies provistos de tomento blanco, etc. La microfilia y la presencia de espinas son caracteres comunes, al igual que la pérdida de hojas en épocas desfavorables (Rzedowski, 1983). El matorral xerófilo junto con los pastizales son los tipos de vegetación donde se han encontrado especies con distribución restringida (Rzedowski, 1991).

Con frecuencia, en las regiones áridas los terrenos agrícolas son barbechados sin conservar alguna cubierta vegetal, lo que incrementa el déficit de agua del suelo (Allen, 1999), los terrenos con vegetación natural son usados como terrenos de libre pastoreo.

3.2 Micorrizas

El término micorriza, el cual literalmente significa "raíz-hongo", fue utilizado por primera vez en 1885 por el botánico alemán Frank para describir las asociaciones mutualistas que ocurren entre las raíces de las plantas y hongos. Las asociaciones micorrícicas constituyen diferentes tipos, dependiendo de los hongos involucrados, dentro de las cuales la micorriza arbuscular es la simbiosis más común en los ecosistemas, puesto que estos hongos han coevolucionado con las plantas desde hace al menos 400 millones de años, asistiéndolas en su transición para colonizar el medio terrestre (Harrison, 1997; Bonfante y Genre, 2008).

Las micorrizas del griego (*mykes*: hongo y *rhiza*: raíz) representan una asociación simbiótica mutualista: la planta suministra al hongo de carbohidratos producto de la fotosíntesis y por su parte el hongo transfiere a la planta agua y nutrientes minerales del suelo (Camargo, 2003).

La asociación micorrícica es indudablemente la asociación simbiótica con mayor distribución en el planeta (Perrin, 1990). El 90% de las plantas superiores son susceptibles de formar la micorriza arbuscular (Roldan- Fajardo y Barea, 1987).

El estudio del efecto de los microorganismos del suelo en los ecosistemas áridos, así como su influencia en el desarrollo de las cactáceas ha sido poco estudiado. La presencia de una amplia diversidad de microorganismos benéficos en la rizosfera permite vislumbrar su importante función en los procesos fisiológicos involucrados en el desarrollo de las plantas (Cui y Nobel, 1992). En la rizosfera, existe un flujo de compuestos exudados por la raíz, proporcionando condiciones ideales para el desarrollo de una gran variedad de microorganismos, mismos que a través de su actividad fisiológica, hacen posible la liberación y asimilación de nutrientes, para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Allen *et al.*, 1995; Ferrera-Cerrato y Alarcón, 2000). Por lo ello, es importante su estudio en ambientes tan extremos como las zonas con clima árido y semiárido en (Monroy *et al.*, 2009)

A lo largo del tiempo la asociación micorrícica ha jugado un papel clave en el desarrollo de las comunidades vegetales. En los ecosistemas actuales, la actividad de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) contribuye a la dinámica de su hábitat (Corkidi y Rincón, 1997; Klironomos *et al.*, 2000) y juega un papel muy importante durante todas las etapas de la sucesión ecológica (Corkidi y Rincón, 1997; Monroy *et al.*, 2009).

Los hongos micorrizógenos arbusculares han formado una asociación importante, que ha podido perdurar a través del tiempo, beneficiando a los hospederos en el soporte de condiciones cambiantes del ambiente, el aumento del área rizosférica, interacción con otros organismos y solubilización de nutrientes; la colonización de la raíz de la planta se da cuando está en contacto con el suelo y produce exudados que la comunican con las esporas o hifas en el suelo rizosférico (Estrada-Torres, 1998; Varma, 1999; Xoconostle, 2002; Monroy *et al.*, 2009).

3.3 Hongos micorrizógenos arbusculares

El segundo grupo con mayor número de especies entre los seres vivos, después de los insectos, es el de los hongos. Se estima que existen cerca de 1.5 millones de especies de hongos, de las cuales

sólo se han descrito 72000; aunque, cada año se registran cerca de 1500 nuevas especies. Los hongos son, por tanto, uno de los reinos biológicos menos conocido.

Los HMA surgieron antes de la colonización del medio terrestre por las plantas (fotótrofos) de hábitat acuático, ya que el origen de los HMA se ha establecido durante el Ordovícico, hace 460 millones de años (Montaño *et al.*, 2007). Asimismo, el hecho de que más del 90% de las plantas terrestres (fitobiontes) tengan uno o más de estos hongos asociados (micobiontes), muestra la eficiencia de esta asociación mutualista, su globalidad y la estrecha coevolución planta-hongo micorrícico, así como su relevancia en el reino vegetal. (Montaño *et al.*, 2007).

Los HMA establecen una asociación mutualista con las raíces de las plantas formando las micorrizas arbusculares (MA). En esta asociación, el hongo ofrece un beneficio a su hospedero a cambio de recibir carbohidratos, es decir, hay un beneficio mutuo producto de un intercambio bidireccional "hongo-planta": la planta suministra al hongo fuentes de carbono procedentes de la fotosíntesis (proceso que el hongo no puede realizar) y le brinda un hábitat en las células corticales de la raíz; mientras que el hongo le facilita a la planta la absorción de agua y nutrimentos como fósforo y nitrógeno, recursos del suelo que en condiciones extremas la planta difícilmente obtendría eficientemente sin la ayuda del hongo. Las micorrizas bien podrían representar el segundo componente más grande en biomasa en muchos ecosistemas terrestres; asimismo, se ha encontrado que los HMA asociados con las plantas, reciben entre el 10% y el 20% del carbono de los árboles, pudiendo ser un sumidero importante del carbono de la comunidad (Montaño *et al.*, 2007). En las plantas micorrizadas se produce un aumento del contenido de agua, debido a un incremento de la conductividad hídrica de la planta o a una disminución de la resistencia al flujo de agua a través de ella. Esto también puede ser debido a una mayor absorción a través de la extensa red de hifas externas de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), extendidas más allá de la zona a la cual tiene acceso directo el sistema radical. Así, la planta puede desarrollarse y permanecer regularmente hidratada y es capaz de recuperarse más rápidamente en caso de estrés hídrico (Cooper, 1984).

Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) se caracterizan porque el hongo que coloniza la raíz desarrolla una estructura en forma de un diminuto arbolillo en las células del parénquima radical, estructura llamada "arbúsculo" que es el sitio de intercambio entre la planta y el hongo. Además, el sistema micorrícico está formado por un conjunto de hifas (micelio) que están conectadas con el tejido de la raíz y que salen de ella ramificándose en el suelo. El micelio que se encuentra en el suelo forma una red de hifas capaces de interconectar a las raíces de plantas y de permitir el flujo de agua y nutrimentos entre las raíces de éstas. (Montaño *et al.*, 2007).

En esta segunda década del siglo XXI, se conocen con cierta precisión los servicios que brindan los HMA en los ecosistemas y en la agricultura, tales como la formación de suelo (disolución de rocas, enlace de partículas, etc.), fertilización del sustrato, estructuración de la comunidad vegetal (interacción planta-planta), producción secundaria (como fuente de alimento; e.g. esporas consumidas por nemátodos), modificación de contaminantes edáficos, y el almacenamiento de carbono mediante glomalinas (proteína sintetizadas por los HMA). Por su efecto sobre las plantas de interés agrícola o forestal, los HMA se usan como inoculantes de aplicación práctica en la agricultura y en programas de reforestación de los bosques. Al respecto, se ha documentado que las plantas

micorrizadas resisten mejor las condiciones adversas en el suelo, como son la falta de agua, de nutrimentos esenciales como el fósforo (P) y el nitrógeno (N) (los HMA proporcionan hasta un 80% y 25% del P y N requeridos por las plantas), el ataque de microorganismos fitopatógenos e, incluso, pueden proteger a sus hospederos de efectos nocivos producidos por contaminantes tóxicos. Por ejemplo, los HMA estimulan en las plantas hospederas, al formarse el HMA, un mayor tamaño y producción de semillas, a través de la incorporación de P y de otros nutrimentos, pero también favorece la resistencia a plagas y a la sequía. En el suelo, el micelio de los HMA participa en la formación de agregados por medio de la adhesión de partículas debida la glomalina, contribuyendo con esto a dar estructura y estabilidad al suelo, reduciendo la erosión y mejorando la capacidad de retención del agua por el suelo. Los efectos de los HMA a nivel edáfico y sobre las comunidades vegetales, son importantes para el mantenimiento de la diversidad vegetal y de los microorganismos del suelo, la productividad, y para la restauración de ecosistemas perturbados (Montaño *et al.*, 2007).

Hasta el 2007 se habían descrito ca. 250 especies de HMA. Asimismo, se considera que la diversificación de las ca. 300 mil especies vegetales existentes hoy, fue de manera simultánea con sus asociados fúngicos respectivos (Montaño *et al.*, 2007).

El estudio de las MA de ecosistemas desérticos es crucial ya que ellos albergan importantes bancos de inóculos de HMA que pueden ser usados para incrementar la supervivencia de plantas en suelos de baja fertilidad y con escasez de agua como las áreas secas degradadas y los suelos agrícolas.

Así mismo, es innegable que los HMA requieren mayor atención, particularmente en los países intertropicales, los cuales albergan un elevado número de endemismos vegetales (el primer lugar lo ocupa Sudáfrica y el segundo México) y en países con megadiversidad biológica donde nuevamente aparece México (Montaño *et al.*, 2007).

Una zona que ejemplifica esta situación es el Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, donde los recursos bióticos han sido utilizados continuamente desde la época prehispánica. En esta región coexisten especies leñosas de las familias Fabaceae, Agavaceae, Cactaceae y Liliaceae, con hierbas como gramíneas (Poaceae) y compuestas (Asteraceae), siendo las especies leñosas *Acacia farnesiana* (huizache o acacia) y *Prosopis Laevigata* (mezquite) las más dominantes de la región.

En los matorrales xerófilos, la mayor parte de las plantas forman micorrizas de tipo arbuscular (Carrillo-García *et al.*, 1999); las plantas viven bajo condiciones de estrés ambiental, producido por altas temperaturas y limitada disponibilidad de agua, por lo que en estos ecosistemas áridos y semiáridos, el establecimiento de la micorriza arbuscular (MA) es fundamental en la nutrición y tolerancia al estrés hídrico de los vegetales (Ferrera-Cerrato, 1993, 1995; Monroy *et al.*, 2006).

3.4 Clasificación de los hongos micorrizógenos arbusculares

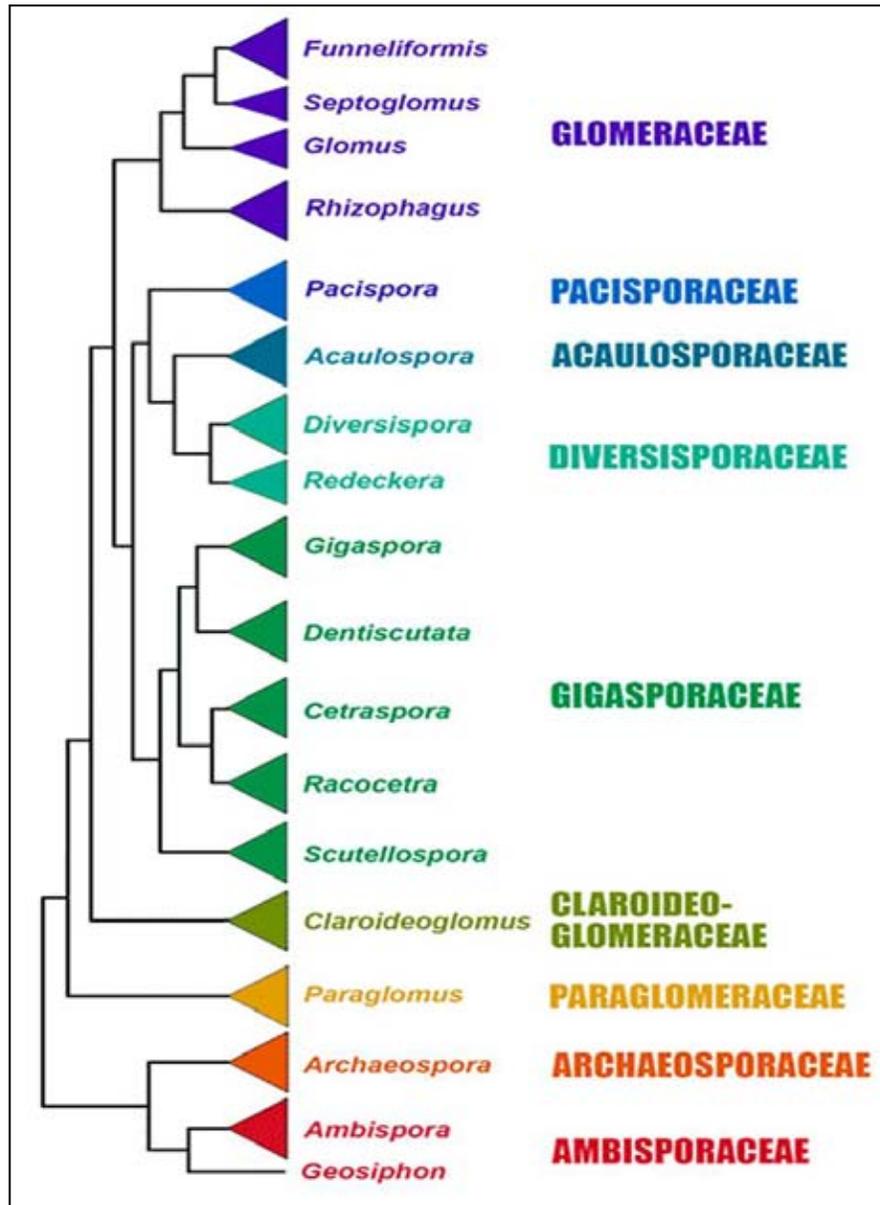
Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) son morfológica y fisiológicamente diferentes, así que es importante conocer su identidad. Aunque estos hongos tienen una amplia variedad de hospederos, son específicos en sus efectos sobre las especies vegetales, aun cuando existe poca evidencia de especificidad entre el hongo y la planta, se ha demostrado especificidad ecológica y

compatibilidad funcional entre simbioses. Ellos pueden variar en sus efectos dentro de cultivos de una sola especie de planta y diferir también su efecto en plantas que se encuentran en diferentes ecosistemas, tipo de suelo, e incluso en suelos con componentes biológicos, físicos y químicos similares (Varela y Trejo, 2001; Van Der Heijden *et al.*, 1998; Avio *et al.*, 2006).

La clasificación e identificación taxonómica de estos hongos, hasta 1995, se había basado solamente en criterios morfológicos de las esporas y esporocarpos. Los caracteres de las esporas como tamaño, forma, tipo de hifa germinal, pared de la spora y sus diversos estados de expresión; especialmente determinando el número de capas, tamaño, color, flexibilidad, reactividad histológica, ornamentación (murograma) son la base para la taxonomía a nivel de especie. Otros criterios han sido propuestos para identificarlos; como la descripción de la morfología de estructuras intraradicales tales como arbusculos, vesículas, presencia de células auxiliares, descripción detallada de la germinación y desarrollo ontogénico de las esporas. Actualmente se están utilizando técnicas bioquímicas y moleculares como herramientas adicionales para su identificación. México es un país con alta biodiversidad y con amplio conocimiento en plantas, animales y otros organismos; sin embargo, en el caso de los HMA se han realizado pocos estudios; sólo se han registrado 44 de alrededor de 200 especies formalmente descritas, las cuales provienen principalmente de 11 entidades federativas y la mayoría de zonas agrícolas, siendo mínimos los reportes que existen para comunidades naturales. Tal panorámica ofrece una visión del gran desconocimiento que existe de la riqueza de especies de hongos micorrizógenos arbusculares y de aquí su importancia por intensificar los estudios ecológicos y taxonómicos de estos organismos (Varela y Trejo, 2001; Guadarrama-Chávez *et al.*, 2007; Chimal *et al.*, 2009)

3.4.1 Clasificación del phylum Glomeromycota.

La clasificación más reciente de Glomeromycota se basa en un consenso de las regiones que abarcan los genes de ARN ribosomal 18S: (SSU), ITS1-5.8S-ITS2 (ITS) y / o 28S (LSU). La reconstrucción filogenética que subyace a esta clasificación se discute y se resume en Redecker *et al.* (2013).



Cuadro 1. Clasificación de *Glomeromycota* 2013.1

La publicación es el resultado de una reunión de los sistemáticos comprometidos para tratar de lograr una clasificación de consenso sobre la base de criterios claramente definidos para que sirvan de base para avanzar. Esta reunión fue organizada por Dirk Redecker en la sede BEG en Dijon, Francia, en abril de 2012.

3.5 Importancia de la microbiota del suelo

En el suelo, medio natural para el desarrollo de las plantas, habita una comunidad de microorganismos muy diversa, la cual se compone de algas, bacterias, arqueobacterias y hongos. Estos microorganismos junto con la mesofauna y la microfauna forman la biota.

Los organismos del suelo han sido divididos en tres grupos de acuerdo a su tamaño y su tipo de respiración: (1) Microfauna- constituida por animales que viven en el agua y que están entre las partículas del suelo, miden menos de 0.1mm (protozoarios, rotíferos y nemátodos); (2) Mesofauna- formada por animales que viven en el aire que se encuentran entre las partículas del suelo cuyo tamaño es de 0.1 a 2 mm, constituido por microartrópodos (Colembolos y Ácaros) y pequeños Oligoquetos y Enquitráeidas y (3) Macrofauna- animales de respiración aérea de más de 2 mm hasta 20 mm que se mueven activamente a través del suelo y que pueden elaborar galerías y cámaras en las cuales viven. A estos animales se les ha nombrado “ingenieros de ecosistemas” como son las lombrices, termitas y hormigas (Swift *et al.*, 1979; Fragoso *et al.*, 2001; Lavelle y Spain, 2001). Dentro de la microflora se encuentran 5 grupos: virus, bacterias, actinobacterias, hongos y algas (Alexander, 1980; Lavelle y Spain, 2001).

La raíz de las plantas superiores entra en una interacción no sólo con el ambiente inanimado, compuestos de sustancias inorgánicas y orgánicas, sino también con una comunidad de microorganismos metabólicamente activos. Se denomina rizósfera al ambiente que existe bajo la influencia bioquímica y biológica del sistema radical de las plantas, donde proliferan y compiten los microorganismos (Bolton *et al.*, 1987, Rosenblueth *et al.*, 2001). La rizósfera se divide a menudo en dos áreas, la rizósfera más interior localizada en la superficie de las raíces (endorrizósfera) y la exterior que corresponde al suelo adyacente (exorrizósfera) (Alexander, 1980).

Existen diferentes interacciones entre los microorganismos que viven en el suelo y los vegetales, ya sean como saprobios, simbioses, parásitos o simbioses mutualistas, estas relaciones tienen diferentes efectos ecológicos tanto perjudiciales (patógenos) como benéficos. La microbiota interfiere en la eficiencia de la captación de nutrientes en el vegetal, además de que su diversidad es esencial para garantizar los ciclos de los nutrientes, producen hormonas además de contribuir al control de patógenos y a los fenómenos de descomposición de la materia vegetal (Rosenblueth *et al.*, 2001). Por lo tanto la actividad microbiana es importante para mantener la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas (Álvarez-Solis y Anzueto-Martínez, 2004).

