

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

Establecimiento de *Yucca filifera* inoculada con hongos micorrizógenos en
condiciones de invernadero

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:

VAZQUEZ CASTILLO HERMILO MAJIB

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN ECOLOGÍA VEGETAL

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Arcadio Monroy Ata

México, D. F., noviembre 24 del 2015

Investigación realizada con financiamiento de la DGAPA, UNAM mediante el proyecto PAPIIT
con clave IN216610



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

CONTENIDO

RESUMEN	4
I INTRODUCCIÓN	5
II MARCO TEÓRICO	6
2.1 Zonas áridas y semiáridas.....	6
2.2 Micorrizas	7
2.3 Hongos micorrizógenos arbusculares.....	8
2.4 Restauración ecológica.....	10
2.5 Establecimiento vegetal	10
2.6 <i>Yucca filifera</i> Chabaud	11
III JUSTIFICACIÓN.....	12
IV PROBLEMÁTICA.....	12
V HIPÓTESIS.....	12
VI OBJETIVOS.....	12
VII METODOLOGÍA.....	13
7.1 Colecta de sustrato e inóculo	14
7.2 Semillas.....	14
7.3 Viabilidad	14
7.4 Germinación	14
7.5 Preparación del sustrato	15
7.6 Inóculo	15
7.7 Macetas	16
7.8 Diseño experimental.....	16
VIII. MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA	16
8.1 Porcentaje de supervivencia	16
8.2 Cobertura.....	17
8.3 Tasa de crecimiento relativo	17
8.4 Evapotranspiración real, evaporación y transpiración.....	17
8.5 Potencial hídrico foliar.....	18
8.6 Biomasa, cociente raíz/vástago y eficiencia en el uso del agua	18
8.7 Porcentaje de colonización micorrícica.....	18
8.8 Análisis estadístico.....	18

IX RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
9.1 Viabilidad	19
9.2 Germinación	19
9.3 Crecimiento	20
9.3.1 Altura	20
9.3.2 Cobertura.....	21
9.3.3 Número de hojas	21
9.3.4 Tasa de crecimiento relativo (TCR).....	22
9.4 Porcentaje de supervivencia	23
9.5 Potencial hídrico foliar.....	23
9.6 Biomasa húmeda y seca, cociente raíz/vástago (R/V) y eficiencia en el uso del agua (EUA)..	24
9.7 Evapotranspiración real acumulada	26
9.8 Porcentaje de colonización micorrícica	29
X . CONCLUSIONES.....	32
XI LITERATURA CITADA	33
Anexo I.....	39
Anexo II.....	39

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) sobre el desarrollo y establecimiento de plantas de *Yucca filifera* en condiciones de invernadero durante nueve meses. Se germinaron semillas de *Y. filifera* que posteriormente se trasplantaron en macetas con una mezcla de sustrato estéril, compuesto por arena sílica más suelo, en proporción 2:1. El diseño experimental consistió en una comparación de medias (con y sin micorrizas) con 30 repeticiones por tratamiento, teniendo así 60 macetas; las variables de respuesta que se evaluaron semanalmente fueron la altura, la cobertura, el número de hojas y la evapotranspiración real acumulada. Al término del experimento se determinó el potencial hídrico foliar, la biomasa húmeda y seca, el cociente raíz/vástago, la eficiencia del uso del agua, la tasa de crecimiento relativo (TCR), la evapotranspiración acumulada y el porcentaje de colonización micorrícica.

Los resultados muestran que las plantas con el sustrato que contenía micorriza (M+) presentaron diferencias estadísticamente significativas en comparación con el testigo (M-) para las variables: altura, cobertura, número de hojas, tasa de crecimiento relativo (TCR), eficiencia en el uso del agua (EUA), biomasa fresca y seca totales, transpiración acumulada y el porcentaje de colonización micorrícica, esto indica que el grupo de plantas M+ adquirió una mayor talla y vigor, comparadas con el grupo M-. Respecto al potencial hídrico foliar (PHF), se encontró que no hay diferencias significativas, sin embargo, las plantas M+ se mostraron ligeramente más hidratadas en comparación con las M-; en el caso del cociente raíz/vástago, tampoco se encontraron diferencias significativas, pero al igual que en el PHF, las plantas micorrizadas mostraron una relación menor entre la raíz y el vástago. Por lo anterior se concluye que la inoculación de plántulas de *Yucca filifera* con HMA es una herramienta eficiente para incrementar su crecimiento en condiciones de invernadero.

I INTRODUCCIÓN

En México las zonas áridas y semiáridas conforman la zona ecológica más extensa del país, cubren una superficie aproximada de 90 millones de hectáreas: por lo menos el 45% de su extensión territorial (Velasco, 1991; Florescano, 1997). Estas zonas se caracterizan por la escasez de precipitación pluvial, cuya precipitación media anual oscila entre 50 y 200 mm, con ocho a 12 meses de sequía, y la zona semiárida con precipitación anual entre 200 y 700 mm, y de seis a ocho meses de temporada seca, que corresponden a los climas Bs y Bw del sistema de Koeppen (1936), modificado por García (1988). Los tipos de vegetación principales que caracterizan estos hábitats son: el matorral xerófilo, el pastizal y la vegetación halófila (Florescano, 1997). Dentro de éstos, los matorrales xerófilos son los más extensos en la región centro-norte de México, cubren aproximadamente un 40% del territorio nacional. El cambio de uso de suelo prolongado e intensivo de las zonas áridas y semiáridas ha disminuido la humedad necesaria para la vegetación, acelerando la desertificación (Skujins, 1991).

Por esta razón, y por la necesidad de recuperar los ecosistemas deteriorados, es necesario hacer uso de la restauración ecológica, que busca reconstruir un ecosistema dañado hacia su estado original, o a una condición saludable y vigorosa (Urbanska *et al.*, 1997), hasta llegar a un nivel de desarrollo y complejidad tal, que se obtenga un sistema auto organizado y sin influencia de alteraciones humanas (Monroy, 2002). Se ha observado que la vegetación juega un papel importante en la conservación de los suelos, por lo cual la recuperación de la cubierta vegetal es una técnica disponible para mitigar y en ocasiones revertir los efectos de la desertificación. Por lo tanto, la restauración de los ecosistemas áridos y semiáridos, puede ser realizada con el uso de plantas nativas; como en el caso de *Yucca filifera* que llega a ser una de las monocotiledóneas dominante o codominante en los llamados izotales, característicos de las zonas áridas y semiáridas (Rzedowski, 1978); además de ser una especie con alto valor ecológico gracias a que juega un papel importante en los procesos bioecológicos de dichos ecosistemas. *Yucca filifera* constituye uno de los recursos forestales más demandados, por su potencialidad para producir fibras empleadas en la fabricación de macetas, costales, cepillos y tapetes, y en la construcción de cercas vivas o corrales, en la elaboración de papel (por su alto contenido de celulosa), y como fuente de alimento y aceites; de la raíz se puede obtener un extracto que puede emplearse como sustituto del jabón (amole), además de que contiene un alto contenido de sarsapogenina esferoidal, de la cual se aísla el principio activo de los anticonceptivos.

Montaño y Monroy (2000) consideran que el establecimiento de árboles y arbustos leñosos como *Yucca filifera* en ecosistemas áridos y semiáridos, es de gran importancia tanto económica como ecológica y pueden ser alternativas productivas para contrarrestar el proceso erosivo. En este sentido, el uso de herramientas biológicas que aseguren el establecimiento exitoso y un aumento en la supervivencia de las especies vegetales, así como una mayor velocidad de crecimiento y aumento en su capacidad de respuesta a eventos de competencia y perturbación, juegan un papel importante. Entre estas herramientas biológicas se encuentran a los microorganismos del suelo, los cuales son de suma importancia, ya que tienen una gran

diversidad de funciones, las cuales son importantes para la restauración de suelos y la cobertura vegetal. Dentro de estas funciones se encuentran la descomposición de compuestos orgánicos, la reducción de nitrógeno a amonio y la degradación de contaminantes (Ramos-Zapata *et al.*, 2004). Dentro de estos microorganismos se encuentran los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), los cuales son los formadores de micorrizas arbusculares (MA) (Montaño *et al.*, 2007), que conforman una relación simbiótica mutualista entre los HMA y las raíces de las plantas; esta relación trae como consecuencia un intercambio bidireccional, en el cual la planta suministra al hongo fuentes de carbono procedentes de la fotosíntesis, además de brindarle protección, mientras que, el hongo le facilita a la planta la absorción de agua y nutrientes como el fósforo y nitrógeno (Martínez *et al.*, 2009; Montaño *et al.*, 2007).

Debido a lo anterior y a la necesidad de encontrar técnicas o metodologías que ayuden a la restauración de ecosistemas áridos y semiáridos, el objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la simbiosis micorrícica en el desarrollo, establecimiento y supervivencia de *Yucca filifera*; las preguntas a resolver fueron: ¿la asociación micorrícica influirá en el desarrollo vegetal de *Yucca filifera*? y ¿de qué manera influye la simbiosis con HMA en la eficiencia del uso del agua y en la tasa de crecimiento relativo en *Y. filifera*?

II MARCO TEÓRICO

2.1 Zonas áridas y semiáridas

La mayoría de las regiones áridas y semiáridas del mundo se localizan entre las latitudes 25 y 35° (Skujins 1991), tanto del hemisferio norte como del hemisferio sur, porque meteorológicamente son regiones que reciben corrientes de aire descendentes totalmente secas, característica clásica de los vientos contralisios (Velasco, 1991). La escasez de agua característica de estos ambientes trae consigo una baja disponibilidad de los minerales del suelo, en especial de los elementos inmóviles como el fósforo, que disminuye su disponibilidad cuando el agua disminuye. Esta característica junto con las condiciones climáticas adversas como sequías prolongadas, temperaturas elevadas y suelos poco desarrollados, se convierten en factores que disminuyen la capacidad de recuperación natural de la cubierta vegetal (Montaño, 2000). Por su extensión, las zonas áridas y semiáridas tienen gran importancia para México, ya que algunos autores manejan que cubren hasta el 60% del total del territorio, en donde su productividad, su biodiversidad (ya que después de la zona templada subhúmeda posee el mayor número de especies endémicas tanto vegetales como animales) y su diversidad cultural, provocan que estas áreas estén sujetas a una intensa explotación de recursos, causando pérdida de la cobertura vegetal que trae como consecuencia un aumento en la desertificación.

2.2 Micorrizas

El término fue propuesto por Frank en 1885, basándose en dos términos, *rhiza*-raíz y *mykes*-hongo (Sieverding, 1991) y representa la asociación simbiótica mutualista establecida entre las raíces de la mayoría de las plantas y algunos hongos del suelo, en la cual, la planta recibe recursos del suelo (minerales y agua) y el hongo compuestos de carbono derivados de la fotosíntesis (Harley, 1989; Montañó *et al.*, 2007). Los hongos pueden ser tanto micro como macroscópicos, y se establecen en las raíces de las plantas vasculares, en el gametofito hipogeo de muchas briofitas y helechos, y los esporofitos de los helechos (Álvarez *et al.*, 2008; Moore *et al.*, 2011). Los hongos involucrados pertenecen a las clases Ascomycota, Basidiomycota y Glomeromycota (Finlay, 2008; Monroy, 2009; Chimal, 2010); esta asociación está presente en más del 90% de las plantas terrestres (Ramos *et al.*, 2004; Zetina, 2008), además de que se han observado en una amplia gama de ecosistemas naturales y campos de cultivo, por lo tanto es una relación simbiótica cosmopolita (Monroy *et al.*, 2007); cabe mencionar que esta relación es muy antigua, se conocen fósiles que datan de hace 460 millones de años, en donde se presentan vestigios de este tipo de simbiosis (Selosse *et al.*, 1998). Las micorrizas juegan un papel importante en los ecosistemas. No sólo incrementan la toma de nutrientes y agua por parte de la planta, sino que también influyen y conectan los componentes abióticos con los bióticos y estos últimos entre sí, contribuyendo en la formación del suelo y su enriquecimiento (Blanco *et al.*, 1997). También se ha comprobado que dicha asociación llega a reducir los efectos negativos causados por agentes patógenos, aunque esta respuesta puede variar dependiendo del tipo de hongo, el patógeno y las condiciones ambientales (Blanco *et al.*, 1997; Sánchez-Colín, 2005).

Existen siete tipos de micorrizas divididas en tres categorías: ectomicorriza, ectendomicorriza y endomicorriza (Figura 1); las cuales se diferencian una de otra dependiendo de la forma en que el hongo penetra en la raíz, las estructuras características que desarrolla y las especies de hongos y plantas que participan en la simbiosis.

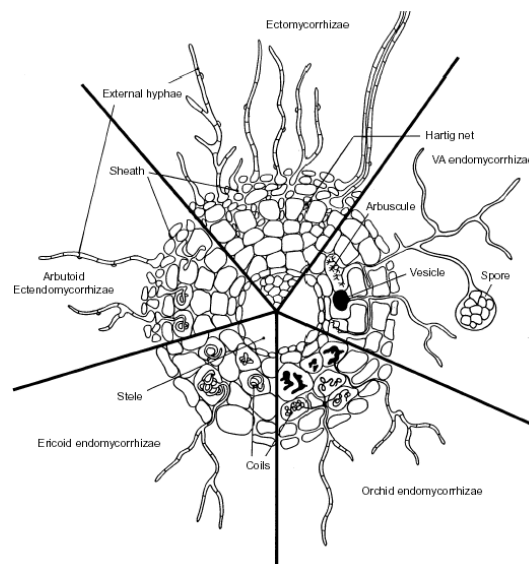


Figura 1. Tipos de micorrizas (Selosse y Le tacon, 1998).

La **ectomicorriza** presenta un manto fúngico denso que cubre exteriormente a la raíz, intercelularmente penetran las hifas y dan lugar a la red de Harting. La **ectendomicorriza** presenta manto fúngico laxo, red de Harting y penetración intracelular escasa; se dividen en: a) arbutoide: el hongo forma un manto, red de Harting e hifas intercelulares; b) monotropoide: el hongo forma un manto fúngico, hifas intracelulares e intercelulares y, c) ectendomicorriza: el hongo forma en algunos casos un manto, presenta hifas intercelulares e intracelulares, llamadas estas últimas pelotones fúngicos. La **endomicorriza** tiene hifas externas que exploran el suelo y penetración de hifas intracelular e intercelularmente, no hay un manto fúngico ni red de Harting; se dividen en: a) arbuscular: el hongo penetra intracelularmente e intercelularmente y forma arbuscúlos y vesículas, incluso su nombre describe las estructuras que forma; b) ericoide: el hongo penetra intracelularmente e intercelularmente y forma enrollamientos hifales llamados ovillos y, c) orquideoide: el hongo penetra intracelularmente e intercelularmente y forma enrollamientos hifales llamados ovillos.

