



# Universidad Autónoma de Tlaxcala

---

Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta  
Posgrado de Maestría en Ciencias Biológicas

**Efecto de algunas variables macroecológicas en la  
diversidad de esporomas de hongos ectomicorrizógenos  
asociados a *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional  
La Malinche**

## **T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

P r e s e n t a

CLAUDIA IVETTE PORTILLO DÍAZ

CODIRECTORAS

Dra. Susana Guillén Rodríguez

M. en C. Gema Lilia Galindo Flores

ENERO 2020





# Universidad Autónoma de Tlaxcala

Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta  
Posgrado de Maestría en Ciencias Biológicas

**Efecto de algunas variables macroecológicas en la  
diversidad de esporomas de hongos ectomicorrizógenos  
asociados a *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional  
La Malinche**

## TESIS

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

CLAUDIA IVETTE PORTILLO DÍAZ

Comité tutorial

Dra. Susana Guillén Rodríguez  
M. en C. Gema Lilia Galindo Flores  
Dr. Arturo Torres Estrada  
Dr. Jesús Pérez Moreno  
M. en C. Alejandro Kong Luz

ENERO 2020

El presente proyecto se realizó con apoyo a estudios de Posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) (Beca núm. 485107) en el programa de Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala con registro en el Programa Nacional de Posgrado-CONACyT (PNP 00-30-03) bajo la codirección de la Dra. Susana Guillén Rodríguez y la M. en C. Gema Lilia Galindo Flores.



Universidad  
Autónoma de  
Tlaxcala

**Posgrado en Ciencias Biológicas**  
Coordinación de la División de Ciencias Biológicas  
Secretaría de Investigación Científica y Posgrado

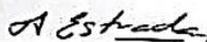


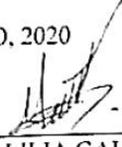
**COORDINACIÓN POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
CENTRO TLAXCALA DE BIOLOGÍA DE LA CONDUCTA  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA  
P R E S E N T E**

Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del proyecto de tesis que **Claudia Ivette Portillo Díaz** realiza para la obtención del grado de Maestra en Ciencias Biológicas, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es “Efecto de algunas variables macroecológicas en la diversidad de esporomas de hongos ectomicorrizógenos asociados a *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional La Malinche”.

Sin otro particular, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
TLAXCALA, TLAX., 24 DE ENERO, 2020

  
\_\_\_\_\_  
DR. ARTURO ESTRADA TORRES

  
\_\_\_\_\_  
M.C. GEMA LILIA GALINDO FLORES

  
\_\_\_\_\_  
DR. JESÚS PÉREZ MORENO

  
\_\_\_\_\_  
M.C. ALEJANDRO KONG LUZ

  
\_\_\_\_\_  
DR. JORGE VÁZQUEZ PÉREZ



Sistema Institucional de Gestión de la Calidad Certificado bajo la Norma:  
ISO 9001:2015-NMX-CC-9001-IMNC-2015



Km 1.5 carretera Tlaxcala-Puebla CP 90070 Tel/fax: 01(246)462-15-57 e-mail: posgradocbtcc@ gmail.com Tlaxcala, Tlax

## **Agradecimientos**

Al Posgrado en Ciencias Biológicas del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta de la Universidad Autónoma de Tlaxcala por darme la oportunidad de pertenecer al programa de Maestría en Ciencias Biológicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca para realizar mis estudios de posgrado (Beca no. 485107).

A los miembros del Comité Tutorial, Dra. Susana Guillén Rodríguez, M en C. Gema Lilia Galindo Flores, M en C. Alejandro Kong Luz, Dr. Jesús Pérez Moreno, Dr. Arturo Estrada Torres y Dr. Jorge Vázquez Pérez.

## **Agradecimientos personales**

A mis directoras de tesis, Dra. Susana Guillén Rodríguez y M. en C. Gema L. Galindo Flores, gracias por apoyarme en este trabajo, por compartir sus conocimientos, tiempo, paciencia e impulsarme para mejorar siempre y en todos los aspectos.

Gracias a todo el Comité Tutoral, M. en C Alejandro Kong Luz, Dr. Arturo Estrada Torres, Dr. Jesús Pérez Moreno y Dr. Jorge Vázquez Pérez, por todas sus aportaciones en cada examen tutorial.

A la Dra. Elizabeth Gallegos por su orientación en las técnicas de análisis de suelos.

A la Dra. Yendi Navarro Noya por orientarme en los análisis estadísticos.

A cada uno de los profesores del posgrado, por compartir su conocimiento.

Gracias a Saul George y Raúl Montero por brindarme su amistad y sobre todo el trabajo en campo.

## **Dedicatoria**

Gracias a mi familia por apoyarme en esta etapa de mi vida.

*“Lo que conocemos es una gota, lo que no conocemos es un océano”. Isaac Newton*

## Resumen

En México, los bosques de *Pinus hartwegii* son de importancia ecológica debido a constituyen el límite arbóreo en los bosques templados de alta montaña. Esta especie arbórea se ha adaptado a las condiciones extremas de frío que imperan en las altitudes mayores además de brindar diversos servicios ecosistémicos, además conforman una red compleja de interacciones para poder existir. Una de ellas es la ectomicorriza formada por las hifas de los hongos con las raíces de las especies arbóreas. Esta asociación es importante desde el punto de vista funcional pues contribuye al mantenimiento de los bosques. Sin embargo, las comunidades de hongos ectomicorrizógenos (HECM) asociados a los bosques de *P. hartwegii* han sido poco explorados. Debido a ello el objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto de algunas variables macroecológicas en la diversidad de esporomas de hongos ectomicorrizógenos en el bosque de *P. hartwegii* en La Malinche. Para ello se eligieron dos altitudes en donde el bosque fuera monoespecífico (3900 y 3750 m snm), en cada una se establecieron cuatro cuadros de 40 x 40 m. en cada cuadro se recolectaron esporomas de HECM semanalmente durante el 2018. Los esporomas fueron caracterizados, herborizados e identificados taxonómicamente. Además, se evaluó la estructura y sanidad del bosque, las características ambientales y edáficas. Para el análisis multivariado se ejecutó un Constrained Análisis of Principal Component (CPCA) en el programa de R studio. Se recolectaron 2197 esporomas de HECM correspondientes a 16 géneros y 72 morfoespecies. Los géneros más abundantes fueron *Russula*, *Lactarius* y *Cortinarius*. La productividad de los esporomas se presentó a los 3900 m snm por los géneros *Cortinarius*, *Russula* y *Lactarius* y a los 3750 m snm por *Xerocomellus*, *Cyanoboletus* y *Russula*. La fenología de los esporomas se presentó de junio a diciembre. Las variables variaron entre altitud, sin embargo, el análisis CPCA indicó las variables que influyen en la presencia de las morfoespecies reportadas. Los resultados de este trabajo indican que la diversidad de esporomas de HECM está relacionada con la humedad ambiental, densidad del arbolado, área basal, el grado infestación por muérdago en los hospederos, el pH, el porcentaje de carbono orgánico, porosidad y arena.