Para que la microbiota del suelo se encuentre activa fisiológicamente requiere de sustratos energéticos del suelo, por ejemplo residuos metabólicos de las plantas, entre los sustratos no específicos se encuentran los azúcares como la glucosa y la fructosa como los más abundantes. Por lo tanto los microorganismos van a buscar rodear la raíz. Las plantas depositan continuamente una gran variedad de compuestos en la rizósfera, proceso conocido como rizodeposición, como los compuestos que no requieren energía metabólica para ser liberados: azúcares, aminoácidos, flavonoides; compuestos que dependen de un proceso metabólico (enzimas) o de la autólisis de células viejas y gases como el etileno y CO₂. Dentro de los compuestos secretados por las plantas también se consideran el mucílago que consiste en polisacáridos (Bolton *et al.*, 1987).

La presencia de vida microbiana en la rizósfera genera mayor exudación por parte de la planta, una remoción de compuestos catabólicos, también se presenta lisis de células de la raíz, producción de hormonas, antibióticos que no permiten la permeabilidad de la membrana y a la inducción de la síntesis de diversos compuestos (Rosenblueth *et al.*, 2001). Los microorganismos no solo actúan directamente con las raíces o con las rizodeposiciones de las plantas, sino también entre ellos y la materia orgánica presente en la superficie del suelo, provocando una serie de beneficios para la misma planta, como es la mineralización, la inmovilidad y disponibilidad de diferentes nutrimentos (Srivastava, 1998; Nuñez *et al.*, 2001; Saetre y Stark, 2005).

Además de utilizar como sustratos energéticos el desecho de plantas perennes (como el del mezquite), también son útiles los de las plantas anuales. En el desierto de Chihuahua se ha visto que la composición química de las plantas es importante en el proceso de descomposición. En una prueba las poblaciones microbianas del suelo prefirieron usar el desecho de plantas anuales que el de las perennes anuales, probablemente como resultado de la cantidad y calidad del carbono (C) contenido (Nuñez *et al.*, 2001).

El clima y las diferentes condiciones están relacionados con la vida de los microorganismos. En los ecosistemas semiáridos la biomasa microbiana puede morir por prolongadas condiciones secas, esta biomasa muerta puede llegar a estar disponible para la comunidad microbiana sobreviviente después de la humedad de una lluvia esporádica. Un ejemplo son las reacciones que existen cuando llueve, en condiciones secas, para presentar un potencial bajo de agua los microorganismos acumulan solutos orgánicos en su citoplasma. En húmedo debe de haber un equilibrio en las concentraciones de solutos dentro y fuera de su membrana si no existe este equilibrio la membrana se rompe y el citoplasma junto con los compuestos orgánicos son liberados al suelo (Sastre y Stark, 2005). Entonces, la humedad del suelo juega un papel importante en la dinámica de la comunidad de los microorganismos, en su fisiología y por lo tanto en la mineralización, inmovilidad y disponibilidad de Nitrógeno y otros nutrimentos (Saetre y Stark, 2005).

Los microorganismos rizosféricos afectan al crecimiento y nutrición vegetal (Haselwandter, 1997) y un desequilibrio en sus funciones puede ocasionar la pérdida de una actividad sostenida. La sostenibilidad de un sistema agronómico y uno natural es dependiente de muchos factores pero se considera fundamental la estructura física y un equilibrio biológico óptimo (Azcón, 2000).

Dentro del equilibrio biológico se engloba la interacción que existe entre la planta, el suelo y todos los micro y macroorganismos edafológicos presentes en el sistema, incluyendo a los hongos micorrizógenos arbusculares, las diferentes bacterias, levaduras, nemátodos, etc. Se ha comprobado que para una mejor actividad microbiana heterotrófica es importante fortalecer las prácticas de manejo que restituyen la cantidad y calidad de las reservas orgánicas y cationes básicos del suelo. La actividad microbiana tiene interés agronómico debido a su potencialidad para reciclar los nutrimentos, mejorar la nutrición de las plantas y disminuir o sustituir la aplicación de fertilizantes de origen industrial (Álvarez-Solis y Anzuelo-Martínez, 2004).

Los microorganismos del suelo juegan un papel importante debido a su gran diversidad y funciones en el suelo, así como los beneficios sobre otros organismos por las interacciones que sostienen con

ellas, como por ejemplo está la interacción mutualista que se registra entre bacterias, hongos micorrizógenos y raíces (Lovera y Cuenca, 1996). La actividad y la diversidad de la microbiota además de condicionar la fertilidad del suelo, determinan la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas naturales (Alexander, 1980).

3.6 Importancia ecológica

Los hongos micorrizógenos arbusculares son abundantes en los suelos de muchos ecosistemas y pueden influenciar en la coexistencia de plantas directa o indirectamente. La vía directa incluye las modificaciones de las características de la planta por los HMA y la transformación de sus recursos. La vía indirecta incluye el posible impacto de los HMA sobre las interacciones ecológicas entre plantas y otros organismos, ej. Planta-herbívoro o planta-patógeno (Camargo-Ricalde, 2003). Los HMA brindan protección en condiciones de estrés como: patógenos de hábitos radicales, salinidad, sequía, acidez y elementos tóxicos. También colaboran en definir la diversidad vegetal y productividad en ecosistemas naturales así como en la estabilidad de los agregados del suelo (Rosenblueth *et al.*, 2001; Azcón, 2000).

El HMA capacita y faculta a la planta asociada para incrementar la capacidad de iones, principalmente de fosfato, el cual puede ser seis veces superior al que consigue en su ausencia. La concentración de fósforo (P) en el micelio fúngico es 1000 veces superior que en el suelo, ya que presenta mayor afinidad para la captación de P que la propia raíz (Azcón, 2000; Ferrol *et al.*, 2004).

También la simbiosis micorrízica favorece al incremento de la asociación con microorganismos fijadores de nitrógeno que en su fase de colonización inicial requiere la presencia de fósforo, como consecuencia se observa el incremento en la cantidad de nódulos y hay mayor ganancia de carbono. Se ha reportado que los HMA incrementan los azúcares y los aminoácidos de las plantas que crecen en sitios con bajos niveles de fosfato, esto se correlaciona con una mayor colonización del hongo (Rosenblueth *et al.*, 2001).

Los hongos micorrízicos arbusculares forman parte de la microbiota del suelo (Camargo-Ricalde, 2003). La actividad de otros microorganismos en la rizósfera afecta decisivamente el comportamiento de la simbiosis micorrízica (Guzmán-Plazola y Ferrer-Cerrato, 1990).

La dependencia de la planta por el hongo micorrízico arbuscular es influenciado por la morfología de las raíces así como de sus estrategias en su historia de vida (Shawn *et al.*, 2003). Las leguminosas como *P. laevigata* es un grupo de plantas predominantemente endomicorrízicas de hongos arbusculares (Guzmán-Plazola y Ferrera-Cerrato, 1990) y una de las razones puede ser por la morfología radical ya que son perenne-anales. Se ha visto que las plantas perenne anuales que tienen raíces primarias y secundarias gruesas dependen de las micorrizas, mientras que las plantas anuales efímeras que tienen raíces más delgadas y que su ciclo de vida es más corto, dependen menos de esta simbiosis (Shawn *et al.*, 2003).

Se ha encontrado que las plantas que no tienen una relación estrecha con los hongos micorrízicos son dependientes de las condiciones promovidas por plantas formadoras de islas de recursos, y aquellas donde sí existe una relación estrecha con estos hongos, como es el caso del mezquite,

puede ser planta nodriza o formadora de islas de recursos o de fertilidad y por lo mismo son reservorios de hongos micorrícicos disponibles para otras plantas (Carrillo *et al.*, 1999).

La influencia de la simbiosis en el desarrollo de las plantas varía según el genotipo de hongo y de la planta involucrada y la acción de factores del suelo como el pH, fósforo, nitrógeno, compactación, profundidad, textura, temperatura, retención de agua, etc., y del clima y la presencia de plaguicidas: además de la morfología y fisiología de la especie vegetal (Guzman-Plazola y Ferrera-Cerrato, 1990; Camargo-Ricalde, 2003; Ramírez-Gerardo *et al.*, 1997). Otros factores que determinan no solo la distribución sino la funcionalidad o efectividad de los HMA se relacionan con la vegetación dominante, la cual participa como reservorio de estos hongos, tal es el caso de *P. laevigata* en el Valle del Mezquital, Hidalgo.

Como se ha visto, los HMA ayudan a la planta en la absorción de nutrimentos, los cuales favorecen el aumento de la producción en biomasa vegetal, lo que implica una mayor superficie de contacto para los rayos solares en la planta maximizando la captación de CO₂, este gas se somete a un proceso fotosintético para convertirse en carbohidratos que aparte de beneficiar a la planta en su funcionamiento interno, beneficia a los HMA. Estos hongos también participan en varios procesos de agregación del suelo, como González-Chávez *et al.*, (2004) mencionan:

- ❖ Enlazamiento físico por desarrollo extensivo de las hifas externas en el suelo para crear un esqueleto estructural que participa en la adherencia de partículas del suelo.
- ❖ Enlazamiento químico, debido al mucigel (glomalina) que las hifas producen y excretan en las raíces colonizadas en el suelo.
- ❖ Creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de raíces e hifas externas.
- ❖ Envolvimiento de microagregados en macroagregados pequeños y la creación de la estructura del macroagregado.
- ❖ Protección contra los procesos de excesivo secado y humedecimiento de los agregados, debido al carácter hidrofóbico de la glomalina.
- ❖ Creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de otros microorganismos de la rizosfera involucrados en la formación y estabilidad de agregados.

Las raíces de las islas de recursos pueden mantener un alto contenido de humedad en la rizosfera ya que el sistema radical tiene contacto, bajo horizontes muy profundos, con lugares donde hay disponibilidad de agua que pone a disposición de la rizosfera por medio de rizodeposiciones como el mucílago, carbohidratos que se encuentran en la superficie de la raíz protegiéndole de una desecación estableciendo la estructura del suelo y manteniendo la conductividad hidráulica (Marschner *et al.*, 2002). Otra sustancia que influye en la estabilidad y estructura de los agregados

del suelo es la denominada glomalina, glicoproteína recalcitrante, la cual también participa en el almacenamiento de C en el suelo (Morales *et al.*, 2005). Se ha observado que valores altos de CO₂ estimula a que los hongos produzcan más glomalina, también se ha mencionado que los suelos con un pH ácido presentan el más alto contenido de glomalina, mientras que en suelos calcáreos hay poca glomalina (González-Chávez *et al.*, 2004; Morales *et al.*, 2005), ya que estos suelos pueden presentar deficiencia de Fe; agua; producción de materia orgánica; además el pH es alcalino, por lo que las condiciones ambientales son más limitativas para el desarrollo de los hongos (Alexander, 1980). Es importante señalar que la cantidad media de glomalina se asocia significativamente a la densidad de micelio, raíz total y colonizada, y superficie de cobertura vegetal (Cornejo, 2006).

La glomalina pertenece al grupo de las glicoproteínas, tiene aproximadamente 60% de carbohidratos. Se ha reportado que la vida media de la glomalina puede ser de 7 a 42 años; siendo mayor a la vida media de diferentes productos del suelo de origen microbiano. De esta manera, esta molécula al estar fuertemente atrapada dentro de micro y macroagregados, representa un importante reservorio de C en el suelo (González-Chávez *et al.*, 2004; Rice *et al.*, 2004). Esta acumulación ocurre porque los residuos orgánicos son encapsulados por arcilla, limo y bioproductos protectores durante el proceso de agregación, así, los productos carbonados se protegen de la acción degradativa de microorganismos, donde la glomalina recubre los residuos orgánicos, lo que impide su rápida degradación. Debido al alto contenido de C recalcitrancia, hidrofobicidad y fácil producción, la glomalina representa una fuente de secuestro de carbono en el suelo.

El secuestro o captura del C se ha relacionado a la temática de la calidad del suelo ya que se considera que una de las principales consecuencias de la degradación del suelo es la pérdida de las reservas orgánicas del suelo. Por lo que esta captura de carbono, además de contribuir a restablecer los reservorios de este elemento en el suelo, ayudaría a disminuir la concentración de CO₂ en la atmósfera, responsable, en parte del cambio climático y del calentamiento global (Etchevers *et al.*, 2000).

La captura de carbono, es importante ahora más que antes por el gran contenido de gases de efecto invernadero de los cuales el CO₂ es el que se encuentra en mayor proporción en la atmósfera, a consecuencia de la utilización de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático estima que el secuestro de C del suelo es las tierras de cultivo en los suelos puede eliminar entre el 40 y 80 miles de millones de toneladas de C que en el próximo siglo. Esto significa que el secuestro de C del suelo podría compensar las emisiones de combustibles fósiles (Rice *et al.*, 2004).

Es por todo esto que los HMA son utilizados en programas de conservación, recuperación o restauración de zonas degradadas, erosionadas o perturbadas (Allen, 1999; Monroy, 2002; Montaña, 2007; Caravaca *et al.*, 2003; Cornejo, 2006). Para estos fines la utilización del inóculo micorrízico junto con estrategias de recuperación vegetal, como la técnica de recuperación “por parches”, han sido alternativas adecuadas en zonas semiáridas (Allen, 1999; Ferrol *et al.*, 2004).

3.7 Efecto de los HMA sobre el crecimiento de las plantas

En 1985, Fitter reportó que las micorrizas juegan un papel importante en el establecimiento y crecimiento de las plántulas de especies arbóreas y que en la etapa adulta ayudan a incrementar la tasa de fecundidad y el área fotosintética, así como la incorporación de nutrimentos a la planta (Smith y Read, 1997).

El efecto más importante en las plantas es un incremento en la absorción de nutrimentos minerales del suelo (Reyes-Quintanar, 2000). Así mismo, el papel de la simbiosis es fundamental en la captación de elementos minerales de difusión lenta en el suelo, como el fosfato, el zinc y el cobre (Marschner, 2002). También, los HMA incrementan la tolerancia a la sequía (Cui y Nobel, 1992) y se vuelven necesarios para el crecimiento y supervivencia de las plantas en el desierto, debido a que la simbiosis provee a la planta de agua extraída del suelo a través de hifas extraradicales, que actúan como una extensión natural del sistema radical de la planta (Alarcon y Ferrera-Cerrato, 2000).

Los HMA son abundantes en los suelos de muchos ecosistemas y pueden influenciar en la coexistencia de plantas directa o indirectamente. La vía directa incluye las modificaciones de las características de la planta por los HMA y la transformación de sus recursos. La vía indirecta incluye el posible impacto de los HMA sobre las interacciones ecológicas entre plantas y otros organismos.

Los HMA incrementan los azúcares y los aminoácidos en las plantas que crecen en sitios con bajos niveles de fosfato, esto se correlaciona con una mayor colonización del hongo (Rosenblueth, 2001).

3.8 Restauración ecológica

La restauración ecológica se utiliza para recobrar ambientes degradados; ésta es posible si existen fragmentos de ecosistemas que puedan ser unidos, para mantener los procesos ecológicos que en él se desarrollan y conservar su biodiversidad. En este sentido, la utilización de hongos micorrizógenos arbusculares es una herramienta, con la que se podría acelerar el proceso sucesional (Siqueira *et al.*, 1998) y determinar la dirección de este después de un disturbio (Evans y Miller, 1990).

La restauración ecológica, según la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica, consiste en *“asistir a la recuperación de ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos”*. El objetivo de la restauración ecológica es la conservación y reposición del capital natural, así como la restitución de los servicios ecosistémicos para su disfrute y aprovechamiento por parte de la sociedad. Se distingue de otras prácticas que persiguen objetivos afines en que sus actuaciones se orientan hacia un referente histórico, inciden sobre procesos ecosistémicos que regulan flujos de recursos limitantes, y se implementan de acuerdo con modelos de gestión adaptativa. Para que la restauración ecológica sea realmente ecológica debe realizarse desde una aproximación holística, que contemple conocimientos ecológicos científicamente contrastados, criterios socioeconómicos, el contexto cultural en el que se realiza la intervención, e incluso la emoción y la sensibilidad de cada uno de los pobladores y usuarios de los ecosistemas o paisajes a restaurar.

La restauración ecológica puede detener el proceso de deterioro del suelo, por medio del establecimiento de una nueva cubierta vegetal (Vázquez y Batis, 1996). Sin embargo, una apropiada reintroducción del mosaico de vegetación debe tomar en cuenta la relación con simbiontes del suelo, además de la selección de micrositios en suelos que favorezcan un rápido crecimiento de las raíces y el establecimiento vegetal (Bainbridge, 1990). En estas simbiosis, los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) desempeñan un papel determinante, cuya importancia radica en incrementar la biomasa de la planta (Sieverding, 1991), modificar las interacciones competitivas (Sylvia, 1990; Allen, 1991, 1994), acelerar el proceso sucesional (Evans y Miller, 1990; Fisher *et al.*, 1994), incrementar la resistencia a la sequía (Roldán-Fajardo, 1994), aumentar la funcionalidad en la adquisición de nutrimentos, principalmente fósforo (Gange *et al.*, 1993), proporciona mayor protección contra patógenos, además de incrementar la resistencia contra diferentes tipos de estrés (Nakano *et al.*, 2001; Guttenberger, 2000) (Chimal y García, 2009).

La inoculación de HMA puede incrementar la supervivencia de plantas en suelo de baja fertilidad y baja actividad biológica, en áreas degradadas donde la cobertura vegetal es escasa y la densidad de los propágulos de los hongos es baja. En la mayoría de los sistemas de producción de plantas se ha acudido a la utilización de inoculante a base de esporas en suelo y raíz, suelo-inóculo, o raíces colonizadas por los HMA (Alarcón, 2004).

Cuando se busca recobrar los ambientes degradados, se pueden utilizar tres técnicas:

1. La restauración, con el fin de llegar a la condición original del sitio.
2. La rehabilitación donde se incluyen algunas especie exóticas para superar la degradación (con fines ecológicos y económicos).
3. La recuperación, donde se utilizan solo especies exóticas (Lamb *et al.* 1997, Reynolds, 2001).

Los inoculantes pueden ser elaborados mediante el uso de los diversos acarreadores los cuales se clasifican en tres principales categorías:

1. Sustratos orgánicos: turba, carbón activado, arcillas y suelo.
2. Compostas y vermicompostas obtenidas a partir de estiércol de animales, aceites de soya y cacahuete, fibra de trigo y otros desechos vegetales.
3. Materiales inertes: vermiculita, zeolita, agrolita, roca fosfórica, sulfato de calcio y alginatos.

3.9 Establecimiento de plantas

El establecimiento puede ser definido como aquellas plántulas que después de germinar no dependen de sus hojas cotiledóneas donde están contenidas sus reservas y que son capaces por si mismas de fotosintetizar compuestos orgánicos (Torres, 2005).

El establecimiento de especies nativas en sitios degradados sirve para regenerar las características de biodiversidad y prevenir el proceso de erosión y desertificación de zonas semiáridas, por lo que el desarrollo rápido de un sistema radical suficiente para tomar agua y nutrimentos para la plántula, es

una prioridad más que el desarrollo del vástago, para que las plántulas alcancen el establecimiento (Orozco, 1993).

Existen factores que afectan el crecimiento de las plantas, como las condiciones ambientales que es considerada como el más importante en el establecimiento. La temperatura y la humedad son dos elementos que mayor influencia tiene en la germinación y el desarrollo subsecuente de las plántulas (Orozco, 1993)

Existen básicamente tres condiciones que garantizan el éxito en establecimiento de las plántulas: plántulas vigorosas, competencia reducida y ambientes favorables. Aunque no es necesario que se cumplan las tres condiciones, ya que dependerá del ambiente y de las posibilidades para modificarlo (Orozco, 1993)

Una vez que la planta inicia su establecimiento, los factores ambientales juegan un papel importante para su posterior desarrollo y están estrechamente relacionados con el éxito de su establecimiento, dependiendo de la especie y de las características ambientales de su hábitat será el factor que tome mayor jerarquía dentro de la dinámica de establecimiento. En esta fase el mayor riesgo de mortalidad suele ser la desecación, el ataque de patógenos, la depredación y la competencia inter e intraespecífica.

