



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA
LABORATORIO DE BIOLOGÍA DE SUELOS

Diversidad de Hongos Micorrízicos Arbusculares en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÓLOGA
PRESENTA

PAULINA JANNETH PÉREZ PERALTA

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. PATRICIA RIVERA GARCÍA

ASESORA: BIÓL. ELVIA GARCÍA SANTOS

MÉXICO, D. F., JUNIO, 2013



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales y pertenecer a esta gran institución.

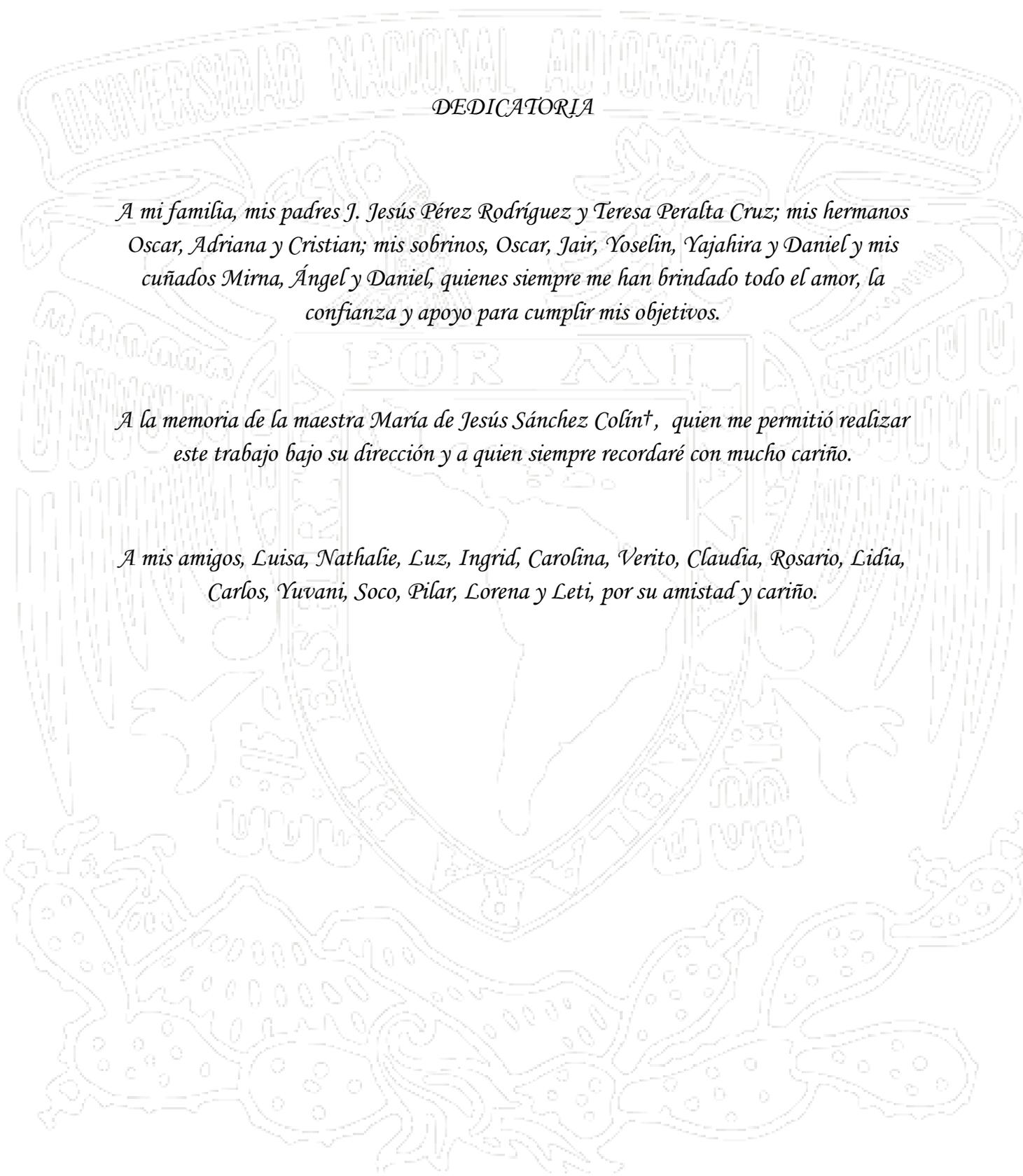
A mis sinodales, M. en C. Bárbara Susana Luna Rosales, M. en C. Patricia Rivera García, Biól. Elvia García Santos, Dra. Rosalva García Sánchez y Biól. Marco Antonio Hernández Muñoz, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

A mi maestra Chuy, por haberme permitido convivir y trabajar con ella, por compartir todos sus conocimientos y confiar en mí.

A los profesores Elvia, Paty y Armando, por todo el apoyo y confianza brindados para concluir este trabajo, muchas gracias.

Al Biól. Eduardo Chimal, por la ayuda en la determinación de las esporas de los hongos micorrízicos arbusculares y por su amistad, gracias.

A mis compañeros y amigos Nathalie, Rosario, Claudia, Natali, Lidia, Anayelli, Yuvani, Carlos, Richie, Gonzalo, Pedro, Jaime, Erik y todos quienes formamos parte del Laboratorio de Biología de Suelos, por su ayuda y por todos los momentos compartidos.



DEDICATORIA

A mi familia, mis padres J. Jesús Pérez Rodríguez y Teresa Peralta Cruz; mis hermanos Oscar, Adriana y Cristian; mis sobrinos, Oscar, Jair, Yoselin, Yajahira y Daniel y mis cuñados Mirna, Ángel y Daniel, quienes siempre me han brindado todo el amor, la confianza y apoyo para cumplir mis objetivos.

A la memoria de la maestra María de Jesús Sánchez Colín†, quien me permitió realizar este trabajo bajo su dirección y a quien siempre recordaré con mucho cariño.

A mis amigos, Luisa, Nathalie, Luz, Ingrid, Carolina, Verito, Claudia, Rosario, Lidia, Carlos, Yuvani, Soco, Pilar, Lorena y Leti, por su amistad y cariño.

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE GRÁFICAS	II
ÍNDICE DE CUADROS.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	2
MICORRIZAS: ASPECTOS GENERALES Y TAXONOMÍA DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES.....	4
1.1 MICORRIZAS	4
1.2 TIPOS DE MICORRIZAS	6
1.3 MICORRIZAS ARBUSCULARES.....	8
1.4 MORFOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA SIMBIOSIS MICORRÍZICA ARBUSCULAR	8
1.5 BENEFICIOS DE LA MICORRIZA ARBUSCULAR.....	10
1.6 ECOLOGÍA DE LA MICORRIZA ARBUSCULAR.....	11
1.7 TAXONOMÍA DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES	13
1.8 DIVERSIDAD DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES	16
1.9 ZONA DE ESTUDIO: PARQUE NACIONAL IZTA-POPO	17
OBJETIVOS.....	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS PARTICULARES	18
JUSTIFICACIÓN	19
HIPÓTESIS	19
MÉTODO.....	20
FASE DE CAMPO.....	20
FASE DE LABORATORIO.....	23
FASE DE GABINETE.....	24
RESULTADOS	25
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
CONCLUSIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Número promedio de esporas de HMA en temporada de lluvias	32
Gráfica 2. Número de esporas de HMA en temporada de invierno	34
Gráfica 3. Número de esporas de HMA en temporada de secas.....	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los Hongos Micorrízicos Arbusculares	15
Cuadro 2. Técnicas de evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo	23
Cuadro 3. Presencia de hongos micorrízicos arbusculares en cada sitio	27
Cuadro 4. Porcentajes de similitud (índice de Sørensen)	27
Cuadro 5. Especies de plantas colectadas de la familia Gramineae	28
Cuadro 6. . Especies de plantas de la familia Asteraceae	28
Cuadro 7. Especies de plantas colectadas de la familia Scrophulariaceae.....	29
Cuadro 8. Especies de plantas colectadas de la familia Rosaceae, Polygalaceae, Caryophyllaceae, Labiatae, Solanaceae y Geraniaceae	29
Cuadro 9. Especies de plantas de las familias Solanaceae y Geraniaceae	30
Cuadro 10. Porcentajes de colonización micorrízica en las temporadas de lluvias y secas	31
Cuadro 11. Promedios de densidad de esporas en temporada de lluvias	33
Cuadro 12. Tabla de las diferencias estadísticas del conteo de esporas en temporada de lluvias	33
Cuadro 13. Promedios de densidad de esporas en temporada de invierno	35
Cuadro 14. Tabla de las diferencias estadísticas de la densidad de esporas en temporada de invierno.....	35
Cuadro 15. Promedios de densidad de esporas en temporada de secas	37
Cuadro 16. Tabla de las diferencias estadísticas del conteo de esporas en temporada de secas	37
Cuadro 17. Propiedades físicas y químicas del suelo	39
Cuadro 18. Análisis de Componentes Principales	41
Cuadro 19. Tabla de los pesos de los componentes principales y propiedades del suelo	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Áreas de la aplicación práctica de la micorriza 5

Figura 2. Tipos de micorrizas. 7

Figura 3. Representación de la fase intraradical y extraradical de los HMA 9

Figura 4. Filogenia y estructura taxonómica de los Hongos Micorrízicos Arbusculares..... 14

Figura 5. Ubicación de las zonas de estudio dentro del Parque Nacional Izta-Popo 20

Figura 6. Zonas de cultivo (parcela de maíz) 21

Figura 7. Zona de Transición 21

Figura 8. Bosque de *Abies religiosa*..... 21

Figura 9. Bosque de *Pinus hartwegii*-zona de incendio 22

Figura 10. *Acaulospora laevis* 22

Figura 11. *Acaulospora delicata* 25

Figura 12. *Acaulospora aff. kentinesis* 25

Figura 13. *Acaulospora sp 1* 25

Figura 14. *Acaulospora sp 2*..... 25

Figura 15. Espora del género *Glomus* 26

Figura 16. *Funneliformis mosseae* 26

Figura 17. *Gigaspora margarita*..... 26

Figura 18. *Racocetra fulgida* 26

Figura 19. *Scutellospora aff. gilmorei*..... 26

Figura 20. Diagrama del conteo de esporas en la temporada de lluvias 32

Figura 21. Diagrama del conteo de esporas en la temporada de invierno 34

Figura 22. Diagrama del conteo de esporas en la temporada de secas..... 36

Figura 23. Dendograma del Análisis Clúster 38

Figura 24. Gráfico del Análisis de Componentes Principales 41

RESUMEN

En este estudio se determinó la diversidad de los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo. Se calculó la densidad de esporas en suelo, así como el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular de las plantas más representativas en las temporadas de lluvias y secas, se evaluaron las propiedades del suelo, tales como textura, densidad real y aparente, porcentaje de humedad, materia orgánica, nitrógeno, pH y contenido de fósforo con el fin de conocer las condiciones edáficas bajo las cuales se presentan los HMA.

La zona de estudio se dividió en cinco zonas ubicadas a diferentes altitudes. La primera fue una zona de cultivo (parcela de maíz) a 2766 msnm. La segunda, una zona de transición entre las áreas de bosque y de cultivo, a los 2950 msnm. La tercera fue un bosque de *Abies religiosa* ubicado a 3369 msnm. La cuarta área consistió en un bosque de *Pinus hartwegii* afectada por un incendio a los 3463 msnm y finalmente a los 3609 msnm se ubicó un bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio. El muestreo se realizó en un área de 100 m², se tomaron muestras compuestas de suelo y se colectaron las plantas herbáceas más representativas, la identificación taxonómica se realizó con base en características morfológicas a través de claves especializadas y se calculó el índice de Sørensen, para conocer el grado de recambio de especies entre zonas. En análisis estadístico consistió en la aplicación de un ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), así como un Análisis Clúster, para comparar la cantidad de esporas en las distintas temporadas y un Análisis de Componentes Principales (ACP) el cual proporcione información acerca de las propiedades físicas y químicas del suelo que influyeron más en la diversidad de los HMA.

Como resultados, los géneros identificados fueron *Acaulospora*, *Glomus*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Racocetra* y *Scutellospora*, además a nivel de especie se lograron identificar a *Acaulospora laevis*, *Acaulospora delicata*, *Acaulospora aff. kentinensis*, *Funneliformis mosseae*, *Gigaspora margarita*, *Racocetra aff. fulgida* y *Scutellospora aff. gilmorei*. El índice de Sørensen presentó la mayor diferencia de especies entre la zona de transición y el bosque de *Pinus hartwegii*. La colonización micorrízica arbuscular se evaluó en 16 plantas, las cuales pertenecen a las familias Gramineae, Asteraceae, Scrophulariaceae, Rosaceae, Caryophyllaceae, Solanaceae, Polygalaceae, Labiatae, y Geraniaceae, en las que se presentó mayor colonización en la temporada de lluvias. La densidad de esporas fue mayor en las temporadas de lluvias e invierno. En suelo, se observaron propiedades como textura arenosa, pH ácido, medios y altos contenidos de materia orgánica, bajos contenidos de fósforo y nitrógeno. Las principales diferencias en cuanto a la densidad de esporas se ubicaron en la zona de transición y en el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio, con base al Análisis Clúster. Mientras que con base al ACP, propiedades como las densidades real y aparente, la humedad, pH, el contenido de materia orgánica y de fósforo, influyeron más en la composición de la diversidad y distribución de los HMA.

Finalmente, cabe señalar que el sitio que ocupa el Parque Nacional Izta-Popo en el centro del Eje Volcánico Transversal, le confiere una serie de características propias que han permitido el establecimiento y desarrollo de los hongos micorrízicos arbusculares, a pesar de de las alteraciones producidas por incendios forestales o el cambio de uso de suelo, sin embargo, es necesaria una mayor exploración taxonómica y fisiológica, la cual permita a futuro implementar estrategias biotecnológicas que contribuyan al desarrollo sustentable.

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de un ecosistema terrestre depende en gran medida de la actividad microbiana del suelo, no sólo los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes son propulsados por organismos, sino además, los componentes de la microbiota del suelo protagonizan diversas acciones que producen beneficios para las plantas con las que se asocian. Dentro de los organismos benéficos del sistema suelo-planta se encuentran entre otros, los hongos formadores de micorrizas, cuya importancia radica en la extensión de área bajo la cual se desarrolla el micelio de manera externa, siendo un enlace clave entre el suelo y la raíz. En consecuencia las micorrizas funcionan como órgano de absorción y traslocación de agua y nutrientes, siendo una de las adaptaciones más sobresalientes (Barea, 2001; Guerrero, 1996).

Las micorrizas se han agrupado en por lo menos siete tipos diferentes, con base en la asociación entre los distintos grupos de hongos, plantas hospederas y patrones morfológicos, de los cuales las micorrizas arbusculares (MA) destacan por ser ecológicamente muy importantes en la ecología y fisiología de las plantas terrestres, ya que influyen en la estabilización del suelo y composición vegetal, productividad, diversidad y sustentabilidad de diferentes ecosistemas. Además de destacar por su ubicuidad, se dice que son aparentemente las más comunes en la naturaleza, ya que ocurren en la mayoría de los suelos y en la mayoría de especies vegetales (Aguilera y col. 2008; Requena y col. 2007).

El estudio de los hongos micorrizicos arbusculares (HMA) es muy importante por sus funciones fisiológicas y productivas en las plantas, refiriéndose a las aplicaciones biotecnológicas que pueden tener en la producción de cultivos comerciales, la agricultura (cultivos ornamentales, frutales, entre otros.) o con fines ambientales tales como la restauración y/o desintoxicación de suelos contaminados (Azcón, 2000; Reyes, 2002). Cabe señalar que la mayoría de las investigaciones se han dedicado a evaluar el efecto de la inoculación de éstos sobre algunas plantas de interés agronómico, sin embargo la exploración morfológica y/o funcional de los HMA nativos ha sido poco estudiada.