Palabras clave: diversidad, esporomas, hongos ectomicorrizógenos, *Pinus hartwegii*.

## Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Bosques de Pino.....	1
1.2 Generalidades de los hongos.....	2
1.3 Reproducción de los hongos.....	2
1.4 Función ecológica de los hongos en los ecosistemas.....	4
1.5 Hongos ectomicorrizógenos.....	4
2. Antecedentes.....	7
2.1 Factores ecológicos que influyen en la reproducción de esporomas.....	7
2.2 Estudios ecológicos de hongos ectomicorrizógenos.....	8
2.3 Estudios ecológicos de hongos ectomicorrizógenos en bosques de <i>Pinus hartwegii</i> .....	10
2.4 Estudios micológicos en el Parque Nacional La Malinche.....	12
3. Justificación.....	13
4. Pregunta de investigación.....	14
5. Objetivos.....	14
5.1 General:.....	14
5.2 Específicos:.....	14
6. Metodología.....	15
6.1 Descripción del área de estudio.....	15
6.2 Delimitación del área de estudio.....	16
6.3 Muestreo de esporomas.....	17
6.3.1 Identificación de esporomas.....	18
6.4 Evaluación de la estructura y sanidad del arbolado.....	18
6.5 Evaluación de variables ambientales.....	20
6.6 Evaluación de las variables edáficas.....	20
6.7 Análisis de datos.....	25
6.7.1 Diversidad alfa de HECM.....	25
6.7.2 Diversidad verdadera de HECM.....	27
6.7.3 Diversidad beta de HECM.....	27
6.7.4 Curvas de acumulación de especies de HECM.....	28

6.7.5 Análisis multivariado.....	28
7. Resultados .....	29
7.1 Hongos .....	29
7.2 Curvas de acumulación .....	29
7.3 Fenología de los géneros de HECM .....	32
7.4 Productividad de peso fresco .....	34
7.5 Diversidad alfa de HECM .....	36
7.6 Diversidad beta de HECM.....	37
7.7 Estructura del bosque .....	37
7.8 Variables ambientales.....	38
7.9 Variables edáficas .....	40
7.10 Análisis multivariado .....	41
8. Discusión.....	47
9. Conclusiones .....	53
10. Perspectivas.....	55
11. Referencias.....	56
12. Anexos .....	70

## Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de reproducción de los hongos (ilustración de Dave Carlson). .....	3
Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Nacional La Malinche. ....	15
Figura 3. Diseño de los cuadros para el muestreo de las variables ecológicas en dos altitudes del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en la ladera Norte del PNLN. ....	16
Figura 4. Ubicación de los cuadros de estudio en la ladera Norte del PNLN en el bosque de <i>Pinus hartwegii</i> . ....	16
Figura 5. Diseño de la división del cuadro de 40 x 40 m usada para la recolección de esporomas de HECM. ....	17
Figura 6. Esquema de la división de <i>Pinus hartwegii</i> para la evaluar de la infestación de <i>Arceuthobium globosum</i> . ....	20
Figura 7. Diagrama triangular de textura del suelo en porcentaje. ....	24
Figura 8. Curvas de acumulación de morfoespecies de HECM para cada altitud de estudio del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> del PNLN [ A) 3900 y B) 3750 m snm]. ....	33
Figura 9. Fenología de la producción de morfoespecies de HECM con relación al promedio mensual de la temperatura y la humedad a los 3900 m snm. 2.A) relación de temperatura media y riqueza de morfoespecies de HECM, 2.B) relación de temperatura media y abundancia de morfoespecies de HECM, 2.C) relación de la humedad media y riqueza de morfoespecies de HECM y 2.D) relación de la humedad media y la abundancia de morfoespecies de HECM. ....	34
Figura 10. Fenología de la producción de morfoespecies de HECM con relación al promedio mensual de la temperatura y la humedad a los 3750 m snm. 3.A) relación de temperatura media y riqueza de morfoespecies de HECM, 3.B) relación de temperatura media y abundancia de morfoespecies de HECM, 3.C) relación de la humedad media y riqueza de morfoespecies de HECM y 3.D) relación de la humedad media y la abundancia de morfoespecies de HECM. ....	34
Figura 11. Productividad de biomasa en fresco de HECM asociados al bosque de <i>Pinus hartwegii</i> en dos altitudes del PNLN. ....	35
Figura 12. Productividad de biomasa en peso fresco por géneros de HECM presente a en los 3900 m snm en la ladera Norte del PNLN. ....	35
Figura 13. Productividad de biomasa en peso fresco por géneros de HECM presente a en los 3750 m snm en la ladera Norte del PNLN. ....	36
Figura 14. Temperatura ambiental de dos altitudes (3900 y 3750 m snm) de la población de <i>Pinus hartwegii</i> en la ladera Norte del PNLN. ....	39
Figura 15. Humedad ambiental de dos altitudes (3900 y 3750 m snm) de la población de <i>Pinus hartwegii</i> en la ladera Norte del PNLN. ....	40
Figura 16. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables estructurales del bosque y las morfoespecies de HECM. DenT = densidad	

total, AB= área basal, Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.....	43
Figura 17. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables de sanidad del bosque y las morfoespecies de HECM. Sin infes. = sin infestación, I. leve= infestación leve y I. severa = infestación severa. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm. ....	44
Figura 18. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables ambientales y las morfoespecies de HECM. %TA= porcentaje de temperatura ambiental y %Hr = porcentaje de humedad relativa. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm. ....	45
Figura 19. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables edafológicas y las morfoespecies de HECM. %A= porcentaje de arena, %Ar = porcentaje de arcilla, %P = porcentaje de porosidad, %CO = porcentaje de carbono orgánico y Da =densidad aparente. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.....	46