Los hongos micorrizógenos arbusculares contribuyen con el aumento en el crecimiento de especies nativas de matorral en un corto tiempo, el cual cambia al crear un medio ambiente más favorable para el desarrollo del proceso del ecosistema. Es por ello que es necesaria una simbiosis micorrícica para el éxito en el establecimiento y crecimiento de plantas en un área degradada (Caravaca *et al.*, 2003).

4. *Prosopis laevigata*

Nombre científico: *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) Johnst. (M.C)

Nombre común: "Mezquite" (México), "Thaco" (Bolivia) Variedades: *P. laevigata* var. *andicola* Burk.

Familia: Fabaceae (Leguminosae: Mimosoideae)

Las plantas del género *Prosopis*, comúnmente llamados mezquites, son abundantes en muchas regiones de América y con frecuencia son el único elemento leñoso de la vegetación en las zonas áridas y semiáridas (Rzedowsky, 1988; Vázquez *et al.*, 2001). Evaluaciones de la SARH en 1984 citadas en López (2001), estimaron una superficie de 4'092,178 hectáreas ocupadas por mezquite. Por su parte, Maldonado y de la Garza (2000) calcularon una extensión de 3.5 millones de hectáreas distribuidas principalmente en el norte de México.

De las nueve especies de mezquite reconocidas para nuestro país destaca *P. laevigata* (Rzedowsky, 1988, Palacios *et al.*, 2000), especie típica del centro de México (Villanueva, 1993, Maldonado y De la Garza, 2000).

Anteriormente, los bosques de mezquite o mezquiales ocupaban amplias extensiones del país, en la actualidad las poblaciones están muy diezmadas y alteradas por el ser humano, debido a los aprovechamientos extensivos de la especie (muchas veces clandestinas) y a la apertura de nuevas áreas de cultivo. La perturbación da lugar a posteriores áreas improductivas, dado que las condiciones climatológicas prevaecientes no son aptas para obtener, a través de los cultivos tradicionales, producciones satisfactorias y mucho menos redituables, por lo que posteriormente estas áreas son abandonadas (Signoret, 1970; Villanueva, 1993; CONAZA, 1994). Por ejemplo, en la zona media y altiplano potosino de una superficie de 193'800 hectáreas con mezquite, se ha perdido una superficie de 100 mil hectáreas en un lapso de 35 años, y de las existentes, sólo 14 mil hectáreas se pueden considerar como mezquiteras puras (Ramírez y Villanueva, 1991).



Figura 1. Árbol de *Prosopis laevigata* imagen tomada de la página de internet ver árboles [2].

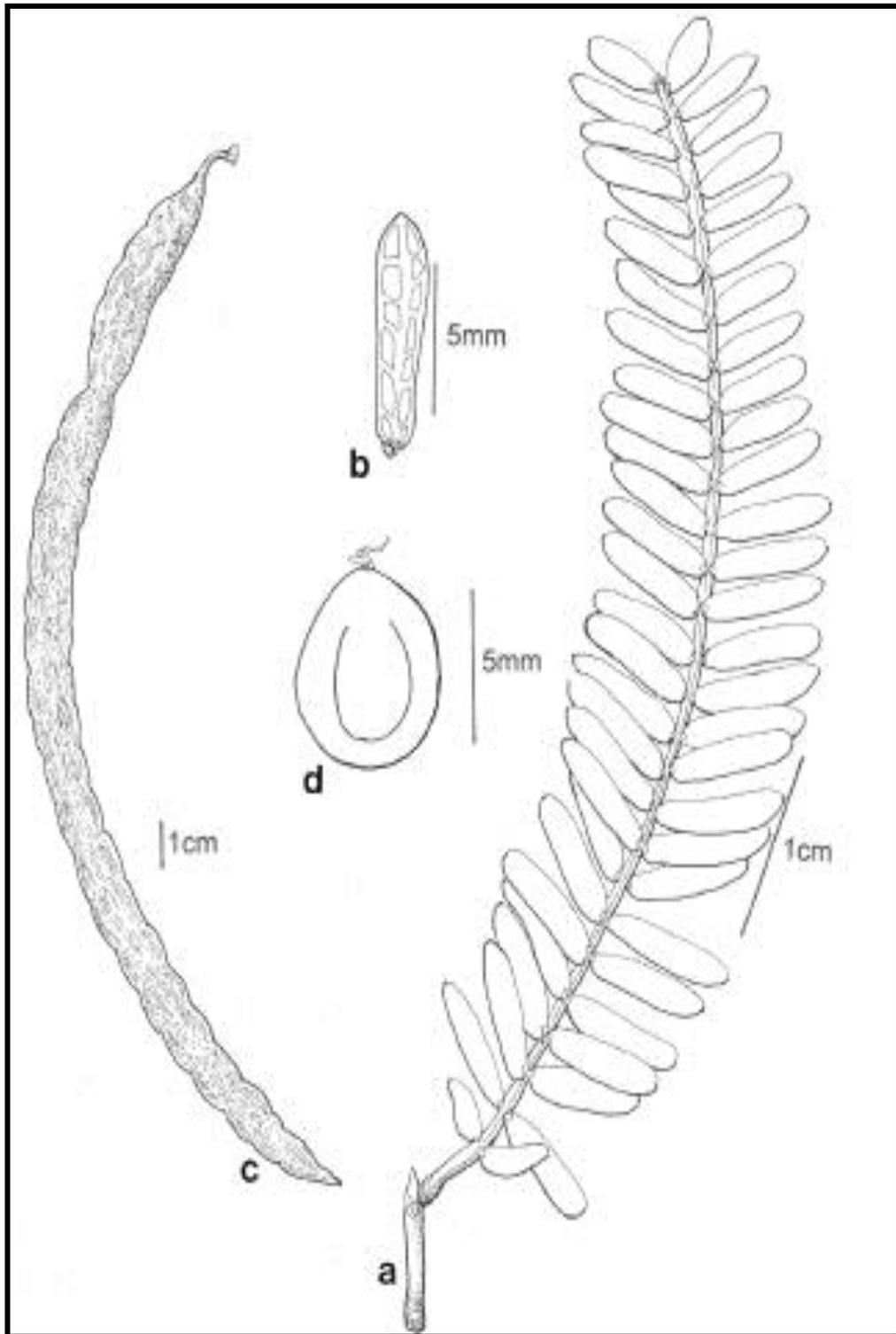


Figura 2. *Prosopis laevigata*: a. pinna; b. foliolo; c. fruto; d. semilla. (R. Palacios 3056). Imagen tomada de Palacios (2006)

4.1 Descripción botánica de *Prosopis laevigata*.

Árboles o arbustos, generalmente armados de púas o espinas; estípulas pequeñas, espinosas o ausentes, hojas bipinnadas, las glándulas del peciolo y del raquis pequeñas o ausentes, folíolos pequeños, en número variable; flores reunidas en espigas o racimos auxiliares, rara vez forman cabezuelas; flores pequeñas, pentámeras, de color amarillento; cáliz acampanado y brevemente dentado; pétalos unidos muy cerca de la base, valvados; estambres 10, libres, brevemente salientes, anteras con una glándula pequeña y decidua en el ápice; ovario sésil o estipitado, multiovulado, estilo filiforme, estigma pequeño y terminal; legumbre linear, recta o falcada, a veces enroscada, comprimida o túrgida, indehiscente, el exocarpo delgado o coriáceo, el mesocarpo esponjoso o endurecido y el endocarpo cartilaginoso o papiráceo; semillas ovaladas o comprimidas. Se conocen más de 20 especies de las regiones tropicales y subtropicales del Globo, en el Valle de México una sola (Rzedowski, 2001).

Prosopis laevigata (Willd.) M:C: Johnst. Árbol o arbusto, a veces hasta de 12 m de altura, aunque generalmente menor; tronco hasta de 1 m de diámetro, por lo general de 30 a 60 cm, corteza gruesa, de color café-negruzco, algo fisurada; copa más ancha que alta; ramas glabras o pilosas, armadas de espinas estipulares de 1 a 4 cm de largo; hojas pecioladas, con 1 a 3 pares de pinnas, cada una con 10 a 20 pares de folíolos sésiles, oblongos o linear-oblongo, de 5 a 15 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, ápice obtuso, margen entero, base obtusa, glabros o ligeramente pubescentes; flores dispuestas en espigas densas de 5 a 10 cm de largo; flores blanco-amarillentas, sésiles o casi sésiles; cáliz de 1 mm de largo, glabro o puberulento; corola de 2.5 a 3 mm de largo, pétalos agudos, tomentulosos en el margen y en el interior, estambres de 4 a 5 mm de largo; legumbre linear, algo falcada, de 7 a 20 cm de largo por 8 a 15 mm de ancho, comprimida, glabra, de color café-amarillento, a veces rojizo, algo constreñida entre las semillas; éstas oblongas, comprimidas, de 8 a 10 mm de largo, de color blanco-amarillento. “Mezquite”. Se encuentra en el fondo del Valle de México y en las laderas bajas, entre 2250 y 2400 m de altitud en sitios con pastizal y matorral. Se ha colectado en la Sierra de Guadalupe y en la delegación de Xochimilco. Fuera de la región de estudio se conoce de Durango, San Luis Potosí y Tamaulipas a Oaxaca (Rzedowski, 2001).

4.2 Bioecología de *Prosopis laevigata*.

Es una planta freatófita, el crecimiento se encuentra íntimamente relacionado con la profundidad del suelo y la disponibilidad de agua en el subsuelo. Por tal motivo, los ejemplares que alcanzan mayor altura y grosor del fuste, se localizan en valles con suelos profundos, así como en los márgenes de ríos y arroyos, alrededor de los cuerpos de agua y en sectores con drenaje de los escasos escurrimientos en zonas áridas y semiáridas.

La especie se desarrolla en zonas templadas, áridas y semiáridas, donde son muy comunes las temperaturas extremas, las cuales varían entre 0 y hasta 48 °C, y la temperatura media anual está alrededor de 18°C. Las precipitaciones son escasas, en algunas ocasiones son inferiores a 100 mm. La humedad relativa es baja y la insolación es alta, y los vientos en la época invernal son muy fuertes. El período de lluvias es corto, de 2 a 3 meses, con presencia de heladas. Prospera mejor en suelos arenosos profundos de buen drenaje. Se distribuye en las partes bajas, que por lo general tienen un alto contenido de sales. Los tipos de suelos son “Sierozem” y Chest nut, bien drenados,

profundos, con alto contenido de arena, aunque también se desarrolla en suelos arcillosos. Es tolerante a la salinidad. Se localiza desde los 8 hasta los 2.050 msnm. En algunos lugares, como en la costa de Sonora, se encuentra cerca del nivel del mar.

Si se presenta en terrenos poco profundos de laderas, el tamaño de la planta es más reducido, lo que indica que para su desarrollo requiere la extracción de cantidades considerables de agua. La floración se presenta en los meses de extrema sequía, de marzo a mayo. La producción de frutos ocurre entre octubre y diciembre. Se presentan variaciones dependiendo de la ubicación geográfica y de las condiciones climáticas.

En condiciones naturales, la semilla y los frutos son susceptibles de ser dañados por insectos que depositan sus huevos y desarrollan sus larvas en las semillas, provocando una disminución en la cantidad y calidad del producto. Éste es uno de los principales daños que se ha registrado (Cedillo-Mayoral, 1997).

4.3 Origen y distribución de *Prosopis laevigata*

Es oriundo de regiones áridas y semiáridas del sur y sureste de los Estados Unidos y México.

Es un árbol o arbusto que se encuentra en forma natural formando parte del matorral espinoso "Desert-Scrub" o "Selva baja espinosa subcaducifolia", así como en laderas riolíticas o en terrenos aluviales con vegetación muy alterada.

También se distribuye en forma aislada, entremezclado con plantíos o cultivos anuales, como maíz y alfalfa. El mezquite (*Prosopis laevigata*) se distribuye en México desde el Estado de Sonora hasta el Estado de Oaxaca, pasando por todos los estados del centro, este y oeste. De acuerdo a la clasificación de la FAO, el mezquite se localiza en las zonas desérticas y semidesérticas, formando parte de la vegetación de árboles poco densos y arbustos desde el nivel del mar hasta los 2050 msnm (Cedillo-Mayoral, 1997).

4.4 Usos de *Prosopis laevigata*

Desde tiempos ancestrales hasta la actualidad, esta especie ha sido un recurso natural de importancia para los habitantes de las zonas áridas y semiáridas del país (e.g. Valle del Mezquita, Hidalgo y Altiplano Potosino) debido a sus múltiples usos (alimenticio, forrajero, forestal, medicinal, entre otros), así mismo, su madera es utilizada para parkets, para mangos de herramientas, hormas para zapatos en escala industrial, la leña para postes y cercos y el carbón es de alta calidad por su elevado poder calorífico. Las hojas y frutos se utilizan como forraje para el ganado, ya que tienen un alto valor nutritivo.

De la corteza se extraen sustancias curtientes. Diversos estudios realizados le atribuyen algunos usos medicinales. Las vainas son aprovechadas como forraje para el ganado. La harina obtenida de los frutos se puede mezclar con harina de maíz, alfalfa, zacate, harinolina, salvado, alfalfa molida, pasta de cacahuete o linaza. La harina del mezquite tiene una proporción de 20 a 60% del total,

cuando se usa para forraje. También es apreciado como planta melífera y para la obtención de gomas, para usos farmacéuticos; (Cedillo-Mayoral, 1997).

De acuerdo a un estudio realizado en México, se sabe que el aprovechamiento alcanzó un valor total de 35,2 millones de pesos (equivalente a 2.8 millones de dólares americanos), en un lapso de diez años en el período de 1956–1965, siendo el carbón el producto que representó el 57% del total de la producción. Aunque el valor más alto se obtuvo de la producción del carbón, se considera que el producto más valioso del mezquite es el fruto, pues contribuye a reducir el costo de la alimentación del ganado. Cuando se pierden cultivos como maíz, frijol, trigo, o se reduce la porción de palma, lechuguilla o la obtención de cera de candelilla, los campesinos de las zonas áridas y semiáridas se dedican a la recolección de frutos. Es de gran importancia desde el punto de vista socioeconómico. En Sonora, México, se usa como alimento del ser humano y forrajes para animales (Cedillo-Mayoral, 1997).

Varios productos se obtienen de esta especie. La madera compacta y pesada se utiliza como combustible y en la elaboración de carbón de excelente calidad, en construcciones rurales, para mangos para herramientas e implementos agrícolas, decoración y acabados interiores, parquet, artículos torneados, hormas para zapatos y carpintería en general.

La goma que exuda el tronco tiene propiedades semejantes a las de la goma arábica y en algunos lugares la usan para fabricar dulces y pastas, así como para aprestar tejidos en la industria textil. Diluida en agua constituye un mucilago de excelente calidad. En farmacia se utiliza para dar viscosidad a las mezclas que contienen polvos insolubles y pesados.

Las vainas y las semillas molidas convertidas en harina se emplean como complemento alimenticio. Los frutos tiernos constituyen un excelente forraje.

La infusión que se obtiene del cocimiento de las hojas se utiliza en medicina casera como remedio para la inflamación de ojos.

La corteza contiene tanto tanino y se aprovecha para curtir pieles y en medicina doméstica como astringente.

Las flores constituyen una fuente valiosa de néctar para la producción de miel de alta calidad.

En algunos lugares esta especie se ha utilizado con fines de reforestación en zonas áridas y semiáridas, así como para fijar arenas movedizas por la propiedad que tienen las raíces de extenderse y penetrar a gran profundidad (Niembro, 1990).

4.5 Silvicultura y manejo de *Prosopis laevigata*

La información que se tiene en México es de poblaciones naturales. Se han elaborado estudios para conocer la extracción y producción de madera para diversos usos, así como datos de producción de frutos y semilla, en áreas de vegetación natural (Cedillo-Mayoral, 1997).

4.6 Influencia del ser humano sobre *Prosopis laevigata*

La influencia humana sobre la vegetación natural de México resulta en general altamente destructiva. Este proceso de devastación data sin duda desde la misma llegada del hombre al territorio de la república, pero sus agentes motores de mayor importancia han sido la colonización progresiva del país, el origen de la expansión de la agricultura, así como el desarrollo de la ganadería, de la explotación forestal y en buena parte también de la minería.

Los métodos de destrucción y perturbación de la vegetación han sido diversos, algunos de ellos de impacto directo y otros indirectos. Entre los primeros, cabe mencionar como principales: el desmonte, el sobre pastoreo, la tala desmedida, los incendios y la explotación selectiva de algunas especies útiles. Los segundos tienen que ver principalmente con la modificación o eliminación del ambiente ecológico necesaria para el desarrollo de una determinada comunidad biótica, causando su desaparición automática; aquí puede citarse, entre otras, la erosión o al cambio de las características del suelo, a las modificaciones del régimen hídrico de la localidad y a veces del clima mismo y a la contaminación del aire y agua.

Las modificaciones de la cubierta vegetal que han determinado en México las actividades humanas en general no son aun tan profundas como las causadas en algunas partes de la Tierra, que han sido densamente pobladas desde hace muchos siglos. Sin embargo, la situación varía notablemente de una región a otra y cabe observar que sobre todo en los últimos cuatro lustros la destrucción y la perturbación de la vegetación natural en este país han alcanzado intensidad y rapidez inusitadas.

Los factores que propician este incremento exponencial de las actividades devastadoras del hombre son similares a los que han estado y están operando en otras regiones de la Tierra. En general las vegetaciones del clima árido es la que menos ha sufrido por efecto de la mano del hombre. Salvo las restringidas áreas de riego, la agricultura, en general, no puede practicarse con éxito en estas zonas y el principal aprovechamiento de la tierra es a base de la ganadería, más bien raquílica, dada la escasez de agua y de alimento para los animales. El fuego en las zonas áridas se emplea muy poco, pues el incendio no se propaga fácilmente en los matorrales xerófilos abiertos y menos aun cuando en su composición entran plantas suculentas. El aprovechamiento de las plantas silvestres en algunas áreas ha causado modificaciones en la vegetación, es el caso, por ejemplo, de individuos arborescentes de *Prosopis* ("mezquite") son con frecuencia los únicos representantes de esta forma biológica en las regiones de clima seco y, en consecuencia, muy apreciados como material de construcción y como combustible, por lo que han desaparecido amplias extensiones.

El matorral micrófilo de *Prosopis laevigata*, que cabe diferenciar del bosque en que predomina la forma arbórea de la misma especie, es característico de algunas zonas de suelo aluvial profundo en la Altiplanicie Mexicana. También este matorral es de los más tolerantes a condiciones de deficiencia de drenaje y de cierta salinidad en el suelo. Tiene distribución discontinua y con cierta frecuencia presenta un estrato inferior perenne bien desarrollado de la gramínea *Sporobolus wrightii* o bien *Suaeda* y *Atriplex* y a veces también de *Maytenus phyllanthoides*; estos últimos indicando franco exceso de sales solubles.

Los arbustos altos que con frecuencia acompañan a *Prosopis* son especies de los géneros *Celtis*, *Koerbelinia* y *Opuntia*, con lo cual éste se constituye manifiestamente en matorral espinoso (Rzedowski, 1983).