En México son pocos los reportes acerca de la riqueza de los HMA, algunos de ellos se han realizado hasta el momento en ecosistemas de regiones áridas y semiáridas, en selva tropical, pastizales y dunas costeras. Se han llevado a cabo estudios en los que se han evaluado los beneficios aportados por los HMA nativos por ejemplo en plantas de *Acacia schaffneri*, *Mimosa biuncifera*, *Astrocaryum mexicanum*, *Desmoncus orthacanthos*, *Opuntia streptacantha*, *Agave angustifolia* y *Agave salmiana*, donde las especies descritas fueron *Funneliformis geosporum*, *Glomus aggregatum*, *Glomus deserticola*, *Glomus microaggregatum*, *Glomus tortuosum*, *Gigaspora margarita*, *Rhizophagus intraradices*, *Sclerocystis coremioides*, *Sclerocystis sinuosa*, *Scutellospora calospora*, *Scutellospora scutata*, *Racocetra gregaria* y *Ambispora appendicula* (Alarcón y col. 2012;

García-Díaz y García-Sánchez, 2009; Montaña y col. 2012). En cuanto a los primeros trabajos realizados en zonas templadas como el área del bosque de Zoquiapan, se encuentran los elaborados por Reyes-Solís y Ferrera-Cerrato (1993) en el que muestrearon en época de lluvias plantas arbustivas y herbáceas, donde el número de esporas fue variado y los géneros encontrados fueron *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora* y *Scutellospora*.

Dado el escaso conocimiento de los HMA, el objetivo de este trabajo fue contribuir al conocimiento acerca de la diversidad de éstos en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo, así como aportar información sobre la densidad de esporas en suelo, el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular en plantas herbáceas en temporada de lluvias y secas así como dar a conocer algunas de las condiciones edáficas bajo las cuales se presentaron.

Los resultados obtenidos se lograron mediante la identificación taxonómica a partir de caracteres morfológicos como color, tamaño, número de paredes y tipos de ornamentación y en la presencia y/o tipos de hifa sustentora. Las esporas de HMA se aislaron del suelo mediante la técnica de Gendermann y Nicolson de cada una de las zonas de muestreo. Asimismo se llevó a cabo la determinación de la densidad de esporas y el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular en algunas de las plantas herbáceas más representativas de cada área, mediante la técnica de Phillips y Hayman. Las propiedades físicas y químicas del suelo se evaluaron a partir de los métodos de la NOM-021-RECNAT-2000.

Se identificaron los géneros *Acaulospora*, *Glomus*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Racocetra* y *Scutellospora*, el índice de Sørensen indicó la menor similitud de HMA entre la zona de transición y el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio. Todas las plantas analizadas mostraron colonización micorrízica arbuscular y en la temporada de invierno se registró la mayor densidad de esporas en suelo. Finalmente, el suelo mostró textura arenosa, pH ácido, porcentajes medios a altos de materia orgánica y bajos contenidos de fósforo y nitrógeno.

El presente trabajo consta de un capítulo donde se abordan el concepto de micorriza así como los tipos en que se clasifican, destacando entre ellos a las micorrizas arbusculares, también se describió la morfología y desarrollo de la simbiosis micorrízica arbuscular, los beneficios que aporta, así como algunos factores ambientales y edáficos que pueden influir sobre éstas. Asimismo se incluye información acerca del primer registro de los HMA, la clasificación inicial así como la más reciente sugerida. Finalmente se habla acerca de la diversidad biológica y su medición mediante el índice de Sørensen, así como acerca de las características del Parque Nacional Izta-Popo.

MICORRIZAS: ASPECTOS GENERALES Y TAXONOMÍA DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

1.1 Micorrizas

El término **micorriza** significa “raíz fungosa” y fue utilizado por primera vez en 1885 por Frank para describir la asociación entre hongos micorrízicos y las raíces de las plantas (Bucher, 2006), una simbiosis establecida entre algunos hongos del suelo y las raíces de la mayoría de las plantas vasculares, consideradas también como asociaciones multifacéticas que comprenden diversas categorías morfológicas, funcionales y evolutivas (Smith y Read, 1997; Brundrett, 2002).

La importancia de esta simbiosis se entiende al tener en cuenta que la raíz es el puente entre la planta y el suelo y que, a su vez, el micelio del hongo micorrizógeno es el puente entre la raíz y el suelo. En consecuencia, la micorriza como órgano de absorción y traslocación de agua y nutrimentos, es una de las más sobresalientes adaptaciones de la raíz para desenvolverse adecuadamente en el ambiente edáfico. La micorriza es el producto de un proceso de coevolución entre plantas y hongos, como parte del avance colonizador de las plantas acuáticas primitivas hacia el medio ambiente terrestre, con tal éxito que mantiene una presencia casi universal entre las plantas vasculares (Guerrero, 1996). Por ello las asociaciones micorrízicas se han sido considerado como cosmopolitas y generalistas, ya que se encuentran en la mayoría de los hábitats naturales y en la mayor parte de los grupos de plantas; en general la relación es facultativa para la planta y obligada para el hongo (Álvarez y Monroy, 2008).

En el establecimiento de esta relación, el hongo ayuda a la planta a absorber nutrientes minerales del suelo a través del desarrollo de un extenso micelio externo como sistema radical complementario. La planta por su parte ofrece a cambio compuestos carbonados derivados de la fotosíntesis y un nicho ecológico protegido (Smith y Read, 1997). El papel de las micorrizas también contribuye a la protección de las plantas contra patógenos del suelo y mayor tolerancia a distintos tipos de estrés abióticos tales como el salino, hídrico o presencia de metales pesados (Guadarrama y col., 2004; Quian-Sheng y Ren-Xue, 2006). Debido a la importancia multifuncional que ofrece el manejo de esta simbiosis existe un gran abanico de aplicaciones tal como lo muestra la Figura 1 (Guerrero, 1996).



Figura 1. Áreas de la aplicación práctica de la micorriza (Tomado de Guerrero, 1996).

Las plantas exhiben diferentes grados de dependencia frente a la micorriza. Algunas son micótrofas obligadas y, por tanto, ven severamente disminuido su desarrollo si no cuentan con esta asociación; otras son micótrofas facultativas, pues no precisan obligadamente la micorriza, pero bajo determinadas condiciones crecen mejor con ella; y finalmente, algunas otras plantas no forman micorriza pero cuentan con otras adaptaciones para adquirir nutrimentos (Guerrero, 1996), tal es el caso del grupo de las familias vegetales Cruciferae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae, Uriticaceae, Juncaceae y Cyperaceae (Espinosa-Victoria, 2000).

Los hongos que forman micorrizas se encuentran en la mayor parte de los suelos y deben ser considerados como un recurso biológico, cuyo estudio y manejo adquiere mayor relevancia en agricultura, silvicultura y conservación de ecosistemas naturales (Guerrero, 1996).

1.2 Tipos de micorrizas

Con base en el grado de penetración en la raíz del hospedero, las micorrizas se han dividido en tres grupos principales: 1) Ectomicorrizas, 2) Ectendomicorrizas, las cuales se subdividen en 2.1 Arbutoide, 2.2 Monotropoide y 2.3 Ectendomicorrizas, y 3) Endomicorrizas, donde se distinguen las 3.1 Ericoide, 3.2 Orquideoide y 3.3 la Micorriza Arbuscular. En cada uno de estos se involucran diferentes grupos de hongos y plantas hospederas, formando distintos diseños morfológicos (Brundrett, 2003; Finlay, 2008; Siddiqui y Pichtel, 2008).

Las **ectomicorrizas** son asociaciones entre los hongos Basidiomicetos, Zigomicetos y Ascomicetos con algunas especies de Gimnospermas y Angiospermas, los cuales forman un manto de varias capas de hifas alrededor de la raíz llamada Red de Hartig, las hifas penetran de manera intercelular en el córtex o epidermis de la raíz (figura 2), se localizan principalmente en climas fríos y templados (Finlay, 2008; Futai y col. 2008).

Las **ectendomicorrizas** son un grupo que presentan características de las ecto y endomicorrizas con el desarrollo de un manto fúngico en algunos casos y presencia de hifas inter e intracelularmente formando “pelotones fúngicos”, involucrándose Ascomicetos y plantas tanto Gimnospermas como Angiospermas. La asociación micorrízica Monotropoide es estructuralmente similar a la Ectomicorriza, forman un manto fúngico superficial así como estructuras llamadas “clavas fúngicas”. La asociación micorrízica Arbutoide también presentan una Red de Hartig bien diferenciada, el crecimiento de hifas puede ser de manera inter e intracelularmente. Se asocia con el orden de los Ericales (Finlay, 2008; Siddiqui y Pichtel, 2008).

Las **endomicorrizas** desarrollan sus estructuras dentro de las células del córtex de la raíz (intracelular) o bien entre célula y célula (intercelular) de la raíz (figura 2). Las Micorrizas Arbusculares pertenecen a este grupo y es una simbiosis que se forma entre los hongos Glomeromicetos y el córtex de la raíz de las plantas vasculares, forma estructuras especializadas como los arbusculos, hifas y vesículas (Sánchez-Colín, 2005). A su vez también se pueden distinguir dos tipos de colonización micorrízica, como lo son el tipo *Arum* y *París*. El tipo *Arum* es caracterizado por llevar a cabo una colonización en la que las hifas dentro de las células de la raíz se disponen de manera intracelular, en donde los arbusculos se forman en la parte terminal de las hifas. El tipo *París* coloniza de manera intercelular, formando “pelotones” de hifas dentro de las células en las que los arbusculos no son precisamente esenciales. Además se ha observado que estos tipos se pueden encontrar intermedios, es decir con características de ambos formados por la misma especie de HMA y que la formación de las distintas estructuras micorrízicas en las raíces están determinadas por la interacción entre las especies de plantas y hongos involucrados (Smith y Smith, 1997; Dickson, 2004).

Las micorrizas Orquideoides son específicas de las orquídeas, forman enrollamientos de hifas dentro de las células de la raíz o en los tallos de estas (figura 2). Se ven involucrados hongos Basidiomicetes y Deuteromicetes logrando transferir carbono orgánico y nutrimentos minerales a la planta, siendo indispensable la presencia de un hongo para la germinación de las semillas. Las micorrizas Ericoides forman hifas en forma espiral en el exterior de las células de la raíz, llamados “ovillos”. Esta asociación se presenta en las plantas de las familias Epacridaceae, Ericaceae y Empetraceae del orden de los Ericales con hongos Ascomicetes (Finlay, 2008; Siddiqui y Pichtel, 2008).

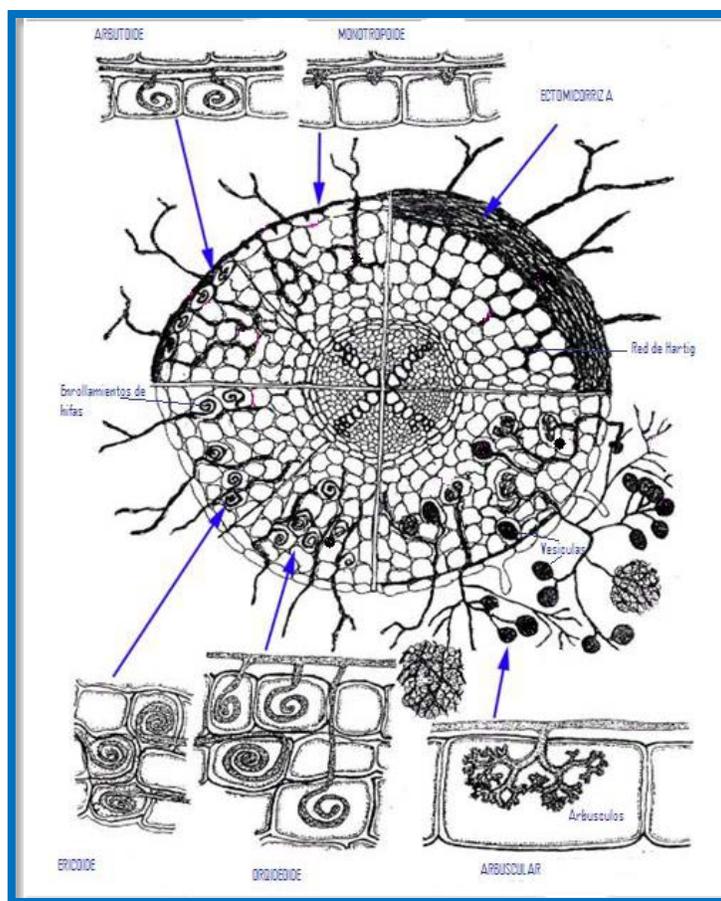


Figura 2. Representación de los tipos de colonización micorrízica (tomado de Agarwal y Sah, 2009).

1.3 Micorrizas arbusculares

La micorriza arbuscular es el tipo más abundante de micorrizas y se caracteriza por colonizar las células corticales de las raíces de las plantas, formando estructuras intracelulares llamadas arbuscúlos (Harrison, 1997) formándose con el 80 y 85 % de todas las plantas terrestres (Smith y Read, 1997) y los hongos del Phylum *Glomeromycota* (Schüßler y col., 2001). Numerosos estudios paleobotánicos, morfoanatómicos y filogenéticos basados en técnicas moleculares evidencian que la coevolución entre hongos micorrízicos y raíces de las plantas se remonta al periodo Devónico de la era Paleozoica, hace aproximadamente 400-460 millones de años, con el origen de las primeras plantas terrestres (Honrubia, 2009; Remy y col., 1994; Wilkinson, 2001). En esta asociación micorrízica, la planta hospedera provee al hongo de compuestos de carbono y el hongo aporta a la planta un incremento de la capacidad de absorción de agua y nutrientes del suelo (James y col., 2002).

1.4 Morfología y desarrollo de la simbiosis micorrízica arbuscular

En una micorriza activa se considera que existe una fase extraradical del hongo, el micelio externo, que incluye micelio, esporas y células auxiliares y una fase intraradical del mismo, con hifas intra e intercelulares, arbuscúlos y a veces vesículas. La colonización se inicia con el contacto de hifas infectivas producidas por propágulos fúngicos, procedentes de esporas de micelio externo o micelio interno procedente de fragmentos de raíz micorrizada. La penetración de la raíz ocurre por medio de un apresorio, el hongo penetra en la raíz y se extiende de manera radial por la epidermis y exódermis, a través de los espacios intercelulares o bien colonizando célula a célula (Guzmán-González y col., 2005; Bago y col., 2000).

Al llegar a las células de la corteza, las hifas colonizadoras se diferencian dando lugar a los arbuscúlos, que son formaciones dicotómicas con apariencia de pequeño árbol en donde se lleva a cabo el intercambio de nutrimentos entre el hongo y la planta. La colonización intraradical desbloquea de cierta forma el ciclo vital del hongo, permitiéndole crecer extraradicalmente en el sustrato. Asimismo el establecimiento de la simbiosis permite al hongo formar estructuras globosas llamadas vesículas (intraradicalmente) de diversas formas según la especie. Géneros como *Gigaspora* y *Scutellospora* no forman vesículas en la raíz y sus funciones son de reserva de nutrimentos. También se producen estructuras como las llamadas células auxiliares; básicamente en el género *Gigasporineae*, desconociéndose en su función. Finalmente se producen estructuras de propagación con la creación de esporas intra y extraradicalmente. Estas pueden ser

solitarias o estar agrupadas en esporocarpos, su germinación se puede afectar por factores como la humedad, temperatura, pH, presencia de flavonoides y/o bacteria, cerrándose así el ciclo vital del hongo (Bago y col., 2000; Espinosa-Victoria, 2000).

Una vez que la simbiosis se establece con éxito, previo a la formación de los primeros arbuscúlos, el hongo adquiere nuevo vigor y comienza a producirse profusamente en el medio con el desarrollo de hifas exploradoras con diámetros de entre 4 y 10 μm y con una pared gruesa. Hifas superiores de orden secundario y superior forman ramificaciones cortas que a su vez se ramifican dicotómicamente formando “estructuras ramificadas de absorción” (BAS. Branched Absorbing Structures) los cuales son considerados como estructuras efímeras y sitio principal en el que se lleva a cabo preferentemente la captación de nutrimentos minerales. El micelio extraradical se extiende de manera radial y tridimensional alrededor de la raíz hospedera (Bago y col., 2000), tal como se ilustra en la figura 3.