## Índice de tablas

Tabla 1. Representación de familias y géneros de HECM (Tomado de Rinaldi y cols. 2008). .....	5
Tabla 2. Clasificación de pH del suelo .....	21
Tabla 3. Clasificación de la densidad aparente de suelos por el método de probeta. ....	22
Tabla 4. Clasificación de porcentaje de Materia orgánica.....	23
Tabla 5. Lista de las morfoespecies de HECM y abundancia por altitud, recolectados en el bosque de <i>Pinus hartwegii</i> de la ladera Norte del PNLN, en el periodo de junio - diciembre de 2018. ....	30
Tabla 6. Riqueza observada y estimada de morfoespecies de HECM y nivel de eficiencia de muestreo. ....	33
Tabla 7. Comparación de la diversidad y riqueza de morfoespecies de HECM entre dos altitudes de la población de <i>Pinus hartwegii</i> de la ladera Norte del PNLN. ....	37
Tabla 8. Comparación por altitud mediante la t de Hutchenson para las morfoespecies de HECM. ....	37
Tabla 9. Escala de clasificación para índices de similitud, propuesta por Ramírez-González (2006). ....	37
Tabla 10. Caracterización de los parámetros estructurales y sanidad del bosque de <i>Pinus</i> <i>hartwegii</i> en dos pisos altitudinales de la ladera Norte del PNLN. ....	38
Tabla 11. Parámetros edafológicos de dos pisos altitudinales del bosque de <i>Pinus hartwegii</i> de la ladera Norte del PNLN. ....	41
Tabla 12 Correlación de las variables micológicas entre las variables ambientales, estructurales y edafológicas. ....	42

## 1. Introducción

### 1.1 Bosques de Pino

El territorio mexicano se describe como un centro secundario de la diversificación del género *Pinus*, cuenta con 49 (40 % son endémicas) de las 120 especies registradas a nivel (Perry 1991, Segura 1997, Gernandt y Pérez-de la Rosa 2014). Este grupo taxonómico es muy complejo por la gran cantidad de variedades y subespecies que presenta. Los pinos se encuentran distribuidos entre los 1500 y 3000 m snm, sin embargo, hay especies que pueden establecerse más allá de estos rangos altitudinales, tal es el caso de *Pinus hartwegii* que constituye el límite superior arbóreo de las zonas montañosas (Sánchez 2008).

Los bosques de pinos tienen una gran importancia ecológica, económica y social, debido a que influyen en procesos funcionales básicos para el mantenimiento del ecosistema como los ciclos biogeoquímicos y de nutrientes (Vázquez 2010), son hábitat y fuente de alimento para otros organismos silvestres. Tienen un alto valor económico, al ser fuente de madera, resinas, pulpa, semillas comestibles entre otros (García y González 2003, Sánchez 2008). Por otra parte, proveen a los humanos de servicios ecosistémicos vitales como el agua, constituyen el escenario de áreas recreativas, espirituales y de educación ambiental (Flores y Gerez 2004).

Para que los ecosistemas permanezcan a través del tiempo es necesario el establecimiento de una compleja red de interacciones dinámicas entre diversos organismos como plantas, bacterias, insectos, hongos entre otros que como resultado pueden tener efectos positivos o negativos pudiendo cambiar a través del tiempo y espacio (Ek del y Boege 2012). Una de las interacciones positivas más común e importante desde el punto de vista funcional son las micorrizas. Se estima que en el mundo el 95 % de las plantas establecen algún tipo de micorriza en condiciones naturales (Honrubia y cols. 1992). El beneficio funcional de esta interacción es incrementar la captación de recursos, por ejemplo, de agua y nutrientes del suelo.

## 1.2 Generalidades de los hongos

Los hongos son organismos eucarióticos, heterótrofos y su alimentación es por absorción. Su cuerpo consiste en células alargadas compuestas de quitina (polisacárido) que al unirse con otras células forman filamentos ramificados denominados hifas. Éstas en conjunto se entrecruzan y ramifican formando una masa fina a lo que se denomina micelio. Sin embargo, no todos los hongos cumplen con las características antes mencionadas, como tal es el caso de las levaduras (Ruiz 2001, Deacon 2010).

Los hongos tienen una amplia distribución debido a que en diversos ecosistemas se generan microhábitats que integran las condiciones apropiadas principalmente de humedad y temperatura necesarias para que los hongos puedan desarrollarse. Asimismo, sus esporas se caracterizan por ser de fácil distribución además de que se presentan en enormes cantidades pudiendo presentar largos periodos de latencia sobreviviendo hasta que se presenten las condiciones óptimas para seguir con su ciclo de vida (Herrera 2000). De acuerdo con Hawksworth (2001) se estima que hay 1.5 millones especies de hongos a nivel mundial, de las cuales se han descrito alrededor de 70000 a 120000 (Webster y Wewer 2007). Para México, Sarukhán y cols. (2009) estiman que hay alrededor de 12000 especies de hongos, en contraste con esta cifra, Guzmán (1998) estimó una diversidad de 200000 especies fúngicas para el país. Sin embargo, para el país se han citado aproximadamente 2000 micromicetos y 4000 macromicetos, en estos últimos se incluyen a los líquenes y los mixomicetos (Pardavé y cols. 2007).

## 1.3 Reproducción de los hongos

La reproducción es la generación de nuevos individuos, los hongos tienen dos tipos de reproducción: la asexual y la sexual. La primera, evita la unión de núcleos de las células sexuales, por lo tanto, los nuevos organismos son genéticamente idénticos a sus progenitores, este tipo de reproducción se puede realizar mediante esporas, por gemación y por fragmentación. (Cepero y cols. 2012). La reproducción sexual, se caracteriza por la fusión de dos núcleos diferenciados (Alexopoulos y Minm 1985, Guillén y cols. 2004). La reproducción de los hongos ocurre en los primeros centímetros del suelo y su actividad

disminuye al aumentar la profundidad, muchos hongos pueden llevar a cabo ambos tipos de reproducción.

La reproducción asexual es importante para la propagación de la especie porque, permite la producción de numerosos individuos y se repite varias veces al año y esto representa, una ventaja respecto a la reproducción sexual que ocurre solo una vez al año, aunque algunas especies llegan a reproducirse cada diez años (Lodge y cols. 2004). La reproducción sexual consta de tres fases, la primera se denomina plasmogamia y consiste en enclaustrar dos núcleos haploides en una célula. La segunda fase es la cariogamia, que es la formación de un núcleo diploide y la tercera es la meiosis, que reduce el número de cromosomas de los núcleos a un estado haploide (Alexopoulos y Mims 1985).