5. Justificación

Los HMA han sido utilizados como inóculo de plantas para lograr su establecimiento en condiciones naturales, siendo especialmente útiles en prácticas de restauración ambiental de ecosistemas degradados o en proceso de desertificación. Así mismo se ha demostrado la eficiencia de los HMA para favorecer el establecimiento de plantas en condiciones de invernadero y posteriormente en campo.

Dado lo anterior, es importante conocer más acerca de la ecofisiología, biología, ecología y evolución de los HMA, especialmente en zonas áridas y semiáridas, y también por el potencial de aprovechamiento de estos ambientes mediante su restauración ecológica, principalmente en áreas afectadas de México. *Prosopis laevigata* es dominante en el Valle del Mezquital, Hidalgo, pero su distribución actual está restringida por sobre-explotación.

6. Problemática

En este trabajo se plantea responder las siguientes preguntas:

¿La inoculación de HMA en plantas de *Prosopis laevigata* aumenta significativamente su tasa de crecimiento relativo?

¿La micorrización de *Prosopis laevigata* cambia significativamente el cociente de biomasa radical/biomasa aérea?

7. Hipótesis

Las plantas que tienen una asociación con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), tendrán una tasa de crecimiento relativo más elevada y una mayor biomasa, entonces si se inoculan plántulas de *Prosopis laevigata* se espera una tasa de crecimiento relativo mayor respecto a las plantas testigo y un cociente biomasa radical/biomasa del vástago mayor.

8. Objetivos

Objetivo general

Caracterizar el desarrollo de plantas de *Prosopis laevigata*, inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares en condiciones de invernadero durante 320 días, a fin de compararlas con testigos no micorrizados.

Objetivos particulares

- ❖ Registrar la altura, cobertura, número de hojas (pinnas), de *Prosopis laevigata* inoculadas con HMA durante 44 semanas.
- ❖ Registre después de 320 días la tasa de crecimiento (TCR), biomasa radical y biomasa aérea (R/S), potencial hídrico caulinar.

9. Zona de estudio

El Valle del Mezquital, se encuentra situado en el occidente del estado de Hidalgo (20° 02' de latitud N y 99° 15' de longitud W) y es la región más grande, abarcando de norte a sur, desde Zimapán hasta Tepeji del Río y de oriente a poniente, desde Actopan, El arenal y Tlaxiaca, hasta Tecozautla, Huichapan y Nopala (Tranfo, 1989). Está situado en la meseta mexicana, a 60 Km de la ciudad de México, con una altitud entre 1,640 m y 2,400 m msnm. El Valle del Mezquital tiene una superficie de 822 mil hectáreas y está conformado por 29 municipios de los 84 que componen el estado de Hidalgo (Tranfo, 1989). El Valle del Mezquital ocupa el 40% de la extensión hidalguense (Gómez-Lorence *et al.*, 1970).

En general el clima del Valle del Mezquital es templado a seco, de tipo semidesértico, el periodo de precipitación pluvial se presenta a final del verano (Julio, Agosto y Septiembre), pero a veces es irregular y la media anual, en promedio, es baja, alrededor de 400 mm, de modo que el grado de humedad es bajo, lo que explica la resequedad del medio ambiente. La precipitación es el elemento de mayor importancia en la economía de la zona, ya que es el factor limitante de éstos ecosistemas.

En el Valle del Mezquital, ha habido un aprovechamiento inadecuado de los recursos naturales. La erosión es la causa principal de la alteración del suelo, y la destrucción de la vegetación originada por factores como:

- a) Desmonte de los cerros para la agricultura, talando y quemando la vegetación existente, situación que se agravó por tratarse de cultivos de temporal y en laderas de cerros, acelerándose éste proceso con la introducción del arado.
- b) Industria minera que consumía madera en gran cantidad.
- c) Leña para el hogar.

A las causas anteriores se añade el sobrepastoreo en algunos sitios, por lo cual el cambio de la vegetación alteró fundamentalmente las condiciones ecológicas, produciendo efectos sobre el suelo y consecuentemente la falta de retención del agua y la invasión de estos sitios por nopales y magueyes (Gómez-Lorence *et al.*, 1970). El municipio de Santiago de Anaya, se ubica en el Valle del Mezquital, la localización se da entre los paralelos 20° 24'30'' de latitud Norte y 98° 58'26'' de longitud Oeste, a una altitud de 2104 m.s.n.m. Limita al Norte con los municipios de Cardonal, Ixmiquilpan y Meztitlán, al Sur con San Salvador y Actopan; al Oeste con la sierra de Actopan. Tiene 36,610 hectáreas de superficie total, la cual tiene como principales actividades la agricultura de

temporal y la práctica de la ganadería extensiva con ganado caprino-ovino. El clima es BS1 k (w'') w(i') g', semiárido templado, con lluvias en verano y un periodo de sequía interestival. La temperatura media anual oscila entre 16° y 20° y 550 mm de precipitación media anual. Según Duran (2008) alrededor del 50% de la vegetación que corresponde a matorrales xerófilos, tiene un alto grado de deterioro.

Por su ubicación geográfica y diversidad vegetal, el Valle del Mezquital Hidalgo, es una región importante para realizar estudios sobre las interacciones HMA - vegetación, puesto que son escasos los reportes en la zona sobre la biodiversidad de estos organismos fúngicos; además, otro factor importante de la región es que sus pobladores dependen de los recursos vegetales para su sustento, lo que ha provocado que los matorrales xerófilos estén sobre-explotados y fragmentados, por el cambio del uso de suelo para fines agrícolas, que a su vez se deterioran más por el uso de aguas residuales para el riego de cultivos (Chimal y López, 2009).



Figura 3. Mapa del estado de Hidalgo, México [3].

10. Metodología

El trabajo se dividió en tres partes: Trabajo de campo, trabajo de invernadero y trabajo de laboratorio.

10.1 Trabajo de campo

Se realizaron tres salidas a campo (Valle del Mezquital), para recolectar semillas de *Prosopis laevigata* y suelo.

Las semillas de *Prosopis laevigata* fueron recolectadas al azar, provenientes de individuos sanos libres de plagas y con abundancia de frutos.

10.2 Trabajo de invernadero

10.2.1 Germinación de semillas.

Se germinaron 80 semillas en cajas Petri con una cama de algodón, humedeciéndolo con agua destilada, previamente escarificadas con una incisión cerca del micropilo y en condiciones de invernadero, ya que germinaron y presentaron una altura aproximada de 5 cm se pasaron a macetas que contienen el suelo inoculado.

Para la germinación de semillas de *Prosopis laevigata* se aplicó un tratamiento pregerminativo, mediante escarificación mecánica, utilizando un bisturí y sumergiéndolas en agua a 40 °C. Cuando el agua penetra en la semilla, se pierde la dormancia física, es decir, desaparece la impermeabilidad en algún sitio de la testa. Por lo regular, la dormancia física se elimina colocando las semillas en agua caliente 40 °C o más, durante tiempos variables, también se pueden utilizar agentes químicos, abrasivos, microbiológicos, etc. (Camacho, 1994). En este estudio, la emergencia total de las plántulas se llevó a cabo en un lapso de 7 días.

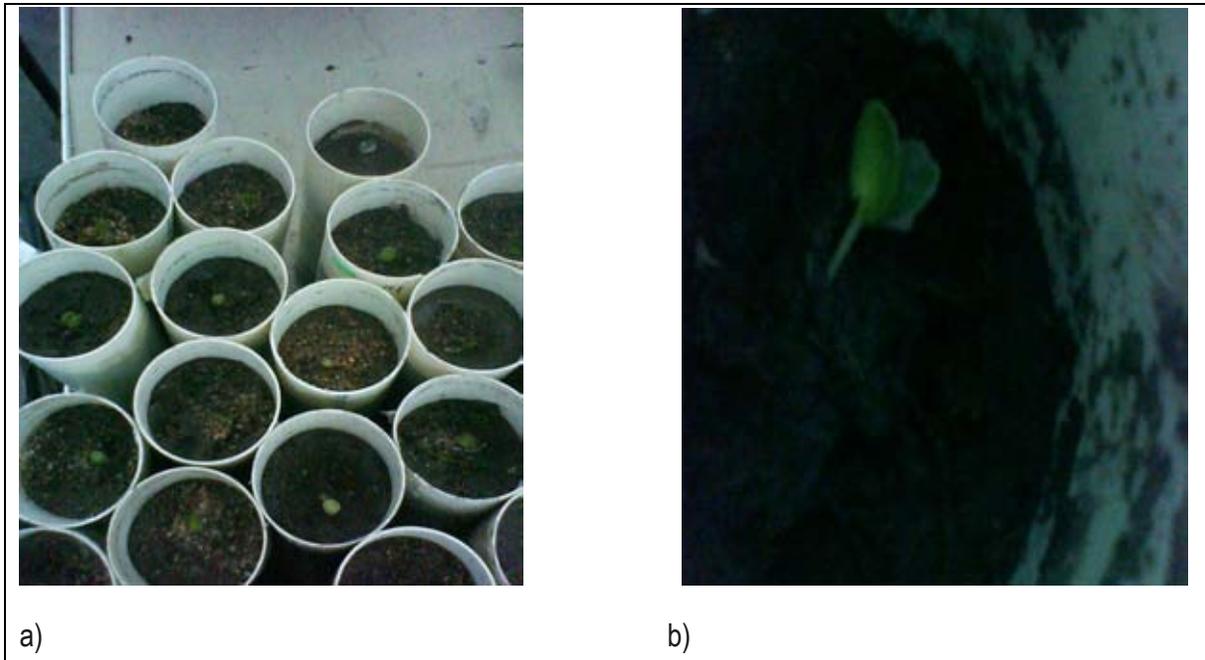


Figura 4. a) lote de *Prosopis laevigata* M+, b) *Prosopis laevigata* M+ trasplantado

10.2.2 *Esterilización de suelo y capacidad de campo.

Para la esterilización de suelo se utilizó una mezcla de suelo con arena silica en proporción 1:2 (v/v), es decir 500 g de suelo de la localidad más 1000 g de arena silica, los cuales se colocaron dentro de bolsas de polipapel cerradas, las cuales introduje dentro de una autoclave a vapor durante dos horas a 110 °C y a 15 libras de presión por pulgada cuadrada (lb/in²), (realizando el procedimiento tres veces),se sacaron y se dejaron airear por 48 horas antes de su utilización.

La capacidad de campo se entiende como contenido de humedad que alcanza el suelo cuando no puede absorber más agua de forma natural de la lluvia. Se considera entonces que el suelo ha alcanzado la capacidad de campo. Este dato puede ser muy variable incluso en el mismo suelo a lo largo del tiempo.

La capacidad de campo de esta mezcla se obtiene de la siguiente manera (Palmer R. y Troeh F., 1979.):

$$\% \text{ de H}_2\text{O a capacidad de campo} = [(B-A) - (C-A) / (C-A)] \times 100$$

Donde:

A= peso de la cápsula

B= peso de la cápsula más suelo húmedo

C= peso de la cápsula más suelo seco al horno

10.2.3 Preparación de macetas

Se lavaron macetas hechas con tubos de PVC, que es un material estable y reciclable, se conformaron dos lotes de 40 macetas utilizando 40 para plantas micorrizadas y 40 para plantas no micorrizadas.

10.3 Trabajo de laboratorio

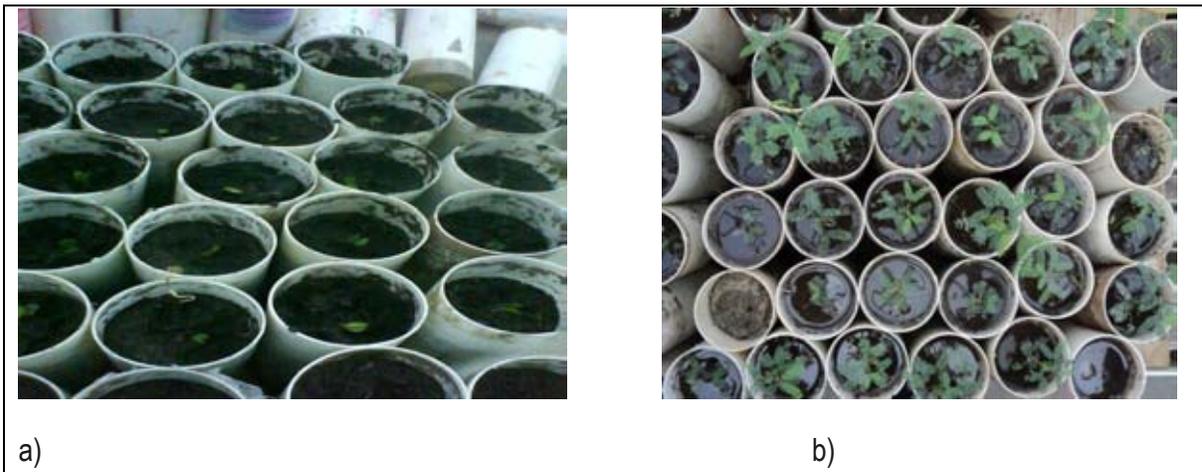
11. Inoculación y trasplante

La inoculación se realizó al momento del trasplante, es decir se aplicó directamente el inóculo en el sustrato que se encontraba en las macetas, esto permite a los hongos mayor probabilidad de establecimiento y así expresar sus beneficios en corto tiempo (Alarcón, 2004).

Se conformaron dos lotes de 40 macetas, las cuales se dividieron 40 inoculadas con HMA (M+), 1350 g de suelo-arena silica esterilizado y 50 g de suelo con inóculo y 40 macetas con 1400 g de suelo-arena silica estéril (M-). Se realizó un riego semanal, agregando 110 ml de agua en cada riego para mantener a las plantas en su capacidad de campo.

11.1 Número de pinnas.

Se contaron mensualmente el número de pinnas de *Prosopis laevigata* micorrizadas y no micorrizadas desde la fecha de germinación hasta el final del experimento.



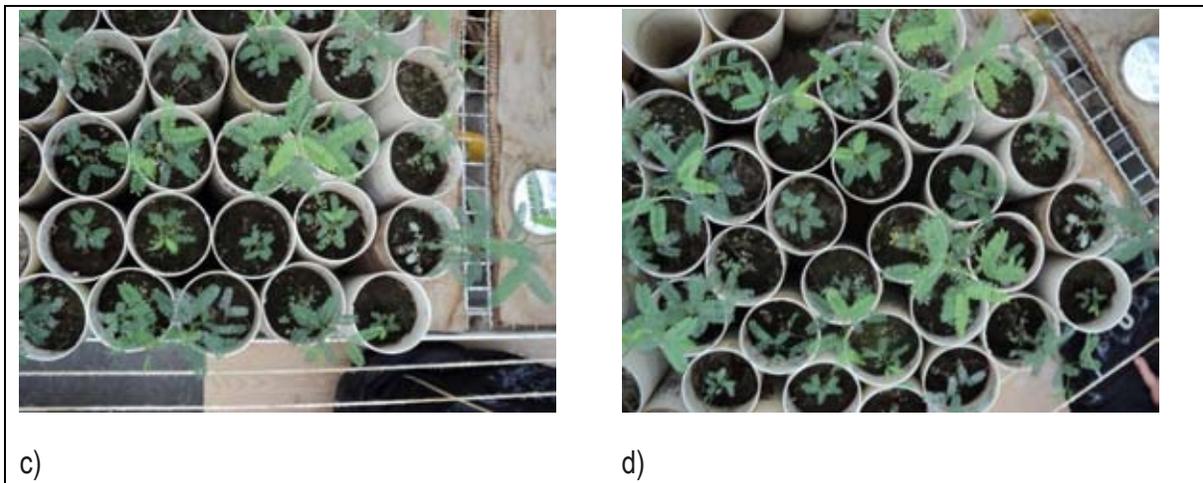


Figura 5. a) trasplante de *Prosopis laevigata*, b), c) y d) conteo de pinnas mensual de ambos tratamientos.

11.2 Temperatura

Temperatura diaria registrada en el invernadero con ayuda de un termohigrógrafo que se encuentra de forma permanente en esta instalación.

Se escarificaron y germinaron 80 semillas para ambos tratamientos, obteniendo el 100% de germinación.

11.3 Diseño estadístico

El diseño estadístico durante el experimento consistió en un ANOVA de un factor que es la micorrización, para comparar parámetros como la, altura, número de pinnas y cobertura; después del experimento se obtuvieron registros como: biomasa húmeda y seca de la parte aérea y radical, tasa de crecimiento, potencial hídrico caulinar, esto con el fin de obtener una comparación entre las plantas micorrizadas y no micorrizadas. Se usó una prueba paramétrica si los datos se ajustaron a una distribución normal, si no es el caso se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis.

Para obtener la cobertura de las plantas se utilizó la siguiente formula:

$$\text{COBERTURA} = [(\text{Diámetro mayor (cm)} + \text{Diámetro menor (cm)}) / 4]^2 \pi = (\text{cm}^2)$$

11.4 Tasa de crecimiento relativo (TCR)

La tasa de crecimiento relativo, (RGR, por sus siglas del inglés “relative growth rate”) es una medida del crecimiento y se define como la ganancia en altura o biomasa por unidad de tiempo.

La tasa relativa de crecimiento de la plantas, se calculó a partir de la altura máxima de las plantas al inicio y al final del periodo de cultivo en condiciones de invernadero. Se utilizó un modelo de

crecimiento exponencial, el cual describe adecuadamente la fase inicial de desarrollo vegetal (Charles – Edwards *et al.*, 1986)

La fórmula empleada es la siguiente:

$$TCR=[\ln(\text{altura final})-\ln(\text{altura})/ t (\text{días})]$$

Por lo que las unidades de tasa de crecimiento son: ((mm/ mm)/ d) o (d⁻¹).

Se hizo el promedio de alturas finales y de alturas iniciales para enseguida aplicarle logaritmo natural (*ln*) y dividirlo entre el número de días que duró el experimento; este método corresponde al modelo de crecimiento exponencial, el cual describe adecuadamente la primera fase del desarrollo vegetal (Charles-Edwards *et al.*, 1986).

Las mediciones se llevaron a cabo con un vernier hasta los 32 cm y después con un flexometro tomando semanalmente la altura de las plantas.



Figura 6. a) se muestra de lado izquierdo una planta de *Prosopis laevigata* M+ y del lado derecho *Prosopis laevigata* M- en la última medición registrada mostrando diferencias significativas en cuanto a la altura, cobertura y número de pinnas en favor de M+ y b) se muestra de lado izquierdo una planta de *Prosopis laevigata* M- y del lado derecho *Prosopis laevigata* M+ en la última medición registrada mostrando diferencias significativas en cuanto a la altura, cobertura y número de pinnas en favor de M+.

11.5 Biomasa y cociente raíz/vástago (R/V)

La biomasa húmeda total de las plantas y el cociente: (biomasa radical)/ (biomasa aérea) o raíz/ vástago o proporción (R/V, por sus siglas en inglés: Root/ Shoot), se calcularon después de cosechar las plantas al final del periodo de crecimiento en invernadero, para esto, las plantas se extrajeron

cuidadosamente de las macetas para no perder las raicillas, se lavaron con agua de la llave, se cortó la raíz del brote; posteriormente, se obtuvo el peso húmedo de ambas partes en una balanza analítica. Finalmente, se calcularon las medidas de la biomasa húmeda total y del cociente R/V para los tratamientos micorrizados y los no micorrizados.



Figura 7. a) Raíz de *Prosopis laevigata* inoculada con hongos micorrizógenos arbusculares, b) Raíz de *Prosopis laevigata* sin inoculo, c) Planta sacrificada de *Prosopis laevigata* micorrizada y d) Planta de *Prosopis laevigata* dentro de la balanza analítica para el cálculo de la biomasa.