Dentro de las micorrizas, las arbusculares (MA) son las más comunes en los ecosistemas tropicales y se forman por la interacción de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) pertenecientes a la clase Glomeromycota y las raíces de alrededor del 80% de las plantas, incluyendo aquellas con interés agrícola (Moore *et al.*, 2011); se caracterizan porque el hongo que coloniza a la raíz desarrolla una estructura en forma de un diminuto arbolillo en las células del parénquima radical, llamada "arbuscúlo", 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 (Montaño *et al.*, 2007). Las MA influyen en la estabilización del suelo, determinan la composición vegetal, la productividad, la diversidad y la sustentabilidad en diferentes ecosistemas (Van Der Heijden *et al.*, 1998); además en la planta se puede observar un efecto positivo al incrementar su adecuación y producción de biomasa; los HMA funcionan como una extensión del sistema radical que les permite explorar un mayor volumen del ambiente edáfico; que a su vez, ayuda a mejorar la absorción de los nutrientes del suelo, principalmente fósforo (Smith *et al.*, 1997). Asimismo, los HMA pueden ser utilizados como inóculo de plantas para lograr su establecimiento en condiciones naturales de estrés hídrico y nutrimental, siendo especialmente útiles en prácticas de restauración ambiental de ecosistemas degradados o en procesos de desertificación (Montaño *et al.*, 2007).

2.3 Hongos micorrizógenos arbusculares

Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) son organismos rizosféricos que se les puede encontrar en todos los biomas terrestres (García, 2007). Se han descrito alrededor de 230 especies de HMA en el mundo (Finlay, 2008; Schüßler, 2010), distribuidos en cuatro órdenes, 11 familias y 25 géneros, pertenecientes a la clase Glomeromycota (Schüßler, 2010; Redecker *et al.*, 2013) (Figura 2). Los HMA se asocian con el 80% de las plantas vasculares, siendo la asociación más abundante en los ecosistemas tropicales (Azcón *et al.*, 1996;

Moore *et al.*, 2011). Los HMA son simbiosntes obligados, por lo cual no pueden ser cultivados fuera de las raíces de las plantas (Smith *et al.*, 1997). Se les considera componentes clave de la microbiota del suelo, ya que desarrollan actividades cruciales para el establecimiento, la nutrición, el desarrollo y el vigor de las plantas (Hernández *et al.*, 2006). Los beneficios que estos microorganismos aportan a las plantas son los siguientes: incremento en la toma de nutrimentos minerales, principalmente fósforo, aunque también participan en la adquisición de nitrógeno, zinc, cobre, potasio, calcio, magnesio y azufre (Martínez *et al.*, 2009); promueven la resistencia a deficiencias hídricas debido a diferentes mecanismos que van desde respuestas mecánicas hasta un nivel bioquímico (Ramos-Zapata *et al.*, 2004); sirven de control biológico contra parásitos del suelo, además de incrementar la tolerancia de la planta contra patógenos (Newsham *et al.*, 1995); tienen un efecto positivo sobre el desarrollo y producción de la biomasa vegetal, inducen la producción de hormonas estimulantes o reguladoras de crecimiento vegetal, incrementan la relación parte aérea/raíz de la planta micorrizada (De-la-Rosa-Mera *et al.*, 2006) y mejoran las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo (Guerrero *et al.*, 1996).

En el caso particular de los ecosistemas áridos y semiáridos se ha registrado que el establecimiento vegetal se incrementa cuando se utilizan plantas micorrizadas, las cuales tienen mejor tolerancia a las condiciones adversas del suelo y del clima (Caravaca *et al.*, 2003). Otros estudios indican que las especies de HMA nativos y que son funcionales en suelos áridos, captan más eficazmente los nutrimentos y el agua en condiciones de sequía, ayudando a las plantas a superar las condiciones adversas (Allen, 2007; Querejeta *et al.*, 2006; Marulanda *et al.*, 2007).

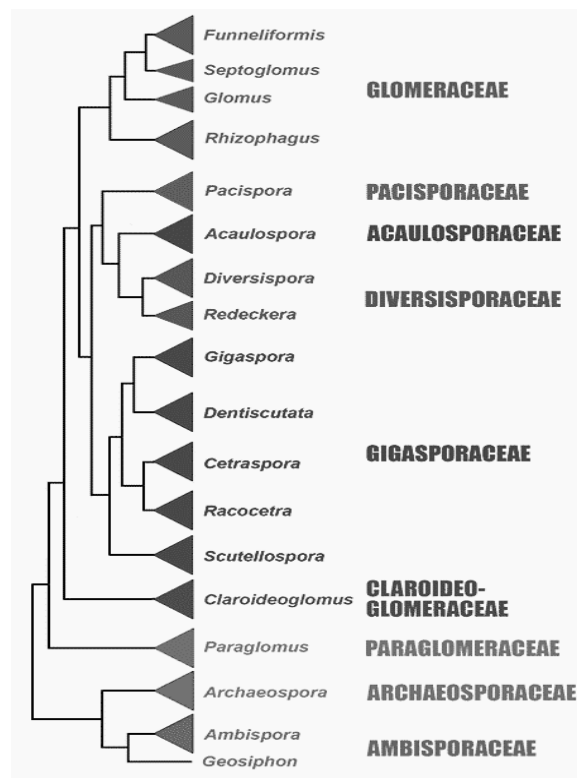


Figura 2. Clasificación taxonómica de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) de acuerdo con Redecker *et al.* (2013).

2.4 Restauración ecológica

El término restauración se refiere a todo proceso ecológico cuya finalidad es recuperar las condiciones ambientales que prevalecieron en un sitio dado, y que por alguna causa se vieron afectados negativamente (Sol *et al.*, 2005). Es una disciplina que estudia los procesos ecológicos que promueven la reconstrucción de ecosistemas deteriorados y analiza técnicas que favorecen la sucesión ecológica, la descontaminación del suelo y del agua, la reintroducción de especies, la rehabilitación edáfica, la captación y retención de la humedad en el suelo y el establecimiento de una nueva cubierta vegetal (Monroy *et al.*, 2009). La restauración ecológica trata de recuperar las interacciones y procesos ecológicos en los que las especies estén relacionadas entre sí y con su medio abiótico (Zamora, 2002).

La restauración ecológica se basa de forma esencial en la sucesión ecológica, muy especialmente en la sucesión secundaria que tiene que ver con la dinámica de ambientes que han sido desviados por fenómenos naturales o artificiales de la sucesión original o primaria (Comín, 2002). Comprende cuatro aspectos importantes: la regeneración, la rehabilitación, la reasignación y el repoblamiento vegetal (Aronson *et al.*, 1993 a; Aronson *et al.*, 1993 b). La regeneración tiene como finalidad lograr una composición florística, estructural y funcional lo más similar al sistema original, o al sistema modelo que se desea reproducir. El objetivo de la rehabilitación es lograr una composición florística similar al ecosistema ecológico original, pero también se pueden utilizar especies exóticas, elevando así la productividad de los ecosistemas para beneficio de los habitantes del lugar. Reasignación se refiere a darle un nuevo uso al suelo de un paisaje o parte de él, que no necesariamente tiene relación con los ecosistemas que se desarrollan con el sitio antes de la perturbación. Por último, el repoblamiento vegetal se define como el establecimiento de una comunidad vegetal en un sitio degradado, pero que permite un manejo de los recursos del suelo y del agua con el fin de lograr el desarrollo conjunto de varias poblaciones de plantas en uno o varios estratos, que estén en equilibrio con el sustrato.

2.5 Establecimiento vegetal

Se define como el estado en el que las plántulas después de germinar no dependen de sus hojas cotiledonares donde están contenidas sus reservas, y son capaces por sí mismas de fotosintetizar compuestos orgánicos (Torres, 2005). Es decir, cuando la plántula depende de los cotiledones para obtener su alimento no está establecida; cuando la plántula es capaz de obtener del suelo los nutrientes, y es capaz de llevar a cabo la fotosíntesis activamente, se le considera una planta independiente y establecida (Rodríguez, 2011). El establecimiento comprende cuatro fases: siembra, germinación, emergencia y crecimiento post emergente. Cada una de estas etapas se ve afectada por los factores climáticos, edáficos y bióticos (Orozco, 1993). En el establecimiento el factor ambiental es el más importante de los que afectan el crecimiento de las plantas; la temperatura y la humedad son los elementos de mayor influencia en la germinación y desarrollo subsecuente

(Orozco, 1993). El establecimiento exitoso puede ser promovido por la selección de especies vigorosas ya que estas presentan tasas de germinación altas, crecimiento rápido del vástago y resistencia al estrés.

Según Orozco (1993), existen tres condiciones que garantizan el éxito en el establecimiento de las plántulas: selección de plantas vigorosas, competencia reducida y ambiente favorable. No es necesario que se cumplan las tres, pues el establecimiento exitoso depende del ambiente y las posibilidades de manipularlo. Por esta razón, en la actualidad existen numerosas herramientas que aseguran el establecimiento de especies vegetales en programas de restauración, dentro de las más destacadas está la aplicación de inoculo de HMA, siendo ésta una alternativa recomendable para favorecer el establecimiento y el crecimiento de plántulas (Camargo-Ricalde, 2001).

2.6 *Yucca filifera* Chabaud

Planta arborescente de 2 hasta más de 10 m de altura, en ocasiones muy ramificada; hojas linear-oblanceoladas, planas o algo convexas, rígidas, de 25 a 65 cm de largo por 1.4 a 3.5 cm de ancho, margen con filamentos delgados y espiralados hasta de 23 cm de longitud, espina de 1.3 a 3.5 cm de largo, de color gris, vaina de color café-rojizo, hasta de 5 cm de largo; inflorescencia cilíndrica y colgante, de 1.2 a 1.6 m de largo, glabra o en ocasiones con el pedúnculo y pedicelos pilosos, éstos de 1.5 a 3 (-4) cm de longitud; segmentos del perianto unidos en 1 o 2 mm desde su base, blancos o de color crema, los segmentos de la serie externa elíptico-oblongos, de 3 a 4.7 cm de largo por 8 a 11 mm de ancho, ápice agudo y piloso al igual que el tercio superior del margen, los de la serie interna elíptico-ovados, de 3 a 4.5 mm de largo por 9 a 13 mm de ancho, con ápices y márgenes similares a los de la serie externa; anteras de ± 3 mm de largo; fruto oblongo, de 5 a 7.5 cm de longitud por 2.2 a 2.7 cm de diámetro, carnoso, colgante; semillas de ± 7 mm de largo (Rzedowski, 2005). Florece de mayo a julio. Se distribuye desde el norte hasta el centro de México en los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas, Querétaro, y el Estado de México. Crece en zonas áridas en las partes altas y medias de las laderas, en suelos de origen calcáreo con textura arcillo-limosa, donde la precipitación es de 250 hasta 550 mm anuales. Principalmente se utiliza la flor y el fruto como alimento, y la inflorescencia se utiliza como forraje. En la industria farmacéutica, también se produce aceite comestible de la semilla, o se utiliza para la industria de la celulosa en la fabricación de papel kraft, papel resistente a la ruptura y al desgaste (CONAFOR, 2012).

III JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se realizó por la escasa información acerca de *Yucca filifera* y su asociación con hongos micorrizógenos arbusculares. Este trabajo aportara información que ayude a la recuperación y reintroducción de esta especie en los ecosistemas áridos y semiáridos en donde llega a ser especie dominante o codominante, además de ser importante ecológicamente, ya que intervienen en los procesos funcionales de dichos ecosistemas, así como alto valor económico pues es una especie ampliamente utilizada por los pobladores locales.

IV PROBLEMÁTICA

Se sabe que el principal factor limitante para el establecimiento de especies vegetales en zonas áridas y semiáridas es el agua, sumado a esto, el proceso de desertificación ocasionado por la sobreexplotación dificulta las labores de recuperación o restauración de dichos ecosistemas. Por esta razón, los estudios sobre herramientas que ayuden en la restauración ecológica como los HMA son importantes, ya que como se ha señalado en trabajos como el de Monroy y García (2009) y el de Martínez y Martínez (2009), las plantas infectadas con los HMA han logrado incrementar su supervivencia, facilitando así su establecimiento. En este contexto, este trabajo tiene como finalidad responder las siguientes preguntas: ¿la asociación micorrícica incrementa el desarrollo de *Yucca filifera*? y ¿de qué manera la simbiosis planta-HMA influye en la eficiencia de uso de agua y en la tasa de crecimiento relativo de *Y. filifera*?

V HIPÓTESIS

La utilización de HMA para inocular plántulas de *Yucca filifera* incrementará su tasa de crecimiento relativo y su eficiencia en el uso del agua, debido a que la simbiosis mutualista aumenta el área de exploración de las raíces en el suelo, mediante las hifas de los HMA, para la obtención de agua y nutrimentos; esto se verá reflejado en una mayor tasa de crecimiento relativo y en una mayor eficiencia en el uso del agua, a diferencia de las plantas no inoculadas.

VI OBJETIVOS

General

Analizar el efecto de la simbiosis micorrícica en el desarrollo, establecimiento y supervivencia de *Yucca filifera* durante nueve meses en condiciones de invernadero.

Particulares

Determinar el efecto de los HMA en las plantas de *Yucca filifera* con respecto a la altura, cobertura, número de hojas y porcentaje de supervivencia durante el experimento.

Explicar los efectos de los HMA sobre *Yucca filifera* mediante las variables de respuesta: potencial hídrico foliar, eficiencia en el uso del agua (EUA), tasa de crecimiento relativo (TCR), biomasa húmeda y seca del vástago y la raíz, cociente raíz / vástago (R/V), el porcentaje de colonización micorrícica, la evapotranspiración real acumulada y la transpiración acumulada.