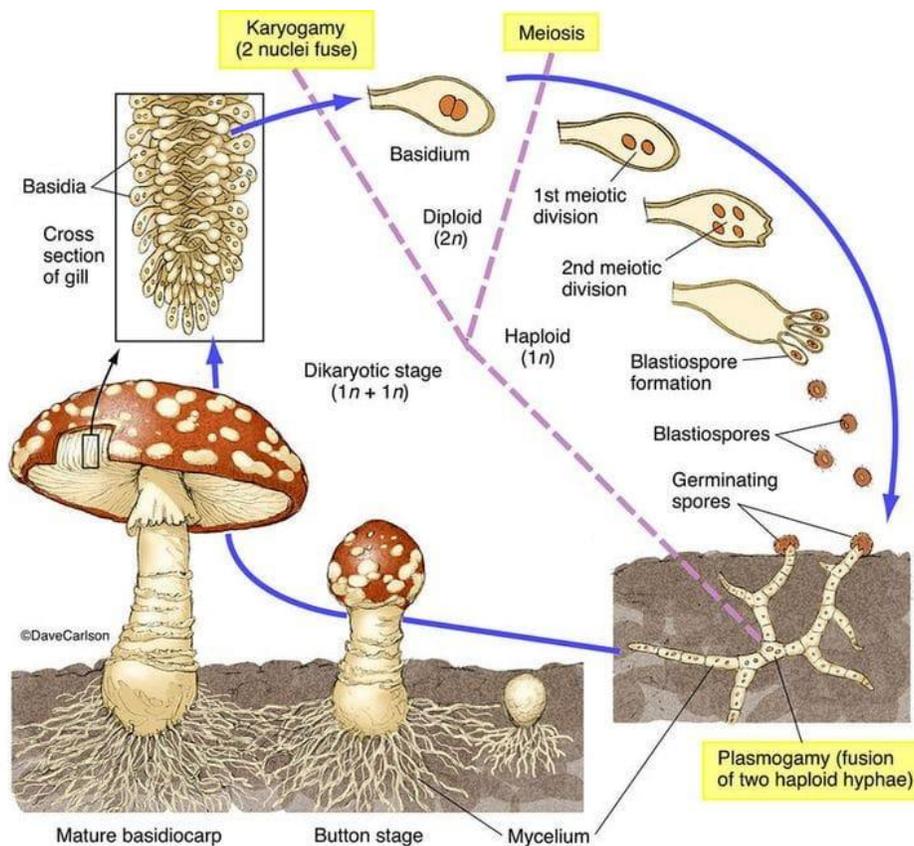


Figura 1. Ciclo de reproducción de los hongos (ilustración de Dave Carlson).

## 1.4 Función ecológica de los hongos en los ecosistemas

En cuanto a su función ecológica, se ha demostrado que los hongos desempeñan un papel esencial para el funcionamiento de los ecosistemas (Trappe y Luoma 1992), relacionado principalmente con el reciclaje de la materia orgánica. En cuanto a esto, los hongos se dividen de acuerdo con sus características tróficas en saprobios, parásitos y mutualistas (Arnolds 1988, Martínez 2008, Montoya y cols. 2010).

Los hongos saprobios son aquellos cuya nutrición es proporcionada por la descomposición de la materia orgánica, durante este proceso se genera la liberación de algunos minerales al ecosistema (Martínez 2008). Los hongos parásitos son los que viven a expensas de otros organismos, existen dos clasificaciones los necróticos y biotróficos. La primera se refiere cuando el hongo daña el sistema de transporte de nutrientes y agua de su hospedero ocasionándole la muerte y el segundo invierte el sistema de transporte para que el hongo reciba los nutrientes necesarios, en este caso el hospedero no muere, pero sus procesos vitales son afectados (Guillén y cols. 2004). Finalmente, en los hongos mutualistas se encuentran los liquenizados y los micorrízicos, los primeros son los hongos que forman una asociación con un alga verde y/o cianobacteria. Los hongos micorrízicos son aquellos que establecen una relación mutualista con las plantas, formando las micorrizas, término propuesto por Frank (1885), para definir la asociación simbiótica mutualista entre las raíces de una planta y las hifas de un hongo. De acuerdo con Peterson y cols. (2004) y Smith y Read (2008) las micorrizas se clasifican en siete tipos 1) ectomicorrizas, 2) endomicorrizas, 3) orquidoides o micorrizas de oville, 4) ericoides, 5) ectendomicorrizas, 6) arbutoides y 7) monotropoides, cada tipo involucra a diferentes grupos de hongos y de plantas hospederas, así como el desarrollo de diferentes estructuras morfológicas (Ágreda y cols. 2010).

## 1.5 Hongos ectomicorrizógenos

Los hongos ectomicorrizógenos (HECM) son simbioses mutualistas, que abundan en suelos de ecosistemas boreales, templados y tropicales formando una asociación con plantas de una o varias especies denominada ectomicorriza (Garza-Ocaña y cols. 2002). En este tipo de micorriza participan cerca de 6000 especies de plantas y entre 20000 a 25000 especies de HECM (Tabla 1) (Brundrett 2002, Rinaldi y cols. 2008, Comandini y cols. 2012) que

pertenecen principalmente a los grupos Basidiomycota y Ascomycota (Pérez-Moreno y Read 2004).

Este tipo de asociación se caracteriza por presentar las siguientes estructuras: manto fúngico, red de Hartig y el micelio externo vegetativo. El manto fúngico cubre las raíces cortas del sistema radical de las plantas, actuando como barrera ante patógenos y de almacenamiento de nutrientes (Lakhanpal 2000). La red de Hartig es el sistema intercelular desarrollado por la penetración de las hifas a los espacios intersticiales de las células corticales de la raíz, en este sistema se realiza el intercambio de nutrientes entre el hongo y la planta (Lakhanpal 2000). El micelio externo vegetativo es una extensión de hifas del manto fúngico, que se desplaza hacia al componente edáfico y vegetal de los ecosistemas. Este micelio tiene la capacidad de absorber y transportar nutrientes del suelo al hospedero, de interactuar con dos o más hospederos ya sea de la misma o diferente especie (Pérez-Moreno y Read 2000), asimismo, interviene en la mineralización del suelo por la segregación de ácidos orgánicos (Domínguez y cols. 2004). Además, a través del micelio externo se llegan a formar cuerpos fructíferos, denominados como carpóforos o esporomas. Algunos hongos se desarrollan en la superficie del suelo (epigeos) con esporomas conspicuos (*Amanita*, *Boletus*, *Pisolithus* entre otros) o son resupinados (*Hydnellum*, *Thelephora*, *Tomentella* entre otros), también hay esporomas que se desarrollan en el subsuelo (hipogeos) y que son menos visibles (*Rhizopogon*, *Tuber*, *Elaphomyces* entre otros).