11.6 Potencial hídrico (ψ_w)

El potencial hídrico, se refiere a la energía libre del agua, la cual es el potencial químico de las moléculas del agua en el suelo, en la planta, en las células y en la atmosfera.

El potencial hídrico puede definirse como la suma de dos medidas cuantitativas: presión hidrostática y presión osmótica (Hopkins, 1995), donde el agua siempre se mueve de una región de alto

potencial hídrico a una región de menor potencial hídrico. El potencial hídrico es una medida útil para determinar la condición hídrica de las plantas; así como para determinar la tolerancia de las plantas a la sequía, las necesidades de riego de diferentes cultivos y el efecto del estado hídrico sobre la calidad y rendimiento de las plantas.

El símbolo para el potencial hídrico, ψ_w , es la letra griega "psi".

En la actualidad, el ψ_w se define convencionalmente como:

$\Psi_w = \psi_p + \psi_s + \psi_e + \psi_g$, Donde:

Ψ_p = potencial de presión hidrostática

Ψ_s = potencial osmótico o de solutos

Ψ_e = potencial eléctrico

Ψ_g = potencial gravitacional.

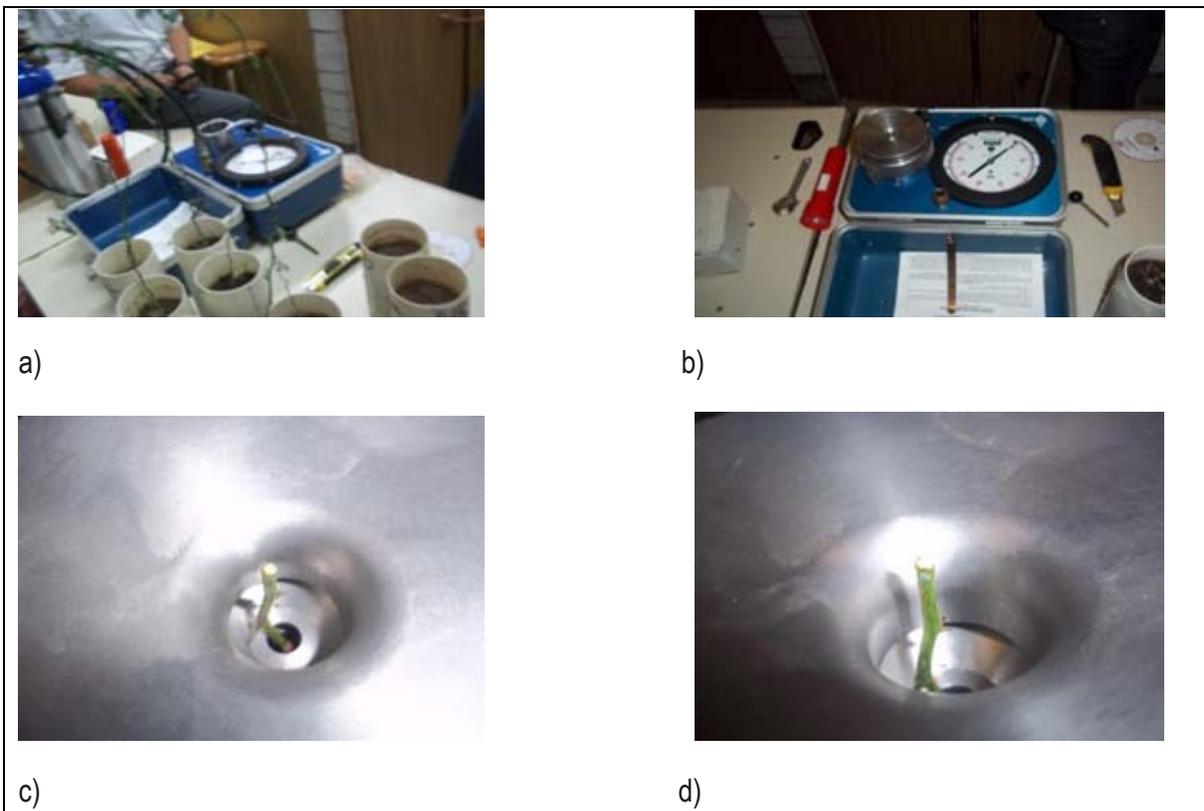


Figura 8. Determinación del potencial hídrico mediante la cámara de Schollander. a) Plantas de *Prosopis laevigata* que se sacrificarán, b) Cámara de Shollander, c) Formación de burbuja en *Prosopis laevigata* no micorrizado y d) Formación de burbuja en *Prosopis laevigata* micorrizado.

11.7 Supervivencia

La supervivencia de las plantas se registró semanalmente desde el inicio del periodo de desarrollo en invernadero. Al término se calculó el porcentaje de plantas vivas respecto al número inicial.



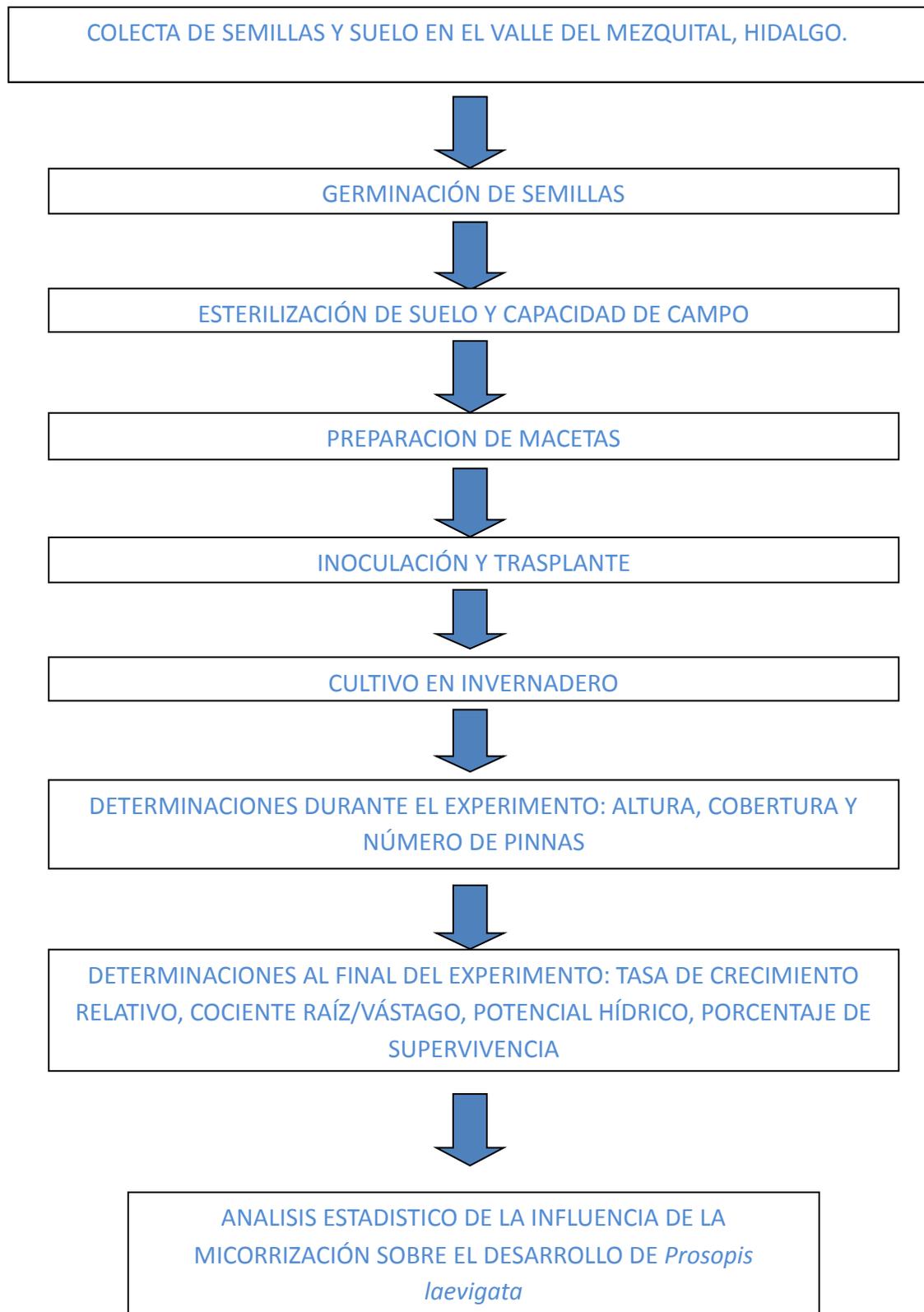
a)



b)

Figura 9. a) Lote de *Prosopis laevigata* M- antes de ser trasladadas a el Valle del Mezquital, Hidalgo y b) Lote de *Prosopis laevigata* M+ antes de ser trasladadas a el Valle del Mezquital, Hidalgo

12. Diagrama de flujo de la metodología



13. Resultados y discusión

13.1 Germinación de semillas

Se obtuvo el 100% de germinación después de aplicar la escarificación mecánica.

13.2 Temperatura

En la Figura 10 se muestra la temperatura registrada en el invernadero durante las 44 semanas de la investigación.

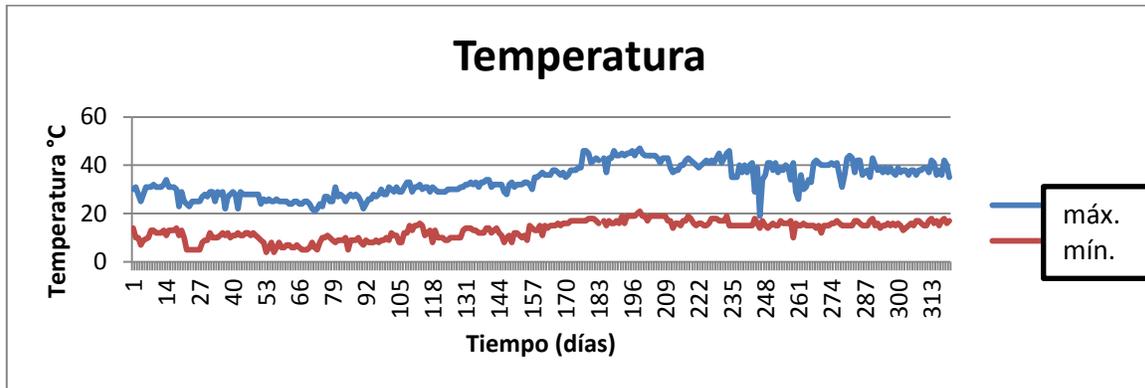


Figura 10. Registro de la temperatura máxima y mínima diarias registradas en el invernadero del 13 de octubre del 2010 al 31 de agosto del 2011.

13.3 Altura de *Prosopis laevigata*

A partir de los datos registrados en las plantas de *Prosopis laevigata*, bajo los dos tratamientos (micorrizado y no micorrizado), se obtuvo que existe una diferencia significativa ($p < 0.0001$), a favor de las plantas micorrizadas, lo que se observa en la Figura 11.

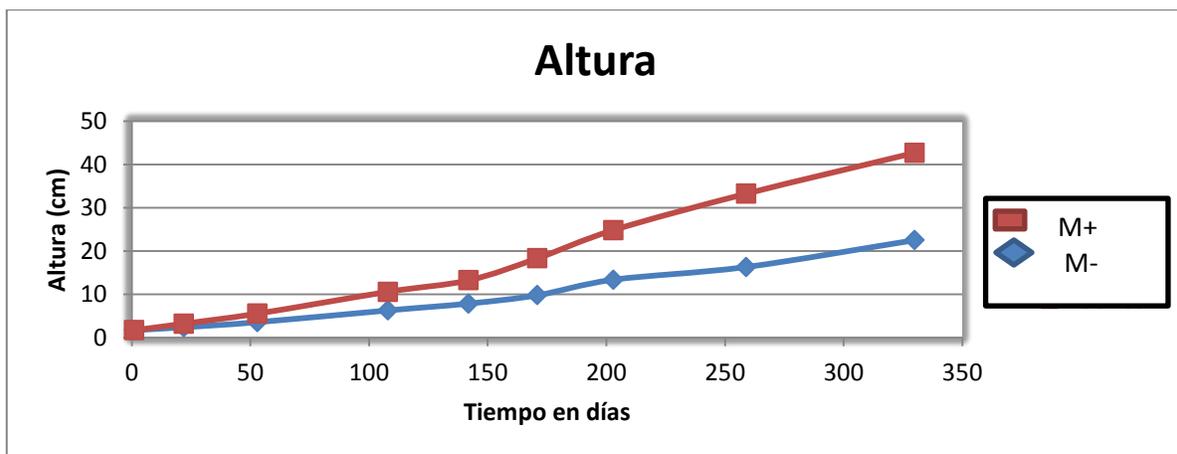


Figura 11. Altura de *Prosopis laevigata* (■ M+) y (◆ M-)



Figura 12. a) lote de *Prosopis laevigata* micorrizados b) lote de *Prosopis laevigata* no micorrizados c y d) fotografías de plantas de *Prosopis laevigata* del lado izquierdo son las inoculadas con hongos micorrizogenos arbusculares y del lado derecho muestran las no micorrizadas, e) lote de *Prosopis laevigata* micorrizadas al final del experimento y f) lote de *Prosopis laevigata* no micorrizadas al final del experimento.

Torres (2005), quien trabajó con plantas de mezquite, encontró que los HMA favorecen un mayor desarrollo vegetal como son la altura, diámetro, número de pinnas, en comparación con aquellas plantas que no son inoculadas. Esto en condiciones de invernadero. Las plantas micorrizadas presentan una mayor altura con respecto a las no micorrizadas por lo tanto existe una diferencia significativa entre ambos tratamientos. En el año 2003 Caravaca *et al.*, mencionan que aún cuando existe colonización micorrízica en las plantas hospederas, no es este un prerequisite para responder exitosamente al crecimiento en todas las plantas inoculadas con HMA, sin embargo en este caso la micorrización con HMA respondió de manera exitosa teniendo como resultado una diferencia significativa en comparación con las plantas testigo.

13.4 Número de pinnas de *Prosopis laevigata*

Después de realizar la prueba e Shapiro-Wilks modificada para verificar las normalidades de las poblaciones de datos a comparar, se procedió a realizar una comparación de medias utilizando una prueba de t de Student para muestras independientes, dando como resultado que existe una diferencia significativa ($p < 0.0001$), a favor de las plantas micorrizadas, esto ocurrió seguramente porque al estar inoculadas con HMA presentaron una mayor absorción de agua y nutrientes, por lo tanto incrementaron su biomasa lo que permitió abastecer la demanda de productos fotosintéticos, lo que se observa en la Figura 13.

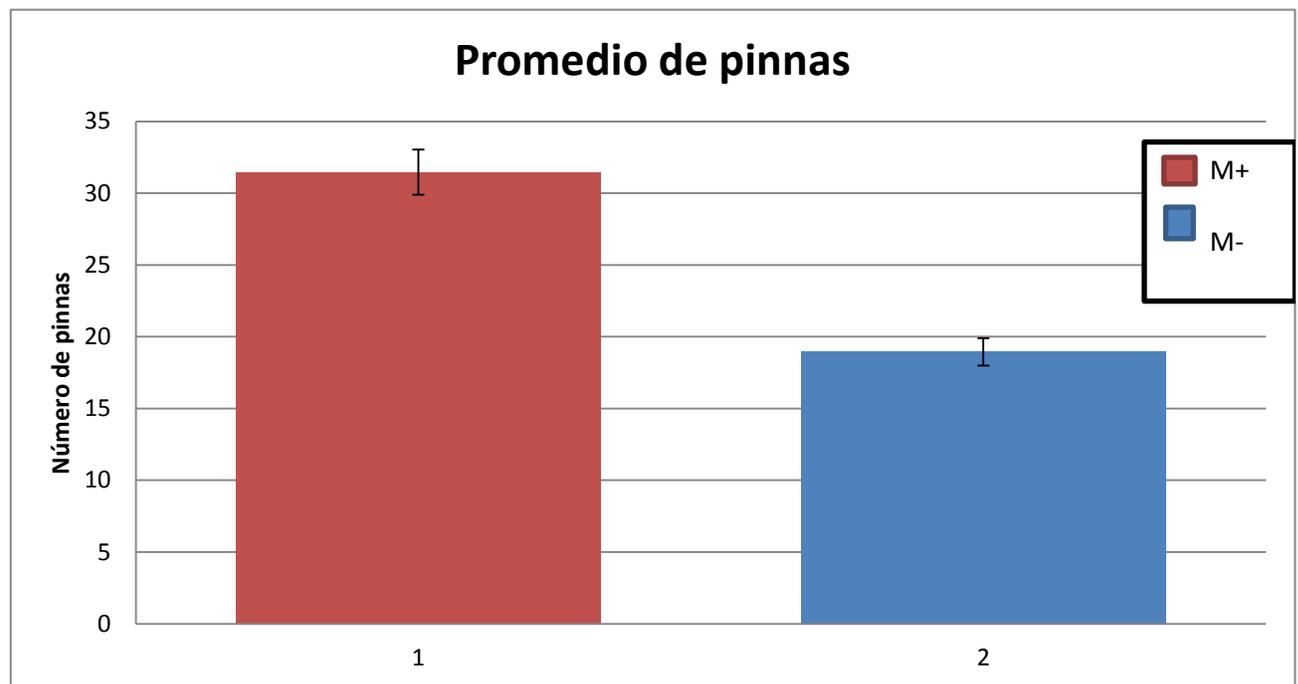


Figura 13. Número de pinnas de *Prosopis laevigata* después de 44 semanas (M+: plantas micorrizadas) y (M-: plantas no micorrizadas).

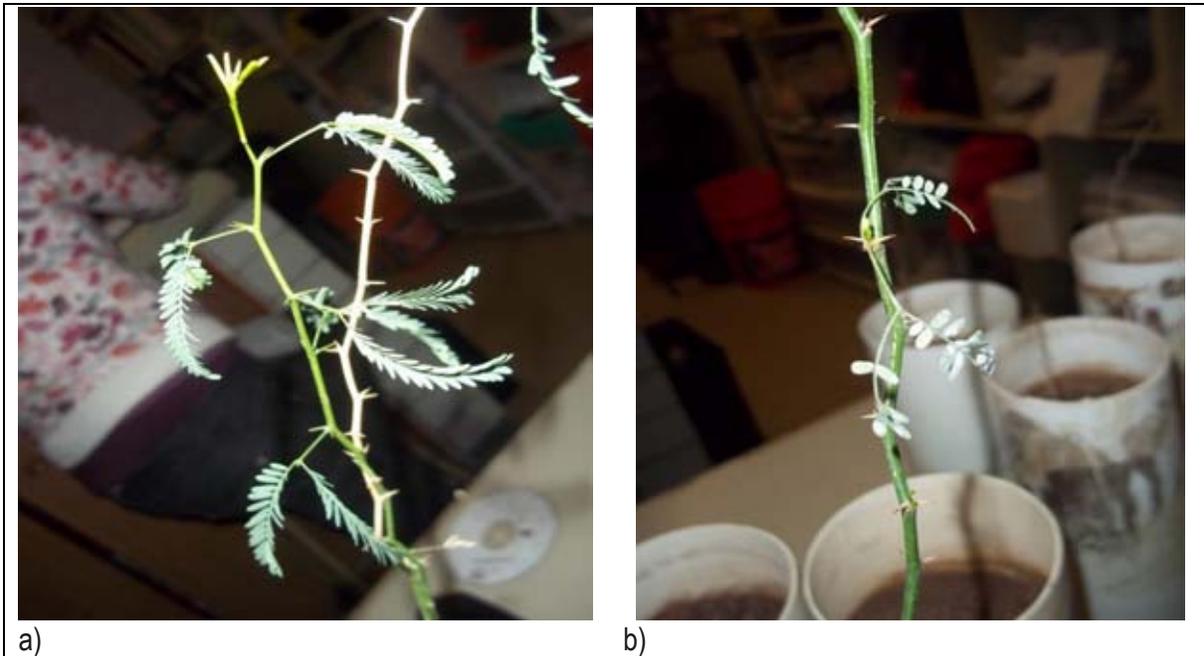


Figura 14. a) número de pinnas de planta micorrizada y b) número de pinnas de planta no micorrizada.