VII METODOLOGÍA

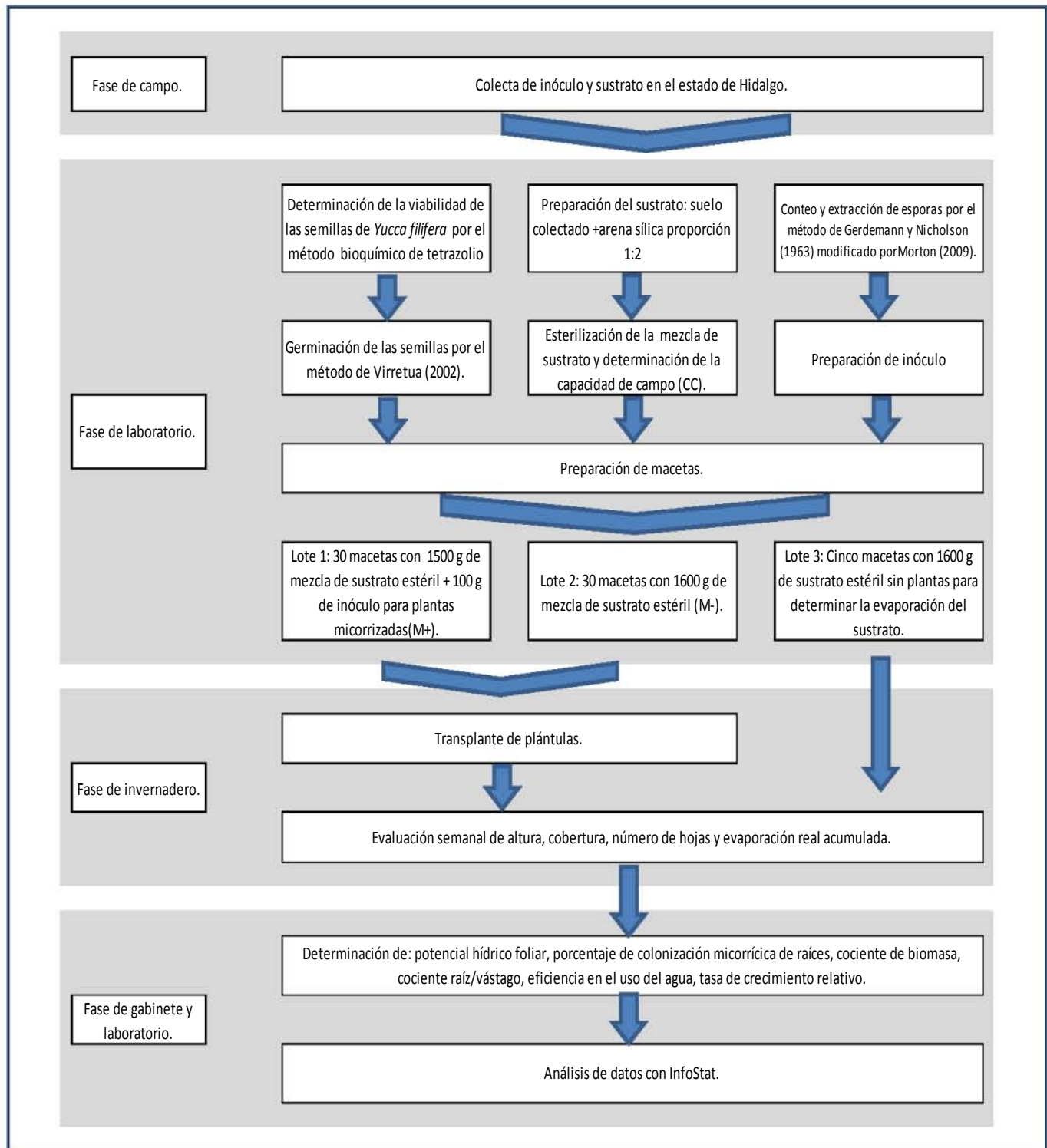


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología.

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM; siguiendo los pasos correspondientes en el diagrama de flujo de la figura 3.

7.1 Colecta de sustrato e inóculo

Se realizó una salida a campo para la obtención del inóculo y suelo que se utilizó en el experimento. El suelo se colectó en un agostadero semiárido en el municipio de Santiago de Anaya, ubicado en el Valle de Actopan. El inóculo se obtuvo extrayendo suelo rizosférico de los primeros 15 cm de profundidad del Parque Ecológico "Cubitos"; ambos lugares pertenecientes al estado de Hidalgo.

7.2 Semillas

Las semillas se obtuvieron del Banco de Semillas de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, las cuales se encontraban en un refrigerador comercial, a una temperatura aproximada de 4 °C. Las semillas utilizadas fueron colectadas en el parque Ecológico Cubitos, en el estado de Hidalgo.

7.3 Viabilidad

Para determinar la viabilidad de las semillas de *Yucca filifera* se utilizó la prueba bioquímica de cloruro de tetrazolio (Moreno 1984); la cual se basa en medir la viabilidad por el porcentaje de semillas coloreadas de rojo en sus embriones. Para la determinación de la viabilidad se colocaron cuatro repeticiones de 10 semillas de *Yucca filifera* en vasos de precipitados de 50 ml con cloruro de tetrazolio al 1%; antes de la imbibición se colocaron las semillas de *Yucca filifera* en agua durante 24 horas para ablandar la testa; posteriormente se cortaron longitudinalmente a la mitad para facilitar la penetración del cloruro de tetrazolio. Una vez transcurridas las 24 horas, se observaron al estereoscopio y se evaluó el número de semillas coloreadas. El porcentaje de viabilidad se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de viabilidad} = (\text{semillas coloreadas} / \text{semillas totales}) \times 100$$

7.4 Germinación

A las semillas de *Yucca filifera* se les aplicó el tratamiento pregerminativo propuesto por Virrueta (2002), en el cual se remojaron 60 semillas en agua durante 96 horas. Después se colocaron en cajas Petri con agar bacteriológico y se incubaron en una cámara de germinación a 30°C hasta que se observó la emergencia de la radícula para posteriormente trasplantarlas. Con la siguiente fórmula se calculó el porcentaje de germinación (García *et al.*, 2006):

$$\% \text{ de germinación} = \text{Número de semillas germinadas} / \text{Número de semillas totales} \times 100$$

7.5 Preparación del sustrato

El suelo colectado se mezcló con arena sílica de tamaño mediano en una proporción 2:1 (V/V). La arena sílica se agregó para mejorar la textura del sustrato y así favorecer la micorrización, además de facilitar la filtración del agua y evitar la compactación. Durante una hora esta mezcla se esterilizó dos veces en autoclave, a 15 libras de presión y 120 °C de temperatura.

7.6 Inóculo

El inóculo fue obtenido a partir de la rizosfera de *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, de los primeros 10-15 cm de profundidad, debido a que la principal fuente de inóculo de HMA se encuentra amplia y uniformemente distribuido en los primeros 10 cm del suelo. La caracterización del inóculo fue realizada en el invernadero de la FES Zaragoza por el Biólogo Eduardo Chimal Sánchez en mayo del 2010; el cual encontró 11 morfotipos fúngicos en total, con una densidad de 286 esporas contenidas en 100 g de suelo (cuadro 1).

Cuadro 1. Diversidad y densidad de esporas de HMA en 100 g de suelo proveniente de la rizosfera de *Bouteloua gracilis* colectado en la localidad de Cubitos, estado de Hidalgo.

Morfotipo	Proporción	Densidad esporas
<i>Glomus</i> sp1 blanco a amarillo paja aprox. 120µ	36.7%	105
Esporas sin hifa blanco con tintes amarillentos	8.0%	23
<i>Glomus</i> sp2 amarillo aprox. 100µ	9.0%	26
<i>Glomus</i> sp3 color naranja brillante aprox. 120µ	13.2%	38
<i>Glomus</i> sp4 color amarillo-naranja	5.2%	15
<i>Acaulospora</i> sp2 naranja aprox. 105µ	5.2%	15
Esporas naranja aprox. 65µ	2.5%	7
<i>Glomus</i> sp5 naranja-rojizos	9.4%	27
<i>Glomus</i> sp6 rojo muy pequeño	3.5%	10
<i>Gigaspora</i> amarillo-pálido 350 µ	3.1%	9
<i>Acaulospora</i> sp3	3.8%	11
11 morfotipos en total	100 %	286

7.7 Macetas

Las macetas utilizadas fueron construidas a partir de tubos de PVC de 25 cm de alto y 7.5 cm de diámetro. Se utilizaron 65 macetas con las mismas características, a las cuales se les selló por completo uno de los extremos, dejándolas sin agujero de drenaje, esto para poder medir de manera correcta la evaporación y evapotranspiración real, y tener una evaluación certera de la eficiencia en el uso del agua en ambos tratamientos.

7.8 Diseño experimental

Se montaron dos lotes de 30 macetas cada uno, cada maceta con una plántula de la especie en cuestión. Para el lote de micorrizadas (M+), cada maceta contenía 1500 g del sustrato + 100 g de inóculo; para las no micorrizadas (M-), las macetas solo contenían 1600 g de sustrato. Los dos lotes se regaron semanalmente a capacidad de campo. Finalmente se preparó un lote de cinco macetas sin plántulas, ni micorrizas, para la determinación de la evaporación del sustrato, con lo cual se calculó la transpiración de los organismos al final del experimento.

VIII. MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA

Las variables de respuesta durante el experimento fueron: altura máxima, cobertura y número de hojas. Estas se midieron semanalmente a partir del quinto día, después del trasplante, la duración del experimento fue de nueve meses. Transcurridos este tiempo se calculó el potencial hídrico foliar, el cociente raíz/vástago, la eficiencia del uso del agua (EUA), la evapotranspiración real acumulada, la transpiración, la tasa de crecimiento relativo (TCR), el porcentaje de colonización micorrízica y la biomasa húmeda y seca del vástago y la raíz.

8.1 Porcentaje de supervivencia

Para poder evaluar este parámetro se dividió el número de plantas vivas al final del experimento, entre el número de plántulas al inicio del experimento y se multiplicó por 100.

$$\% \text{supervivencia} = \text{PS} / \text{PI} \times 100$$

Dónde:

PS = Número de plantas vivas al final del experimento.

PI = Número de plántulas al inicio del experimento.

8.2 Cobertura

Esta se registró con ayuda de un vernier graduado en milímetros y se midió el diámetro mayor y el menor, tomando el centro de la planta como referencia y la longitud de las hojas más largas, formando un eje cartesiano de 90°. Estos diámetros permitieron calcular el área del círculo medio considerado como la cobertura.

8.3 Tasa de crecimiento relativo

Esta se determinó con base al promedio de los organismos, después se obtuvo el ln y se dividió entre el número total de días que duró el experimento (Hunt *et al.*, 2002).

$$TCR = \{\ln (L_2) - \ln (L_1)\} / T_2$$

En donde:

TCR = tasa relativa de crecimiento

L₂ = altura final (cm)

L₁ = altura inicial

T₂ = tiempo final (número de días al final del experimento)

T₁ = tiempo inicial = 0

8.4 Evapotranspiración real, evaporación y transpiración

La evapotranspiración real se define como la cantidad de agua perdida semanalmente por la evaporación del suelo, más la transpiración por parte de la planta (Luna, 2005). Para determinarla se pesó cada maceta antes y después de cada riego, utilizando la siguiente formula (Belmonte *et al.* 1999).

$$ETR = PDR - PAR$$

Dónde:

ETR = evaporación real semanal

PDR = Peso de la maceta después del riego (g) en la semana anterior

PAR = Peso de la maceta antes del riego (g) en la semana actual

La evaporación se determinó mediante la diferencia de peso de las cinco macetas utilizadas como testigo (sin plántula) durante cada semana.

$$EC = PCDR - PCAR$$

Dónde:

EC = evaporación del testigo medida semanalmente

PCDR = peso del testigo después del riego, en la semana anterior

PCAR = peso del testigo antes del riego, en la semana actual.

Para poder obtener la cantidad de agua transpirada durante una semana se usó el valor de la ETR, a la cual se le resto la cantidad de agua evaporada por parte de los testigos.

$$T = ETR - EC$$

Dónde:

T = transpiración

EC = agua evaporada del control.

ETR= evaporación real semanal.

8.5 Potencial hídrico foliar

Para determinar el potencial hídrico se empleó una cámara de Schollander; por lo que se necesitaron muestras foliares obtenidas de seis individuos sacrificados al azar, por cada tratamiento.

8.6 Biomasa, cociente raíz/vástago y eficiencia en el uso del agua

La biomasa seca total se determinó obteniendo seis individuos al azar por cada tratamiento, se les retiraron los restos de sustrato de los organismos y posteriormente se secaron en una estufa por 48 horas a 80°C. El cociente raíz/vástago se calculó obteniendo la cuantificación del peso seco de la raíz y la parte aérea de la planta (Luna, 2005). La eficiencia de uso del agua (EUA) se define como la proporción entre la materia seca producida y el consumo de agua en un periodo determinado. La evaluación se hizo con la siguiente fórmula (Salisbury *et al.* 1994; Rodríguez 2011).

$$EUA = \text{g de biomasa seca total} / \text{kg de agua irrigada total}$$

8.7 Porcentaje de colonización micorrízica

El porcentaje de colonización se determinó por el método propuesto por McGonigle *et al.* (1990) (citado por Álvarez *et al.*, 2008). Aplicando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de colonización micorrízica} = (\text{número de campos colonizados}) / (\text{número total de campos observados}) \times 100$$

8.8 Análisis estadístico

A los datos obtenidos en el experimento se les realizó una prueba de normalidad (Shapiro-Wilks). Los datos que exhibieron una distribución normal se les aplicó un ANOVA de un factor, haciendo una comparación de medias por el método de Tukey. Los que no se ajustaron a este tipo de distribución se les aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. Para el potencial hídrico foliar y el cociente Raíz/Vástago, además de realizarle las pruebas estadísticas antes mencionadas, también se les aplicó la prueba de t de student suponiendo varianzas desiguales, debido a

que los datos obtenidos por el ANOVA estuvieron muy cercanos de ser diferentes significativamente. Estas pruebas fueron realizadas con ayuda del programa InfoStat versión 2013 y Microsoft Office Excel 2007.

IX RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Viabilidad

El porcentaje de viabilidad obtenido por la prueba del cloruro de tetrazolio (Moreno, 1984) fue de 57.50% (cuadro 2), el cual concuerda con el porcentaje de germinación.

Cuadro 2. Número de semillas viables de *Yucca filifera*.

Semillas totales	Semillas viables	% de Viabilidad
40	25	57.50

9.2 Germinación

El cuadro 3 muestra el porcentaje de germinación de semillas de *Yucca filifera*; a las cuales, previamente se les aplicó el tratamiento pregerminativo de remojo en agua durante 96 horas, esto se realizó con el propósito de eliminar la latencia de las semillas de *Yucca filifera*, impuesta por una cubierta dura, impermeable al agua y los gases, provocando que estas presenten porcentajes de germinación menores al 50% (Virrueta, 2002). Aragón y García (1973), mencionan que la latencia de las semillas puede eliminarse con la aplicación de tratamientos pregerminativos como el remojo en agua, tiourea y nitrato de potasio, que puede incrementar los porcentajes de germinación por arriba del 80%. Camacho (2000), también menciona que para eliminar la latencia de las semillas es necesario sumergirlas en agua caliente, ácido sulfúrico, o en su defecto lijando la testa, lo cual induce a romper la latencia de las semillas.

Cuadro 3. Porcentaje de germinación después de aplicar el tratamiento pregerminativo (remojo en agua durante 96 horas).

Semillas totales	Numero de semillas germinadas	% de semillas germinadas	Numero de semillas no germinadas	% de semillas no germinadas
240	144	60	96	40

El porcentaje de germinación de *Yucca filifera* fue del 60%, el cual no fue tan alto, pero suficiente para obtener un número considerable de individuos a trasplantar. La latencia de las semillas se eliminó con el remojo en agua por 96 horas y su posterior introducción a la cámara de germinación.

9.3 Crecimiento

El crecimiento fue evaluado tomando en cuenta cuatro variables: la altura final, la cobertura, el número de hojas y la tasa de crecimiento relativo (TCR). En el cuadro 4 se muestran los promedios de los parámetros evaluados para ambos tratamientos.

Cuadro 4. Promedio de la altura, la cobertura, el número de hojas y la tasa de crecimiento relativo para el grupo de estudio (M+) y el testigo (M-) al final del experimento.

Variables	M+	M-
Altura (cm)	16.17	8.04
Cobertura (cm ²)	35.30	11.29
Número de hojas	8.76	4.56
TCR (d ⁻¹)	0.0076	0.0053

9.3.1 Altura

En este parametro las plantas micorrizadas mostraron en promedio mayor altura, en comparación con el testigo (cuadro 4). En la figura 4, se observa que las plantas micorrizadas (M+) muestran un crecimiento rápido y continuo desde el inicio del experimento, pero apartir del día 100 es cuando las diferencias entre tratamientos se hacen mas notables; el grupo de plantas no micorrizadas (M-) presentan un crecimiento lento y estable a partir del día 60. También se puede observar que existe una diferencia considerable en la altura final alcanzada por ambos tratamientos.