Tabla 1. Representación de familias y géneros de HECM (Tomado de Rinaldi y cols. 2008).

CLASE	ORDEN	FAMILIA	GÉNERO
Ascomycetes	Elaphomycetales	Elaphomycetaceae	<i>Elaphomyces</i>
		Helvellaceae	<i>Helvella</i>
	Pezizales	Otideaceae	<i>Genea</i>
		Pezizaceae	<i>Peziza</i>
		Tuberaceae	<i>Tuber</i>
Basidiomycetes	Agaricales	Amanitaceae	<i>Amanita</i>
		Entolomataceae	<i>Entoloma</i>
		Hygrophoraceae	<i>Hygrophorus</i>
	Boletales	Tricholomataceae	<i>Tricholoma</i>
		Boletaceae	<i>Boletus</i>

		<i>Leccinum</i>
		<i>Pulveroboletus</i>
		<i>Suillus</i>
	Cantharellaceae	<i>Cantharellus</i>
Cantharellales	Clavulinaceae	<i>Clavulina</i>
	Craterellaceae	<i>Craterellus</i>
	Hydnaceae	<i>Hydnum</i>
		<i>Cortinarius</i>
Cortinariales	Cortinariaceae	<i>Hebeloma</i>
		<i>Inocybe</i>
		<i>Rozites</i>
Gomphales	Ramariaceae	<i>Ramaria</i>
Melanogastrales	Melanogastraceae	<i>Melanogaster</i>
	Elasmomycetaceae	<i>Gymnomyces</i>
Russulales	Russulaceae	<i>Lactarius</i>
		<i>Russula</i>
Thelephorales	Thelephoraceae	<i>Hydnellum</i>
		<i>Thelephora</i>

---

Aunado al papel ecológico de los HECM en los árboles, éstos también participan en actividades fisiológicas, mediadoras e integradoras que contribuyen a la salud y crecimiento de los bosques. Entre los beneficios que proporciona la ectomicorriza son que el hongo beneficia a la planta en adquisición de agua y nutrimentos principalmente nitrógeno y fosforo, así como micronutrientes, brinda protección a las raíces contra patógenos del suelo y forma una amplia interconexión entre los árboles (Sánchez-Colín 2005, Odum y Banett 2006). Por su parte la planta le provee al hongo de carbohidratos, ya que de manera independiente el hongo no es capaz de sintetizarlos (Leake y cols. 2004).

## 2. Antecedentes

### 2.1 Factores ecológicos que influyen en la reproducción de esporomas

Para que se lleve el proceso de la asociación ectomicorrízica algunos factores bióticos o abióticos participan ya sea de manera directa o indirecta. Entre los factores biológicos podemos encontrar la comunidad microbiana, el propio hospedero, la estructura arbórea, arbustiva y herbácea, y factores abióticos como precipitación, humedad, insolación, el suelo y la fisiografía (Smith y cols. 2002, Kernaghan y cols. 2003).

Algunos autores reportan las condiciones de algunas variables que influyen en la fructificación de HECM, sin embargo, dichas variables no son homogéneas para todos los ecosistemas. Para bosques templados reportan algunos rangos óptimos en los factores ambientales que son necesarios para que el ciclo de vida de los hongos ocurra hasta la formación de esporomas. Por ejemplo, se ha reportado que el intervalo de temperatura oscila entre 25 a 35 °C, la humedad relativa deber ser mayor al 70 %, el pH debe estar entre 5.5 a 6.5 (Pazos 2007). Respecto a la altitud, se ha reportado que a mayor altitud menor diversidad fúngica (Rojo 1994, Ramos-Fernández y cols. 2015). Se sabe que la diversidad y abundancia de los hongos es sensible a la calidad del suelo (Richard y cols. 2004), a la edad y composición del bosque, (Trudell y Edmonds 2004, Jumpponen y Egerton-Warburton 2005), el clima y la fisiografía (Dighton y Mason 1985, Smith y cols. 2002).

Actualmente, el sistema climático mundial se ha modificado por el aumento de los niveles de gases de efecto invernadero (WMO 2006), como consecuencia de esto hay una enorme variación climática en la que se presentan alteraciones en las estaciones del año lo cual repercute la vida de diversos organismos. Los efectos que se han reportado de manera general en los hongos son el retraso de la producción de esporomas, modificaciones en su fenología y en la composición de la comunidad fúngica (Kausserud y cols. 2008, Moreno y cols. 2015), esto principalmente por eventos de estrés hídrico, aumento de temperatura, entre otros.

## 2.2 Estudios ecológicos de hongos ectomicorrizógenos

Dentro de los trabajos que reportan la diversidad de HECM *in situ* encontramos el de Salerni y cols. (2002), ellos correlacionaron el efecto de la precipitación y la temperatura sobre la fructificación de esporomas en bosques de *Quercus* en Italia. Reportaron que la precipitación es el factor que tiene mayor significancia en la producción de esporomas, además de presentar una correlación entre las precipitaciones de primavera y la riqueza de los esporomas que se desarrollan en otoño, respecto a la temperatura no se encontró ninguna correlación, misma conclusión fue reportada para los bosques de hayas de Dinamarca (Lange 1978).