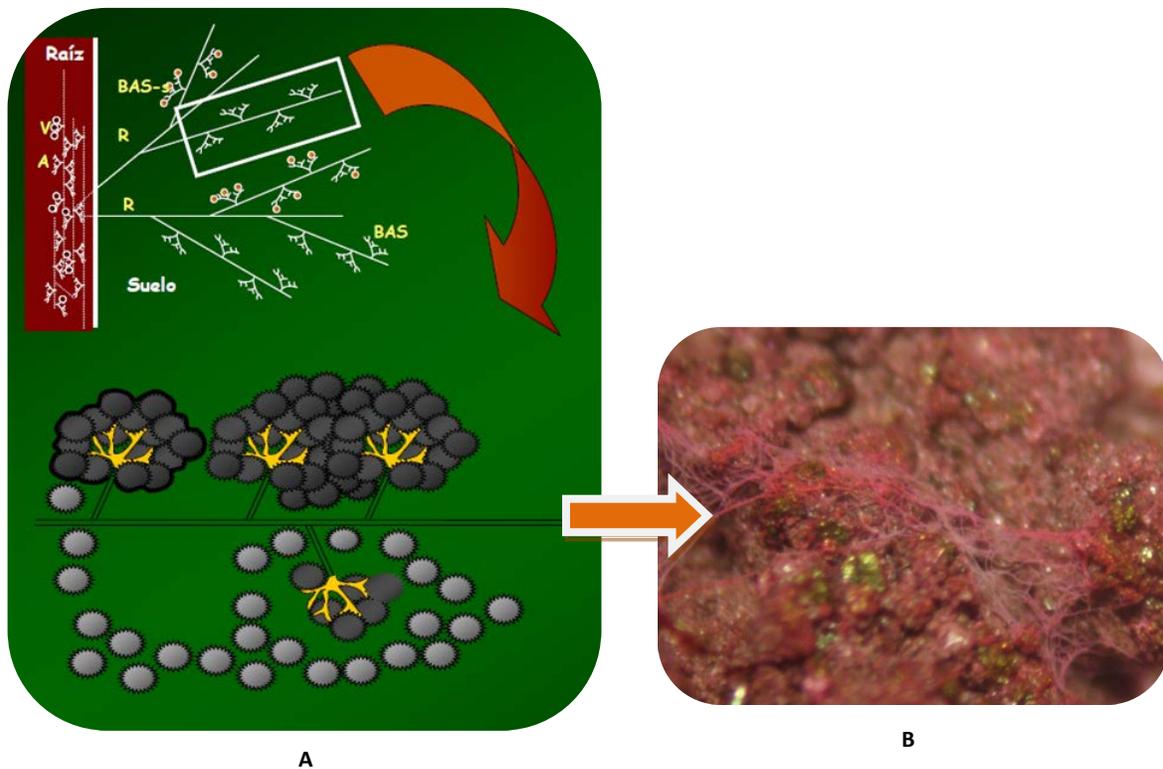


Figura 3. A. Representación de la fase intraradical y extraradical de los HMA y el crecimiento de hifas exploradoras en el suelo y cooperación de los BAS en la formación de agregados (Bago y col. 2000). B. Agregación de partículas minerales del suelo por hifas extraradicales (Cardoso, 2011).

Cabe señalar que la raíz produce una variedad de compuestos orgánicos solubles y volátiles, que funcionan como atrayentes, reservorio de nutrimentos y fuente de señales genéticas regulatorias para los hongos endomicorrízicos. Ejemplo de ello son los flavonoides, que pueden producir efectos estimulatorios e inhibitorios en el desarrollo de los HMA (Espinosa-Victoria, 2000). Estudios recientes han identificado también a las estrigolactonas como principales inductores en la producción de arbusculos así como la germinación de esporas (Parniske, 2008).

Las esporas generalmente son producidas en el suelo, no obstante las pertenecientes al género *Glomus* se forman en el interior de la raíz. Las esporas también se caracterizan por ser multinucleadas y son consideradas como principales propágulos de reproducción y supervivencia de los hongos (Alarcón, 2007).

1.5 Beneficios de la micorriza arbuscular

Dentro de las funciones que lleva a cabo la MA se encuentra la capacidad de incrementar el volumen de suelo explorado, por cada metro de raíz colonizada se producen entre 7 y 250 metros de hifas externas (Bago y col., 2000), también existen otros reportes establecen que por cada centímetro cúbico de suelo se pueden encontrar cien metros de hifas extraradicales (Parniske, 2008). De tal manera esta simbiosis muestra su capacidad de captación eficaz de nutrimentos y algunos micronutrimentos esenciales para la planta que se encuentran con poca disponibilidad. También actúa en la función primaria de la fisiología vegetal ayudando a la asimilación de algunos nutrimentos del suelo como fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio, zinc, entre otros, ya que al área explorada por el micelio externo permite aprovecharlos más allá del área explorada por el sistema radical. Incluso las micorrizas aumentan la capacidad de crecimiento compensatorio de las plantas ante la herbivoría debido a la capacidad de proporcionar nutrimentos limitantes después de adquirir material fotosintético los herbívoros (Kula y col. 2005).

Los HMA como parte de la biota del suelo, también se les ha atribuido un importante papel en el proceso de formación y estabilidad de agregados en el suelo, participando con un mecanismo para atrapar y enlazar las partículas primarias del suelo (González-Chávez y col. 2004). Se ha señalado la arquitectura del micelio de los HMA varía entre géneros (Dodd y col. 2000) además de que actúa de manera mecánica al unir las partículas, algunos polisacáridos extracelulares llevan a cabo una acción cementante, como la llevada a cabo por la glomalina, una glicoproteína que se encuentra en las hifas, raíces y se acumula en el suelo (Rilling, 2004) y que además incrementa la resistencia a la erosión (Rilling y Mummey, 2006; Wright y col. 1996).

Otro de los beneficios es la protección contra patógenos. La simbiosis micorrízica arbuscular ha tenido un gran impacto sobre las interacciones con otros organismos ya que incrementa la resistencia ante patógenos del suelo y disminuye los efectos que se producen, induciendo un cambio en el sistema de defensa de las plantas a través de sofisticadas redes de señalizaciones (Fujita y col., 2006). Los HMA pueden mejorar la nutrición de las plantas como compensación al daño, provocar modificaciones en el sistema radicular, crear cambios en las poblaciones microbianas en la rizósfera y activar los mecanismos de defensa de la planta (Pozo; Azcón-Aguilar, 2007). También los HMA pueden proveer tolerancia a elementos tóxicos ya que proporcionan un sistema atractivo de saneamiento ambiental a través de la red hifal con el potencial de captación. Metales pesados como Pb, Cr, As, Cu, Cd y Hg pueden ser absorbidos y/o inmovilizados en el interior del hongo. Se ha reportado incluso el aumento del número de vesículas involucradas probablemente en el almacenamiento de compuestos tóxicos (Göhre y Paszkowski, 2006). Cabe señalar que la glomalina producida por las hifas de los HMA juegan un papel importante en el rastreo, localización y absorción de los elementos potencialmente tóxicos (micorrizo-remediación) (Khan, 2006).

Las micorrizas arbusculares también ofrecen beneficios en cuanto a la protección contra el estrés hídrico, promoviendo la resistencia a deficiencias hídricas en la planta hospedera. El micelio de los HMA influye en el ambiente edáfico previniendo la formación de claros entre las raíces y el suelo, manteniendo así la continuidad del líquido en la interfase del suelo y la raíz, además de ser incrementada la zona de captación de agua mediante las hifas extraradicales (Guadarrama y col. 2004). Sin embargo cabe señalar que se ha observado que las plantas micorrizadas se benefician en diferente magnitud dependiendo de los HMA que las colonicen.

1.6 Ecología de la micorriza arbuscular

Las múltiples interacciones ecológicas que ocurren en el suelo son responsables del comportamiento de los hongos micorrízicos, por lo que su desarrollo se puede ver afectado por el comportamiento de diversas variables ambientales tales como el tipo de comunidad vegetal, las condiciones fisiológicas de la planta hospedera, así como interacciones con otros organismos del suelo.

Entre los factores que influyen en el comportamiento y la composición de especies de hongos micorrízicos se encuentran algunas condiciones del suelo tales como su fertilidad, ya que el suministro de fósforo (P) y el nitrógeno (N) son factores clave en los efectos benéficos para las plantas siendo el fósforo un factor que limita el crecimiento de las plantas. Un incremento de sus niveles reduciría los beneficios de la micorrización, sin

embargo algunos hongos pueden tolerar mayores concentraciones de fósforo y contribuir en el crecimiento de sus hospederos. Asimismo el grado de compactación del suelo repercute en la presencia y supervivencia de los HMA. Se ha reportado que compactaciones mayores a 1.75 mg/m^3 afectan la respuesta de crecimiento de las plantas mediante la inoculación de HMA, así como la capacidad de colonización en raíces. Este tipo de resultados se atribuye a la disminución de oxígeno en la atmósfera del suelo (Alarcón, 2007; Nadian y col., 1998).

En cuanto al pH del suelo, los hongos micorrízicos están presentes desde suelos ácidos hasta suelos alcalinos. La acción del suelo juega un papel importante en la composición de especies y abundancia, así como el decline del potencial de inóculo y la reducción en la colonización en raíces, inclusive la completa eliminación de los HMA (Guerrero, 1996; Pawlowska y Charvat, 2002; Pritchett, 1990).

La vegetación y la variación estacional también son factores determinantes en la presencia de los hongos micorrízicos, ya que además de contribuir al suministro de los compuestos energéticos necesarios para los hongos, también proporcionan el medio en el cual los hongos se pueden establecer y, por consiguiente, reproducirse. En este sentido en los agroecosistemas, la vegetación nativa con cierto grado de micotrofia desempeña un papel determinante como reservado de los hongos, para que estos puedan ser funcionales en los cultivos agrícolas (Alarcón, 2007).

El clima y sus variaciones también influyen en la presencia de los HMA, ya que en algunas plantas agrícolas, la abundancia de esporas en el suelo, así como el porcentaje de colonización micorrízica, son afectadas por el patrón estacional de lluvias, así como por el régimen hídrico del suelo. Por ejemplo en ecosistemas naturales áridos las esporas de los HMA tienden a entrar en un periodo de dormancia que les permite soportar la sequía. En el caso de algunas especies de los géneros *Acaulospora* y *Scutellospora*, la infectividad de las hifas depende del estadio de su ciclo de vida que se lleva a cabo principalmente al inicio del periodo de sequía y declina después de haber comenzado la esporulación (Guerrero, 1996; Pawlowska y Charvat, 2002)

La temperatura es otro factor importante que controla la presencia y distribución global de los organismos. Los glomales se distribuyen en todas las zonas climáticas sin embargo, los regímenes de temperatura tienen gran influencia sobre la composición de ciertas especies. En el caso de prolongados periodos de frío, se generan cambios en la sobrevivencia de los HMA, así como en la actividad metabólica de la planta hospedera, por ejemplo las esporas, micelio extraradical y fragmentos de raíces colonizadas pueden retener su potencial de colonización y sobrevivir ante el frío. Las temperaturas óptimas para la germinación de esporas se encuentran entre los 18 y 40°C ; para el crecimiento de los micelios se hallan entre los 18°C y 27°C para la mayoría de las especies. Asimismo la intensidad lumínica alta, y fotoperiodos de doce o más horas, conducen a incrementos en la colonización de la raíz y en la esporulación (Guerrero, 1996; Koshe, 1987; Pawlowska y Charvat, 2002; Pritchett, 1990).

La altitud se considera como otro factor que afecta la diversidad micorrízica, sin embargo han sido pocas las investigaciones al respecto. Al respecto, Gai y col. (2012) reportaron que la diversidad de HMA no tuvo cambios respecto a la altitud, sin embargo, la colonización micorrízica y la densidad de esporas se redujeron con su incremento. En algunos otros estudios como el de Lugo y col. (2008) mencionan lo contrario, donde la diversidad de HMA disminuyó considerablemente con la altitud.

Otros de los factores que también afectan la presencia de propágulos de micorrizas se debe a actividades antropogénicas como la agricultura, incendios y pastoreo, entre otros, que pueden propiciar condiciones desfavorables para la vida de los HMA, eliminando propágulos micorrízicos o atenuando la capacidad infectiva de estos (Guerrero, 1996).

1.7 Taxonomía de los hongos micorrízicos arbusculares

En base a registros fósiles de esporas e hifas, se ha reportado el origen de los hongos micorrízicos desde hace 460 millones de años (Redecker y col., 2000) como una de las primeras asociaciones mutualistas que surgieron entre las plantas primitivas y hongos que emprendieron el camino hacia el medio terrestre (Honrubia, 2009).

A partir de 1845 con el descubrimiento y las descripción

ner, 2012).

Schüßler y col. (2001), mediante la secuenciación de genes de la subunidad pequeña (SSU) del ARNr agruparon a los hongos formadores de micorriza arbuscular en el Phylum Glomeromycota, separándolo del Phylum Zigomycota, donde primero fueron ubicados, compartiendo un ancestro común con los Phylum Ascomycota y Basidiomycota (figura 4A).

En la figura 4B se ilustra la estructura taxonómica del Phylum Glomeromycota la cual comprende la clase de los Glomeromycetes, a su vez consta de cuatro órdenes: Glomerales, Diversisporales, Archaeosporales, Paraglomerales. De acuerdo a Schüßler (2009) y Schüßler y Walker (2010) se incluyen 11 familias y 17 géneros (cuadro 1) y aproximadamente 220 especies descritas.

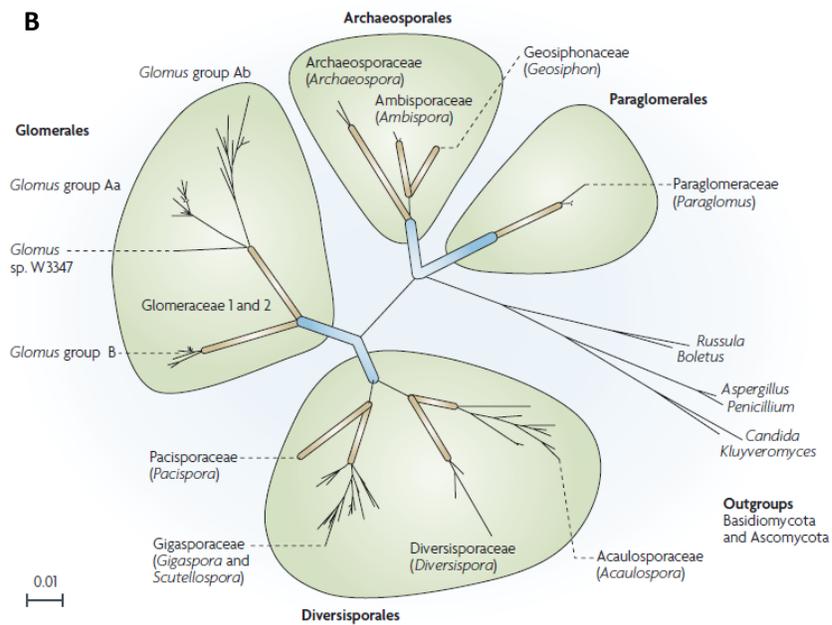
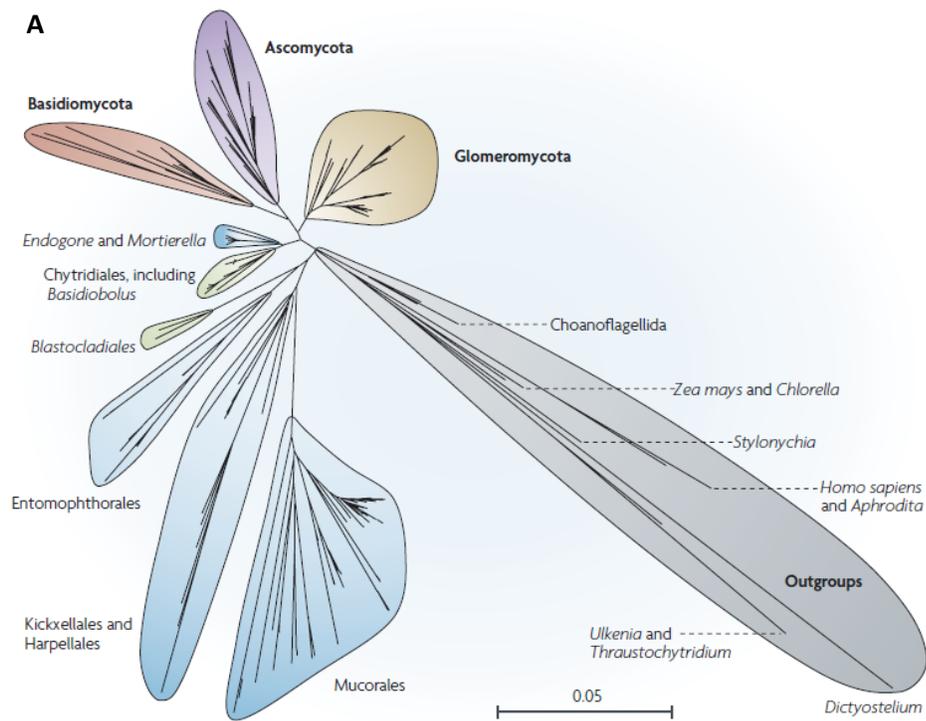


Figura 4. A. Filogenia y B. estructura taxonómica de los Hongos Micorrízicos Arbusculares (Parniske, 2008).

phylum <i>Glomeromycota</i>		
clase <i>Glomeromycetes</i>		
ordenes (4)	familias (11)	géneros (17)
<i>Glomerales</i>	<i>Glomeraceae</i>	Glomus Funneliformis Rhizophagus Sclerocystis
	<i>Claroideoglomeraceae</i>	Claroideoglomus
<i>Diversisporales</i>	<i>Gigasporaceae</i>	Gigaspora Scutellospora Racocetra
	<i>Acaulosporaceae</i>	Acaulospora
	<i>Entrophosporaceae</i>	Entrophospora
	<i>Pacisporaceae</i>	Pacispora
	<i>Diversisporaceae</i>	Diversispora
<i>Paraglomerales</i>	<i>Paraglomeraceae</i>	Paraglomus
<i>Archaeosporales</i>	<i>Geosiphonaceae</i>	Geosiphon
	<i>Ambisporaceae</i>	Ambispora
	<i>Archaeosporaceae</i>	Archaeospora

Cuadro 1. Clasificación de los hongos micorrízicos arbusculares (Schüßler y Walker, 2010)

Cada uno de los géneros de los HMA se define por criterios relacionados con la forma en que se originan las esporas, su morfología, los puntos de unión de las hifas sustentoras o formadoras. La mayor parte de la identificación de las especies se ha basado en la observación y la caracterización de pared que constituye a las esporas, así como de sus diferentes modos de formación, sin embargo, existen nuevas técnicas bioquímicas (enzimas, anticuerpos específicos, ácidos grasos, entre otros.) y moleculares (análisis de ADN, desde la extracción, amplificación y clonación, y secuenciación genómica de la subunidad pequeña de ARNr), que han permitido un gran avance (Alarcón, 2007).