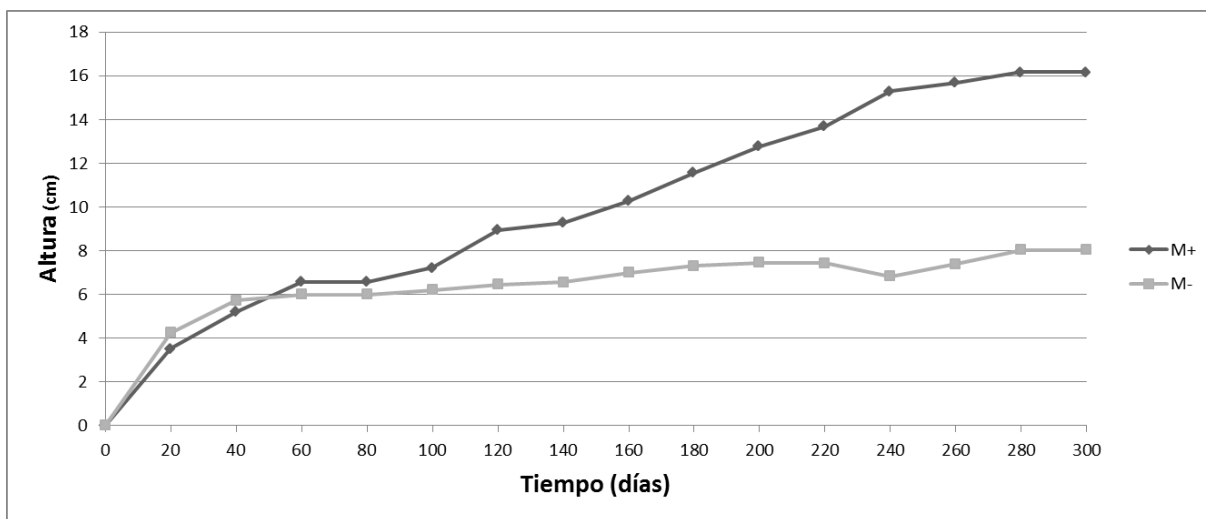


Figura 4. Altura promedio registrada en el tiempo de duración del experimento (300 días). Tratamiento (M+) y Testigo (M-).

9.3.2 Cobertura

El promedio más alto para la cobertura lo obtuvo el grupo micorrizado con un valor igual a 35.30 cm². En la figura 5 podemos observar que desde el día 80, las plantas micorrizadas empiezan a mostrar una ligera ventaja en la cobertura en comparación con las plantas no micorrizadas.

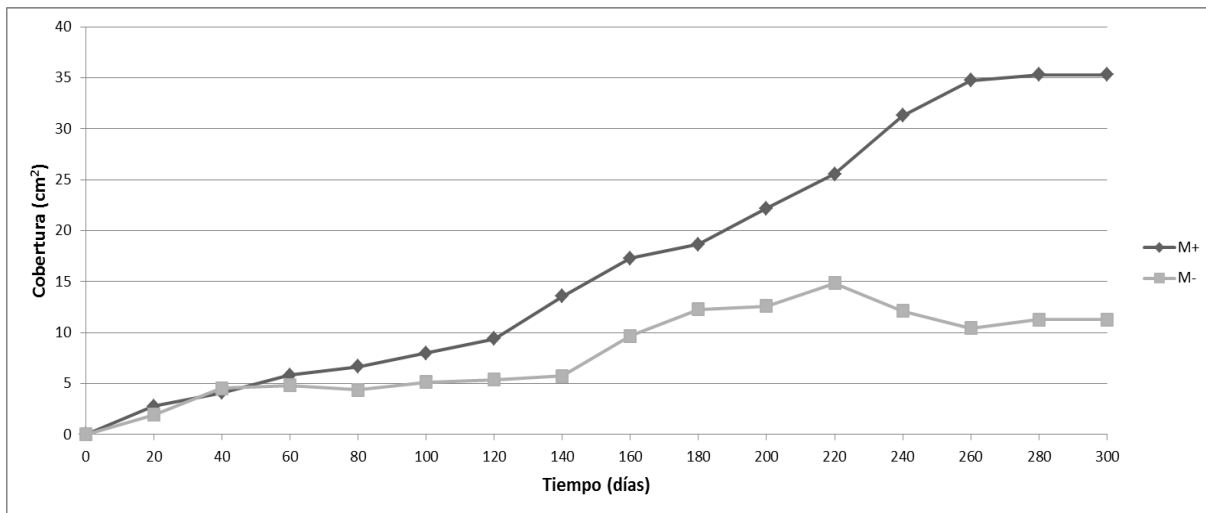


Figura 5. Cobertura promedio registrada en el tiempo de duración del experimento (300 días). El grupo de estudio es M+ y el testigo M-.

9.3.3 Número de hojas

En el figura 6 se observa que el promedio más alto para el número de hojas, al igual que en la altura y la cobertura, se registró en las plantas micorrizadas, con un valor de 8.77 hojas. La grafica 3 corrobora que las plantas micorrizadas muestra una producción de hojas mayor; esto se hace evidente a partir del día 40.

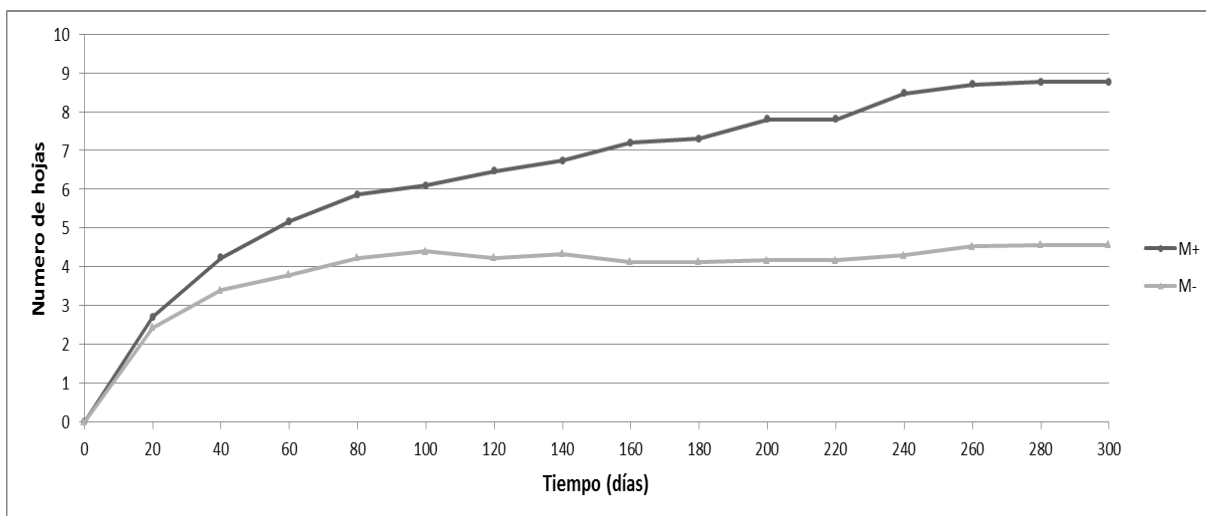


Figura 6. Número de hojas promedio registradas en el tiempo de duración del experimento (300 días). El grupo de estudio es M+ y el testigo M-.

Una vez obtenidos los resultados de la tabla 3, se realizó el análisis estadístico; en primer lugar se llevó a cabo la prueba de normalidad por el método de Shapiro-Wilks modificado; los resultados de esta prueba mostraron que los datos no se ajustaron a la normalidad, por lo que se procedió a realizar el análisis de varianza para datos no paramétricos (Kruskal Wallis) encontrando diferencias significativas ($p < 0.0001$) (anexo 1) para los variables antes descritas.

9.3.4 Tasa de crecimiento relativo (TCR)

La tasa de crecimiento relativo (TCR) fue mayor para M+ en comparación con el testigo (Figura 7). Con base en el análisis de varianza se encontró que hubo diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre ambos grupos (cuadro 6).

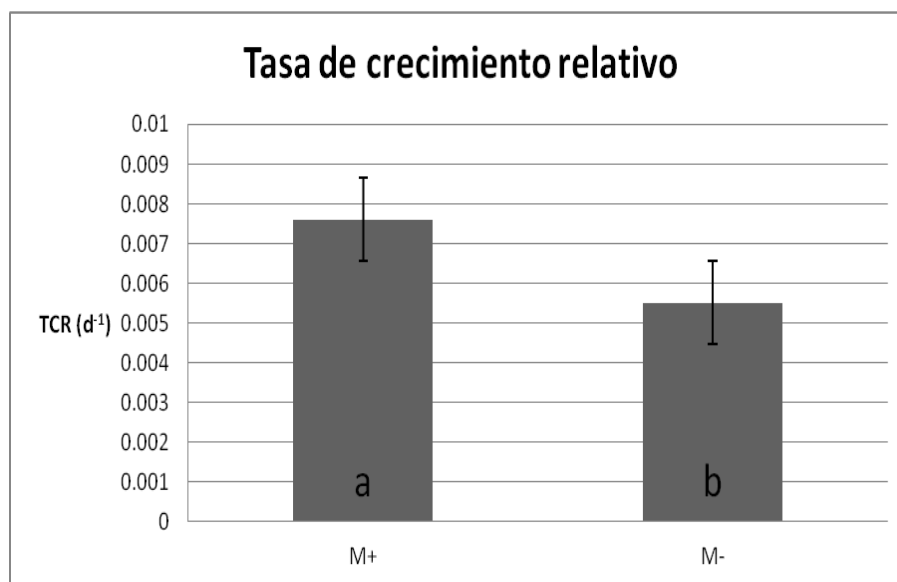


Figura 7. Tasa de crecimiento relativo. Letras distintas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). Las barras negras representan el error estándar. Grupo de estudio (M+) y testigo (M-).

Los resultados obtenidos en la altura, cobertura, número de hojas y la TCR, muestran que el grupo de plantas de *Yucca filifera* inoculadas con HMA, presenta un incremento en su crecimiento, en comparación con el grupo de plantas no micorrizadas, la causa de este incremento, son los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA); ya que forman abundantes hifas externas, además de estimular el crecimiento de las raíces aumentando el área de exploración y a la vez también incrementando el contacto con los agregados del suelo, mejorando así la capacidad del sistema radical para absorber y traslocar los minerales, principalmente P, mejorando el crecimiento de las plantas (Daniels-Hylton *et. al.* 1994).

9.4 Porcentaje de supervivencia

En la figura 8 se muestra la supervivencia de *Yucca filifera* al final del experimento. Se observa que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (cuadro 6). El porcentaje de supervivencia fue de 100% para M+ y 97% para M-. Esto probablemente se debe a que las plantas de ambos grupos se mantuvieron en condiciones de invernadero óptimas para su desarrollo y crecimiento; además ambos grupos se mantuvieron con riegos a capacidad de campo, de tal forma que las plantas no se sometieron a algún tipo de estrés provocado por algún recurso limitado, de esta manera las plantas de ambos grupos encontraron las condiciones óptimas para su supervivencia.

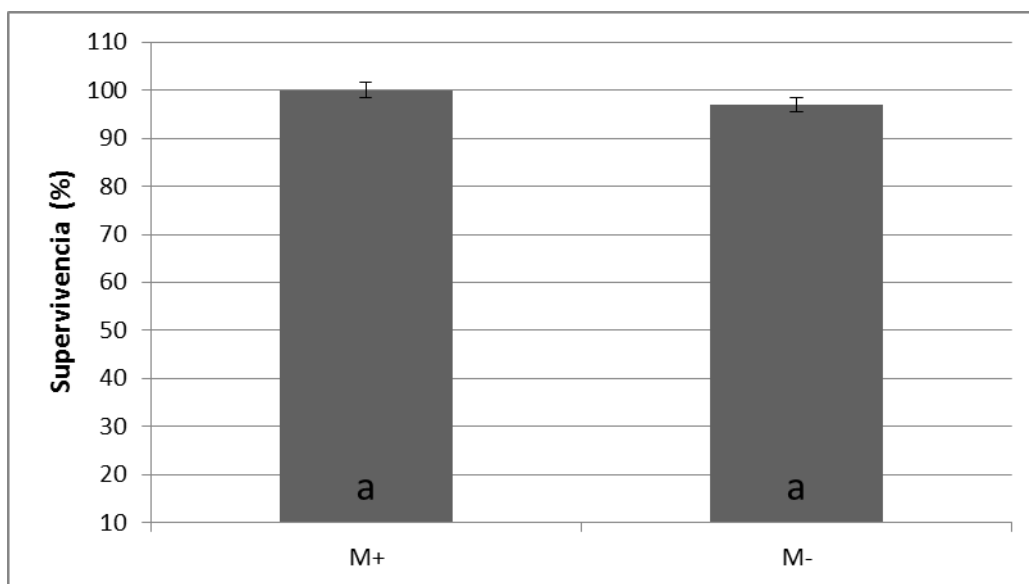


Figura 8. Porcentaje de supervivencia. Letras iguales no muestran diferencias significativas ($p > 0.05$). Las barras negras representan el error estándar. Plantas micorrizadas (M+) y testigo (M-).

9.5 Potencial hídrico foliar

El potencial hídrico es un indicador para describir el estado hídrico de las plantas (Yatapanage *et al.* 2001; tomado de García *et al.*, 2010); esta variable expresa el estado energético del agua en las células y los tejidos vegetales que a su vez controla el flujo hídrico en el continuo suelo-planta-atmosfera (Sánchez *et al.*, 2000; Taiz *et al.*, 2006). El valor registrado por el potencial hídrico es negativo, debido a que el potencial del soluto ejerce una tensión de afinidad al agua, por lo tanto, se vuelve un valor negativo y mientras sea más alto el valor obtenido más agua tiene disponible la planta para el proceso de fotosíntesis y la formación de carbohidratos. En este trabajo no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para esta variable ($p = 0.10$). Lo anterior pudo haber sido ocasionado debido a que ambos tratamientos fueron regados a capacidad de campo, por lo cual, ninguno de los grupos de estudio estuvo sometido a condiciones de estrés por falta de agua. Lo que sugiere que es de esperarse mayor impacto benéfico de los HMA cuando las plantas están expuestas a ambientes extremos que limitan su crecimiento (González *et al.*, 2007).

La mayoría de los estudios que evalúan el efecto de los HMA cuando las plantas están sometidas a estrés, 80 % de ellos demuestran que las plantas micorrizadas crecen y mejoran su estado hídrico en comparación con las plantas no micorrizadas (Auge, 2001; citado por Harris-Valle *et al.*, 2009). También es cierto que la infectividad y efectividad de los HMA varía dependiendo del hongo y la planta (Abbott *et al.*, 1985 citado por Flores *et al.*, 2008). Por lo anterior, sería recomendable hacer un análisis exhaustivo sobre los HMA que forman asociación con esta especie de planta, y a la vez saber que hongos tiene un mejor efecto en la planta inoculada. A pesar de no haber registrado diferencias significativas, si se logra notar levemente que las plantas micorrizadas presentaron un mejor estado hídrico con respecto a las no micorrizadas (Figura 9).