Por otro lado, Durall y cols. (2006) evaluaron los efectos la edad y la composición de la estructura forestal sobre la abundancia, diversidad y composición de las comunidades de HECM epigeos en la zona biogeoclimática de British Columbia, Canadá. En dicho estudio se realizaron muestreos durante tres años, en transectos con diferente composición y estructura del arbolado (jóvenes de cinco años y maduros de 75 a 125 años). El análisis de datos mostró que la abundancia de los esporomas varía entre los años de muestreo y aumentó con la precipitación anual. Dentro de la estructura arbórea, la edad del bosque tuvo un efecto sobre la abundancia y composición de los HECM, donde se reportó que la mayor abundancia de HECM se obtuvo para las zonas de bosque maduro. Así se concluyó que la composición de las especies forestales generó cambios en la composición de la comunidad fúngica. En el trabajo de Villarruel y Cifuentes (2007) se refuerza la conclusión antes mencionada. Dichos autores establecieron un transecto altitudinal abarcando tres tipos de bosque (dos monoespecíficos y un mixto) en la Cuenca del Río Magdalena, México. A través de un análisis de similitud reportaron que los tres tipos de bosque presentan índices muy bajos de especies fúngicas, lo que indica que cada tipo de bosque tiene una comunidad de hongos particular.

Por otra parte, Gómez-Hernández y Williamns-Linera (2011), realizaron un estudio donde evalúan la relación de los macromicetos con las características estructurales de la vegetación y condiciones climáticas de un bosque nublado de montaña en Veracruz, México. Se establecieron cuatro zonas de estudio distribuidas en dos altitudes (altitud de mayor altura (1790 y 1900 m snm) y altitud de menor altura (1240 y 1440 m snm). El muestro consistió

en un año, colectando en los meses de mayor precipitación. Los autores reportaron que la diversidad de los macromicetos decreció conforme la altitud, de la misma forma este patrón se presentó para las plantas leñosas. La riqueza que los macromicetos tuvo una relación positiva con la altitud, la humedad del aire y del suelo. Los autores concluyeron que dependiendo del tipo de vegetación podría haber una variación en cuanto a las condiciones ambientales que promueven la producción de esporomas. Por su parte, Gómez-Reyes y cols. (2011) evaluaron el efecto de algunas variables ambientales de un bosque de pino-encino en el Parque Nacional Barraca del Cupatitzio, Michoacán, sobre la producción de biomasa fresca en esporomas de HECM. Se registraron un total de 50 especies de HECM con una biomasa general de 12691.3 g, las especies con mayor aporte de biomasa fueron *Amanita caesarea*, *A. virora*, *Russula foetens*, *R. brevipes*, *Laccaria laccata*, *Austroboletus gracilis*, y *Suillus granulatus*. Reportaron que la producción de biomasa estuvo relacionada con la edad del arbolado, estructura de herbáceas y arbustos. Así como la asociación de géneros *Amanita*, *Boletus* y *Lactarius* con bosques maduros y para bosque joven se encuentran *Laccaria* y *Suillus*. Sin embargo, para un bosque de oyamel en el Parque Nacional Cofre de Perote Veracruz, se reportan que las variables ambientales que influyen para la producción de esporomas son la temperatura, la precipitación, la humedad, así como la estructura del bosque (Burrola-Aguilar 2013). En cuanto a la distribución altitudinal de los HECM, Ramos-Fernández y cols. (2015) estudiaron el efecto de los hongos a través de un gradiente altitudinal y térmico de un bosque de oyamel en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. En dicho estudio se establecieron cinco altitudes en un rango altitudinal de 2800 a 3500 m snm, los esporomas fueron recolectados en dos temporadas de lluvias, enfocadas en los meses de mayor precipitación (septiembre-octubre). Dichos autores reportaron 62 especies de HECM, de las cuales más de 50 % solo estuvieron presentes en uno de los sitios de muestreo, los autores proponen a estas especies como indicadoras a la susceptibilidad del cambio climático. También encuentran que la riqueza de especies de HECM es inversa respecto a la altitud, lo que indica que a mayor altitud hay una menor la riqueza de especies.

Los estudios respecto a la productividad de hongos es un estimador que permite conocer la ecología de éstos, principalmente se utilizan para evaluar la biomasa en fresco de hongos comestibles. En este contexto, Bonet-Lledós (1996) estudió la productividad de HECM y comestibles en siete clases de edad en un bosque de *Pinus sylvestris* en España (cada clase

tiene un intervalo de nueve años, la primera clase es considerada a los 5 años). Se registraron un total de 3079 esporomas, agrupados en 92 taxones. La biomasa media de los esporomas fue de 105 kg/ha. La mayor biomasa fue registrada en los intervalos de 25-54 y 75-84 años. Por lo cual, el autor concluyó que tanto la producción y la diversidad aumenta respecto a la edad del bosque. Para el centro del territorio mexicano Zamora-Martínez (1993), realizó una correlación de la producción de hongos comestibles con diversas características ambientales, edáficas y dasométricas. La evaluación se llevó a cabo en plantaciones de árboles de navidad (Topilejo, D.F) y en un bosque de *Pinus montezumae* y de *Abies religiosa* (San Juan Tetla, Puebla). Se registraron 29, 35 y 47 especies de hongos comestibles y una productividad de 65.52, 17.375 y 85.237 kg/ha para la plantación comercial, el pinar y oyamel, respectivamente. Las diferencias que se presentan en la riqueza y productividad de los hongos se debieron a las características ecológicas de cada sitio, se concluyó que la mayor producción estuvo fuertemente relacionada con suelos ricos en materia orgánica y porcentajes altos de humedad.

También se han hecho evaluaciones de la diversidad de HECM *ex situ* evaluando diversas condiciones ambientales. Gómez y cols. (2002), reportaron que la aplicación del riego antes de la temporada de lluvia adelanta la emergencia de esporomas de la especie *Tricholoma magnivelare* de 6 a 10 días. Perea-Estrada y cols. (2009), evaluaron el porcentaje humedad en el crecimiento de plántulas de *Pinus patula* y de *P. hartwegii*, inoculadas con *Hebeloma sp.*, *Lacaria sp.* y *Clavulina aff. cinnera*. Dichos autores reportaron que las plántulas inoculadas con *Hebeloma sp.* y con un grado de humedad del 80-100 %, tuvieron un mejor desarrollo en cuanto a la altura y el diámetro del tallo.