1.8 Diversidad de los hongos micorrízicos arbusculares

La biodiversidad comprende las diferentes formas y variedades en que se manifiesta la vida en el planeta tierra, desde organismos vivos hasta los ecosistemas, comprende la diversidad dentro de cada especie, entre especies y en ecosistemas. La diversidad alfa es la riqueza de especies de una comunidad particular a la que se considera homogénea, la diversidad beta es el grado de cambio o reemplazo en la composición de especies entre diferentes comunidades en un paisaje, y la diversidad gamma es la riqueza de especies del conjunto de comunidades que integran un paisaje, resultante tanto de las diversidades alfa como de las diversidades beta.

Cabe señalar que la diversidad beta o diversidad entre hábitats, comprende la heterogeneidad dentro de un ecosistema a través de la determinación del cambio en la composición de especies a través de un gradiente fisiográfico. Se expresa en tasas de cambio de la composición de las especies o índices de similitud, a partir de datos cualitativos y cuantitativos, donde se expresa el grado en el que dos muestras son semejantes por las especies presentes en ellas. El índice de Sørensen en particular relaciona el número de especies en común con la suma de las especies en ambos sitios (Moreno, 2001; Ñique, 2010).

México ocupa el lugar 14 en extensión territorial, y en él habita la cuarta biota más rica del mundo. Su elevada biodiversidad se explica por su complejidad fisiográfica, por su historia geológica y climática. Sin embargo la diversidad de los HMA ha sido casi inexplorada, desconociéndose la diversidad morfológica y/o funcional de los HMA nativos. La gran mayoría de los HMA conocidos en México proviene de sistemas agrícolas en los que se analiza el efecto benéfico de su inoculación (Alarcón y col., 2012; Espinosa y col., 2008; Varela y Trejo, 2001).

1.9 Zona de estudio: Parque Nacional Izta-Popo

El Parque Nacional Izta-Popo se ubica en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal, situación que lo hace indispensable para la generación de servicios ambientales en beneficio de la región más densamente poblada de México. Sus boscosas montañas captan y filtran el agua que abastece a dos importantes cuencas hidrológicas: la del Valle de México y la del alto Balsas, al mismo tiempo que generan una vigorosa red hidrográfica fundamental para el suministro de agua de las poblaciones, zonas industriales y valles agrícolas vecinos. La extensión de estos bosques es clave también para la captación de dióxido de carbono, la generación de oxígeno y la regulación del clima, son unos auténticos pulmones del centro del país. Asimismo debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68° C por cada 100 metros.

La distribución de la vegetación en esta zona atiende a la altitud, de modo que se pueden distinguir los bosques de coníferas, como la vegetación dominante y la pradera de alta montaña o pastizal alpino.

Por otra parte, de acuerdo con la clasificación de la FAO, las unidades de suelo presentes en el área del parque son los Litosoles, suelos someros, con menos de 0.1 m de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental; Regosoles, del griego *rhegos*, manto; los suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; en el parque se localizan a altitudes por debajo de los 3,900 msnm y normalmente son pobres en contenido de materia orgánica y nutrientes; Cambisoles, del latín *cambiare*, cambiar, suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad; Fluvisoles, del latín *fluvius*, río, suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrientes y los Andosoles, los cuales se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica (CONANP, 2010).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✚ Determinar la diversidad de los hongos micorrízicos arbusculares mediante la exploración a diferentes altitudes en el Parque Nacional Izta-Popo.

OBJETIVOS PARTICULARES

- ✚ Determinar taxonómicamente las esporas a nivel de género con base en claves especializadas, considerando sus características morfológicas.
- ✚ Obtener el porcentaje de colonización micorrízica en las raíces de las plantas colectadas en las temporadas de lluvias y secas.
- ✚ Establecer la densidad de esporas del suelo en las temporadas de lluvias y secas.
- ✚ Analizar las propiedades físicas y químicas del suelo.

JUSTIFICACIÓN

En México el registro de HMA representa aproximadamente 46% de las especies conocidas mundialmente, sin embargo la mayoría provienen de sistemas agrícolas y zonas tropicales ubicadas a bajas altitudes. Por lo que es importante llevar a cabo el estudio sobre la diversidad de géneros de los HMA en ambientes naturales, asimismo conocer las condiciones de suelo bajo las cuales se presentan en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Izta-Popo, ya que además, son considerados como un recurso biológico con potencial de uso en la producción sustentable y en la restauración ecológica.

HIPÓTESIS

Si los hongos micorrízico arbusculares son considerados como cosmopolitas y generalistas, entonces se podrá determinar la diversidad de géneros en los diferentes tipos de vegetación a diferentes altitudes en el Parque Nacional Izta-Popo.

MÉTODO

Fase de campo

Este estudio se realizó en la región del municipio de Ámecameca, en el Estado de México, donde se ubicaron cinco zonas, las cuales se localizaron a diferentes altitudes (figura 5).



Figura 5. Ubicación de las zonas de estudio en el Parque Nacional Iztá-Popo (Google earth, 2012).



Figura 6. Zona de cultivo (parcela de maíz).

La primera zona muestreada correspondió a una parcela de maíz (figura 6), ubicada a los 2766 msnm, con las coordenadas geográficas de 19° 04.73' Latitud Norte (LN) y 98° 43.15' Longitud Oeste (LW).

La segunda área de muestreo, fue una zona de transición entre las áreas de cultivo y los bosques de *Pino*, a los 2950 msnm (figura 7) y con las coordenadas de 19° 04.40' LN y 98° 42.06' LW.



Figura 7. Zona de transición.



Figura 8. Bosque de *Abies religiosa*

La tercera zona muestreada, se localizó a los 3369 msnm, correspondiente a un bosque de *Abies religiosa* (figura 8) en las coordenadas 19° 05.86' LN y 98° 40.87' LW.

La cuarta zona correspondió a un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. (Figura 9) ubicado a los 3463 msnm, en el cual se presentó un incendio hace aproximadamente ocho años. Las coordenadas son 19° 05.24' LN y 98° 40.13' LW.



Figura 9. Bosque de *Pinus hartwegii*-zona de incendio.



Figura 10. Bosque de *Pinus hartwegii*.

Por último, a la altitud de 3609 msnm la zona de estudio fue en un bosque de *Pinus hartwegii* Lindl.-sin incendio (figura 10) en las coordenadas de 19° 05.14' LN y 98° 39.54' LW.

El muestreo de suelo se realizó en cuadrantes de 10 x 10 m² de los cuales se tomaron 10 submuestras en forma de zig-zag para formar una muestra compuesta a partir de la cual se evaluaron las variables físicas y químicas. Asimismo se realizó el muestreo de suelo de la rizósfera de algunas plantas para la cuantificación de esporas en la temporada de lluvias y secas, también se efectuó un análisis más en la temporada de invierno dadas las lluvias inusuales que se presentaron durante ésta temporada en el Parque.

El muestreo de la vegetación consistió en la colecta de algunas de las plantas herbáceas más representativas de cada zona, la determinación taxonómica se efectuó con base en claves especializadas como Sánchez- González (1979); Sánchez y López, (2003); Rzedowski y col. (2005) y Villers y col. (2006). También se colectaron tres ejemplares de cada planta para determinar el porcentaje de colonización micorrízica arbuscular en la temporada de lluvias y secas.

Fase de laboratorio

Para analizar el suelo se determinaron algunas variables físicas y químicas tales como las que se muestran en el cuadro 2.

Parametro	Método	Referencia
Densidad real	Método del picnómetro AS-04	NOM 021-RECNAT-2000
Densidad aparente	Método de la probeta	Gandoy, 1991
Textura	Método de Bouyoucos	NOM 021-RECNAT-2000
pH (real)	AS-02	NOM 021-RECNAT-2000
Materia Orgánica	Método de Walkley y Black AS-07	NOM 021-RECNAT-2000
Fósforo extraíble	Bray y Kurtz. AS-11	NOM 021-RECNAT-2000
Nitrógeno	Semimicro-kjeldahl	NOM 021-RECNAT-2000

Cuadro 2. Técnicas de evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Para determinar el porcentaje de colonización micorrízica, se siguió la técnica de Phillips y Hayman (Ferrera-Cerrato, y col., 1993), la cual consistió en el clareo, blanqueo, acidificación y tinción de raíces. Posteriormente se montaron en laminillas para su lectura bajo el microscopio óptico. Para conocer el porcentaje de colonización, se aplicó la siguiente fórmula:

Para el conteo y aislamiento de esporas de HMA se siguió el procedimiento del método de tamizado y decantación en húmedo Gendermann y Nicolson reportado en Ferrera-Cerrato y col. (1993) el cual consistió en hacer una suspensión con 10 gramos de suelo en 1000 ml de agua, la cual fue agitada y posteriormente reposada, dejando sedimentar las partículas grandes para posteriormente filtrar a través de una serie de tamices de

0.35mm, 0.125mm y 0.250mm. Las fracciones obtenidas en cada tamiz se observaron con un microscopio estereoscópico para su cuantificación, así como para el aislamiento de esporas.

Una vez aisladas las esporas se llevó a cabo el procedimiento para la identificación taxonómica, que consistió en colocar las esporas en preparaciones permanentes con polivinílico-glicerol (PVLG) y PVLG en solución Melzer siguiendo la técnica de Shenck y Pérez (1990). Posteriormente se observaron características tales como color, forma, tamaño, hifa de sostén, tubos germinativos, ornamentación, así como la reacción al reactivo Melzer de las capas de la pared de la espora y número de éstas bajo un microscopio de contraste de fases. La identificación taxonómica de esporas de HMA se llevó a cabo con base en las descripciones especializadas propuestas por la International Culture Collection of Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi, INVAM (2005), la AMF Phylogeny Schüßler (2011) y Blaskowski (2003).

Fase de gabinete

Para determinar la diversidad de esporas de HMA entre hábitats, se calculó el índice similitud de Sørensen (J_s), el cual relaciona el número de especies y morfoespecies en común, con suma de las especies en ambos sitios, con la siguiente fórmula (Moreno, 2001):

Donde:

A = número de especies en el sitio A

B = número de especies en el sitio B

C = número de especies y morfoespecies comunes en ambos sitios

El procesamiento de los datos incluyó un Análisis de Varianza, con un nivel de confianza del 95%, así como la prueba Tukey ($\alpha = 0.05$), con la finalidad de saber si existían diferencias estadísticas en los sitios de estudio con respecto a la densidad de esporas. El Análisis de Componentes Principales, se aplicó para conocer las propiedades físicas y químicas del suelo que más influyeron en el conteo, colonización y la diversidad de esporas de HMA. Por su parte el Análisis Clúster permitió agrupar las zonas con base en las semejanzas y diferencias que presentaron. El programa utilizado fue Statgraphics Centurión XVI Versión 16.1.11.

RESULTADOS

Los géneros de hongos formadores de micorriza arbuscular identificados fueron *Acaulospora*, *Glomus*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Racocetra* y *Scutellospora*. Se determinó a nivel de especie a *Acaulospora laevis*, *A. delicata* y *A. aff. kentinesis*, así como a las morfoespecies *Acaulospora sp. 1.* y *Acaulospora sp. 2* (figuras 11-15). Asimismo se identificaron las especies *Funneliformis mosseae*, *Gigaspora margarita*, *Racocetra aff. fulgida* y *Scutellospora aff. gilmorei*. Del género *Glomus* se determinó una morfoespecie (figuras 16 y 20).

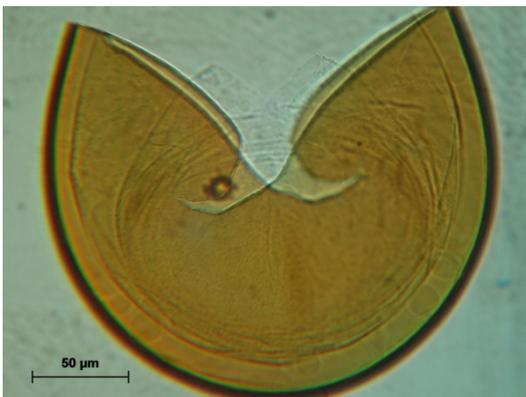


Figura 11. *Acaulospora laevis*

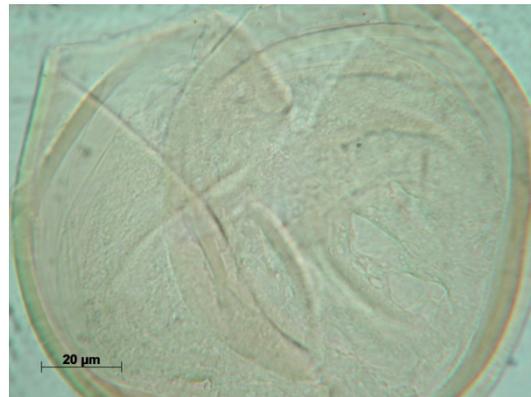


Figura 12. *Acaulospora delicata*



Figura 13. *Acaulospora aff. kentinesis*

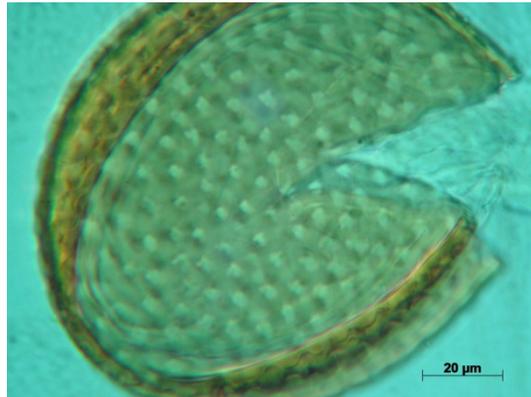


Figura 14. *Acaulospora sp.1*



Figura 15. *Acaulospora sp. 2*

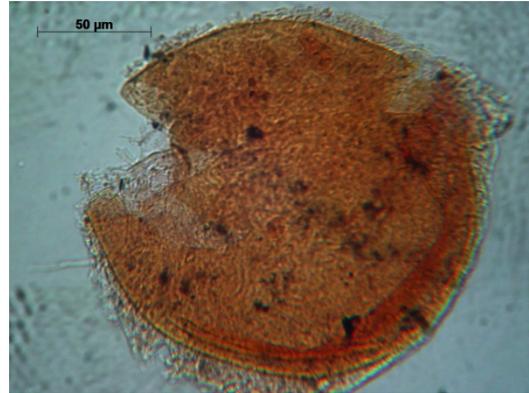


Figura 16. Espora del género *Glomus*.