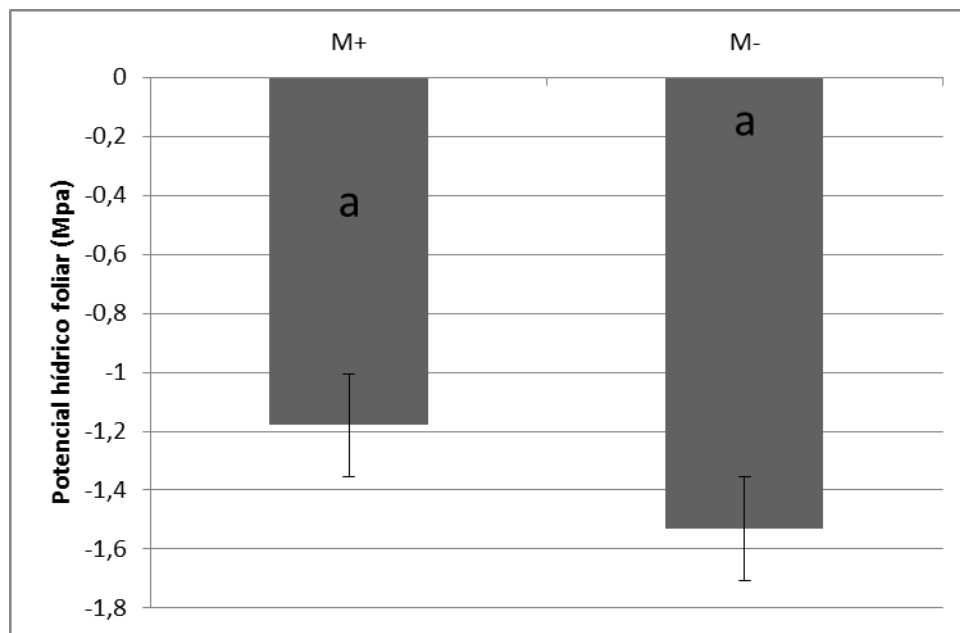


Figura 9. Potencial hídrico foliar. Letras iguales no muestran diferencias significativas ($p > 0.05$). Las barras negras representan el error estándar. Plantas micorrizadas (M+) y no micorrizadas (M-).

9.6 Biomasa húmeda y seca, cociente raíz/vástago (R/V) y eficiencia en el uso del agua (EUA)

La biomasa húmeda y seca del tratamiento micorrizado fue mayor en comparación con la producida por el testigo (cuadro 5). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ambos casos (Cuadro 6). Esto es atribuible al efecto de los HMA; ya que como se ha mencionado anteriormente, los HMA incrementan el potencial de la planta inoculada para explotar los recursos del suelo (agua y fósforo principalmente) (González 2005), dando como resultado un aumento en la producción de biomasa de la planta. Monroy *et al.* (2007), mencionan que un aumento en la biomasa representa mayores probabilidades de establecimiento exitoso en campo.

En el caso del cociente raíz vástago se registró que el tratamiento micorrizado obtuvo el promedio ligeramente más bajo comparado con el no micorrizado (Cuadro 5). No se encontraron diferencias significativas para este parámetro (Cuadro 6); sin embargo, en la figura 10 se puede apreciar que el grupo micorrizado presentó una menor relación raíz/vástago, posiblemente se deba a que las plantas micorrizadas no necesitan invertir más energía para aumentar la biomasa del sistema radical y explorar una mayor área para la captura de iones y agua, ya que el micelio externo producido por las micorrizas cumple con esta función (Pimienta *et al.*, 1998; tomado de Valladares, 2010; Cavagnaro *et al.*, 2001).

Cuadro 5. Promedio para el peso húmedo y seco de la raíz y el vástago, así como el cociente raíz/vástago y la eficiencia en el uso del agua. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Variable Tratamiento	Peso húmedo (g)		Peso seco (g)		Cociente R/V	Agua total irrigada (kg)	Eficiencia del uso del agua (g/kg de H ₂ O irrigada)
	Vástago (V)	Raíz (R)	Vástago (V)	Raíz (R)			
M+	6.8295 a	12.2183 a	2.7200 a	3.8717 a	1.4282	2.4370	2.6392 a
M-	1.8533 b	3.5300 b	1.3100 b	2.2733 b	1.7978	3.0680	1.1278 b

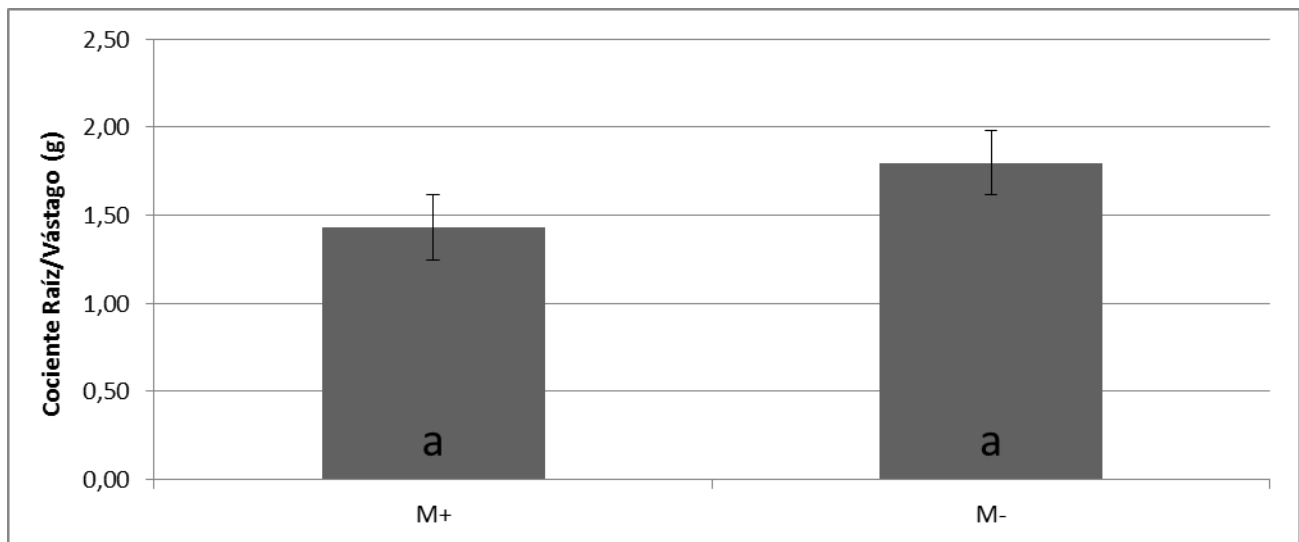


Figura 10. Cociente Raíz/Vástago. Letras distintas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). Las barras negras representan el error estándar. Plantas micorrizadas (M+) y no micorrizadas (M-).

En el caso de la eficiencia en el uso del agua (EUA), el grupo micorrizado obtuvo el promedio más alto (Cuadro 5) esto indica que las plantas micorrizadas produjeron más materia seca por kg de agua irrigada en comparación a las no micorrizadas, este comportamiento se debe posiblemente a que las plantas tienen una mayor capacidad de absorción de agua debido a la asociación con los HMA, ya que estos mejoran los agregados del suelo permitiendo una mejor hidratación en el mismo (Figura 11).

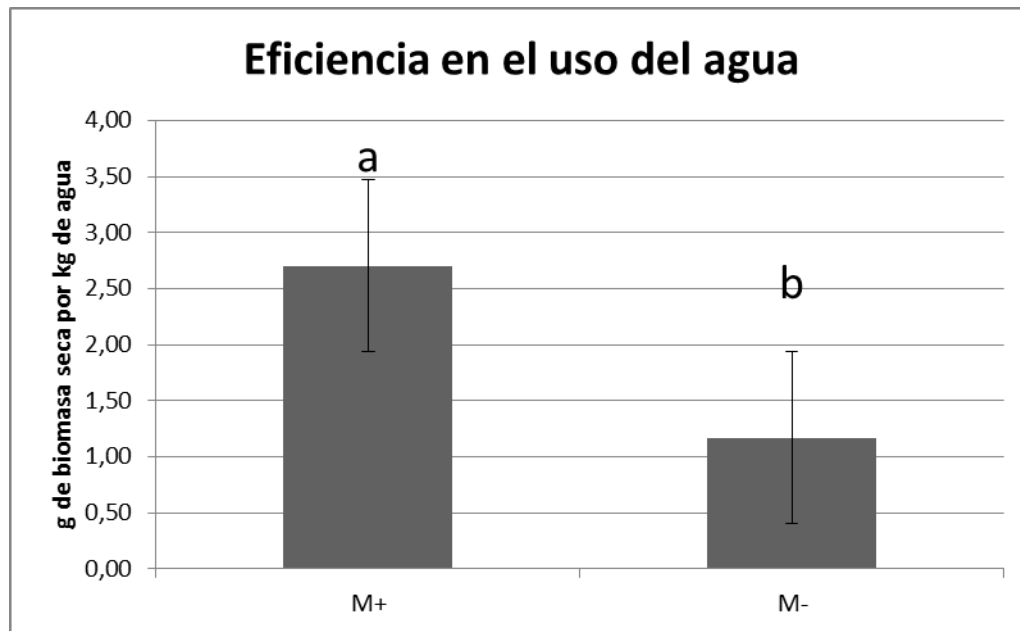


Figura 11. Eficiencia en el uso del agua. Letras distintas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). Las líneas negras representan el error estándar. Plantas micorrizadas (M+) y no micorrizadas (M-).

9.7 Evapotranspiración real acumulada

En el caso de la evapotranspiración real acumulada, no se encontraron diferencias significativas ($p = 0.3977$) (cuadro 5, figura 12); como se puede observar en la figura 13, la ETR fue muy similar en ambos grupos. Esto posiblemente debido a que ambos tratamientos se mantuvieron bien hidratados, a capacidad de campo. Se sabe que existen varios factores tanto ambientales, como los intrínsecos de las plantas que afectan la transpiración, estos son el suministro de agua a las raíces, la temperatura, el viento, la intensidad de la luz y la demanda evaporativa del agua del suelo por la atmósfera. En este sentido, si la disponibilidad de agua es abundante, el movimiento de esta a la raíz es rápido y la transpiración se encuentra controlada tanto por planta como por los factores atmosféricos, pero si el suministro es bajo, el movimiento del agua a la raíz es lento, disminuyendo así la transpiración, ya que la absorción restringida del agua provoca tensión hídrica de las hojas de la planta y el cierre de los estomas aumentando la resistencia de la hoja (Kramer, 1989). Los resultados obtenidos de la transpiración de las plantas micorrizadas y no micorrizadas mostraron diferencias significativas; esto indica que las plantas micorrizadas tuvieron más cantidad de agua para realizar sus procesos fisiológicos (Figura 14 y 15).

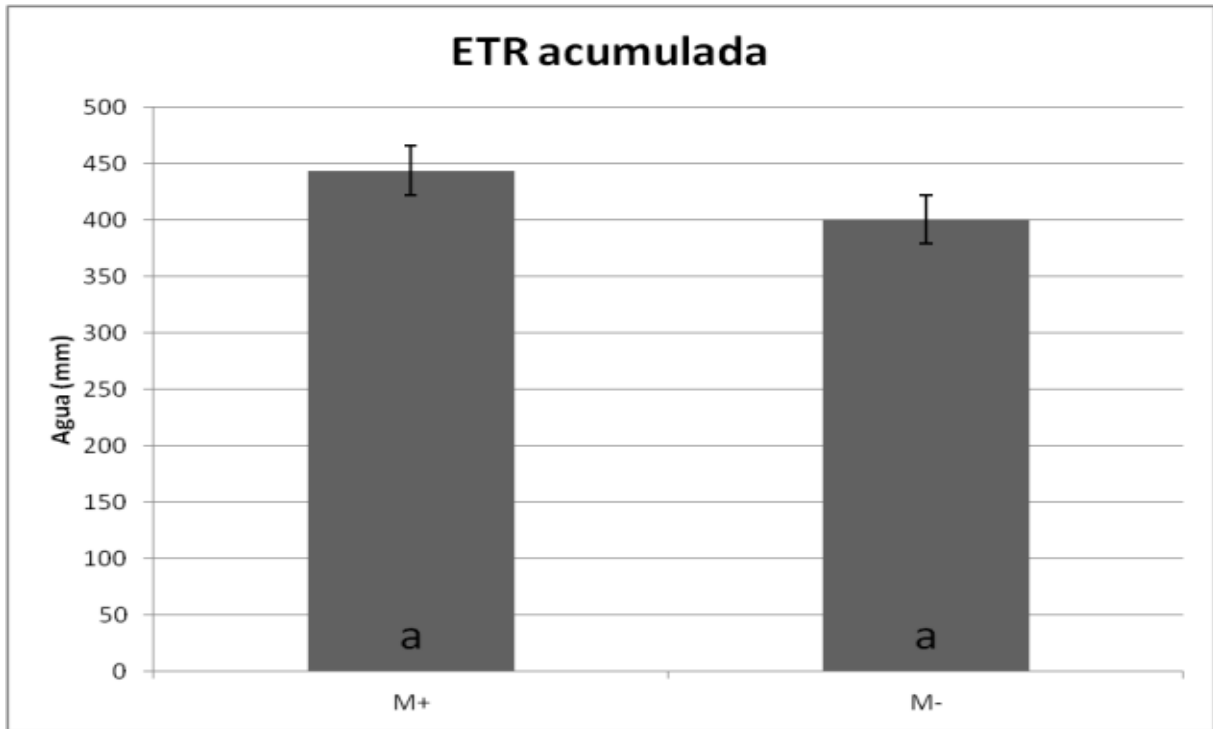


Figura 12. Evapotranspiración real acumulada. Letras iguales no muestran diferencias significativas ($p>0.05$). Las líneas negras representan el error estándar. Micorrizadas (M+), no micorrizadas (M-).