### 2.3 Estudios ecológicos de hongos ectomicorrizógenos en bosques de *Pinus hartwegii*

Los estudios que se han realizado de HECM en bosque de *P. hartwegii* son muy escasos. Perea-Estrada (2009) realizó la caracterización de las raíces micorrizadas para el bosque que se encuentra en el Parque Recreativo y Cultural del Desierto de los Leones y el Parque Nacional Zoquiapan. Dicho autor reportó 52 morfotipos de HECM, donde las especies más

representativas fueron *Cadophora finlandica* y *Cenococum geophilum*. Para la Cuenca del Río Magdalena, Cd. de México, Villaruel y Cifuentes (2007) reportan un listado de 10 de especies de HECM con la identificación de esporomas (*Amanita flavoconia*, *A. gpo. Caesarea*, *A. gpo. Rubescens*, *A. gpo. vaginata*, *A. gpo. muscaria*, *Boletus edulis*, *Cantharellus gpo. Cibarius*, *Russula aff. rosacea*, *R. brevipes* y *Tylopilus pseudoscaber*). Posteriormente, Meza-Ramírez (2010) registró un total de 27 especies asociadas a este tipo de vegetación de las cuales dos ya se habían reportado (*Amanita calyptratoidea*, *A. cineroconia*, *A. tuza*, *Boletus erythropus*, *B. pinophilus*, *Gomphus floccosus*, *Inocybe geophylla* var. *geophylla*, *I. maculata*, *I. umbrina*, *Laccaria laccata*, *Tricholoma ecuestre*, *Porphyrellus porphyrodporus*, *Suillus brevipes*, *Coltricia perennis*, *Lactarius alnicola*, *L. deliciosus*, *L. luculentus*, *Russula abietina*, *R. accidentalis*, *R. puellaris*, *R. olivácea*, *R. robinsoniae*, *R. xeramphelina*). Para el bosque del Cofre de Perote, Veracruz, se realizó la identificación de las raíces micorrizadas a través del análisis molecular. Se identificaron un total de 14 especies, donde el mayor número de especies fue para el género *Cortinarius*, además de reportar a los géneros *Byssocorticium* y *Pseudotomentella* como nuevos registros para la zona (Baeza-Guzmán y cols. 2017).

Un trabajo más integrativo es el de Arteaga y Moreno (2006) quienes evaluaron la producción de hongos comestibles en el bosque de *P. hartwegii* y *Abies religiosa* con relación a las diferentes características ecológicas en Santa Catarina del Monte en el Estado de México. Los resultados muestran que la producción mensual de los hongos se relacionó positivamente con la temperatura, la precipitación, la edad y el diámetro a la altura del pecho del arbolado. Se registraron 24 especies de hongos, de las cuales tres fueron exclusivas para *P. hartwegii* (*Rodophyllus clypeatus*, *Lyophilum decastes* y *Boletus edulis*) y 12 fueron especies compartidas. La biomasa total estimada para el bosque de pino es de 107.3 kg/ha<sup>-1</sup>, dicho valor corresponde a la abundancia de cada una de las especies.

Asimismo, son pocos los estudios donde se han registrado los beneficios que obtienen las plántulas de *P. hartwegii* a través de la inoculación en vivero con algunas especies de hongos micorrizógenos. Flores-Rentería (2010) evaluó la fisiología de plántulas inoculadas con *Inocybe splendens* y *Suillus brevipes*. Por otra parte, Sandoval (2010) reportó el crecimiento

y supervivencia de plántulas con las especies de hongos ya antes mencionados; ambos trabajos concluyen que *P. hartwegii* se desarrolla mejor cuando la plántula es inoculada.

## 2.4 Estudios micológicos en el Parque Nacional La Malinche

El Parque Nacional La Malinche (PNLM) es considerada como una de las zonas prioritarias para su conservación dentro del estado de Tlaxcala, por lo que se han realizado diversos estudios sobre la ecología de varios grupos de organismos. Sin embargo, la micobiota de la entidad ha sido poco estudiada, especialistas han realizado aportaciones en la determinación taxonómica de diversos hongos (Estrada-Torres y cols. 1991) así como en la etnomicología (Zamora-Martínez y cols. 2000, Montoya 2005).

En la cañada Grande del PNLM, Hernández (1998) evaluó la productividad de 35 especies de hongos comestibles en dos tipos de vegetación (*Pinus* y *Abies*). Para el bosque de *Pinus* se observaron 22 especies, con una diversidad de ( $H'$ ) 2.679 y productividad de 55.504 kg/ha/año; para el bosque de *Abies* se obtuvo una riqueza de 28 especies, con una diversidad de ( $H'$ ) 3.033 y una productividad de 181.132 kg/ha/año. El autor concluye que la diversidad, abundancia y productividad de los hongos difieren entre vegetación. Posteriormente Zamora-Martínez y cols. (2000) evaluaron la productividad de los hongos comestibles y condiciones ecológicas-silvícolas. Se registraron 35 especies de hongos con una producción promedio de 13.757 kg/ha, las especies con mayor producción fueron *Boletus aff edulis*, *Russula alutacea* y *Suillus brevipes*). Para determinar la diversidad y fenología de los hongos silvestres que se desarrollan en el PNLM, Montoya (2005) estableció cuatro unidades de muestreo en dos laderas (suroeste y sureste) durante 1998-2000. Se registró un total de 61 especies, de las cuales 41 especies fueron agrupadas como micorrizógenos, 19 saprobios y una parásita. La ladera sureste fue la más productiva, con una biomasa fue de 2.84 kg/3200 m<sup>2</sup>/3 años, con ello propone que la productividad estuvo relacionada con la densidad arbórea, debido a que esta ladera presenta mejor estado de conservación.

Actualmente el conocimiento sobre la diversidad de hongos en el PNLM no abarca todos los tipos de vegetación. Particularmente para los bosques de *Pinus hartwegii* no hay información

de las especies de HECM que se pueden presentar y pudieran ser utilizadas en programas de reforestación. Debido a los escasos trabajos, surge la necesidad de conocer la ecología de los HECM para contribuir a su inventario local y regional, determinar las especies que potencialmente puedan ser inoculantes, así como conocer su fenología y que factores macroambientales son importantes para su desarrollo.

### 3. Justificación

La mayoría de los trabajos utilizan la descripción morfológica de los esporomas para evaluar la diversidad de hongos, aunque algunos autores señalan que este tipo de evaluación es deficiente al no analizar directamente la asociación micorrícica (Richard y cols. 2005, Smith y cols. 2007). Sin embargo, los esporomas son buenos indicadores para estimar la diversidad de los hongos y la productividad del suelo (Kranabetter y cols. 2005), además, se pueden identificar con mayor precisión, tener un respaldo del material, abarcar grandes áreas de estudio y señalar algunas características de distribución. Asimismo, hay trabajos donde se enfocan a la caracterización de las ectomicorizas o en análisis moleculares, pero sus costos son más elevados (Peay y cols. 2008, Baeza-Guzmán y cols. 2017), no obstante, los diferentes métodos de estudio de los HECM son complementarios.