Figura 17. *Funneliformis mosseae*.

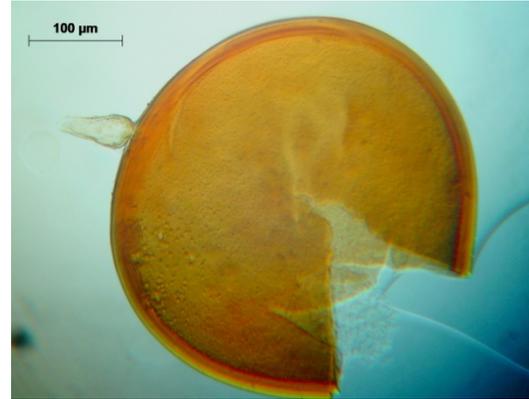


Figura 18. *Gigaspora margarita*.

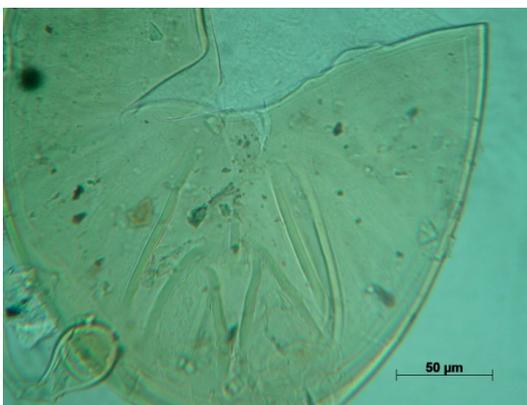


Figura 19. *Racocetra aff. fulgida*



Figura 20. *Scutellospora aff. gilmorei*

En cuanto a la distribución de los HMA, en el cuadro 3, se puede decir que la presencia de las especies/morfoespecies variaba en cada una de las zonas. *Acaulospora laevis*, se le encontró presente en casi todos los sitios, excepto en el bosque de *Abies religiosa*. Por su parte, *Acaulospora delicata*, *Gigaspora margarita*, *Racocetra aff. fulgida*, *Scutellospora aff. gilmorei*, *Acaulospora sp.*, *Acaulospora sp. 1* y *Glomus sp.* se presentaron en sitios específicos.

Especies Zonas/ msnm	<i>A. laevis</i>	<i>A. delicata</i>	<i>A. aff. kentinensis</i>	<i>A. sp.1</i>	<i>A. sp. 2</i>	<i>Gl. sp.</i>	<i>F. mosseae</i>	<i>G. margarita</i>	<i>R. aff. fulgida</i>	<i>Sc. aff. gilmorei</i>	Total
cultivo 2766	x	-	-	-	-	-	x	x	-	-	3
Transición 2950	x	-	-	-	-	-	x	-	x	x	4
B. <i>Abies religiosa</i> 3369	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	3
B. <i>Pinus hartwegii</i>-incendio 3463	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	2
B. <i>Pinus hartwegii</i> 3609	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	4

Cuadro 3. Presencia de hongos micorrízicos arbusculares (X) en cada sitio.

Con base en la distribución de los HMA, en el cuadro 4 se señalan los porcentajes de similitud calculados a partir del índice de Sørensen, donde se observa que el valor más bajo del 14 %, se presentó entre la zona de transición y bosque de *Pinus hartwegii*-incendio, por lo que se consideran éstas como las más diversas.

zonas	cultivo	Transición	B. <i>Abies religiosa</i>	B. <i>Pinus hartwegii</i>-incendio
cultivo				
Transición	40			
B. <i>Abies religiosa</i>	0	0		
B. <i>Pinus hartwegii</i>-incendio	25	16	0	
B. <i>Pinus hartwegii</i>-sin incendio	16	14	16	50

Cuadro 4. Porcentajes de similitud (índice de Sørensen).

Acorde con la vegetación colectada, 16 especies fueron determinadas, las cuales pertenecen a las familias Gramineae, Asteraceae, Scrophulariaceae, Rosaceae, Caryophyllaceae, Solanaceae, Polygalaceae, Labiatae y Geraniaceae (cuadros 5-9).

Familia Gramineae



Zea mays ssp. Mexicana (Scharader)
Iltis



Stipa ichu (Ruiz & Pavón) Kunth



Muhlenbergia macroura (Kunth)
Hitc



Festuca amplissima
Rupr. ex Four

Cuadro 5. Especies de plantas colectadas de la familia Gramineae.

Familia Asteraceae



Senecio callosus Sch.
Bip.



Roldana angulifolia
(D. C.) H. Rob y
Brettell



Achillea millefolium L.



Baccharis conferta
Kunth

Cuadro 6. Especies de plantas colectadas de la familia Asteraceae.

Familia Scrophulariaceae



Penstemon gentianoides (Kunt) Poir



Castilleja tenuiflora Benth

Cuadro 7. Especies de plantas colectadas de la familia Scrophulariaceae.

Familia Rosaceae



Alchemilla procumbens Rose

Familia Polygalaceae



Monnina ciliolata D.C.

Familia Caryophyllaceae



Drymaria leptophylla Cham. & Schltld

Familia Labiatae



Salvia elegans Vahl.

Cuadro 8. Familias Rosaceae, Polygalaceae, Caryophyllaceae y Labiatae.

Familia Solanaceae

*Psysalis chenopodifolia* Lamb.

Familia Geraniaceae

*Geranium potetillaefalium* D.C**Cuadro 9.** Especies de plantas colectadas de la familia Solanaceae y Geraniaceae.

En el cuadro 10, se observa que todas las plantas analizadas presentaron colonización micorrízica arbuscular, asimismo, muestra que en general que en la temporada de secas se presentaron los valores más altos, respecto a la de lluvias.

Para temporada de secas, de la vegetación que mayor colonización obtuvo fueron *Monnina ciliolata* y *Psysalis chenopodifolia*, de la zona de transición, con más del 70 %. Por su parte en el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio, *Stipa ichu* y *Geranium potetillaefalium*, exhibieron el 66.66 y 64.44%, respectivamente.

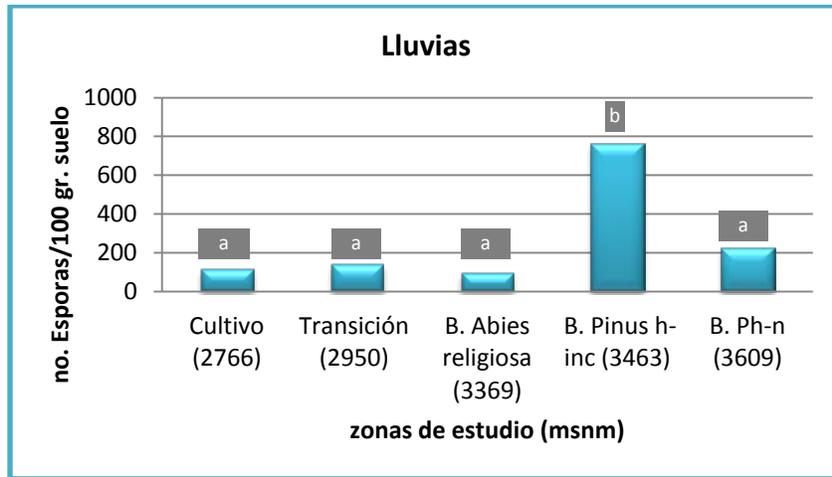
En la temporada de lluvias, destaca *Achillea millefolium*, como la que presentó el valor más alto de colonización con 51.55 %.

Cabe señalar que el maíz, presentó porcentajes por encima del 89 % en ambas temporadas. En tanto que en el bosque de *Abies religiosa*, fue baja la colonización, ya que *Senecio callosus* y *Geranium potetillaefalium* obtuvieron el 35% para la temporada de secas. Por su parte, *Baccharis conferta*, presento los valores más bajos.

Zonas (msnm)		% colonización (lluvias)	% colonización (secas)
Cultivo (2766)	<i>Zea mays ssp.</i>	98.88	89.98
	<i>Drymaria leptophylla</i>	73.32	-
Transición (2950)	<i>Stipa ichu</i>	39.12	45.80
	<i>Muhlenbergia macroura</i>	35.23	49.67
	<i>Festuca amplissima</i>	25.34	44.44
	<i>Psycalis chenopodifolia</i>	64.44	71.67
	<i>Penstemon gentianoides</i>	45.45	55.78
	<i>Alchemilla procumbens</i>	47.56	55.89
	<i>Castilleja tenuiflora</i>	37.67	42.59
	<i>Monnina ciliolata</i>	63.90	72.49
	<i>Salvia elegans</i>	49.12	55.23
	<i>Senecio angulifolius</i>	51.22	58.33
	Bosque de <i>Abies religiosa</i> (3369)	<i>Baccharis conferta</i>	15.45
<i>Senecio callosus</i>		33.80	35.98
<i>Geranium potetillaefalium</i>		29.76	35.87
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> -incendio (3463)	<i>Stipa ichu</i>	57.22	66.66
	<i>Achillea millefolium</i>	51.55	33.88
	<i>Geranium potetillaefalium</i>	46.16	64.44
	<i>Baccharis conferta</i>	10.65	13.54
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> -sin incendio (3463)	<i>Stipa ichu</i>	27.77	51.66
	<i>Alchemilla procumbens</i>	33.43	51.66

Cuadro 10. Porcentajes de colonización micorrízica en las temporadas de lluvias y secas.

Respecto a la densidad de esporas, en la gráfica 1, se observa que en el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio se registró el valor más alto de 763.33, mientras que la menor cantidad se presentó en el bosque de *Abies religiosa* con 95.66.



Grafica 1. Densidad de esporas de HMA en temporada de lluvias.

En la figura 21, se observan los resultados del análisis de varianza (95 % de confianza) los cuales muestran que existe al menos una zona diferente, el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio, debido a la alta densidad de esporas del suelo.

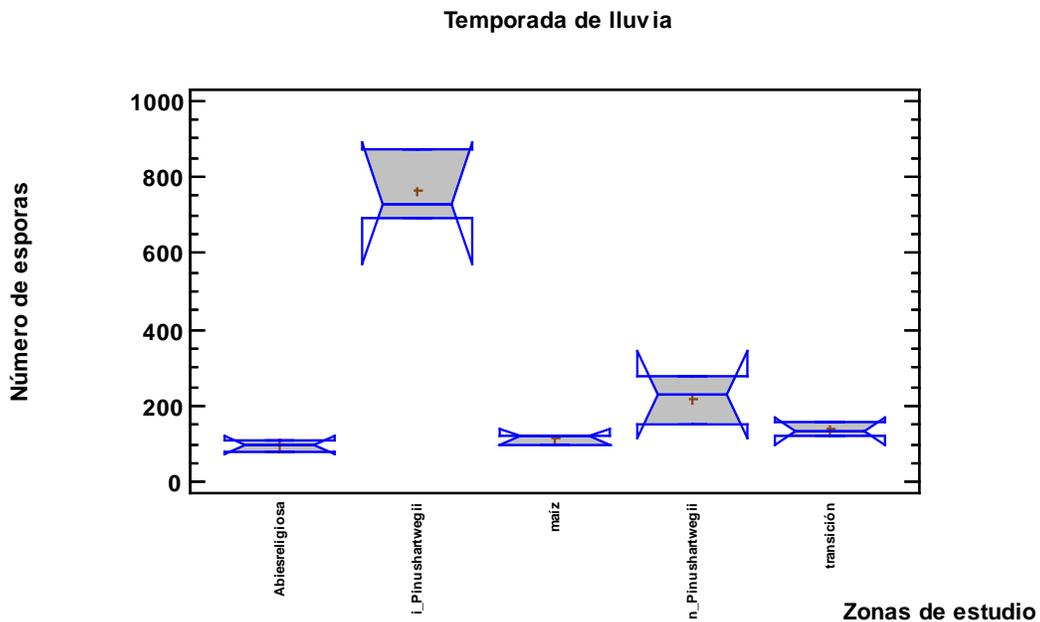


Figura 21. Comparación de la densidad de esporas en la temporada de lluvias

En los cuadros 11 y 12, la prueba de rango múltiple de Tukey, indica las densidades promedio de cada zona, también muestra a la zona de cultivo, transición, bosque de *Abies religiosa* y de *Pinus hartwegii*-sin incendio, sin diferencias estadísticas significativas ($p\text{-value} \geq 0.05$) en la temporada de lluvias.

zonas	Repeticiones	promedios	Grupos homogéneos
<i>Abies religiosa</i>	3	95.66	X
maíz	3	114.33	X
transición	3	138.33	X
<i>n_Pinus hartwegii</i>	3	220.00	X
<i>i_Pinus hartwegii</i>	3	763.33	X

Cuadro 11. Promedios de la densidad de esporas en la temporada de lluvias

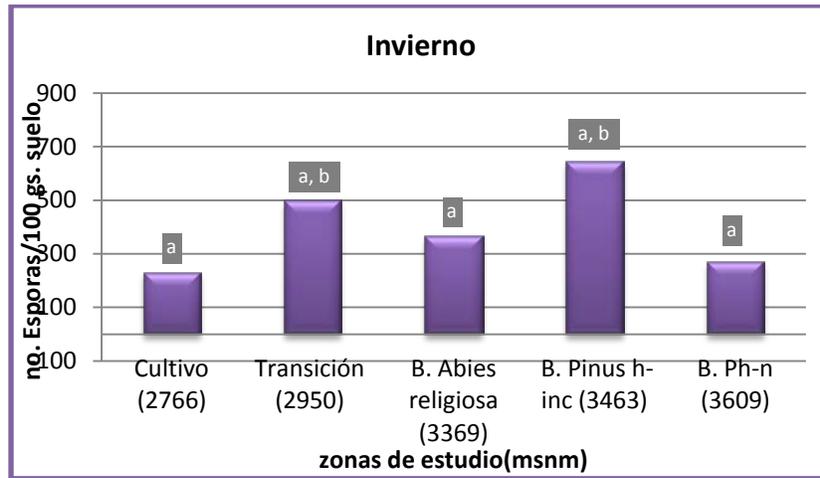
Prueba de Tukey HSD

Contraste	Sig.	Diferencias	+/- Limites
<i>Abies religiosa</i> - <i>i_Pinus hartwegii</i>	*	-667.667	142.175
<i>Abies religiosa</i> – maíz		-18.6667	142.175
<i>Abies religiosa</i> - <i>n_Pinus hartwegii</i>		-124.333	142.175
<i>Abies religiosa</i> – transición		-42.6667	142.175
<i>i_Pinus hartwegii</i> – maíz	*	649.0	142.175
<i>i_Pinus hartwegii</i> - <i>n_Pinus hartwegii</i>	*	543.333	142.175
<i>i_Pinus hartwegii</i> - transición	*	625.0	142.175
maíz - <i>n_Pinus hartwegii</i>		-105.667	142.175
maíz - transición		-24.0	142.175
<i>n_Pinus hartwegii</i> - transición		81.6667	142.175

* diferencia estadística significativa.

Cuadro 12. Tabla de las diferencias estadísticas de la densidad de esporas en temporada de lluvias.

Debido a las lluvias inusuales que se presentaron en el Parque, se realizó un muestreo extra, en la temporada de invierno, en donde hubo un incremento general en la densidad de esporas, principalmente en la zona de transición, el bosque de *Abies religiosa* y en el bosque de *Pinus hartwegii*. También se muestra que al igual que en la temporada de lluvias, el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio fue la zona en que se registró la mayor cantidad de 643.33, en tanto que el valor más bajo se presentó en la zona de cultivo con 230 esporas (gráfica 2).



Grafica 2. Densidad de esporas de HMA en temporada de invierno.

A partir de los datos anteriores, el ANOVA muestra la existencia de al menos dos grupos diferentes, el primero compuesto por el bosque de *Abies religiosa*, el cultivo y el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio, y el segundo conformado por la zona de transición y el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio (figura 22).