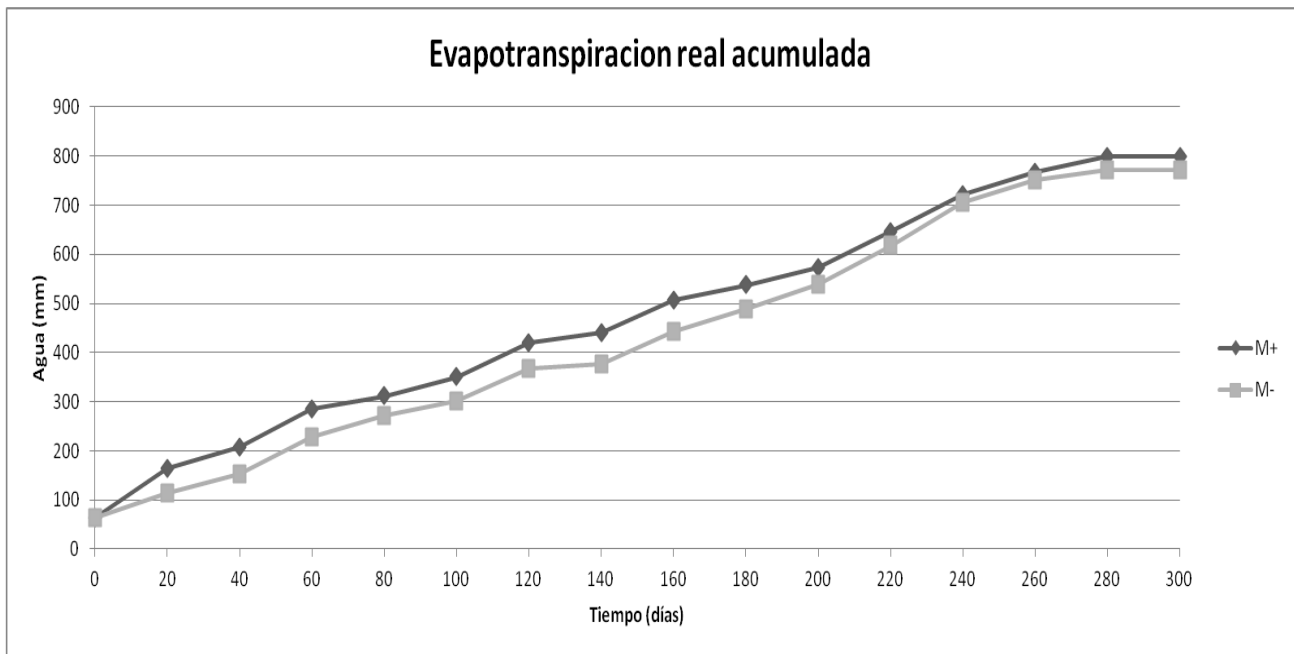


Figura 13. Evapotranspiración real acumulada promedio registrada durante 240 días. El grupo de estudio es M+ y el testigo M-.

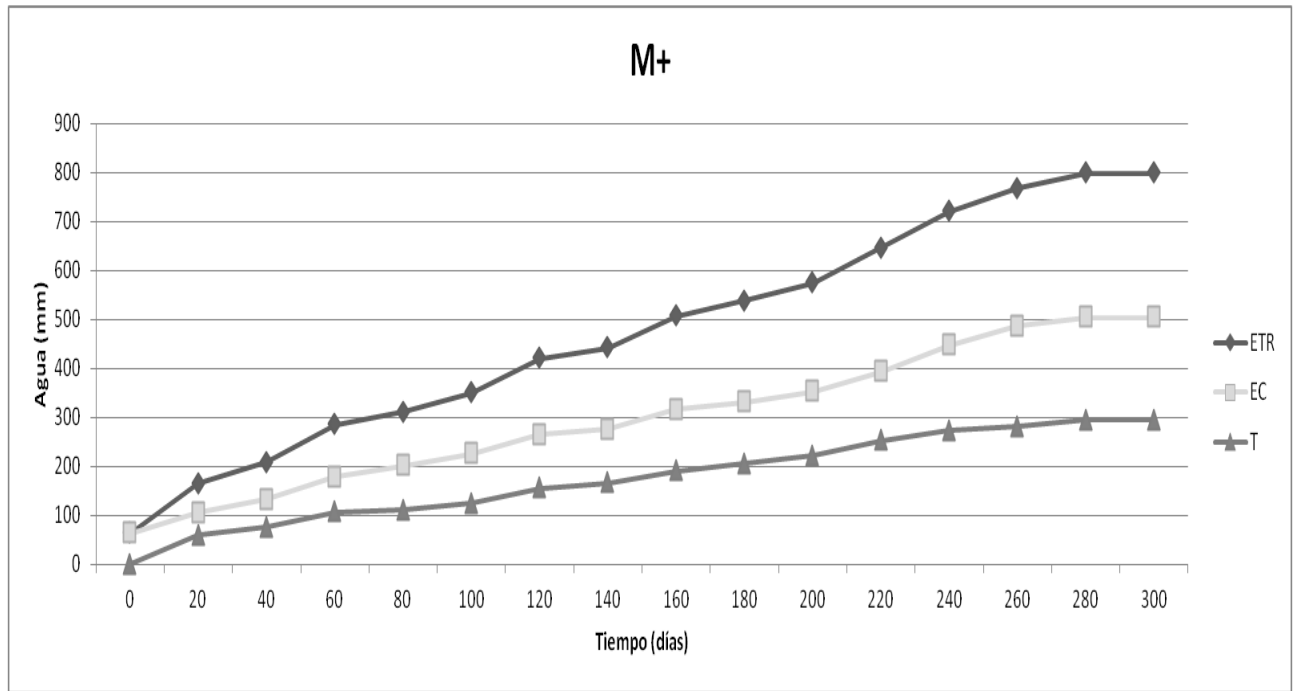


Figura 14. Evapotranspiración real (ETR), Evaporación (EC) y Transpiración (T) acumulada para el tratamiento M+ (Plantas micorrizadas).

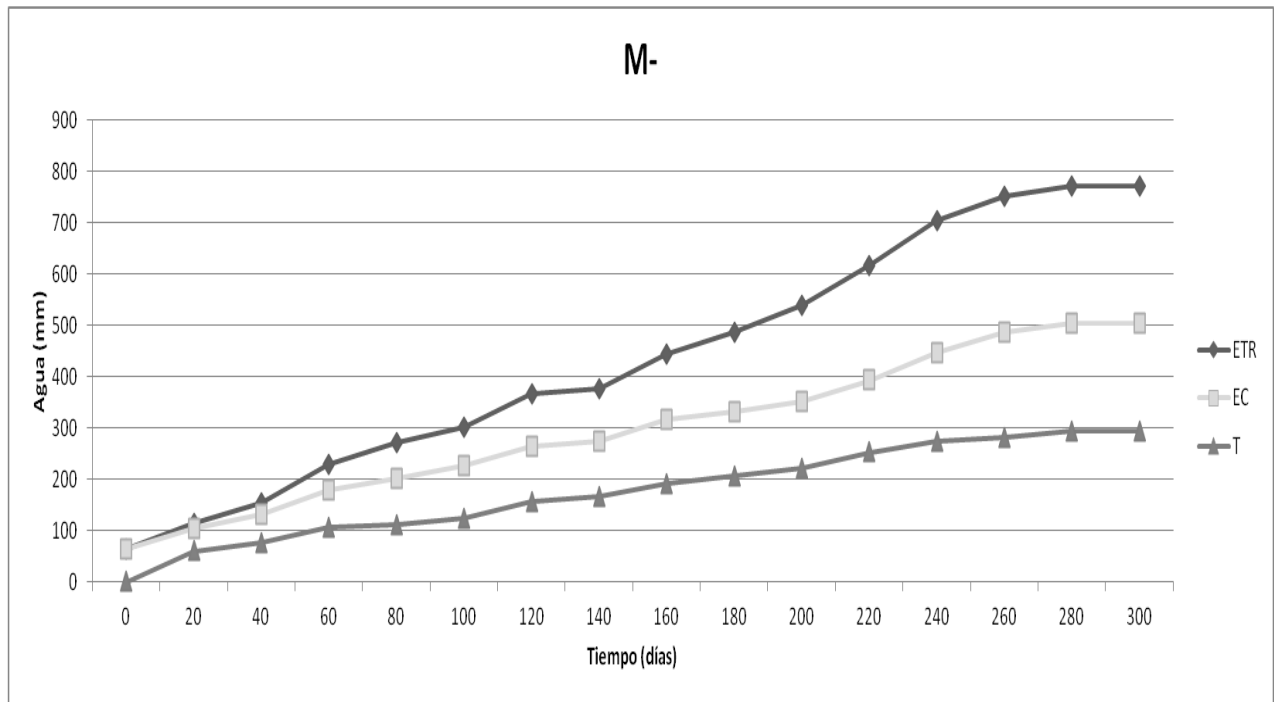


Figura 15. Evapotranspiración real (ETR), Evaporación (EC) y Transpiración (T) acumulada para el tratamiento M- (Plantas no micorrizadas).

9.8 Porcentaje de colonización micorrícica

El porcentaje de colonización micorrícica para el grupo estudiado fue de 33.97 %, encontrándose micelio intra y extra radical, así como vesículas y arbusculos (lamina 1 y 2), lo cual indica que el inoculo proveniente de la rizosfera de *Bouteloua gracilis* es funcional y que inicialmente contenía propágulos viables de HMA. En cuanto al testigo no se detectó ningún indicio de colonización (Figura 19). Se sabe que el grado de colonización micorrícica depende de diferentes factores, entre ellos destacan la planta simbiote, los hongos, los exudados de la raíz, la humedad, la temperatura y el pH. Cabe señalar que cuando el porcentaje de humedad en el suelo es mínimo, hay un retraso en el proceso de germinación de las esporas de los hongos (Varma, 1999; Rodríguez, 2002) trayendo como consecuencia un decremento en la colonización.

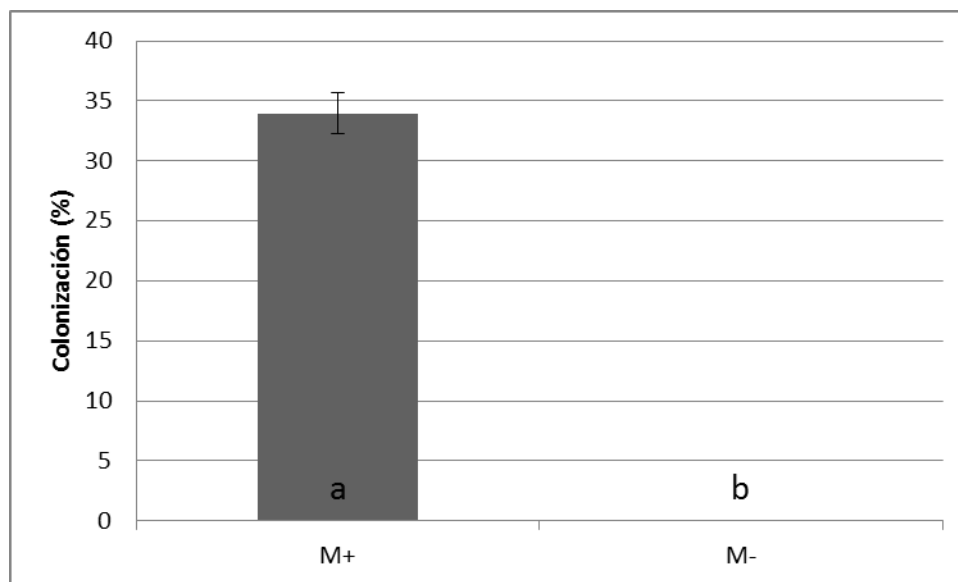


Figura 16. Porcentaje de colonización micorrícica. Letras distintas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$).

Las líneas negras representan el error estándar. Plantas micorrizadas (M+) y no micorrizadas (M-).

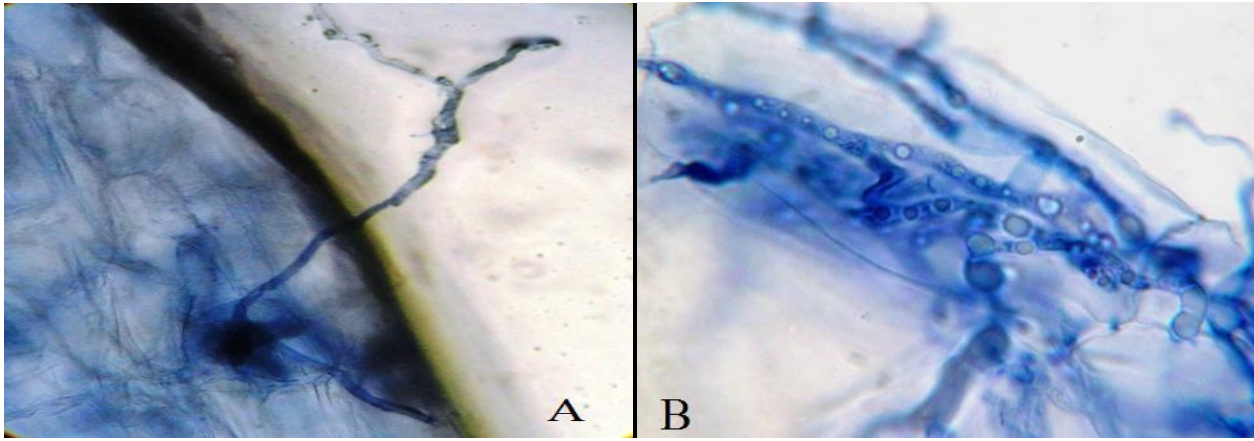


Lámina 1. Raíces de dos muestras diferentes de *Yucca filifera* inoculada con hongos micorrizógenos arbusculares. Figura A. Hifa que se extiende por dentro y fuera de la raíz. Fig. B se observa un conjunto de hifas o micelio intraradical.

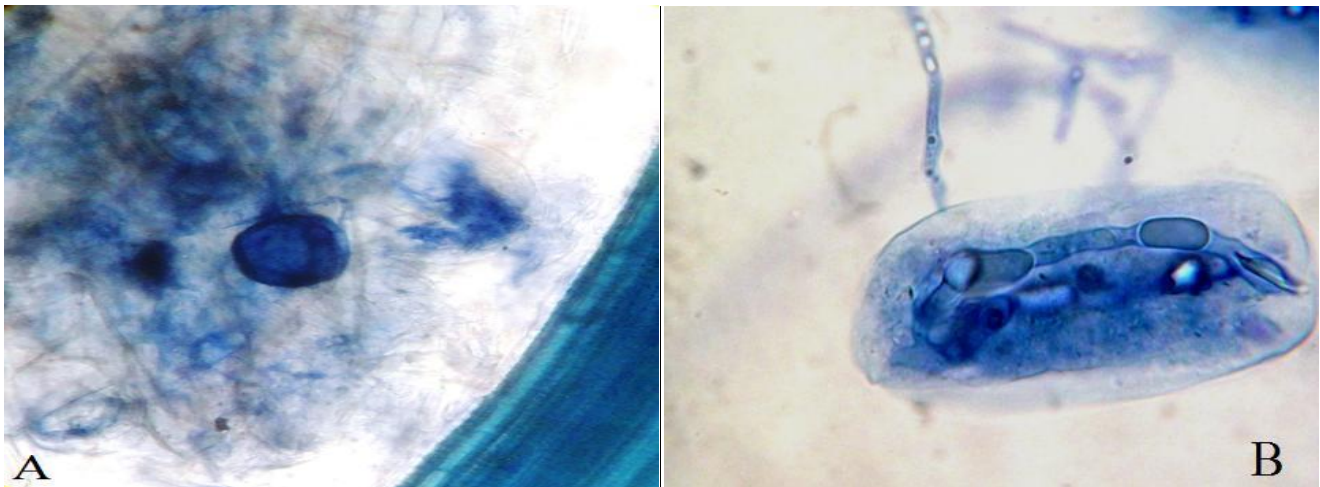


Lámina 2. Figura A. Vesícula. Figura B. Arbúsculo. Estructuras características de los HMA. Los arbúsculos son las estructuras en donde se lleva a cabo el intercambio de nutrimentos entre la planta y el hongo. Las vesículas son posibles estructuras de almacenamiento del hongo.