13.5 Cobertura

La cobertura foliar es un indicador del crecimiento (Paz, 2006), el área foliar está influenciada por factores atmosféricos como la radiación y la temperatura, así como por la humedad del suelo; esta área vegetal es importante para la producción de materia seca. En el análisis estadístico realizado utilizando el diámetro medio como indicador de la cobertura foliar, se obtuvo que entre plantas micorrizadas y sin micorrizar se presentan diferencias significativas ($p < 0.0001$), a favor de las plantas micorrizadas, lo que se atribuye al efecto que tienen las micorrizas sobre la planta ya que se incrementa la absorción de minerales óptimos para el desarrollo vegetal (Marschner, 2002).

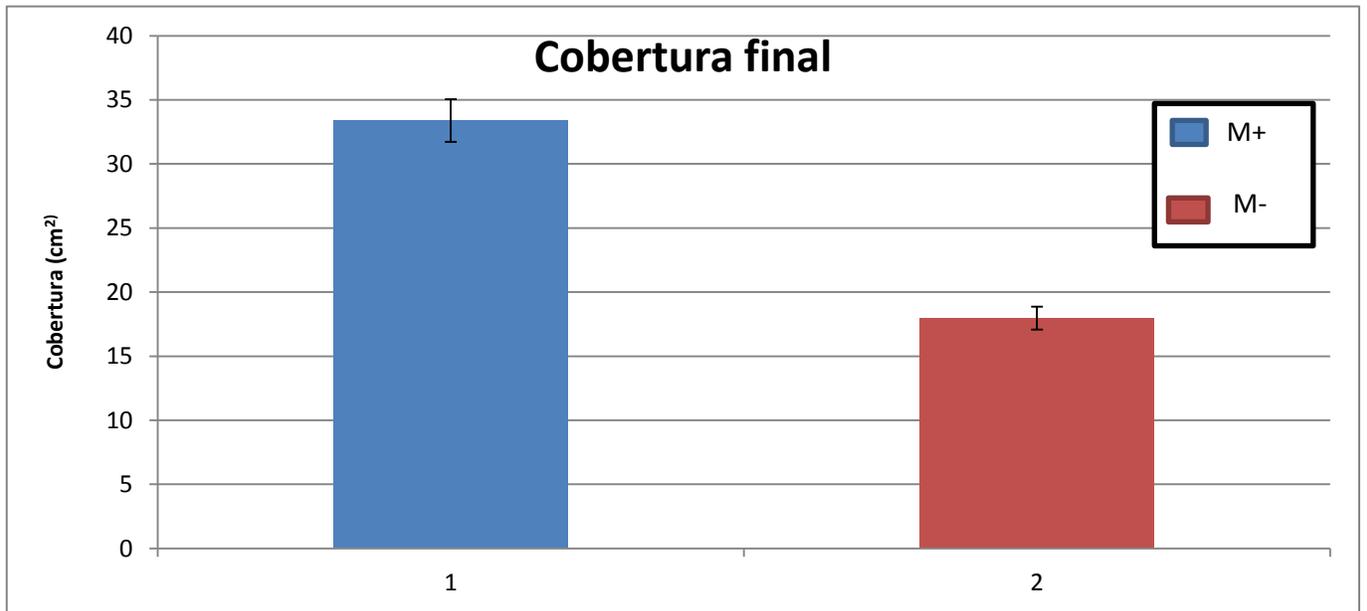


Figura 15. Cobertura de *Prosopis laevigata* (M+: plantas con micorrizas) y (M-: plantas sin micorrizas).





b)



c)

Figura 16. a) cobertura de plantas micorrizadas, b) cobertura de plantas no micorrizadas y c) del lado izquierdo de muestra la cobertura final de las plantas micorrizadas del lado derecho la cobertura final de las plantas no micorrizadas.

13.6 Cociente R/V

El cociente R/V indica la cantidad de materia orgánica producida para formar raíz y vástago, existe una diferencia significativa en favor de las plantas micorrizadas que obtuvieron un R/V mayor, esto seguramente porque las plantas micorrizadas presentaron mayor producción radical, debido a que las raíces son las encargadas de buscar los nutrientes presentes en el suelo. Cuando las plantas se micorrizan la superficie de absorción es mayor, la biomasa radical aumenta dando como resultado un incremento significativo en el cociente R/V lo que se muestra en la Figura 17.

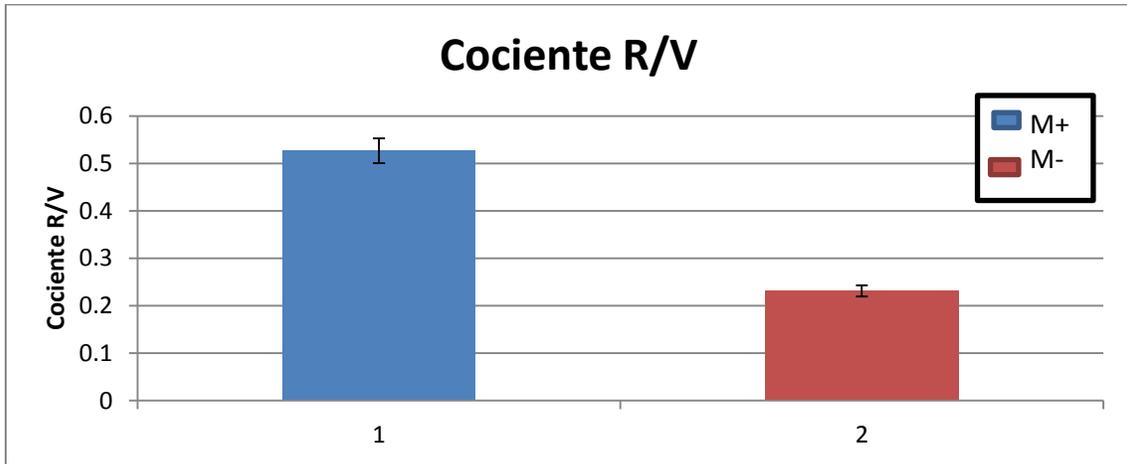


Figura 17. Cociente raíz/vástago de *Prosopis laevigata*, (M+: plantas con micorrizas y M-: plantas sin micorrizas).

13.7 Potencial hídrico de *Prosopis laevigata*

El potencial hídrico se relaciona con la humedad relativa y la temperatura; también permite registrar el grado de hidratación de la planta; al obtener valores menos negativos se observa que la planta tiene mayor hidratación para llevar a cabo sus funciones (Hopkins, 1995). En los resultados obtenidos se observan diferencias significativas ($p < 0.001$) y que el tratamiento M+ está más hidratado, ya que las micorrizas optimizan las relaciones hídricas de plantas. Asimismo, el micelio incrementa el área de contacto con el suelo y las posibilidades de absorción hídrica (Smith *et al.*, 1997). En el caso de las plantas M- la humedad del suelo no fue aprovechada de manera eficiente, seguramente porque no hubo hifas que se lo permitieran (Barragán, 2003).

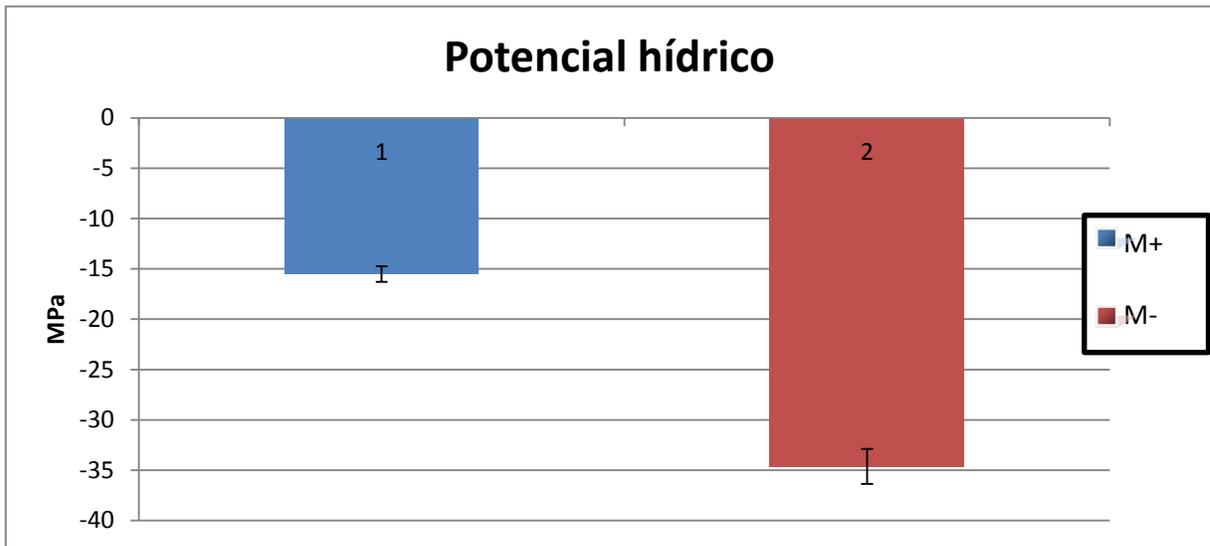


Figura 18. Potencial hídrico caulinar de *Prosopis laevigata*, M+: plantas micorrizadas; M-: plantas no micorrizadas

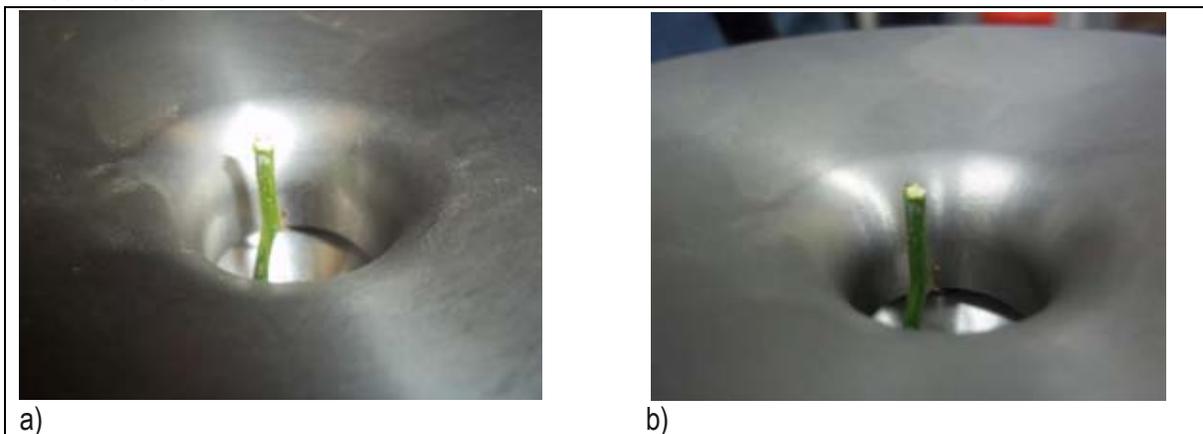


Figura 19.a) tallo de planta de *Prosopis laevigata* micorrizada dentro de la cámara de Schollander y b) tallo de *Prosopis laevigata* no micorrizada dentro de la cámara de Schollander para medir el potencial hídrico.

13.8 Biomasa húmeda del vástago y de la raíz

En la biomasa húmeda del vástago se encuentra que existe una diferencia significativa ($p=0.0240$), a favor de las plantas micorrizadas, y en el caso de la raíz, no hubo diferencia significativa ($p=0.2906$), ya que el aumento de biomasa radical puede relacionarse con las micorrizas, puesto que favorece el desarrollo del sistema radical del hospedero, incrementando los sitios de intercambio, por lo que la planta tiene que aumentar la producción de raíces laterales finas, que son colonizadas por las hifas de los HMA encargadas de absorber el agua y los nutrientes minerales necesarios para el crecimiento (Augé, 2001; Rincón *et al.*, 1993).

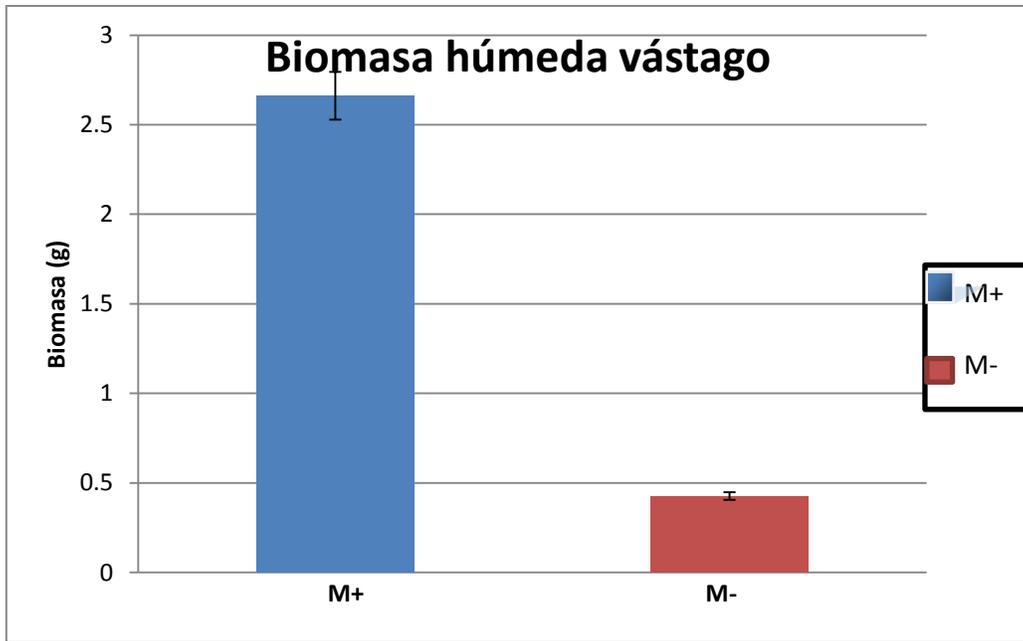


Figura 20. Biomasa húmeda del vástago de *Prosopis laevigata*, M+: plantas micorrizadas y M-: plantas no micorrizadas.



Figura 21. Fotografía en donde se muestra la diferencia de biomasa, la planta del lado izquierdo es no micorrizada y la del lado derecho es micorrizada.

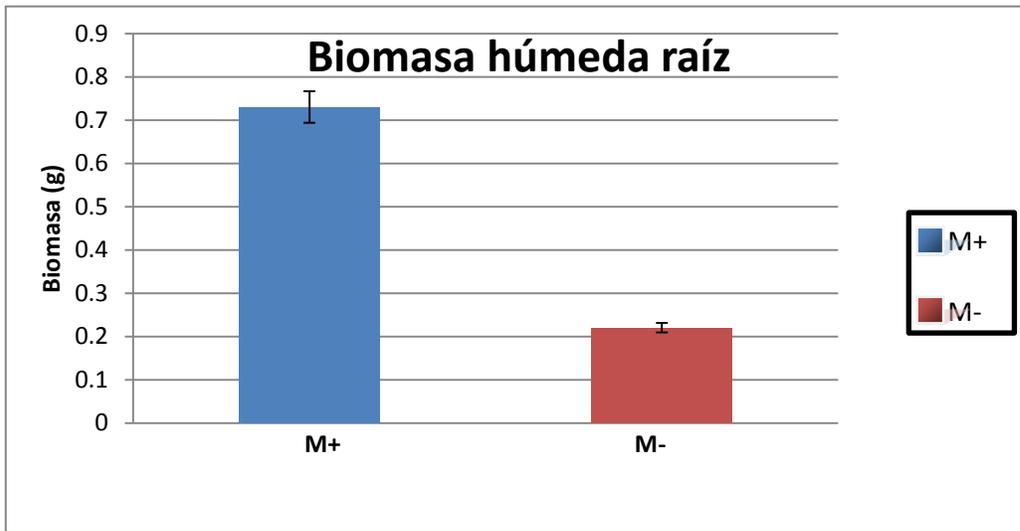
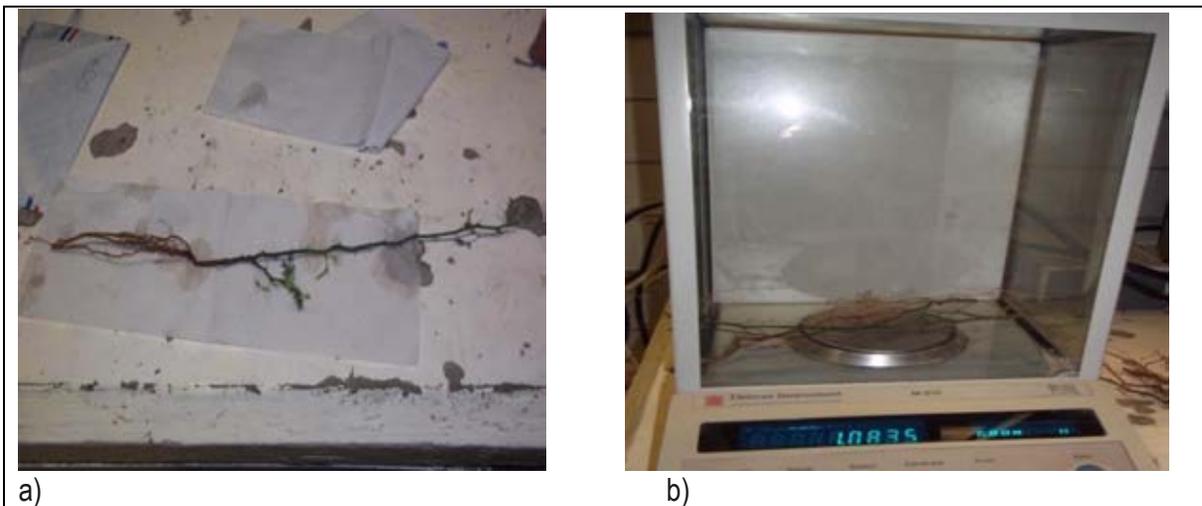


Figura 22. Biomasa húmeda de raíz de *Prosopis laevigata*, M+: plantas micorrizadas y M-: plantas no micorrizadas.