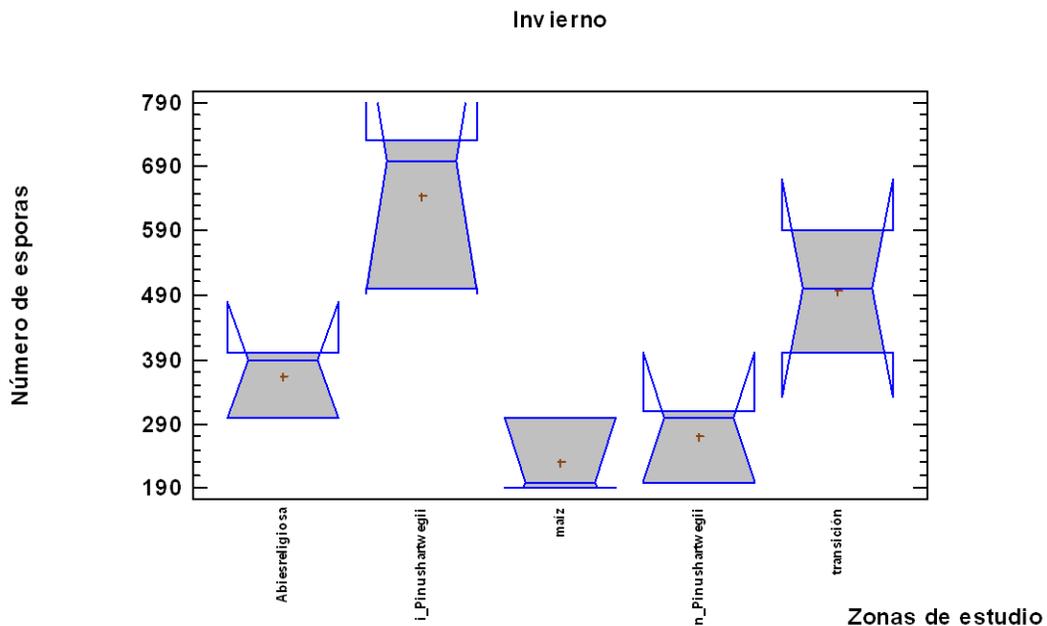


Figura 22. Comparación de la densidad de esporas en la temporada de invierno

Los resultados de la prueba Tukey (p-value ≥ 0.05), muestran que en la temporada de invierno, las principales diferencias estadísticas se asociaron al bosque de *Pinus hartwegii*-incendio y a la zona de transición (cuadros 13 y 14).

Prueba de Tukey HSD

<i>zonas</i>	<i>Repeticiones</i>	<i>Promedios</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
maíz	3	230.0	x
<i>n_Pinus hartwegii</i>	3	270.0	x
<i>Abies religiosa</i>	3	363.333	xx
transición	3	496.667	xx
<i>i_Pinus hartwegii</i>	3	643.333	x

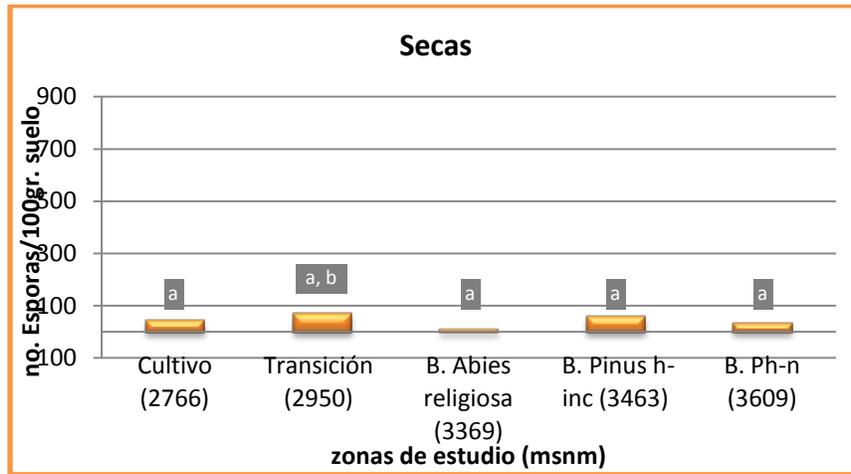
Cuadro 13. Promedios de la densidad de esporas en la temporada de invierno

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencias</i>	<i>+/- Limites</i>
<i>Abies religiosa - i_Pinus hartwegii</i>	*	-280.0	225.164
<i>Abies religiosa - maíz</i>		133.333	225.164
<i>Abies religiosa - n_Pinus hartwegii</i>		93.3333	225.164
<i>Abies religiosa - transición</i>		-133.333	225.164
<i>i_Pinus hartwegii - maíz</i>	*	413.333	225.164
<i>i_Pinus hartwegii - n_Pinus hartwegii</i>	*	373.333	225.164
<i>i_Pinus hartwegii - transición</i>		146.667	225.164
<i>maíz - n_Pinus hartwegii</i>		-40.0	225.164
<i>maíz - transición</i>	*	-266.667	225.164
<i>n_Pinus hartwegii - transición</i>	*	-226.667	225.164

* diferencia estadística significativa.

Cuadro 14. Tabla de las diferencias estadísticas de la densidad de esporas en la temporada de invierno

Para la temporada de secas, en todas las zonas se presentó una disminución considerable (gráfica 3), no obstante la zona de transición registró la más alta cantidad de 73.33, y la más baja se mostró en el bosque de *Abies religiosa* con 13.33 esporas en cien gramos de suelo.



Grafica 3. Densidad de esporas de HMA en época de secas.

En la figura 23, el análisis de varianza (95 % de confianza), muestra que al menos la zona de transición es diferente, al resto de los sitios en la temporada de secas.

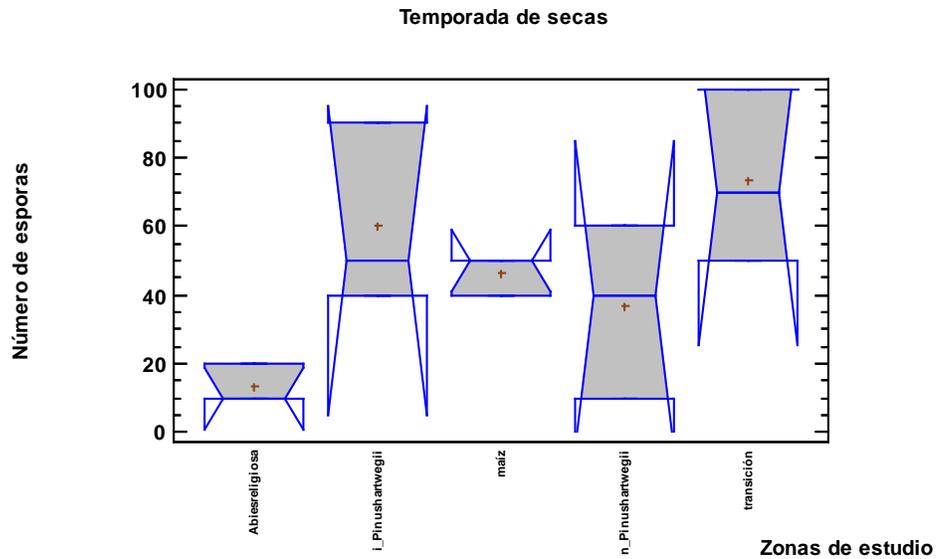


Figura 23. Comparación de la densidad de esporas en la temporada de secas.

En los cuadros 15 y 16 se muestran los resultados de la prueba de Tukey ($p\text{-value} \geq 0.05$) donde se indican los promedios de densidades así como la diferencia estadística significativa que se presentó en la zona de transición, asociada al bosque de *Abies religiosa*, en la temporada de secas.

Prueba de Tukey HSD

<i>zonas</i>	Repeticiones	Promedios	Grupos Homogéneos
<i>Abies religiosa</i>	3	13.3333	X
<i>n_Pinus hartwegii</i>	3	36.6667	XX
Maíz	3	46.6667	XX
<i>i_Pinus hartwegii</i>	3	60.0	XX
transición	3	73.3333	X

Cuadro 15. Promedios de la densidad de esporas en la temporada de secas.

Contraste	Sig.	Diferencias	+/- Límites
<i>Abies religiosa - i_Pinus hartwegii</i>		-46.6667	54.1939
<i>Abies religiosa - maíz</i>		-33.3333	54.1939
<i>Abies religiosa - n_Pinus hartwegii</i>		-23.3333	54.1939
<i>Abies religiosa - transición</i>	*	-60.0	54.1939
<i>i_Pinus hartwegii - maíz</i>		13.3333	54.1939
<i>i_Pinus hartwegii - n_Pinus hartwegii</i>		23.3333	54.1939
<i>i_Pinus hartwegii - transición</i>		-13.3333	54.1939
maíz - <i>n_Pinus hartwegii</i>		10.0	54.1939
maíz - transición		-26.6667	54.1939
<i>n_Pinus hartwegii</i> - transición		-36.6667	54.1939

* Diferencia estadística significativa.

Cuadro 16. Tabla de las diferencias estadísticas del número de esporas en la temporada de secas

Finalmente el Análisis Clúster, permitió la formación de cuatro grupos formados con base en las semejanzas y diferencias respecto a la densidad de esporas de HMA. Se observa en la figura 24, que la zona de cultivo y el bosque de *Pinus hartwegii*- sin incendio, presentaron la mayor semejanza entre sí, mientras la mayor diferencia se presentó en la zona de transición y el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio.

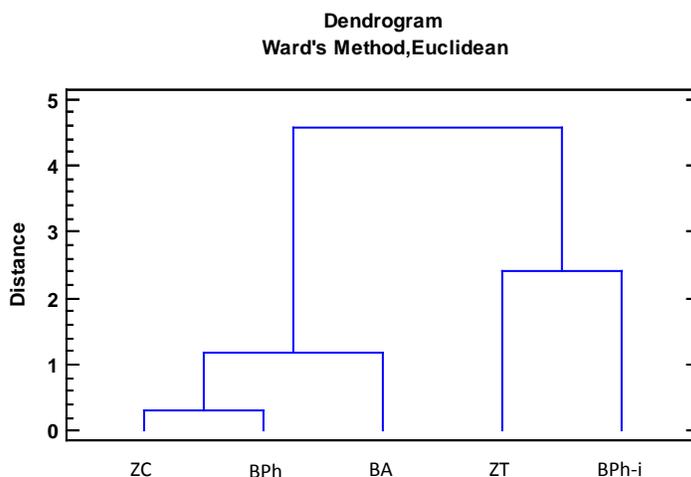


Figura 24. Dendrograma de agrupamiento de las zonas de estudio. ZC= zona de cultivo; ZT= zona de transición; BA= bosque de *Abies religiosa*; BPh-i= bosque de *Pinus hartwegii*-incendio y BPh= bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio

En cuanto a las propiedades físicas y químicas del suelo, en el cuadro 17 se encuentran los valores obtenidos. Respecto a la textura que presentaron las zonas de estudio la mayoría presentó la clase textural de arenosa, ya que el porcentaje mineral que ocupó la arena fue por encima del 90 %, sin embargo la zona de cultivo mostró una leve variación en los porcentajes de arena y limo lo que le dio la clase de areno-migajón.

Respecto a la densidad real, los valores obtenidos de todas las zonas se presentaron dentro de los intervalos comunes que se van de 2.0 a 2.75 g/cm³, en tanto que en el bosque de *Abies religiosa* fue de 1.19 g/cm³, sin embargo es un valor que se asocia con el alto porcentaje de materia orgánica de 10.50 %.

Por su parte, los valores de densidad aparente de la zona de cultivo y de transición fueron semejantes al presentar cifras de 1.39 g/cm³ y 1.24 g/cm³, respectivamente. Asimismo, fueron similares los valores obtenidos en el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio con 0.99 g/cm³ y en el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio con 0.91 g/cm³. En general todos los valores se encuentran dentro del rango más común que va de 0.85 a 2.0 g/cm³, excepto el bosque de *Abies religiosa* al presentar el valor más bajo de 0.79 g/cm³, no obstante coincide con lo reportado por Bravo-Espinosa y col. (2006) quienes reportan una densidad de 0.89 g/cm³ en Andosoles de Michoacán.

En cuanto al porcentaje de espacio poroso, tuvo un comportamiento similar al de las densidades real y aparente, ya que también está dado por estas variables. La mayoría de las zonas de estudio presentaron un porcentaje alto entre 45 y 60 % de espacio poroso.

ZONAS (msnm)	Textura (USDA)	D.R. (g/cm ³)	D.A. (g/cm ³)	E.P (%)	Humedad lluvias (%)	Humedad invierno (%)	Humedad secas (%)	pH (real)	M.O (%)	P (mg kg ⁻¹)	N (%)
cultivo (2766)	areno-migajón	2.55	1.39	45.49	13.76	13.76	0.05	5.75	4.12	1.5	0.09
Transición (2950)	arenoso	2.34	1.24	47.00	12.61	18.34	0.03	6.51	10.05	5.8	0.12
B. <i>Abies religiosa</i> (3369)	arenoso	1.19	0.79	33.61	23.1	32.8	0.11	6.00	10.50	4.6	0.40
B. <i>Pinus hartwegii</i>-incendio (3463)	arenoso	2.14	0.99	53.33	25	28.86	0.18	6.55	5.19	4.0	0.26
B. <i>Pinus hartwegii</i>-no incendio (3609)	arenoso	2.28	0.91	60.08	33.68	38.69	0.23	6.05	7.78	4.0	0.22

Cuadro 17. Propiedades físicas y químicas del suelo

En relación al porcentaje de humedad, ha sido relacionado con el porcentaje de E.P., ya que el comportamiento fue muy similar. En el cuadro 17 se observa que las cantidades registradas para la temporada de invierno fueron incluso más altas, respecto a la de lluvias, debido a las altas precipitaciones ocurridas en esta temporada. Particularmente en el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio, se presentaron porcentajes más altos, en tanto que en el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio fueron menores. Por su parte, en el cultivo se presentaron los valores más bajos.

Referente al pH y de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 los valores observados en todas las zonas se clasifica como moderadamente ácido (cuadro 3). No obstante cabe señalar que en el área de cultivo, se presentó el menor valor de 5.75 siendo el más bajo. La zona de transición tuvo un valor de 6.51 de manea similar a la zona del bosque de *Pinus hartwegii*-incendio con 6.55. El pH de las zonas de bosque de *Abies* y el Bosque de *Pinus hartwegii*- sin incendio fueron de 6.51 y 6.05 respectivamente.

Respecto los porcentajes de materia orgánica y de acuerdo a la NOM-021.RECNAT-2000, en la parcela de maíz con 4.12%, fue clasificado como bajo el contenido. La zona de transición y el bosque de *Abies* y bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio, tuvieron 10.05, 10.50 y 7.78%, respectivamente, los cuales son considerados como porcentajes medios. Sin embargo el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio mostró un nivel bajo del 5.19 %.

En lo que se refiere al contenido de fósforo, los niveles presentes en todas las zonas, se clasificaron como bajos según la NOM-021-RECNAT-2000, al estar los niveles por debajo de 15 mg kg^{-1} , sin embargo cabe señalar que en el cultivo se presentó la mayor cantidad de 7.5 mg kg^{-1} , seguido por la zona de transición con 5.8 mg kg^{-1} , el bosque de *Abies religiosa* con 4.6 mg kg^{-1} , y los bosques de *Pinus hartwegii* con 4 mg kg^{-1} .

En cuanto al contenido de nitrógeno en el suelo y con base a la NOM-021-RECNAT-2000, se clasificaron como bajos los niveles de las zona de cultivo (0.09 %), transición (0.12 %), bosque de *Pinus hartwegii*-incendio (0.26 %), y del bosque de *Pinus hartwegii* sin incendio (0.22%). Mientras que en el bosque de *Abies religiosa*, se observó un nivel medio del 0.40%.

En cuanto al ACP, permitió identificar a la zona de cultivo, transición y el bosque de *Abies religiosa*, como las áreas más representativas del Parque. Asimismo, muestra que en la zona de cultivo, las densidades real (D.R) y aparente (D.A) son las más determinantes, mientras que para el sitio de transición, parecen tener mayor influencia el pH, la materia orgánica (M.O) y el contenido de fósforo (P) en suelo. En cuanto al bosque de *Abies religiosa*, la D.R y el contenido de humedad, son las variables más importantes que podrían tener mayor influencia sobre el porcentaje de colonización, la cantidad de esporas, así como la composición de especies de HMA (figura 25).