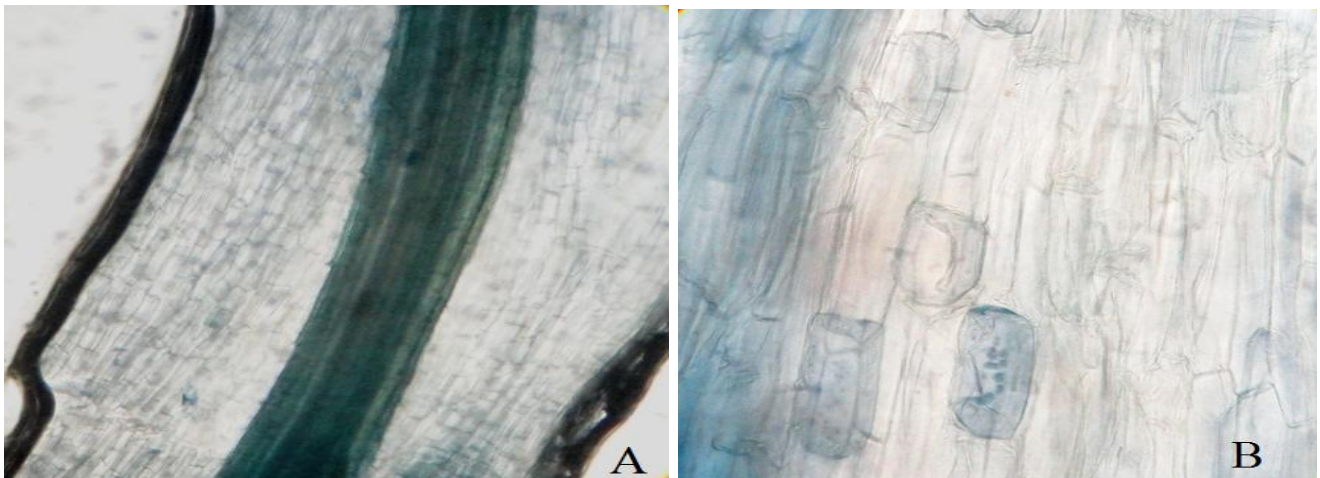


Lámina 3. Raíz de *Yucca filifera* sin inocular. Figura A. Raíz (corte longitudinal) observada con un aumento de 10X. Figura B. Raíz observada a 100 X.

Cuadro 6. Síntesis de resultados.

Tratamiento Variables	M+	M-	p(p<0.05)	Observaciones
Altura (cm)*	16.17	8.04	<0.0001	Las plantas micorrizadas mejoraron su crecimiento comparadas con las no micorrizadas, probablemente por el efecto de los HMA ya que estos por medio de sus hifas mejoran la captación de nutrimentos y agua necesarios para el crecimiento de las plantas.
Cobertura (cm ²)*	35.30	11.68	<0.0001	
Número de hojas*	8.77	4.72	<0.0001	
TCR (d ⁻¹)*	0.0076	0.0055	<0.0001	
ETR acumulada (mm)	441.84	398.68	0.3977	Los HMA no mejoraron la evapotranspiración ya que los resultados fueron muy similares en ambos grupos.
T acumulada (mm)*	165.57	122.41	0.0312	A diferencia de la ETR si se encontraron diferencias para esta variable lo cual indica que las plantas micorrizadas tuvieron mayor cantidad de agua para realizar sus procesos fisiológicos.
Supervivencia (%)	1.00	0.97	0.3173	Los HMA no afectaron la supervivencia de las plantas. Esto puede ser adjudicado a que ambos grupos se mantuvieron en condiciones de invernadero.
PHF (Mpa)	-1.18	-1.53	0.1009	El potencial hídrico foliar no fue afectado por los HMA, ya que ambos grupos presentaron una hidratación muy similar. Sin embargo, las plantas micorrizadas muestran una ligera mejoría en cuanto a su hidratación.
Biomasa húmeda total (g)*	19.54	4.98	<0.0001	Las plantas micorrizadas produjeron mayor cantidad de biomasa húmeda y seca. Esto indica que las plantas M+ aprovecharon mejor los recursos necesarios para su establecimiento.
Biomasa Seca total (g)*	6.59	3.58	<0.0001	
EUA (g/kg de agua irrigada)*	2.70	1.17	<0.0001	Las plantas micorrizadas produjeron más cantidad de biomasa por kg de agua irrigada.
R/V	1.43	1.80	0.0582	Aunque no se registraron diferencias significativas, las plantas micorrizadas tuvieron una relación raíz/vástago ligeramente más pequeña que las no micorrizadas; posiblemente porque las plantas micorrizadas no necesitan incrementar el tamaño de sus raíces para la adquisición de nutrimentos ya que el micelio externo de los HMA se encarga de realizar esta función.
% de colonización*	33.97%	0.00%	0.0022	El inoculo utilizado en este experimento fue efectivo para la infección de las plantas de <i>Yucca filifera</i> ; aunque presenta un porcentaje de colonización bajo. ⁹

*Presentan diferencias significativas (p <0.05).

X. CONCLUSIONES.

Respecto al crecimiento se encontraron diferencias significativas en cuanto a la altura, cobertura, número de hojas y la tasa de crecimiento relativo, lo cual manifiesta que el desarrollo de *Yucca filifera* se ve influido por los HMA, de tal manera que las plantas micorrizadas presentan un crecimiento mayor en comparación con las no micorrizadas, favoreciendo su establecimiento.

Las plantas micorrizadas registraron una mayor cantidad de biomasa tanto húmeda como seca, de esta forma se observó que los HMA influyen positivamente en la producción de biomasa por unidad de agua irrigada.

La eficiencia en el uso del agua fue significativamente mayor en las plantas micorrizadas que en las no micorrizadas, de esta manera se comprueba que la simbiosis favorece la hidratación de la planta simbiote, lo cual se ve reflejado en un aumento en la producción de biomasa por cada litro de agua irrigada.

La transpiración de las plantas micorrizadas fue mayor que en las no micorrizadas, por lo tanto, se concluye que las plantas micorrizadas mejoraron su hidratación y posiblemente el agua se utilice más eficientemente en los procesos fisiológicos.

A pesar de que el porcentaje de micorrización fue bajo, se encontraron estructuras fúngicas (arbúsculo y vesículas, además de micelio intra y extra radical) en las células de las raíces de las plantas simbiotes, lo cual indica que el inoculo utilizado contenía propágulos viables de HMA.

Se registró una tendencia en el aumento de la supervivencia de las plantas inoculadas, incrementando su establecimiento, debido a que aumentaron su crecimiento e hidratación.

El potencial hídrico foliar de las plantas en ambos grupos no mostró diferencias significativas, sin embargo las plantas micorrizadas aumentan ligeramente su hidratación, esto concuerda con la producción de biomasa por litro de agua irrigada y el aumento en la cantidad de agua perdida durante la transpiración de las plantas simbiotes.

Las plantas micorrizadas mostraron una menor relación raíz-vástago, ya que éstas no necesariamente producen raíces de mayor longitud, pues el micelio extra radical de las micorrizas se encarga de una exploración mayor para la absorción del agua y sales minerales disueltas.

La transpiración no se vio afectada por los HMA, debido a que las plantas micorrizadas las testigo se sometieron a un riego a capacidad de campo, Sin embargo, fueron las micorrizadas las que aprovecharon de mejor manera el agua incrementando su hidratación.

XI LITERATURA CITADA

- Álvarez, J., Monroy, A. 2008. Técnicas de estudio de las asociaciones micorrízicas y sus implicaciones en la restauración. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias. México D.F.
- Allen, M.F. 2007. Mycorrhizal fungi: Highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal* 6: 291-297.
- Aragón, S. N., García, C.M.T. 1973. Efectos físicos y químicos sobre la germinación de semillas y el establecimiento de plantulas en varias especies del genero *Yucca*. Tesis de licenciatura. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. I.P.N. México. P 8-25.
- Aronson, J., Floret, C., Le floc'h, E., Ovalle, C., Pontanier, R. 1993 (a). Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. *Restoration Ecology* , 1 (1), 8-17.
- Aronson, J., Floret, C., Le floc'h, E., Ovalle, C., & Pontanier, R. 1993 (b). Restoration and Rehabilitation of Degraded Ecosystems in Arid and Semi-Arid Lands. II. Case Studies in Southern Tunisia, Central Chile and Northern Cameroon. *Restoration Ecology*. 1 (3); 168-187.
- Azcón- Aguilar, C., Barea, J. M. 1996. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil- borne plant pathogens: an overview of the mechanisms involved. *Micorrhiza* 6: 457-464 pp.
- Belmonte, S., Romero, D. 1999. Interceptacion en algunas especies del matorral mediterraneo. España: Cuadernos de ecología y medio ambiente Universidad de Murcia .
- Blanco, F. A., Salas E. A. 1997. Micorrizas en la agricultura, Contexto mundial he investigación realizada en Costa rica. *Agronomía*. 2(1). 55-67.
- Calderon, G., Rzedowski, J. 2001. Flora Fanerogamica del Valle de Mexico (Vol. Unico). Patzcuaro, Michoacan: Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío.
- Camacho, M. F. 2000. Dormición y quiescencia en el manejo de las semillas forestales. Red Mexicana de germoplasma vegetal forestal. SEMARNAP-PRONARE. México. 7-22 pp.
- Camargo-Ricalde S. L. 2001. Some biological aspects of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 68: 15-32.
- Caravaca, F., Barea J. M., Palenzuela J., Figueroa D., Alguacil M. M., Roldan A. 2003. Establishment of Shrub species in a degraded semiarid site affter inoculation with native or allochtonous Arbuscular Mycorrhizal fungi *Applied Soil, Ecology* 22: 103-2012.
- Chimal, S. E. 2010. Ensayos para la obtención de inóculos de Hongos Micorrizicos Arbusculares (HMA) nativos del valle del mezquital, Hidalgo, México. Tesis de Licenciatura. UNAM.

- Comín, F. 2002. Restauración Ecológica: Teoría versus Práctica. 11 (1).
- Comisión Nacional Forestal [en línea]. Zapopan, Jalisco: CONAFOR, 2012. [Fecha de consulta: 10 abril 2013].
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en:
<<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1016Yucca%20filifera.pdf>>
- Daniels-Hylton, K. y Ahmad, M. 1994. Inoculation response in kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to vesiculararbuscular fungi and rhizobia in non-sterilized soil. *Biol. Fertil. Soils* 18: 95-98.
- De-la-Rosa-Mera, C., Monroy-Ata, A. 2006. MOSAICOS DE VEGETACIÓN PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN UNA ZONA SEMIÁRIDA. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 96-100.
- Finlay, R. D. 2008. Ecological aspects of micorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*. 59: 1115-1126.
- Flores, B. M., Aguilar, E. S., García, C. R., Zamora, C. A., Farías, L. J., López, A. J. 2008. Inoculación con hongos micorrícicos arbusculares y el crecimiento de plántulas de leucaena. *Colima Mex. Terra Latinoamericana* 26. 2. 127-131 pp.
- Florescano, E. 1997. El patrimonio nacional de Mexico. Mexico: Fondo de Cultura Economica .
- García, L. A., Cun, G. R. y Montero S. L. 2010. Efecto de la hora del día en el potencial Hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 19: 7-11.
- García, M., Villamizar, F., Torres, A., Cortes, A. 2006. Efecto de subcultivos sucesivos de *Beauveria bassiana* sus características y actividad contra *Premnotrypes vorax*. *Manejo Integrado de Plantas y Agroecología* .
- García, M. 2007. ESTUDIO TAXONÓMICO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES ASOCIADOS A *Bouteloua curtipendula* EN CUATRO POBLACIONES DEL VALLE DEL MEZQUITAL HGO. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Gerdemann, J. W., Nicolson, T. H. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244.
- Guerrero, E., Rivillas, C, Rivera, E. 1996. Perspectivas de manejo de la micorriza arbuscular en ecosistemas tropicales. En Guerrero E. (Ed.), *Micorrizas. Recurso Biológico del suelo*. Fondo FEN Colombia, Bogotá. 181-201 pp.
- González, C. M., Alarcón, A. y Ferrera, C. R. 2007. Biodiversidad funcional de los hongos micorrícicos arbusculares en zonas áridas y semiáridas. En: *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Mundi-Prensa. S.A. de C.V., UAM Iztapalapa. Distrito Federal. 37-62 pp.

- González, M. C., Monroy, A. A., García, A. E. y Orozco, A. S. 2005. Influencia de hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) en el desarrollo de plantulas de *Opuntia streptacantha* Lem. sometidas a sequía, en condiciones de invernadero.
- Harley, L. 1989. The fourth benefactor's lecture. The significance of mycorrhiza. En *myco. Res.* (2):92.
- Harris, V. C., Esqueda, M., Valenzuela, S. E., Castellanos, A. 2009. Tolerancia al estrés hídrico en la interacción planta-hongo micorrizico arbuscular: metabolismo energético y fisiología. *Rev. Fitotec. Mex.* 32. 4. 265-271 pp.
- Hernandez, R., Lugo, E., Diaz, L., Villanueva, S. 2005. Extraccion y cuantificacion indirecta de las saponinas de *Agave lechuguilla* torrey. 3 (11).
- Hernández, H., Ordoñez, C. 2006. Hongos micorrizicos arbusculares de ocho localidades del valle del mezquital, Hidalgo. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Hunt, R., Shipley, B., Askew, P. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany.*
- Instituto de Biología. "*Yucca filifera* Chabaud - IBUNAM:MEXU: AGA275239". UNIBIO: Colecciones Biológicas. 2010-02-14. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultada en: 2013-4-11. Disponible en: <<http://unibio.unam.mx/collections/specimens/urn/IBUNAM:MEXU:AGA275239>>
- Kramer, P. J., Relaciones hídricas de suelos y plantas, una síntesis moderna. Harla-México. México. p 538.
- Luna, I. 2005. Influencia de los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) sobre el desarrollo de *Agave salmania* (Agavaceae) y *Opuntia streptacantha* (Cactaceae) en condiciones de invernadero . México D. F. : Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM .
- López, G. I. 2006. Hongos de micorriza arbuscular en diferentes sistemas de producción de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) en Oaxaca. Maestría en ciencias en conservación y aprovechamiento de recursos naturales (proteccion y produccion vegetal). Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional. p-92.
- Martínez, L. B., Pugnaire, F. I. 2009. Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. algunos ejemplos en los ecosistemas semiáridos. 18 (2), 44-54.
- Martínez, L.; Martínez, M. 2009. Establecimiento de plantas de *Mimosa depauperata* inoculadas con hongos micorrizogenos arbusculares (HMA) en condiciones de invernadero. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Marulanda, A., Porcel, R., Barea, J., Azcón, R., 2007. Drought tolerance and antioxidant activities in lavender plants colonized by native drought-tolerant or drought-sensitive *Glomus* species. *Microbial Ecology* 54:543-552.
- Monroy, A. 2002. En busca del paraíso perdido: restauración ecológica. *Conversus* , 28-33.
- Monroy, A., García, R. 2009. Los hongos micorrizógenos arbusculares en prácticas de restauración de vegetación semiárida. En A. Monroy Ata, & R. García Sánchez, Plantas y hongos micorrizas

arbusculares: un mutualismo esencial en zonas semiáridas, Unidad de investigación en ecología vegetal. . México D. F. : Universidad Nacional Autónoma de México .