Ferrera-Cerrato (1993), mencionan que en estudios realizados con leguminosas micorrizadas, éstas presentan mayor crecimiento y mayores concentraciones de minerales como N, P, Ca, Cu y Mn, que las plantas no micorrizadas por lo tanto al presentar estas ventajas las plantas micorrizadas adquieren una mayor biomasa húmeda



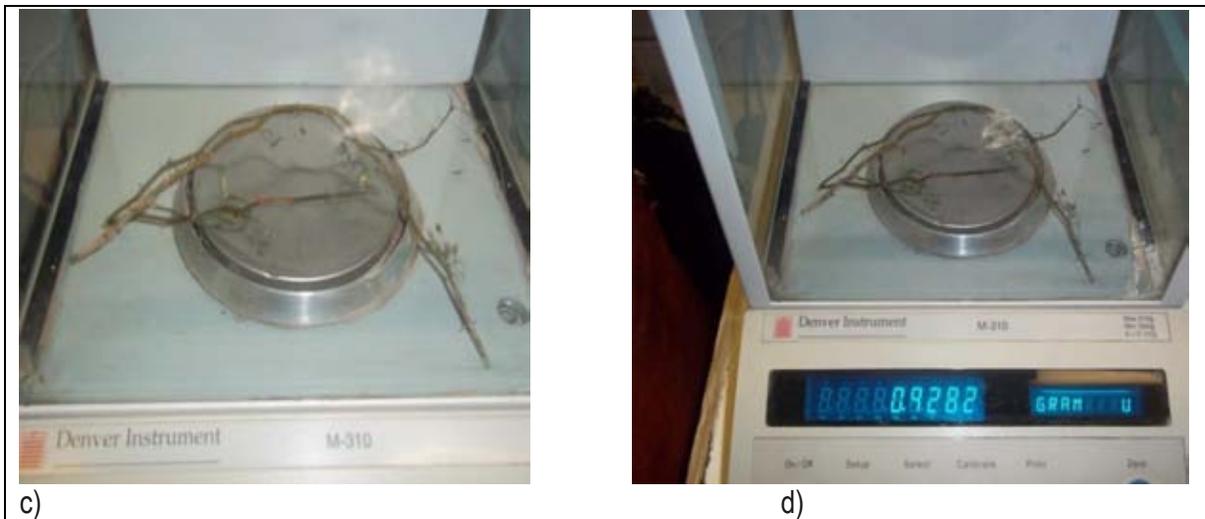


Figura 23. a) planta no micorrizada para pesarla y obtener la biomasa total, b) planta micorrizada dentro de una balanza analítica, c) planta micorrizada dentro de la balanza analítica y d) planta no micorrizada dentro de la balanza analítica.

13.9 Tasa de crecimiento relativo

Las plantas micorrizadas presentan un mayor crecimiento, ya que después de la germinación el tallo de la planta transporta agua y nutrientes desde la raíz hasta las hojas, por lo que se asume que los hongos micorrizógenos arbusculares favorecen la disponibilidad de nutrientes, para emplearlos en el crecimiento, generando así un mayor establecimiento de la planta (Bonfante *et al.*, 2008).

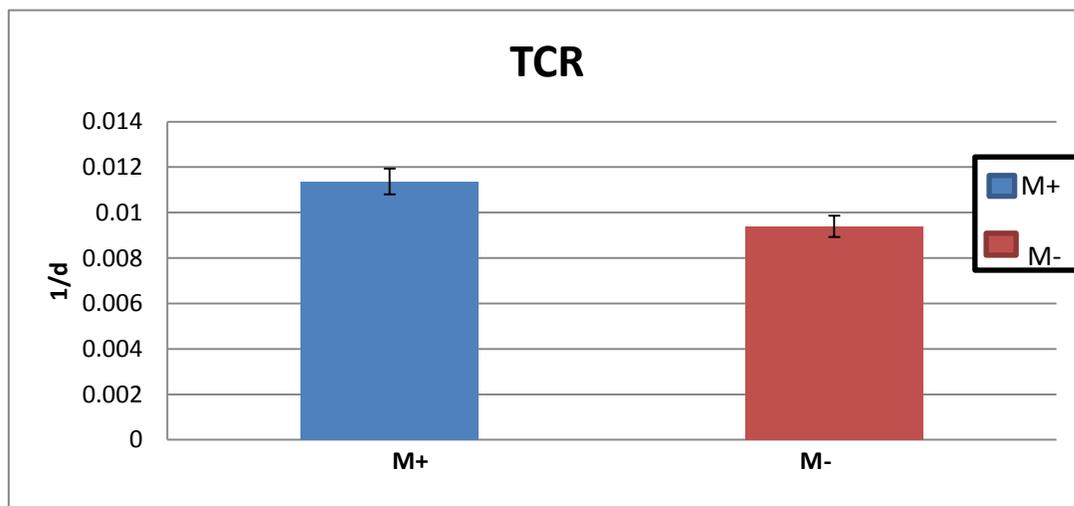


Figura 24. Tasa de crecimiento relativo de *Prosopis laevigata*, M+: plantas micorrizadas y M-: plantas no micorrizadas.



Figura 25. En la parte frontal se encuentra el lote de *Prosopis* micorrizadas y en la frontal el lote de *Prosopis* no micorrizadas, en esta fotografía se puede observar la diferencia en cuanto a la tasa de crecimiento relativo entre los dos tratamientos.

14. Cuadro 2. Tabla comparativa de cuatro trabajos de *Prosopis lavigata* que midieron los mismos parámetros, con algunas variaciones en semanas de cultivo.

PARÁMETROS	Cervantes	Cervantes	Torres	Torres	Reyes	Reyes	Sandoval	Sandoval
	2014	2014	2005	2005	2014	2014	2014	2014
	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-
SUPERVIVENCIA	72*	16	100*	90	80*	62	95*	85
ALTURA	4.47*	2.31	8.02*	6.88	5.95*	4.86	42.68*	22.51
NÚMERO DE PINNAS	5.45*	1.73	14*	9	14.17*	10.74	31.47*	18.94
COBERTURA	-	-	-	-	3.05*	2.45	10.67*	7.94
DIAMETRO	16*	4	14*	9	-	-	-	-
BIOMASA HÚMEDA DEL VÁSTAGO	.38*	.17	.3404*	.2654	1.697*	1.151	2.66*	.43
BIOMASA HÚMEDA DE LA RAÍZ	.20*	.08	.2789*	.2509	.643*	.595	.73*	.22
COCIENTE RAÍZ/VÁSTAGO	.91*	.58	1.14*	1.10	2.09*	.89	.23*	.53
POTENCIAL HÍDRICO	-1.69*	-1.98	-.97*	-1.43	-1.18*	-1.7	-15.50*	-34.63
TCR	.01	.01	.006*	.005	.026*	.009	.0113*	.0093
SEMANAS DE CULTIVO	16		24		16		44	

*Diferencias estadísticas significativas en favor del dato con asterisco ($p < 0.05$). M+: plantas micorrizadas y M-: plantas no micorrizadas.

14.1 Discusión del cuadro comparativo de cuatro trabajos de *Prosopis laevigata*

Supervivencia

De los trabajos revisados se obtuvo que las plantas micorrizadas presentaron una mayor supervivencia esto debido probablemente a que las micorrizas aumentan la posibilidad de que las raíces accedan a la humedad y al fósforo, los dos recursos normalmente escasos en las regiones áridas; así conforme el hongo se esparce por el suelo y coloniza nuevas raíces, transmite nutrientes a las plantas.

Altura, número de pinnas, cobertura, diámetro y tasa de crecimiento.

Con base a los resultados obtenidos de la altura, número de pinnas, cobertura vegetal, diámetro y tasa de crecimiento relativo, las plantas presentaron una tendencia significativa al crecimiento, este incremento es atribuido al efecto de los HMA, ya que éstos ayudan a la mejor captación de elementos minerales del suelo mediante dos mecanismos: uno que es puramente físico, en donde las hifas del hongo son capaces de extenderse y abarcar una mayor superficie de exploración del suelo; donde, iones como el fosfato, el amonio el zinc o el cobre son transportados de una forma más rápida a través de las hifas del hongo que por medio de la difusión a través del suelo. El segundo es un mecanismo de tipo bioquímico, el cual incrementa la afinidad de la raíz micorrizada por el fosfato soluble, de manera que las raíces captan fosfato a partir de concentraciones más bajas en el suelo.

La tasa de crecimiento relativo presenta diferencias significativas, esta diferencia puede deberse a que el micelio extra-radical estabilizó y mejoró las características físicas, químicas y biológicas de las plantas como lo son: una mayor absorción de agua, mejora la nutrición, induce los cambios anatómicos y morfológicos en las raíces, los cuales resultan muy favorables para la planta.

Biomasa húmedas totales

Con respecto a la biomasa total húmeda se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos. El aumento de la biomasa tanto aérea como radical, puede estar relacionada con las micorrizas, ya que las hifas del hongo, pueden explorar volúmenes de suelo cientos o miles de veces más que lo que pueden hacer las raíces normales, aumentando de esta manera la absorción de nutrimentos minerales básicos para su crecimiento.

Cociente Raíz/Vástago

El mezquite es una especie que invierte más en la biomasa radical en plantas M+, debido a que las raíces son las encargadas de buscar los nutrientes presentes en el suelo. Cuando la planta es micorrizada la superficie de absorción es mayor; esta biomasa radical aumenta por el micelio del hongo y por el aumento de sus raíces, lo que permitió un incremento significativo en biomasa húmeda aérea y radical y en el cociente raíz/vástago.

Potencial hídrico

Con respecto al potencial hídrico caulinar presenta diferencias significativas a favor de las plantas inoculadas con HMA, ya que tienen un mejor estado hídrico que los no micorrizados, ya que la micorrización aumenta el uso eficiente del agua y el potencial hídrico caulinar, ya que los HMA proveen de agua a las plantas.

En el trabajo “Establecimiento de plantas de *Prosopis laevigata* y *Agave salmiana* inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares en condiciones de invernadero” realizada por Cynthia Sherezada Cervantes González tiene como resultado que no existen diferencias significativas ($p < 0.7103$), sin embargo se observa que las plantas micorrizadas están más hidratadas ya que las micorrizas optimizan relaciones hídricas de las plantas, pues poseen una elevada relación superficie-volumen.

Se sabe que la simbiosis micorrícica mejora la conductividad hidráulica de la raíz para la toma y transporte de agua.

15. Cuadro 5. Cuadro sintético de resultados al cultivar plantas de *Prosopis laevigata* durante 44 semanas en condiciones de invernadero.

Tratamientos Parámetros	Micorrizadas (M+)	No micorrizadas (M-)	Observaciones
Supervivencia (%) al final	95 *	85	Las plantas M+ tuvieron un mejor establecimiento y mayor supervivencia.
Altura máxima final (cm)	42.68 *	22.61	Las M+ presentan 20 cm más de altura promedio.
Número de pinnas	31.47 *	18.94	Las M+ presentan mayor número de pinnas.
Cobertura (cm ²)	33.38 cm ² *	17.97 cm ²	La mayor cobertura la presentan las M+.
Cociente: biomasa radical /biomasa del vástago	0.5266 *	0.2311	En las M+ se desarrolla más el sistema radical.
Potencial hídrico Ψ_w (MPa)	-15.5 MPa *	-34.62 MPa	Las M+ presentan valores menos negativos lo que nos indica que están mejor hidratadas.
Biomasa húmeda del vástago (g)	2.6613 *	0.4269	Las M+ presentan mayor biomas en el vástago.
Biomasa húmeda de la raíz (g)	0.7302 *	0.2204	Las M+ presentan mayor biomasa en las raíces.
TCR (d ⁻¹)	0.0113 *	0.0093	M+ presenta un crecimiento mayor.

*Diferencias estadísticas significativas en favor del dato con asterisco ($p < 0.05$). M+: plantas micorrizadas y M-: plantas no micorrizadas.

16. Conclusiones

La hipótesis planteada fue correcta ya que las plantas bajo el tratamiento micorrizado presentaron una tasa de crecimiento relativo más elevada y una mayor biomasa respecto a las plantas testigo.

La tasa de crecimiento relativo está influenciada por condiciones ambientales como abundancia de agua y nutrientes, por lo que existen diferencias significativas a favor de las plantas micorrizadas, ya que los hongos micorrizógenos arbusculares, lo cual es atribuido al efecto de los hongos micorrizógenos arbusculares, ya que promueven el incremento en la longitud radical y aumentan la absorción de minerales necesarios para el crecimiento vegetal; ello debido a que los pelos radicales y la hifas extra-radicales multiplican el área de contacto con las partículas del suelo, favoreciendo la toma de nutrientes y transportándolos hasta el hospedero.

La biomasa radical y la biomasa del vástago presentan diferencias significativas en favor de las plantas micorrizadas, ya que gracias a las micorrizas las plantas tienen un óptimo aprovechamiento del agua y nutrientes del suelo para las partes aéreas de la planta y para el transporte de carbohidratos a la raíz y a las partes bajas de la planta, lo que se refleja en un desarrollo continuo y en un rápido establecimiento de las plantas micorrizadas.

Se presentan diferencias significativas en los parámetros medidos como lo son altura, número de pinnas, cobertura, potencial hídrico caulinar, biomasa húmeda del vástago y de la raíz en favor de las plantas micorrizadas, esto debido a que la simbiosis micorrícica arbuscular permite que las plantas regulen su crecimiento y ayudan a suministrar los nutrientes necesarios, proporcionando también un aumento en la absorción de agua debido a las hifas extra-radicales del hongo.

Por lo tanto con ayuda de la simbiosis micorrícica se obtuvieron plantas que son capaces de alcanzar un desarrollo óptimo en un medio determinado y que al presentar una supervivencia y crecimiento idóneo tienen mayores probabilidades de establecimiento en condiciones de invernadero.

17. Recomendaciones.

- ❖ Después de la fase de invernadero sería adecuado llevar un monitoreo dentro de un vivero para evaluar el comportamiento en condiciones no controladas.
- ❖ Se sugiere evaluar el comportamiento del experimento en campo.
- ❖ Se sugiere también hacer la determinación del porcentaje de colonización micorrícica en el experimento, la determinación de los géneros y la evaluación de esporas.

18. Literatura citada

- Alarcón, A. y Ferrera-Cerrato, R. (2000). "Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular". IRENAT. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Mundi Prensa, México. pp.16-38
- Alexander, M. (1980). "Introducción a la microbiología del suelo". Ed. AGT editor S.A., México 2ª Edición.
- Allen, E.B., Allen M.F., D.J., Trappe, J.M., Molina, R. and Rincon, E. (1995). "Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity". *Plant Soil* 170:47-62.
- Allen, E. B. (1994). "Patterns and regulation of mycorrhizal plant and fungal diversity". *Plant Soil*. 170:447-462.
- Allen, M. F. (1991). "The ecology of mycorrhizae". Cambridge University Press. N.Y. pp.184.
- Allen, M.F. (1999). "La micorriza y las rehabilitaciones de los suelos perturbados: procesos y prácticas". En Orellana, R., Escamilla, J.A. y Larqué-Saavedra (eds). *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. CICY. Yucatán, México. P. 151-165
- Álvarez-Solis J.D. y Anzueto-Martínez M.J. (2004). "Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México". *Agrociencia* 38:13-22.
- Augé, R. M. (2001). "Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis". *Micorrhiza* 11: 3-42pp.
- Avio L, Pellegrino E, Bonari E. y Giovannetti M. (2006) "Functional diversity of arbuscular mycorrhizal fungal isolates in relation to extraradical micelial networks". *New Phytologist*. 172:347-357.
- Azcón R. (2000). "Papel de simbiosis micorrízica y su interacción con otros microorganismos rizosféricos en el crecimiento vegetal y sostenibilidad agrícola". En: A. Alarcon y R. Ferrera-Cerrato (compiladores). "Ecología, fisiología y biotecnología de las micorrizas". Colegio de Postgraduados. Montecillo. *Mundi Prensa*. México pp. 1-15.
- Bainbridge, D. A. (1990). "The restoration of agricultural lands and drylands. En: Berger, J.J (ed). *Environmental restoration, science and strategies for restoring the earth*". *Island Press*. E.U. pp. 4-13.
- Barragán, V. E. A. (2003). Inoculación micorrízica de *Prosopis laevigata* L.(Mezquite) en condiciones de invernadero y su efecto al trasplante a condiciones de campo. Tesis de licenciatura. FES-Zaragoza. UNAM. México.
- Bonfante, P., Genre A. (2008). "Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: and evolutionary-developmental perspective". *Trends in plants science* 13(9): 492-498

- Bolton H. Jr., Fredrickson J. K. y Lloyd F.E. (1987). "Microbial Ecology of the Rhizosphere". En: Atlas R. M. y Bartha R. (compiladores). "Microbial Ecology: fundamentals and applications". 2ª edición.
- Brundett, M., N. Bougher, B. Dell, T. Grove y N. Malajcuk.(1996). "Working with mycorrhizas in forestry and agriculture". ACIAR Monograph 32. Caberra, Australia.
- Camacho, M. F. (1994). "Dormición de semillas, causas y efectos"; Editorial Trillas, México, 125pp.
- Camargo-Ricalde, L. (2003). Endemic Mimosa species can serve as michorrizal "resource island" within semiarid michorrizal communities of the Tehuacan-Cuicatlán Valley, México en: Endemic Mimosa L. S pece (Fabacea-Mimosidae) of the specie (Fabaceae-Mimosidae) Tehuacan-Cicatlan Valley, México. Agricultural University of Norway. Tesis de Doctorado.
- Caravaca. F., J. M. Barea, J. Palenzuela, D. Figueroa, M. M. Alguacil y A. Roldan. (2003). "Establishment of shrub species in a degraded semiarid site after inoculation with native or allocthonous arbuscular micorrhizal fungi". Applied Soil Ecology 22: 103-111.
- Carrillo-García A.; Bashan Y. y Bethlenfalvay G. J. (1999). "Nurse plantas, micorrhizae, and plant establishment in a disturbed área of the Sonora Desert". Restoration Ecology Vol. 7 No. 4, pp. 321-335.
- Cedillo, V.; P. Mayoral. (1997). "*Prosopis laevigata*". agroforesteria en zonas áridas. FAO. RCL. México.
- Charles-Edwards, D., Doley, D., Rirmmington-Glyn, M. (1986). "Modeling plant growth and development". Ed. Academic Press. pp. 21
- Chimal E., López L., García Rosalva. (2009). "Obtención de inóculos de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) nativos del Valle de Mezquital, Hidalgo". En: Plantas y Hongos. Micorrizas Arbusculares: un mutualismo esencial en zonas semiáridas. 1ª edición, 16 de Noviembre 2009. Arcadio Monroy Ata y Rosalva García Sánchez Editores. Unidad de investigación en Ecología Vegetal, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México D. F. 5: 60-76 pp.
- Cloudsley-Thompson J. L. (1979). "El hombre y biología de zonas áridas" ed. Blume ecología. Barcelona. Pp. 77-89.
- Cooper, K. (1984). "Physiology of VA mycorrhizal associations. In VA mycorrhiza C. L1". Powell D. Bagyaraj. Ed. CRC Boca Raton, Florida. pp. 155-203.
- Cui, M. y P.S. Nobel. (1992)." Nutrient status, water uptake and gas exchange for three desert succulents infected with micorrhizal fungi". New Phytol. 122: 643-649.
- CONAZA. (1994). "Mezquite *Prosopis*. Cultivo alternativo de zonas áridas y semiáridas de México". Comisión Nacional de Zonas Áridas-Instituto Nacional de Ecología, México 31p.