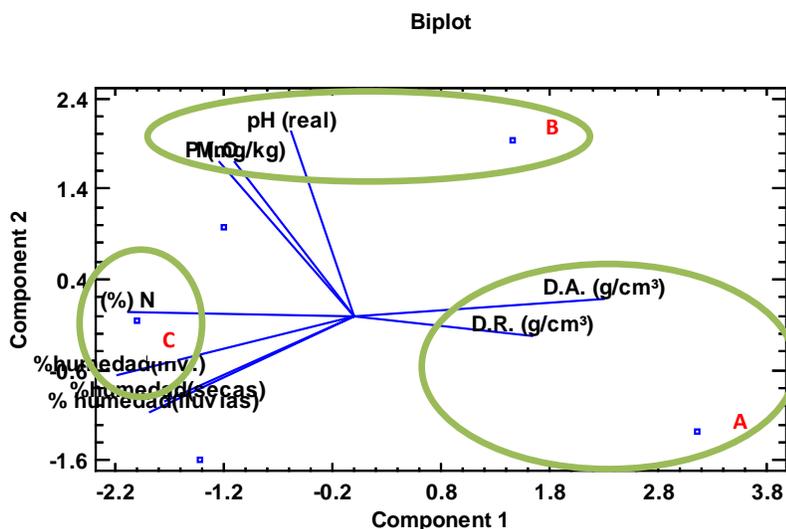


Figura 25. Grafico del Análisis de Componentes Principales. A= zona de cultivo (parcela de maíz), B= zona de transición, C= Bosque de Abies.

Cabe señalar que los componentes principales se identificaron a partir de los *Eigen* valores, los cuales a su vez aportaron en total el 94.087 % de la varianza de los datos originales (cuadro 18).

Numero de Componente	Valores Eigen	Porcentaje de Varianza	Porcentaje acumulado
1	4.89917	54.435	54.435
2	2.20854	24.539	78.975
3	1.36013	15.113	94.087

Cuadro 18. Análisis de componentes principales para las variables de las propiedades físicas y químicas del suelo. Componente 1=zona de cultivo; componente 2= zona de transición y componente 3= el bosque de *Abies religiosa*.

Posteriormente en el cuadro 19, se presentan los valores que tuvieron con cada una de las variables del suelo.

	<i>Componente 1</i>	<i>Componente 2</i>	<i>Componente 3</i>
D.R. (g/cm ³)	0.316086	-0.0612108	0.607163
D.A. (g/cm ³)	0.444642	0.0553465	0.126028
% humedad(lluvias)	-0.365135	-0.304978	0.320699
% humedad (inv.)	-0.421797	-0.187218	0.135054
% humedad(secas)	-0.337517	-0.268737	0.445968
pH (real)	-0.1141	0.57408	0.390098
% M.O.	-0.239704	0.48306	0.0999742
P (mg kg ⁻¹)	-0.211289	0.479488	0.00882275
(%) N	-0.402627	0.00915721	-0.365029

Cuadro 19. Tabla de los pesos de los componentes principales y propiedades del suelo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con base en los resultados y a la presencia de los géneros *Acaulospora*, *Glomus*, *Funnelformis*, *Gigaspora*, *Racocetra* y *Scutellospora*, cabe señalar que en estudios realizados por Azcón-Aguilar, y col., 2009; Gai y col., 2012; Lugo y col., 2008, también se reportaron a *Acaulospora*, *Glomus*, *Gigaspora*, *Funnelformis* y *Scutellospora*, además, muestran al género *Acaulospora* como dominante en ambientes templados ubicados a altitudes por encima de los 3000 msnm, lo que indica que es un género cosmopolita bien adaptado al ambiente que le ofrece el parque Nacional Izta-Popo.

De acuerdo a la presencia de *Acaulospora laevis*, *Acaulospora delicata*, *Funnelformis mosseae*, *Gigaspora margarita*, *Acaulospora aff. kentinensis*, *Racocetra aff. fulgida* y *Scutellospora aff. gilmorei*, cabe señalar que han sido reportadas tanto en sistemas naturales como agrícolas, asociados a bosques de *Pino*, cultivos de aguacate, café, y maíz, entre otros, tal como lo indican Arias y col., 2012; Berch y col., 1989; González-Córtés y col., 2012 y Guadarrama-Chávez, y col., 2007, por lo que se consideran especies adaptadas a diversas características del suelo como pH's ácidos y deficiencias de nutrimentos como fósforo, principalmente, así como al manejo del suelo y la pérdida de vegetación, condiciones bajo las cuales se presentan en el parque.

En relación a los bosques de *Pinus hartwegii*, *Acaulospora laevis* así como la morfoespecie *Acaulospora sp 1*, las cuales se observaron únicamente en la zona de incendio, son especies que se muestran resistentes a las nuevas condiciones creadas a causa del fuego, ya que como lo mencionan Vaquerizo y col. (2004) después del fuego se comienza con la regeneración de la vegetación, por lo que se vuelve a las primeras etapas de sucesión fúngica, donde la diversidad de los hongos es menor. Por otra parte, es probable que los HMA estén jugando un papel importante en la recuperación del suelo y vegetación de este bosque.

Respecto del registro de *Acaulospora aff. Kentinensis*, tanto en el bosque de *Abies religiosa*, así como en el bosque de *Pinus hartwegii*, es una especie de la cual se tienen reportes de áreas tropicales y agroforestales (Varela y Trejo, 2001), lo que indica que es una especie adaptada a diferentes tipos de ecosistemas, particularmente en suelos ácidos y con altos porcentajes de materia orgánica, tal como los sitios donde se presentó en este trabajo.

Cabe señalar que de acuerdo al Índice de Similitud de Sørensen, la mayoría de los valores estuvieron asociados principalmente a la presencia de *Acaulospora laevis*, por lo que se puede considerar una especie generalista y resistente, que se ha logrado adaptar a las diferentes condiciones que le ofrece cada uno de los sitios con diferente tipo de vegetación, sino también a las alteraciones causadas por los incendios forestales, así como a las características de las propiedades físicas y químicas del suelo como los altos contenidos de materia orgánica, pH ácido, textura ligera y bajos contenidos de nitrógeno y fosforo.

En relación a la colonización micorrízica arbuscular, la cual exhibió en general mayores porcentajes en la temporada de secas, pueden estar asociada a la alta actividad de la simbiosis, la cual puede ser inducida o activada ante el estrés producido por la falta de humedad. Por el contrario, la vegetación que mostró mayor colonización en la temporada de lluvias, pudo ser beneficiada por los altos porcentajes de humedad en suelo, ya que favorece la germinación de esporas y por lo tanto origina la infección en las raíces, según mencionan Panwar y Taradfar (2006). No obstante, las variaciones en el grado de colonización también pueden ser afectadas por la densidad de propágulos en suelo, así como por el tipo de planta hospedera (Smith y Read, 1997), asimismo, depende de las especies de los HMA involucrados, ya que en el caso de familia *Gigasporaceae*, se ha reportado que logra colonizar en bajas cantidades, según Dodd y col. (2000).

Cabe señalar que la mayoría de las plantas analizadas en este trabajo no cuentan con registro de colonización micorrízica arbuscular, sin embargo coincide con lo reportado por Cripps y Eddington (2005), Schmidt y col. (2008) y Urcelay y col. (2011), donde también registraron colonización micorrízica en las familias Gramineae, Compositae, Solanaceae, Geraniaceae y Scrophulariaceae, en ambientes ubicados por encima de los 2900 msnm. Por lo que resultan muy importantes estas aportaciones, dado que se ha estimado que en México solo se han examinado cerca del 10 % del total de plantas vasculares conocidas, además, algunas de las plantas determinadas dentro del parque cuentan con potencial como plantas medicinales de uso común, como es el caso de *Alchemilla procumbens*, *Baccharis conferta*, *Castilleja tenuiflora* y *Achillea millefolium*.

Respecto a la densidad de esporas y con base en el Análisis Clúster, el cual muestra las principales diferencias en la zona de transición así como en el bosque de *Pinus hartwegii*, se asocian principalmente a la cantidad de humedad en suelo, ya que en las temporadas de lluvias e invierno, se registraron los más altos valores de esporas en suelo, lo cual coincide con el trabajo de Oliviera y Oliviera (2003). Asimismo, el número de esporas pudo haber sido influenciado por la variedad de plantas que se encontraron principalmente en la zona de transición, ya que Burrows y Pflieger (2002) reportan un favorecimiento en la densidad de esporas con base en la diversidad de vegetación.

En relación con las propiedades físicas del suelo, la clase textural arenosa, indica que la cantidad de macroporos es mayor y por lo tanto hay un favorecimiento en la circulación de oxígeno, de agua, de nutrimentos y mayor facilidad en la penetración de raíces (Trejo y col., 2008) en tanto que, la variación a migajón-arenosa de la zona de cultivo, se asocia principalmente al manejo agrícola.

En cuanto a la densidad real y aparente, son variables dadas por el origen mineral del suelo, debido a la presencia de cuarzo, feldespatos y silicatos, como principales constituyentes, sin embargo la baja densidad real del bosque de *Abies religiosa* se asocio con el alto contenido de materia orgánica.

Por su parte los porcentajes de espacio poroso, indican que es afectado por los contenidos de materia orgánica, asimismo, que estos suelos tienen buena aireación y que los gases son aprovechables para el crecimiento de organismos, entre ellos las micorrizas, tal como lo menciona Buckman y Brady (1991).

En relación a la humedad del suelo, el bajo porcentaje observado en el bosque de *Pinus hartwegii*-incendio de debe a que en zonas incendiadas la humedad del suelo tiende a disminuir por la deshidratación derivada de la combustión de los materiales orgánicos. En tanto que los altos porcentajes de humedad en el bosque de *Abies religiosa*, se asocian con el alto porcentaje de materia orgánica.

De acuerdo a las propiedades químicas del suelo, los valores de pH se consideran comunes en los suelos forestales como resultado de la liberación de ácidos orgánicos y como consecuencia del aporte de material vegetal de las coníferas (Pritchett, 1990, sin embargo la acidez de la zona de cultivo puede deberse a la adición de fertilizantes. Mientras que el valor más cercano a la neutralidad que correspondió al bosque de *Pinus hartwegii*-incendio, puede asociarse al aporte de cationes procedente de las cenizas producidas por el incendio, según lo reportado por Vaquerizo y col. (2004) y Vega (2004).

Respecto a los niveles de materia orgánica, los porcentajes medios del bosque de *Abies religiosa* y el bosque de *Pinus hartwegii*-sin incendio, se deben principalmente al el aporte de material vegetal, como hojas y cascara de madera a la superficie. En tanto que el bajo porcentaje de la zona de cultivo puede deberse a las pérdidas originadas por la labranza. Mientras que el bajo nivel del bosque de *Pinus hartwegii*-incendio se atribuye a la pérdida de M.O. por la combustión originada por el incendio, tal como lo maneja Ubeda y Sala (1996).

En cuanto a los contenidos de fósforo, los bajos contenidos, se pueden atribuir a que es un nutrimento el cual en sus formas solubles tiende a fijarse, principalmente en los suelos del Parque Izta-Popo, del tipo Andisol, en los que se presentan complejos del tipo alofánico, los cuales tienden a realizar este proceso de fijación.

Por su parte, los contenidos de nitrógeno representan valores que en general se han reportado en comunidades de coníferas de los climas fríos, los cuales presentan deficiencias de este elemento, ya que es un elemento demasiado soluble, que suele volatilizarse y desaparecer por el drenaje del suelo.

Finalmente cabe destacar que algunas propiedades del suelo tuvieron mayor influencia en ciertas zonas, así pues, conforme lo muestra el Análisis de Componentes Principales, las densidades real y aparente son un factor de mayor peso sobre a diversidad de los HMA, particularmente en la zona de cultivo, ya que como se ha reportado en Nadian y col. (1998), las altas compactaciones pueden afectar la respuesta de crecimiento de las plantas así como la capacidad de colonización. No obstante, son las condiciones aptas para el desarrollo de especies como *Gigaspora margarita*, la cual se observó exclusivamente en el cultivo y de las morfoespecies de *Acaulospora*, las cuales fueron únicas para el bosque de *Abies religiosa*.

En tanto que para la zona de transición, el pH es uno de los factores importantes a considerar, ya que puede afectar positiva o negativamente la densidad de esporas, tal como lo experimentaron Panwar y Tarafdar (2006). De igual manera, también puede ser clave en la presencia de ciertas especies de HMA, ya que géneros como *Acaulospora*, domina principalmente en sitios con rangos de pH de 5.5 a 7 o incluso originar la completa eliminación de los HMA, conforme lo mencionan Giovannetti (2000) y Pawloska y Charvat (2002).

Finalmente, cabe señalar que el sitio que ocupa el Parque Nacional Izta-Popo en el centro del Eje Volcánico Transversal, le confiere una serie de características propias que han permitido el establecimiento y desarrollo de los Hongos Micorrízicos arbusculares, a pesar de de las alteraciones producidas por incendios forestales o el cambio de uso de suelo, sin embargo, es necesaria una mayor exploración taxonómica y fisiológica, la cual permita a futuro implementar estrategias biotecnológicas que contribuyan al desarrollo sustentable.

CONCLUSIONES

- ✚ Se logró determinar la diversidad de los hongos micorrízicos arbusculares, compuesta por los géneros *Acaulospora*, *Funneliformis*, *Gigaspora*, *Racocetra*, *Scutellospora* y *Glomus*.
- ✚ El registro de las especies *Acaulospora delicata*, *Funneliformis mosseae* y *Gigaspora margarita*, así como a *Racocetra aff. fulgida*, *Scutellospora aff. gilmorei* y *Acaulospora aff. kentinesis*, representan nuevos reportes para el Parque Nacional Izta-Popo.
- ✚ Factores como el tipo de vegetación, propiedades físicas y químicas del suelo, así como su manejo y la incidencia de incendios forestales, son factores que influyen en la composición, distribución y abundancia de los hongos micorrízicos.
- ✚ La colonización micorrízica arbuscular y la densidad de esporas de los hongos micorrízicos arbusculares, fueron influenciados principalmente por el contenido de humedad en suelo así como por el tipo de planta hospedera.

BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, P.; Sah, P., 2009. "Ecological Importance of Ectomycorrhizae in World Forest Ecosystems", *Nature and Science*, Vol. 7, No. 2, Pp. 107-116.
- Aguilera, L.I.; Olalde, V.; Rubi, M.; Contreras, R., 2007-2008, "Micorrizas arbusculares", *Ciencia Ergo Sum*, Vol. 14, No. 003, Pp. 300-306.
- Alarcón, A.; Hernández-Cuevas, L.; Ferrera-Cerrato, R.; Franco-Ramírez, A., 2012, "Diversity and agricultural applications of arbuscular mycorrhizal fungi in México", *Biofertilizers & Biopesticides*, Vol. 3, No. 1, Pp. 1-10.
- Alarcón, A., 2007, "Micorriza arbuscular", en: Ferrera-Cerrato, R.; Alarcón, A. (eds.), "Microbiología agrícola. Hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico y planta-microorganismo", *Trillas*, México.
- Álvarez, J.; Monroy, A., (Eds.), 2008, "Técnicas de asociaciones micorrízicas y sus implicaciones en la restauración". Departamento de ecología y recursos naturales, *Facultad de ciencias, UNAM, México, D.F.*, 232 Pp.
- Arias, R. M.; Heredia-Abarca, G.; Sosa, V.; Fuentes-Ramírez, L.E., 2012, "Diversity and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores under different coffee production systems and in a tropical montane cloud forest patch in Veracruz, México", *Agroforests Syst*, Vol. 85, Pp. 179-193.
- Azcón, R., 2000, "Papel de la simbiosis micorrízica y su interacción con otros microorganismos rizosféricos en el crecimiento vegetal y sostenible agrícola", IRENAT-Colegio de Postgraduados, Montecillo, *Mundi prensa*, México, Pp. 1-15.
- Azcón-Aguilar, C.; Palenzuela, J.; Ruiz, M.; Ferrol, N.; Azcón, R.; Irurita, J.; Barea, J. 2009, "Diversidad de micorrizas y hongos micorrícicos asociados a especies de la flora amenazada del Parque Nacional de Sierra Nevada", *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2006-2009*, Pp.173-190.
- Bago B.; Azcón-Aguilar, C.; Shachar-Hill, Y.; Pfeffer, P. E., 2000, "El micelio externo de la micorriza arbuscular como puente simbiótico entre la raíz y su entorno", en: Alarcón A.; Ferrera-Cerrato R. (Eds.), "Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular", *Mundi Prensa*, México, Pp. 78-89.
- Barea, J., 2001. "Las micorrizas arbusculares, componente clave en la productividad y estabilidad de agroecosistemas", <http://www.csic.es/asociaciones/api/b15/micorrizas.htm>. Fecha de consulta 15 de Octubre 2011.