Monroy, A., Estevez, J., García, R. y Rios, R. 2007. Establecimiento de plantas mediante el uso de micorrizas y de islas de recursos en un matorral xerófilo deteriorado. Boletín de la sociedad Botánica de México (80), 49-57.

Montaño, N. 2000. Potencialidad de los hongos micorrizógenos arbusculares de las islas de fertilidad de Mezquite (*Prosopis leaviagata*) de dos agostaderos semiáridos del Valle de actopan, México central, un enfoque ecológico para recuperar la vegetación. Tesis de licenciatura en Biología, UNAM. FES Zaragoza, unidad de investigación de ecología vegetal, México, D.F.

Montaño, N.M., A. Monroy 2000 Alternativas para la conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*. 26(154):26-37.

Montaño, N., Camargo, S., García, R., Monroy, A. 2007. Micorrizas Arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos (Arbuscular mycorrhizae in arid and semiarid ecosystems). Mundi-Prensa SA de CV. México D. F.

Moore, D., Robson, D. G., Trinci, P. A. 2011. 21 st century guide book to fungi. Cambridge university pres. Cambridge. P-336-340.

Moreno, C. 1984. Analisis físico y biológico de semillas agrícolas. México: Instituto de biología UNAM .

Morton. 2009. <http://invam.caf.wvu.edu/>

Newsham, K., Fitter, H., Watkinson, R. 1995. Arbuscular mycorrhiza protects an annual grass from root pathogenic fungi in the field. *J. Ecol.* 83: 991-1000 pp.

Orozco, A. M. S. 1993. Efecto de la profundidad de siembra y fertilización en el establecimiento de 3 zacates forrajeros. Tesis de Maestría en ciencias, Colegio de Postgraduados.

Paz, I. 2006. Establecimiento de plantulas de Mezquite (*Prosopis leavigata*) inoculadas con hongos micorrizogenos arbusculares bajo un sistema prehispánico de riego por goteo en una zona semiárida deteriorada. Tesis de licenciatura. Facultad de estudios Superiores Zaragoza. UNAM. México.

Querejeta, J.I., Allen, M.F., Caravaca, F., Roldan, A., 2006. Differential modulation of host plant delta13C and delta18O by native and nonnative arbuscular mycorrhizal fungi in a semiarid environment. *New Phytologist* 169:379-387.

Ramos-Zapata, J.; Guadarrama, P. 2004. Los hongos micorrizógenos arbusculares en la restauración de comunidades tropicales. *Universidad y Ciencia*. (1):59-65.

- Redecker, D., A. Schüßler, H. Stockinger, S. Stürmer, J. Morton, and C. Walker. 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*). *Mycorrhizado*: 10.1007/s00572-013-0486-y.
- Rodríguez, H. G. 2002. Inducción del enraizamiento en *Agave salmiana* Otto con *Agrobacterium rhizogenes* y colonización de raíces transformadas por *Glomus intraradicales*. Tesis de Doctorado. Facultad de ciencias biológicas y agropecuarias. Universidad de Colima.
- Rodríguez, R. 2011. Establecimiento de plantas de zacate navajita, *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths, inoculadas con hongos micorrizogenos arbusculares (HMA) y sometidas a sequia en condiciones de invernadero. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski y colaboradores, 2005. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2a. ed., 1a reimp., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro (Michoacán), 1406 pp.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México (Vol. 1). México D.F.: LIMUSA.
- Salisbury, B., & Ross, W. 1994. Fisiología Vegetal. México: Editorial Iberoamericana.
- Sánchez-Díaz, M., Aguirrelea, J. 2001. "El agua en la planta". En: Fundamentos de Fisiología Vegetal Editorial Mundi- Prensa. España. pp. 17-30.
- Sánchez, S. O. 1979. La flora del valle de México. Editorial Herrero, S.A. Quinta edición. Pag 99
- Selosse, M. A., Le Tacon, F. 1998. The land flora: a phototroph-fungus partnership? *Trends in ecology and evolution*. 13 (1): 20.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular arbuscular mycorrhiza management in Tropical Agrosystems. GTZ. Federal Republic of Germany.
- Sol, A., Zenteno, C., Zamora, L., Torres, E. 2005. Modelo para la restauración ecológica de áreas alteradas. VII (14), 48-60.
- Skujins, J. 1991. Semiarid lands and deserts: soil resource and reclamation. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Smith, S. E.; Read, D. J. 1997. Mycorrhizal symbiosis. Editorial Academic Press. London. 605pp.
- Taiz, L., Zeiger, E. 2006. *Water and Plant Cell*. En: Plant Physiology. Sinauer Associates. Inc. Publishers. Cuarta edición. Massachusetts, USA, 2006.

- Torres, A. A. E. 2005. Establecimiento de plántulas de mezquite (*Prosopis leavigata*) inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), bajo condiciones de sequía en invernadero. Tesis de Licenciatura. Facultad de estudios Superiores Zaragoza. UNAM, México.
- Schüßler, A., Walker, C. 2010. The Glomeromycota. A species list with new families and new genera. Gloucester, England.
- Urbanska, K. M., Webb, N. R., Edwards, P. J. 1997. Restoration ecology and sustainable development. U. S. A.: Cambridge University Press.
- Valladares, S. K. 2010. Crecimiento de plantas de *Agave Salmiana* Otto y *Mimosa lacerata* Rose inoculadas con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) en condiciones de invernadero. Tesis de licenciatura. UNAM.
- Van der Heijden, M.G.A.; Klironomos, J. N. Ursic M.; Moutoglis, P.; Streitwolf-Engel, R.; Boller, T.; Wiemken, A.; Sanders, I. R. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant Biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* (396):69-72.
- Varma, A. 1999. Function and application of arbuscular mycorrhizal fungi in arid and semi-arid soils. En: *Mycorrhiza. Structure, function, molecular biology and biotechnology*. Varma A. Y Hock B. (eds). Springer. Berlin. 521-556 pp.
- Velasco, H. 1991. Las zonas áridas y semiáridas sus características y manejo. México d. f.: Limusa.
- Virrueta, J. 2002. Efecto de la procedencia, la población, la longitud de onda y el tratamiento pregerminativo en la germinación de dos especies del género *Yucca* spp. México D.F.: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Zamora, R. 2002. La restauración ecológica: una asignatura pendiente . 11 (1).
- Zetina, J. 2008. Establecimiento de *Yucca Filifera* inoculada con hongos micorrizógenos arbusculares (HMA), en condiciones de invernadero. Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Anexo I

Morfotipo encontrado con mayor frecuencia en la muestra de suelo proveniente de la localidad de cubitos. Estas fotografías fueron tomadas por el Biólogo Eduardo Chimal Sánchez, en el Laboratorio de la Unidad de Investigación en Ecología Vegetal de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.



Figura 1. *Glomus* sp1. Morfotipo con mayor densidad de esporas en 100 g de suelo.

Anexo II

Cuadros de pruebas estadísticas aplicadas a las variables de respuesta.

Cuadro 7. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) aplicado a la altura.

Tratamiento	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
M-	ALTURA FINAL	29	8.04	1.59	0.86	0.0013
M+	ALTURA FINAL	30	16.17	2.53	0.95	0.4397

Cuadro 8. Análisis de varianza para datos no paramétricos (Kruskal Wallis) para la altura.

Variable	tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
ALTURA FINAL	M-	29	8.04	1.59	7.60	43.30	<0.0001
ALTURA FINAL	M+	30	16.17	2.53	16.25		

Trat.	Ranks
M-	15.03 A
M+	44.47 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 9. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de cobertura.

Tratamiento	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)	
M-	COBERTURA FINAL	29	11.68	6.11	0.89	0.0154	
M+	COBERTURA FINAL	30	35.30	15.78	0.95	0.5266	

Cuadro 10. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para la cobertura.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
COBERTURA	59	0.50	0.49	50.84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	8228.67	1	8228.67	56.72	<0.0001
Tratamiento	8228.67	1	8228.67	56.72	<0.0001
Error	8269.33	57	145.08		
Total	16498.00	58			

Cuadro de comparación de medias por el método de Tukey para la cobertura

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=6.28055

Error: 145.0760 gl: 57

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
M-	11.68	29	2.24	A
M+	35.30	30	2.20	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 11. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de número de hojas.

Tratamiento	Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
M-	No. de hojas	29	4.72	0.96	0.73	<0.0001
M+	No. de hojas	30	8.77	1.70	0.91	0.0548

Cuadro 12. Análisis de varianza para datos no paramétricos (Kruskal Wallis) para el número de hojas.

Variable	tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
No. de hojas	M-	29	4.72 0.96	4.00	40.36		<0.0001
No. de hojas	M+	30	8.77 1.70	8.50			

Trat. Ranks

M- 15.55 A

M+ 43.97 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 13. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para la tasa de crecimiento relativo.

Tratamiento	Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
M-	TCR	29	0.01	1.1E-03	0.97	0.7937
M+	TCR	30	0.01	2.1E-03	0.83	0.0003

Cuadro 14. Análisis de varianza para datos no paramétricos (Kruskal Wallis) para la tasa de crecimiento relativo.

Variable	tratamiento	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
TCR	M-	29	0.01 1.1E-03	0.01	19.87		<0.0001
TCR	M+	30	0.01 2.1E-03	0.01			

Trat. Ranks

M- 19.86 A

M+ 39.80 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 15. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de la eficiencia del uso del agua.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
M-	EUA	6	1.17	0.15	0.83	0.1310
M+	EUA	6	2.70	0.38	0.88	0.3050

Cuadro 16. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para la eficiencia en el uso del agua.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
EUA	12	0.89	0.88	15.11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7.09	1	7.09	82.82	<0.0001
TRATAMIENTO	7.09	1	7.09	82.82	<0.0001
Error	0.86	10	0.09		
Total	7.94	11			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.37627

Error: 0.0856 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M-	1.17	6	0.12 A
M+	2.70	6	0.12 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 17. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de biomasa húmeda total.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
M-	BHT	6	4.98	0.94	0.96	0.8335
M+	BHT	6	19.54	4.38	0.93	0.6642

Cuadro 18. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para la biomasa húmeda total.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BHT	12	0.86	0.85	25.85

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	635.65	1	635.65	63.32	<0.0001
TRATAMIENTO	635.65	1	635.65	63.32	<0.0001
Error	100.38	10	10.04		
Total	736.03	11			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.07578

Error: 10.0383 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M-	4.98	6	1.29 A
M+	19.54	6	1.29 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 19. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de biomasa seca total.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
M-	BST	6	3.58	0.47	0.83	0.1309
M+	BST	6	6.59	0.94	0.88	0.3049

Cuadro 20. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para la biomasa seca total.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
BST	12	0.83	0.81	14.57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	27.15	1	27.15	49.44	<0.0001
TRATAMIENTO	27.15	1	27.15	49.44	<0.0001
Error	5.49	10	0.55		
<u>Total</u>	<u>32.64</u>	<u>11</u>			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.95329

Error: 0.5491 gl: 10

<u>TRATAMIENTO</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>
M-	3.58	6	0.30
M+	6.59	6	0.30

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 21. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro de evapotranspiración real acumulada.

<u>TRATAMIENTO</u>	<u>Variable</u>	<u>n</u>	<u>Media</u>	<u>D.E.</u>	<u>W*</u>	<u>p(Unilateral D)</u>
M-	ETR acumulada	33	398.68	210.61	0.92	0.0626
M+	ETR acumulada	33	441.84	201.10	0.93	0.1397

Cuadro 22. Análisis de varianza comparación de medias por el método de Tukey para la evapotranspiración real acumulada.

<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
ETR acumulada	66	0.01	0.00	49.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	30733.37	1	30733.37	0.72	0.3977
TRATAMIENTO	30733.37	1	30733.37	0.72	0.3977
Error	2713513.47	64	42398.65		
<u>Total</u>	<u>2744246.84</u>	<u>65</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=101.26765

Error: 42398.6479 gl: 64

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M-	398.68 33	35.84	A
M+	441.84 33	35.84	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 23. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro transpiración acumulada.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
M-	T acumulada	33	122.41	88.04	0.88	0.0032
M+	T acumulada	33	165.57	78.22	0.91	0.0453

Cuadro 24. Análisis de varianza para datos no paramétricos (Kruskal Wallis) para la transpiración acumulada.

Variable	TRATAMIENTO	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
T acumulada	M-	33	122.41	88.04	102.12	4.64	0.0312
T acumulada	M+	33	165.57	78.22	166.30		

Trat. Ranks

M- 28.41 A

M+ 38.59 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 25. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro del potencial hídrico foliar.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
M-	PHF	6	-1.53	0.44	0.81	0.0967
M+	PHF	6	-1.18	0.11	0.94	0.6852

Cuadro 26. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para el potencial hídrico foliar.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHF	12	0.27	0.20	23.67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo.	0.39	1	0.39	3.75	0.0815	
TRATAMIENTO		0.39	1	0.39	3.75	0.0815
Error	1.03	10	0.10			
Total	1.41	11				

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.41227

Error: 0.1027 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
M-	-1.53	6	0.13	A
M+	-1.18	6	0.13	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 27. Prueba t de Student aplicada al potencial hídrico foliar.

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	M+	M-
Media	-1.175	-1.533333333
Varianza	0.01175	0.193666667
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	1.9366226	
P(T<=t) una cola	0.05045667	
Valor crítico de t (una cola)	1.94318027	
P(T<=t) dos colas	0.10091334	
Valor crítico de t (dos colas)	2.44691185	

Cuadro 28. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificado) para el parámetro cociente raíz/vástago.

TRATAMIENTO	Variable	n	Media	D.E.	W*	p (Unilateral D)
M-	R/V	6	1.80	0.33	0.97	0.9119
M+	R/V	6	1.43	0.27	0.85	0.2040

Cuadro 29. Análisis de varianza y comparación de medias por el método de Tukey para el cociente raíz/vástago.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
R/V	12	0.31	0.25	18.56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.41	1	0.41	4.57	0.0582
Tratamiento	0.41	1	0.41	4.57	0.0582
Error	0.90	10	0.09		
Total	1.31	11			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.38515

Error: 0.0896 gl: 10

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.
M+	1.43	6	0.12 A
M-	1.80	6	0.12 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Cuadro 30. Prueba t de Student aplicada al cociente R/V.

Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales para cociente raíz/vástago

	<i>M+</i>	<i>M-</i>
Media	1.428205128	1.79781824
Varianza	0.070430658	0.10886553
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-2.138146514	
P(T<=t) una cola	0.029108289	
Valor crítico de t (una cola)	1.812461102	
P(T<=t) dos colas	0.058216579	
Valor crítico de t (dos colas)	2.228138842	