- Cornejo R. P. E. (2006). "Influencia de la cobertura vegetal sobre la diversidad y estructura de las comunidades de hongos micorrícicos y sus efectos en la estabilidad de suelos degradados". Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, pp 288.
- Durán, G.M. (2008). Caracterización edáfica bajo el dosel de cuatro especies de la familia Leguminosae, en la zona semiseca del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura, Fes Zaragoza UNAM.
- Espinosa V. D. (2000). Diálogo Molecular: Hongo micorrízico arbuscular-raíz en: Ecología, Fisiología y Biotecnología de la Micorriza Arbuscular. Alarcón, A. Y Ferrera-Cerrato, R. (eds.). IRENAT-Colegio de Postgraduados. Montecillo. Mundi Prensa, México. pp.93-116.
- Estrada-Torres, A. (1998). Hacia el estudio de la diversidad y la conservación de germoplasma de los hongos micorrizógenos de México. En: Zulueta, R.R. Avances de la investigación micorrízica en México. Dirección Editorial de la Universidad Veracruzana. México.
- Etchevers, B. J.; Bautista; M. A. y Vergara M. A. (2000). "Calidad del suelo indicadores de calidad y captura de carbono". En Quintero-Lizaola R.; Reyna-Trujillo T.; Corlay Chee L.; Ibañez-Huerta A. y García-Calderon N. E. (Eds.) (2000). La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo II Colegio de Postgraduados. Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Evans, D. G. y Miller, M. H. (1990). "The role of the external mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize". *New Phytologist*. 114:65-71.
- Ferrera-Cerrato, R. (1993). "Manual de agrobiología" Ed. Trillas, México. pp. 130.
- Ferrol Nuria; Calvente Rut, Cano Custodia, Barea J. M.; Azcón-Aguilar. (2004). "Analysing arbuscular mycorrhizal fungal diversity in shrub-associates resource islands from a desertification-threatened semiarid Mediterranean ecosystem". *Applied Soil Ecology*. Vol. 25: 123-133.
- Folliott, P.F; J. Thames. (1983). "Manual Sobre Taxonomía de *Prosopis* en Mexico, Perú y Chile". Rome, FAO, 35p.
- Fisher, C. R., Janos, D. P., Perry, D. A. y Sollins, P. (1994). "Mycorrhizal inoculum potentials in tropical secondary succession". *Biotropica*. 26(4): 369-377.
- Fragoso, C., Reyes Castillo, P. y Rojas, P. (2001). "La importancia de la biota edáfica en México". *Acta Zool. Mex.*, número especial 1:1-10.

- Gange, A. C., Brown, V. K. y Sinclair, G. S. (1993). "Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi: a determinant of plant community structure in early succession". *Functional Ecology*. Ecol. 7: 616-622.
- García E. (1973). "Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köpen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana "UNAM, México.
- Gladstone A. S, Lumini E, Costa M.L, Bonfante P. y Bianciotto V. (2006) "Phylogenetic analysis of Glomeromycota by partial LSU rDNA sequences. *Mycorrhiza*". 16: 183-189.
- Gómez-Lorence, F., Signoret Poillon, J. Y Alvin Moreira, M en C. (1970). "Algunos aspectos de la economía, ecología y taxonomía de los generos *Prosopis* Acacia en México". Ed. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables A.C. México.
- González-Chávez, Gutiérrez-Castorena, C. y S. Wright. (2004). "Hongos Micorrizicos Arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad". *Terra Latinoamericana*. Vol. 22:507-514.
- Guadarrama-Chávez P, Camargo R.S.L, Hernández C.L, y Castillo A.S.(2007). "Los hongos micorrizógenos arbusculares de la región de Nizanda, Oaxaca, México". *Bol.Soc.Bot.Méx.* 81:131-137.
- Guttenberger, M. (2000). "Arbuscules of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Funji Inhabit an Acidic Compartmen Within Plant Roots", Springer-Verlag 211:299-304.
- Guzmán-Plazola R. A. y Ferrera-Cerrato F. (1990). "La endomicorriza-vesiculo-arbuscular en las leguminosas". Colegio de postgraduados. México. pp 63-87.
- Harrison, J.M. (1997). "The arbuscular mycorrhizal symbiosis: an underground association". *Trends in plant science* 2(2):54-60.
- Haselwandter K. (1997). "Soil micro-organisms, micorrhiza and restoration ecology". En: Urbaska K. M., Webb N. R. y Edwards P. J. (editors). *Restoration ecology and sustainable deelopment*. Cambridge University Press. Reino Unido. Pp. 65-76.
- Hopkins, W.G. 1995. "Introduction to plant physiology". John Wiley and Sons, Inc. New York. Pp. 464.
- Lamb D, J. Parrota y R. Keenan 1997. Rejoining hábitats remnants: restoring degraded rainforest Lands. In: *Tropical forest remnants. Ecology, management, and conservation of fragmented communities*. Laurence W: F. and Bierrgaard R. O: (Eds.). The University of Chicago Press. Chicago. Pp. 366-385.
- Lavelle, P. y Spain, AA.V. (2001). "Soil Ecology". Klewera Academia Publishers.

- López, R.O.A. (2001). Desarrollo de plántulas de mezquite, *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Wild) M.C. Johnst., en suelos salinos del ex-lago de Texcoco. Ing. Agroecología, Universidad Autónoma de Chapingo, México 62p.
- Maldonado, A.L. y P.F. De la Garza. (2000). El mezquite en México: rasgos de importancia productiva y necesidades de desarrollo en: Frias-Hernandez, V. Olalde, E.J. Vernon. El mezquite árbol de usos múltiples: estado actual del conocimiento de México. Universidad de Guanajuato, México pp 37-50
- Marschner, P., Marino, W. y Liebercei, R. (2002). "Seasonal effects on microorganisms in the rizosphere of two tropical plants in polyculture agroforestry system in Central Amazonia, Brazil".
- Monroy A. A. (2002). "En busca del paraíso perdido: restauración ecológica". *Conversus* Num. 8:28-33.
- Monroy A. A. y García S. R. (2009). Plantas y hongos. Micorrizas arbusculares un mutualismo esencial en zonas semiáridas. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza 1ª edición.
- Montaño NM, Camargo-Ricalde SL, García-Sánchez R, Monroy A. (eds.), (2007). Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos (Arbuscular mycorrhizae in arid and semiarid ecosystems). Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Mundi-Prensa SA de CV, UAM Iztapalapa, FES Zaragoza, UNAM. Distrito Federal, México. 460 pp.
- Morales A. L., Castillo R. C., Rubio H. R., Godoy B. R., Rouanet M. L. J. y Borie B. F. (2005). "Niveles de glomalina en suelos de dos ecosistemas del sur de Chile". R. C: *Suelo Nutr. Veg.*, jul. 2005, Vol. 5, No. 1, pp. 37-45. ISSN 0718-2791.
- Nakano, A., K. Takahashi, R. T. Koide y M. Kimura. (2001). "Determination of the nitrogen source for arbuscular mycorrhizal fungi by ^{15}N ". *Application to Soil and Plants*, Springer-Verlag 10:267-273.
- Nobel P.S. (1998). *Los Incomparables Agaves y Cactus*. Trillas, México D.F.
- Núñez S., Martínez-Yrizar A., Búrquez A. y García-Olivia F. (2001). "Carbon mineralization in the southern Sonora Desert". *Acta Oncológica* 22:1-8.
- Orozco, A. M. S. (1993). Efecto de la profundidad de siembra y la fertilización en el establecimiento de tres zacates forrajeros. Tesis de Maestría, Colegio de postgraduados, Montecillo, México.
- Palacios R.A., P.S. Hoc, A.D. Burghardt y A.E. Vilela. (2000). *Prosopis L.: Biodiversidad y del conocimiento de México*. Universidad de Guanajuato, México pp. 13-34 clasificación estrategias adaptativas reproductivas e importancia económica. En: Frias-Hernandez, V. Olalde, E.J. Vernon. El mezquite árbol de usos múltiples: estado actual

- Palacios R.A. (2006). Los mezquites Mexicanos: Biodiversidad y Distribución Geográfica, Bol. Soc. Argent. Bot. 41 (1-2): 99 – 121. ISSN 0373-580 X
- Palmer R. y Troeh F. (1979). Introducción a la ciencia del suelo y manual de laboratorio. Editor S.A. Mexico.
- Paz, C. I. (2006). Establecimiento de plántulas de mezquite (*Prosopis laevigata*) inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares bajo un sistema prehispánico de riego por goteo en una zona semiárida deteriorada. Tesis de licenciatura Biología. UNAM Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México.
- Perrin, R. (1990). "Interracciones between mycorrhizas and diseases caused by soil-borne fungi". *Soil use and Management* 6:189-195.
- Phillips JM, Hayman D.S. (1970). "Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection". *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Ramírez-Gerardo M.; Álvarez-Sánchez J.; Guadarrama-Chávez P. y Sánchez-Gallén, I. (1997). "Estudio de hongos micorrizógenos arbusculares bajo árboles remanentes en un pastizal tropical". *Biol. Soc. Bot.* 61:15-20.
- Ramírez, J.A. y J. Villanueva. (1991). "Reforestación con mezquite en la zona media y altiplano potosino". Folleto No. 9 SARH-INIFAP-CIFAP, San Luis Potosí, 13p.
- Reyes-Quintanar, C.K., Ferrera Cerrato, R., Alarcón, A. y Rodríguez, S.Z. (2000). "Microbiología de la relación de nodricismo entre leguminosas arbóreas y *Neobuxbaumia tetetzo* en suelos no erosionados y erosionados en Zapotitlán de las Salinas, Puebla. En: Alarcón A. y Ferrera-Cerrato R. (eds). Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular. IRENAT-Colegio de postgraduados. Montecillos. Mundi Prensa, México.
- Reynolds, J.F. 2001. "Desertification. Encyclopedia of Biodiversity". 2. Academic Press, Nueva York, pp. 61-78.
- Rice W. C.; White P. M.; Fabrizzi K. P. y Wilson G. W. T. (2004). "Managing the microbial community for soil carbon management".
- Rincón, E. P. Hunte y J. Ramírez. (1993). "Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on biomass production by the cactus *Pachycereus pectin-aboriginum*". *Mycorrhiza* 3:79-81pp.
- Roig, F. A. (1993). "Informe Nacional Para la Selección de Germoplasma en Especies de *Prosopis* en la República Argentina" IADIZA- CRICYT.
- Roldan-Fajardo, B.E. y Barea, J.M. (1987). "Micorrizas vesiculoarbusculares en árboles y arbustos". Anatomía edafológica. Agrobiología. P. 220-246.

- Roldan-Fajardo, B. E. (1994). "Effect of indigenous arbuscular mycorrhizal endophytes on the development of six wild plants colonizing a semi-arid area in south-east Spain". *The New Phytologist*. 127:115-121.
- Rosenblueth M, Martínez R.J. y Martínez R.E. (2001). Ecología química en la rizósfera y en las simbiosis de plantas. En: Anaya, A.L., Espinosa, G.F. y Cruz, O.R. (ed.). *Relaciones químicas entre organismos: Aspectos básicos y perspectivas de su aplicación*. Instituto de Ecología. P y V Editores. México pp 99-133.
- Rosendahl S. (2008). "Communities, populations and individuals of arbuscular mycorrhizal fungi". *New Phytologist*. 178:253-266.
- Rzedowski, J. (1983). *Vegetación de México*. Editorial Limusa México.
- Rzedowski, J. (1988). Análisis de la distribución del complejo *Prosopis* (Leguminosae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Botánica Mexicana*, 3: 7-19
- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botanica Mexicana* 259-260
- Rzedowski de G.C. y Rezedowski J. (2001). Flora fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología A.C. México. Pp.250-253.
- Saetre P. y Stark J. M. (2005). "Microbial dynamics and carbón and nitrogen cycling following re-wetting of doils beneath two semi-arid plant species". *Ecosistem Ecology* 142:247-260.
- Scheinvar L. (1995). Taxonomy of utilized opuntias. En: Barbera G., Inglese P., Pimienta-Barrios E. Eds. *Agro-Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear*, pp. 20-27, FAO, Roma.
- Schußler A, Schwarzott D. y Walker C. (2001). "A new phylum, the *Glomeromycota* : phylogeny and evolution". *Mycol. Res.* 105 (12): 1413-1421.
- Shawn C. Collier, Cristopher T. Yarnes R., Peter H. (2003). "Mycorrhizal dependency of Chihuahuan Desert plats is Influenced by life history strategy and root morphology". *Journal of Arid Enviroments*. Vol. 22:223-229.
- Signoret, J.P. (1970). Datos sobre algunas características ecológicas del mezquite (*Prosopis laevigata*) y su aprovechamiento en el Valle del Mezquital. En: Gómez-Lorence, F. *Mezquites y Huisaches: Algunos aspectos de la economía, ecología y taxonomía de los géneros Prosopis y Acacia en México*. IMERNAR, México pp73-146.
- Sieverding, E. (1991). "Vesicular-arbuscular mycorrhizal management in tropical agrosystems". Technical Cooperation Eschborn. Federal Republic of Germany. 17-69.

- Siqueira J.O., Carneiro M.A.C., Curi N., Da Silva Rosado S.C. y Davide A.C. (1998). Mycorrhizal colonization and micotrophic growth of native woody species as related to successional groups in Southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 107:241-252.
- Smith, S., Read, D. (1997). "Mycorrhizal symbiosis". Segunda Edición. Capítulo 1. Academic Press. London.
- Srivastava S.C. (1998). "Microbial contribution to extractable N y P after air drying of dry tropical soils" *Biol. Fertil Soil* 26:31-34.
- Swift, M. J., Heal, O. W. y Aderson J.M. (1979). "Decomposition in terrestrial ecosystem". *Studies in ecology*, Vol. 5, Blackwell Scientific Publications, Great Britain.
- Sylvia, D. M. (1990). "Inoculation of native woody plants with vesicular-arbuscular mycorrhizal". *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environments*. 31:253-261.
- Torres A., A.E. (2005). Establecimiento de plántulas de mezquite (*Prosopis laevigata*) inoculadas con hongosmicorrizógenos arbusculares (HMA) bajo condiciones de sequía en invernadero. Tesis de licenciatura en Biología. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 80 pp.
- Tranfo, L. (1989). "La vida y magia en un pueblo otomí del Mezquital". Ed. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, México.
- Van der Heijden A.G.M, Klironomos N.J, Ursic M, Moutoglis P, Streitwolf-Engel R, Boller T, Wiemken A y Sanders R.I. (1998). "Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity". *Nature*. 396: 69-72.
- Varela L, y Trejo D. (2001). "Los hongos micorrizógenos arbusculares como componentes de la biodiversidad del suelo en México". *Acta Zoológica Mexicana. Nueva Serie No especial* 1: 39-51.
- Vázquez, Y. C. y Batis, A. I. (1996). "La restauración de la vegetación: árboles exóticos vs. árboles nativos"., *Ciencias*. 43:16-23.
- Varma, A. (1999). "Functions and application of arbuscular mycorrhizal fungi in arid and semi-arid soils". En: Varma, A. *Mycorrhiza*. Ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Vázquez, G.S., J.T. Frías H., V. Olalde P. y G. Vázquez M. (2001). "The social and ecological importance of mesquite in Guanajuato". *Voices of México (CISAN-UNAM)*, No. 57
- Villanueva J.D. (1993). "Distribucion actual y características ecológicas del mezquite (*Prosopis laevigata* H & B Johnst), en el estado de San Luis Potosí" INIFAP, México p 5.

Xoconostle, C.B. (2002). "Impacto de la biotecnología agrícola en cultivos: el caso de las micorrizas". *Avance y Perspectiva* 21:263-266.

Referencias de internet.

[1] Redecker, D., A. Schüßler, H. Stockinger, S. Stürmer, J. Morton, y C. Walker. 2013. Un consenso basado en la evidencia para la clasificación de los hongos formadores de micorrizas arbusculares (Glomeromycota). Doi Mycorrhiza: 10.1007/s00572-013-0486-y. <http://invam.wvu.edu/>

[2] Geoambiental fotografía de Homero Adame *Prosopis laevigata*
<http://www.verarboles.com/Mezquite/mezquite.html>

[3] Carpeta Informativa de la Gira de trabajo por el estado de Hidalgo, 3 de octubre de 2000. http://zedillo.presidencia.gob.mx/pages/giras_n/hgo/hgo.html

19. Anexos

Altura de *Prosopis laevigata*

Prosopis laevigata micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	38	42,68	11,25	0,92	0,0400

Prosopis laevigata no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	34	22,51	2,72	0,93	0,1160

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Columna2	N	Medias	D.E.	Medianas	Prom.	rangos	gl	C	H	p
Columna1	1	38	42,68	11,25	39,75	52,64	1	1	4	7,89	<0,0001
Columna1	2	34	22,51	2,72	22,30	18,46					

Número de pinnas *Prosopis laevigata* micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna2	38	31,47	6,45	0,94	0,1892

Número de pinnas *Prosopis laevigata* no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	34	18,94	7,18	0,97	0,7892

Prueba T para muestras Independientes

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1 Grupo 2	
	1	2
n	38	34
Media	31,47	18,94
Varianza	41,66	51,57
Media(1)-Media(2)		12,53
LI(95)	9,33	
LS(95)	15,74	
pHomVar	0,5268	
T	7,80	
gl	70	
p-valor	<0,0001	

Cobertura final de *Prosopis laevigata* micorrizado.

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna2	38	10,67	2,47	0,92

Cobertura final de *Prosopis laevigata* no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna2	34	7,94	2,65	0,93

Prueba T para muestras Independientes M+ Y M-

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1 Grupo 2	
	1	2
n	38	34
Media	10,67	7,94
Varianza	6,11	7,04
Media(1)-Media(2)		2,73
LI(95)	1,53	
LS(95)	3,94	
pHomVar	0,6754	
T	4,52	
gl	70	
p-valor	<u><0,0001</u>	

Temperatura mayor

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	319	33,94	6,57	0,95

<0,0001

Temperatura menor

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	319	13,10	3,80	0,94

<0,0001

Prueba T para muestras Independientes

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1 Grupo 2	
	1	2
n	320	319
Media	33,97	13,10
Varianza	43,26	14,47
Media(1)-Media(2)		20,87
LI(95)	20,04	
LS(95)	21,70	
pHomVar	<0,0001	
T	49,12	
gl	512	
p-valor	<0,0001	

Biomasa húmeda del vástago de *Prosopis laevigata* micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	2,66	1,04	0,95

Biomasa húmeda del vástago de *Prosopis laevigata* no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	0,43	0,16	0,81

Prueba T para muestras Independientes

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1 Grupo 2	
	1	2
n	4	4
Media	2,66	0,43
Varianza	1,09	0,02
Media(1)-Media(2)		2,23
LI(95)	0,56	
LS(95)	3,91	
pHomVar	0,0111	
T	4,24	
gl	3	
p-valor	0,0240	

Biomasa húmeda de la raíz de *Prosopis laevigata* micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	0,73	0,79	0,79 0,0898

Biomasa húmeda de la raíz de *Prosopis laevigata* no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	0,22	0,06	0,81 0,1278

Nueva tabla: 09/04/2014 - 16:23:17

Prueba T para muestras Independientes

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1	Grupo 2
	1	2
n	4	4
Media	0,73	0,22
Varianza	0,63	4,2E-03
Media(1)-Media(2)		0,51
LI(95)	-0,76	
LS(95)	1,78	
pHomVar	0,0018	
T	1,28	
gl	3	
p-valor	0,2906	

Potencial hídrico de *Prosopis laevigata* micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	-15,50	3,81	0,86 0,2569

Potencial hídrico de *Prosopis laevigata* no micorrizado

Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columna1	4	-34,63	5,12	0,99	0,9277

Prueba T para muestras Independientes

Variable:Columna1 - Clasific:Columna2 - prueba:Bilateral

	Grupo 1	Grupo 2
	1	2
n	4	4
Media	-15,50	-34,63
Varianza	14,50	26,23
Media(1)-Media(2)		19,13
LI(95)	11,32	
LS(95)	26,93	
pHomVar	0,6385	
T	5,99	
gl	6	
p-valor	0,0010	

Supervivencia de *Prosopis laevigata* micorrizado y no micorrizado

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Columna2	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Columna1	1	1	38,00	0,00	38,00	1,00	>0,9999
Columna1	2	1	34,00	0,00	34,00		