- Berch, S.; Ferrera-Cerrato, R.; Gonzalez, C., 1989, "Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Fields in Atlacomulco, México", *Mycological Society of America*, Vol. 81, No. 6, Pp. 933-935
- Blaskowski, J. 2003, <http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/>. Fecha de consulta 18 de Junio de 2012.
- Bravo-Espinosa, M.; Fregoso-Tirado, L.E.; Medina-Orozco, L.E., 2006, "Parámetros de erosionabilidad del modelo WEPP para andosoles con uso pecuario en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán", *Técnica Pecuaria en México*, Vol. 44, No. 1, Pp. 129-141.
- Brundrett, M. C., 2002, "Co evolution of roots and mycorrhizas of land plants", *New Phytologist*, Vol. 154, Pp. 275-304.
- Brundrett, M., 2003, "Diversity and classification of mycorrhizal associations" *Biol. Rev.*, Vol. 79, Pp. 473-395.
- Bucher, M., 2006, "Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces", *New phytologist*, Vol. 173, Pp. 11-26.
- Buckman, H. O.; Brady, N. C., 1991, "Naturaleza y propiedades de los suelos". *Limusa*, 590 Pp.
- Burrows, R. y Pflieger, F. 2002, "Arbuscular mycorrhizal fungi respond to increasing plant diversity", *Ca. J. Bot.* Vol. 80, Pp. 120-130.
- Cardoso, M., 2011, "Efecto del fuego sobre la diversidad de Hongos Ectomicorrízicos y el micelio externo del Bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional Izta-Popo", Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, 88 Pp.
- Cripps, C. L.; Eddinton, L. H., 2005, "Distribution of Mycorrhizal Types among Alpine Vascular Plant Families on the Beartooth Plateau, Rocky Mountains", *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 37, No. 2, Pp. 177-178.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2010, <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Fecha de consulta 24 de Marzo de 2012.
- Dickson, S. 2004, "The *Arum-Paris* continuum of mycorrhizal symbioses", *New Phytologist*, Vol. 163, Pp. 187-200.
- Dodd, J.C.; Boddington, C. L.; Rodríguez, A.; González-Chávez, C.; Mansur, I. 2000, "Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) from different genera: Form, function and detection", *Plant Soil*, Vol. 226, Pp. 131-151.
- Espinosa, D.; Ocegueda, S. *et. al.* 2008." El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural", en *Capital natural de México*. Vol. 1. Conocimiento actual de la biodiversidad. pp. 33-65.

- Espinosa-Victoria, D. 2000, "Dialogo molecular: hongo micorrízico arbuscular-raíz". En: Alarcón A.; Ferrera-Cerrato R. (Eds.). Ecología, fisiología y biotecnología de la micorriza arbuscular, *Mundi Prensa*, México, Pp. 93-116.
- Ferrera-Cerrato, R.; González, M.C.A.; Rodríguez, M.M.N. 1993, "Manual de Agromicrobiología", *Trillas*, México, 142 Pp.
- Finlay R.D. 2008. "Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium", *Journal Experimental Botany*, Vol. 59, Pp. 1115-1126.
- Fujita, M.; Fujita Y.; Noutoshi, Y.; Takahashi, F.; Narusaka, Y.; Yamaguchi-Shinozaki, K; Shinozaki, K. 2006, "Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: a current view from the points of convergence in the stress signaling networks", *Curr Opin Plant Biol*, Vol. 9, Pp. 436-442.
- Futai, K.; Taniguchi, T, Kataoka, R. 2008, "Ectomycorrhizae and their importance in forest ecosystems", En: Siddiquiet al. (Eds.). *Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry*, Pp. 241-285.
- Gai, J. P.; Tian, H.; Yang, F. Y.; Christie, P.; Li, X. L.; Klironomos, J. N. 2012, "Arbuscular mycorrhizal fungal diversity along a Tibetan elevation gradient", *Pedobiología*, Vol. 55, Pp. 145-151.
- García-Díaz, M. y García-Sánchez, R. 2009. "Hongos micorrizógenos arbusculares asociados al suelo rizosférico de diez cactáceas globosas de cinco localidades del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. En: Monroy-Ata, A.; García-Sánchez, R., (eds.), 2009, "Plantas y hongos. Micorrizas arbusculares: un mutualismo esencial en zonas semiáridas", *UNAM, FES Zaragoza*, México, Pp. 81-96.
- Giovannetti, M. 2000, "Spore germination and pre-symbiotic mycelial growth". En: Kapulkik, Y. y Douds, D. (Eds.), "Arbuscular mycorrhizas: physiology and function", *Kluwer Academic Publishers*, Bordrecht, Netherlands, Pp. 47-69.
- Göhre, V.; Paszkowski, U. 2006, "Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation", *Planta*, Vol. 22, Pp. 1115-1122.
- González-Córtes, J.C.; Vega-Fraga, M.; Varela-Fregoso, L.; Martínez-Trujillo, M.; Carreón-Abud, Y.; Gavito, M.E. 2012, "Arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities and land use change: the conversion of temperate forests to avocado plantations and maize fields in central México", *Fungal Ecology*, Vol. 5, Pp. 16-23.
- González-Chávez, M.C.A.; Gutiérrez-Castorena, M. C.; Wright, S. 2004, "Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad", *Terra Latinoamericana*, Vol. 22, Pp. 507-514.

- Guadarrama-Chávez, P.; Camargo-Ricalde, S.L.; Hernández-Cuevas, L.; Castillo-Arguero, S., 2007, "Los hongos micorrizógenos arbusculares de la región de Nizanda, Oaxaca, México" *Bol. Soc. Bot. Mex.* Vol. 81, Pp. 131-137.
- Guadarrama, C. P.; Sánchez, G. I.; Álvarez, S. J.; Ramos, Z. J. 2004, "Hongos y plantas beneficios a diferentes escalas en micorrizas arbusculares", *Ciencias*, Vol. 73, Pp. 38-45.
- Guerrero, E. 1996, "Micorrizas. Recurso biológico del suelo", *Fondo fen Colombia*, Bogotá, Colombia, 208 Pp.
- Guzmán-González, G. S.; Farías-Larios, J. 2005, "Biología y regulación molecular de la micorriza arbuscular", *Avances en investigación agropecuaria*, Vol. 9, Pp. 17-31.
- Harrison, M. J. 1997, "The arbuscular mycorrhizal symbiosis: an underground association", *Trends in plant science*. Vol. 2, No. 2, Pp. 54-60.
- Honrubia, M. 2009, "Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años", *Anales del jardín botánico de Madrid*, Vol. 66S1, Murcia, España, Pp. 143-144.
- INVAM (International Culture Collection of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi). 2005. (<http://invam.caf.wvu.edu/fungi/fungindex.htm>). Fecha de consulta 18 de Junio de 2012.
- James, A. E.; Rygiewicz, P. T.; Watrud, L. S.; Donnelly, P. K. 2002, "La influencia de condiciones adversas de suelo en la formación y función de micorrizas arbusculares", *Advances in Environmental Research*, Vol. 7, Pp. 123-138.
- Khan, A.G. 2006, "Mycorrhizoremediation-an enhanced form of phytoremediation", *Journal of Zhejiang University Science B*, Vol. 7, Pp. 503-514.
- Koshe, R. E. 1987, "Distribution of VA micorrhizal fungi along a latitudinal temperature gradient", *Mycologia*, Vol. 79, No. 1, Pp. 55-68.
- Kula, A. A. R.; Hartnett, D. C.; Wilson, G. W. T. 2005, "Effects of mycorrhizal symbiosis on tallgrass prairie plant-herbivore interactions", *Ecology Letters*, Vol. 8, Pp. 61-69.
- Lugo, M. A.; Ferrero, M.; Menoyo, E.; Estévez, M.C., 2008, "Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizospheric Bacteria Diversity along an Altitudinal Gradient in South American Puna Grassland", *Microb Ecol*, No. 55. Pp. 705-713.
- Montaña, N. M.; Alarcón, A.; Camargo-Ricalde, S. L.; Hernández-Cuevas, L. V.; Álvarez-Sánchez, J.; González-Chávez, M. C. A.; Gavito, M. E.; Sánchez-Gallen, I.; Ramos-Zapata, J.; Guadarrama, P.; Maldonado-Mendoza, I. E.; Castillo-Arguero, S.; García-Sánchez, R.; Trejo, D.; Ferrera-Cerrato, R. 2012, "Research on arbuscular mycorrhizae in México: an historical synthesis and future prospects", *Symbiosis*, Vol. 57, No. 1.
- Moreno, C. E. 2001, "Métodos para medir la biodiversidad", *M&T-Manuales y Tesis SEA*, Vol. 1, Zaragoza, 88 Pp.

- Nadian, H.; Smith, S.E.; Alston, A.M.; Murray, R.S.; Siebert, B. D., 1998, "Effects of soil compaction on phosphorus uptake and growth of *Trifolium subterraneum* colonized by four species of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi", *New Phytol*, No. 139, Pp. 155-165.
- NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana. Diario Oficial de la Federación, segunda sección, 31 de Diciembre del 2002. 82 p.
- Ñique, M., 2010, "Biodiversidad: Clasificación y Cuantificación", Universidad Agraria de la Selva, Tingo Maria, Perú.
- Oliveira, N. ; Olivera L. 2005, "Seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi in plants of *Theobroma grandifolium* Schum and *Pullinia cupana* Mart. of an agroforestry system in Central Amazonia, Amazonas State, Brazil", *Brazilian J. Microb*, Vol. 36, Pp. 262-270.
- Panwar, J. ; Tarafdar, J. 2006, "Arbuscular mycorrhizal fungal dynamics under *Mitragyna parvifolia* (Roxb.) Korth in Thar", *Desert Appl. Soil Ecol*, Vol. 34, Pp. 200-208.
- Parniske, M. 2008. "Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses", *Nature reviews, Microbiology*, Vol. 6, Pp. 763-775.
- Pawlowska, T. E.; Charvat, I. 2002, "Influence of edaphic and environmental factors on arbuscular mycorrhizae", en: Sharma, A. K.; Johri, B.N. 2002, "Arbuscular Mycorrhizae. Interactions in Plants Rhizosphere and Soils", *Science Publishers, Inc.*, India, 311 Pp.
- Pozo M.J.; Azcón-Aguilar, C. 2007, "Unraveling mycorrhiza-induced resistance". *Current opinion in Plant Biology*, Vol. 10, Pp. 393-398.
- Pritchett, W. L. 1990, "Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento", *Limusa*, México, D. F. 634 Pp.
- Quiang-Sheng, W.; Ren-Xue, X. 2006, "Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions", *Journal of Plant Physiology*, Vol. 163, Pp. 417-425.
- Redecker, D.; Kodner, R.; Graham, L. E. 2000, "Glomalean Fungi from the Ordovician", *Science*, Vol. 289, Pp. 1920-1921.
- Remy, W.; Taylor, T. N.; Hass, H.; Kerp, H. 1994, "Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. Vol. 91, Pp. 11841-11843.
- Requena, N.; Serrano, E.; Oco'n, A.; Breuninger, M..2007, "Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhiza establishment", *Phytochemistry*, Vol. 68, Pp. 33–40.
- Reyes, I. 2002, "Asociaciones biológicas en el suelo: la micorriza arbuscular (MA)", *ContactoS*, Vol. 44, Pp. 5-10.

- Rilling, M.C. 2004, "Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation", *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 84, Pp. 355-363.
- Rilling, M.C.; Mummey, D. L. 2006, "Micorrizas and soil structure", *New Phytologist*, No. 171, Pp. 41-53.
- Rzedowski, G.C. y colaboradores. 2005, "Flora Fanerogámica del Valle de México", 2ª ed. Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1406 Pp.
- Sánchez-Colín, M. J. 2005, "Micorrizas. Aspectos generales", *Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM*, México, 96 Pp.
- Sánchez- González, A. 1979, "La flora del Valle de México", 5ª ed. *Herrero S.A.* México.
- Sánchez, A.; López, L. 2003, "Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la sierra nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal", *Anales del Instituto de Biología., Serie Botánica*, Vol. 74, No. 001, Pp. 47-71.
- Schmidt, S. K.; Sobieniak-Wiseman, L. C.; Kageyama, S. A.; Halloy, S. R. P.; Schadt, C. W. 2008, "Mycorrhizal and dark-septate fungi in plants roots above 4270 meters elevation in the Andes and Rocky Mountains", *Artic, Antartic, and Alpine Research*, Vol. 40, No. 3, Pp. 576-583.
- Schüßler, A. 2011. <http://www.lrz.de/~schuessler/amphylo/>. Fecha de consulta 18 de junio de 2012.
- Schüßler, A. 2009, "Struktur, Funktion und Ökologie der arbuskulären Mykorrhiza", *Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Ökologische Rolle von Pilzen*, Vol. 37, Pp. 97-108
- Schüßler, A.; Gehrig, H.; Schwarzott, D.; Walker, C. 2001, "Analysis of partial *Glomales* SSU rRNA gene sequences: implications for primer design and phylogeny", *Mycol. Res.* Vol. 105, Pp. 5-15.
- Schüßler, A.; Walker, C. 2010, "The Glomeromycota. A species list with new families and new genera", <http://www.lrz.de/~schuessler/amphylo/>.
- Shenck, N.C; Pérez, Y. 1990, "Manual for the identification of VA Mycorrhizal Fungi", *Synergistic Publications*, Gainesville, USA, 286 Pp.
- Siddiqui, Z. A.; Pichtel, J., 2008, "Mycorrhizae: an overview", en Siddiqui, Z. A.; Akhtar, M.S.; Futai, K. (eds.), 2008, "Micorrizas: sustainable agriculture and forestry", *Springer Science & Business Media B. V.* Pp. 1-3.
- Smith, S. E.; Read D. J. 1997, "Mycorrhizal symbiosis", *Academic Press*, Gran Bretaña, 605 Pp.

- Smith, B. A.; Smith, S. E. 1997, "Structural diversity in (vesicular) arbuscular mycorrhizal symbioses", *New Phytologist*, Vol. 137, Pp. 373-388.
- StÜrner, S. L. 2012. "A history of the taxonomy and systematics of arbuscular mycorrhizal fungi belonging to the Phylum Glomeromycota". *Mycorrhiza*, Vol. 22, pp. 247-258.
- Trejo, A.D.; Zuzuleta, R.; Lara, L., 2008, "Manual de Prácticas para el estudio de la simbiosis micorrizógena arbuscular", *Universidad Veracruzana, Serie textos universitarios*, Veracruz, 138 Pp.
- Ubeda, X.; Sala, M., 1996, "Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal", IV Reunión de Geomorfología, Grandal d' Anglade, A.; J. P. Valcarlos (Eds.), *Sociedad Española de Geomorfología*, Pp. 559-572.
- Urcelay, C.; Acho, J.; Joffre, R. 2011, "Fungal root symbionts and their relationship with fine root proportion in native plants from the Bolivian Andean highlands above 3,700 m elevation", *Mycorrhiza*, Vol. 21, Pp. 323-330.
- Vaquerizo, A.; Peñalver, F.; Oria-Rueda, J. A.; Olaizola, J.; Martín-Pinto, P., 2004, "La prevención de incendios forestales y los recursos micológicos; influencia de fuego en la riqueza, diversidad y producción de hongos en montes mediterráneos", *Cuarta conferencia internacional sobre incendios forestales*, España, Pp. 1-8.
- Varela, L. y Trejo, D.2001. "Los Hongos Micorrizógenos Arbusculares como Componentes de la Biodiversidad del Suelo en México", *Acta Zool. Mex.* Número especial, Pp. 139-51.
- Vega, J. A. 2004, "Recuperación de suelos en montes incendiados", *Recursos Ruraris*, Serie cursos, No.1, Pp. 57-60.
- Villers, L.; Rojas, F.; Tenorio, P. 2006, "Guía Botánica del Parque Nacional Malinche Tlaxcala-Puebla", *UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Biología*, México, Distrito Federal.
- Wilkinson, D. M. 2001, "Mycorrhizal evolution", *TRENDS in Ecology & Evolution*, Vol.16, No.2, Pp. 64-65.
- Wright, S.; Franke-Snyder, F. M.; Morton, J. B.; Upadhyaya, A. 1996, "Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots", *Plant and Soil*, Vol. 181, Pp 193-203.