Sin embargo, en la mayoría de los trabajos se ha omitido el reporte de las interacciones con las variables ecológicas que tienen los hongos (Kendrick 2000), las cuales son importantes conocer para que su desarrollo y reproducción se lleven de manera adecuada e identificar especies claves que pueden ayudar en la conservación del ecosistema. Actualmente el conocimiento de HECM en los bosques de *Pinus hartwegii* es escaso, por lo cual, se hace notar la necesidad de conocer la diversidad fúngica e incrementar el conocimiento sobre hongos de estos bosques, integrando variables ecológicas que nos puedan ayudar a entender su desarrollo.

#### 4. Pregunta de investigación

¿Qué condiciones macroambientales afectan la diversidad de HECM asociados al bosque de *P. hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche?

#### 5. Objetivos

##### 5.1 General:

- Evaluar si la diversidad y productividad de los hongos ectomicorrizógenos asociados al bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional La Malinche está determinada por la estructura física y fitosanitaria del arbolado, las variables ambientales y edafológicas.

##### 5.2 Específicos:

- Determinar la riqueza, abundancia, diversidad y productividad (variables micológicas) de hongos ectomicorrizógenos asociados al bosque de *P. hartwegii* en dos pisos altitudinales (3750 y 3900 m snm) en el PNLM.
- Evaluar el efecto de las variables ambientales (humedad relativa y temperatura ambiental) sobre las variables micológicas de la comunidad de HECM.
- Evaluar el efecto de la estructura del arbolado (densidad y área basal) sobre las variables micológicas de la comunidad de HECM.
- Determinar el efecto del grado de infestación por muérdago *Arceutrobium globosum* sobre las variables de la comunidad de HECM.
- Determinar si las variables edafológicas (densidad aparente, porosidad, pH, textura, carbono y materia orgánicos) están correlacionada con las variables micológicas de la comunidad de HECM.

## 6. Metodología

### 6.1 Descripción del área de estudio

El Parque Nacional La Malinche es una montaña decretada área natural protegida, en el Diario Oficial de la Federación el 6 de octubre de 1938, con la finalidad de conservar y proteger de los recursos naturales de la zona (CONANP 2013). La Malinche forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana y es considerado el quinto volcán más alto de la zona. Se localiza en los estados de Tlaxcala y Puebla, la posición geográfica está entre los 19°06'30'' y 19°20'19'' latitud Norte y 97°55'32'' y 98°09'55'' longitud Oeste (López-Domínguez y Acosta 2004). Comprende un rango altitudinal que va de los 2300 m snm a los 4461 m snm. El Parque cuenta con una superficie de 43939 ha de las cuales el 44.7 % corresponde a superficie arbolada (Rojas 2008) (Figura 2).

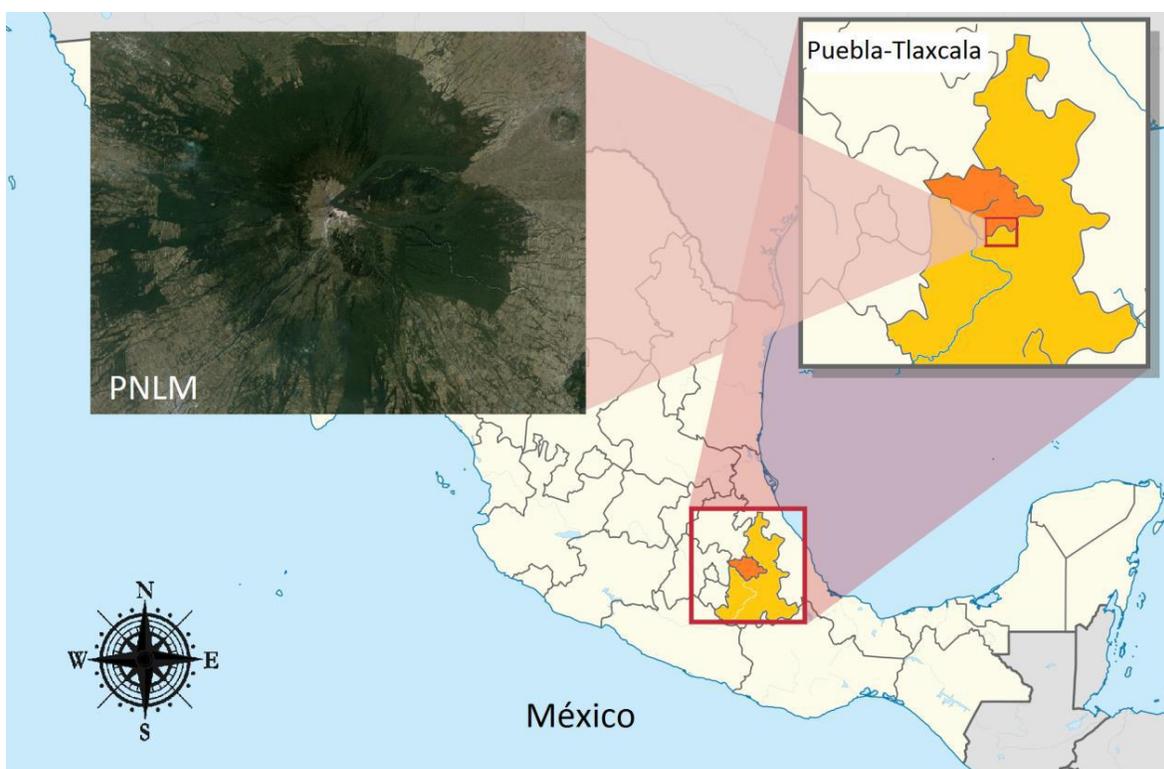


Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Nacional La Malinche.

## 6.2 Delimitación del área de estudio

En la ladera norte del PNLM se establecieron los sitios de muestreo comprendiendo dos altitudes (3900 y 3750 m snm). En cada altitud se delimitaron cuatro cuadros de 40 x 40 m (1600 m<sup>2</sup>), cubriendo un área total de 128000 m<sup>2</sup> de muestreo. Los cuadros fueron orientados al norte, con una composición arbórea monoespecífica de *Pinus hartwegii* y con una distancia mínima de 30 metros entre los cuadros (Figura 2 y 3).

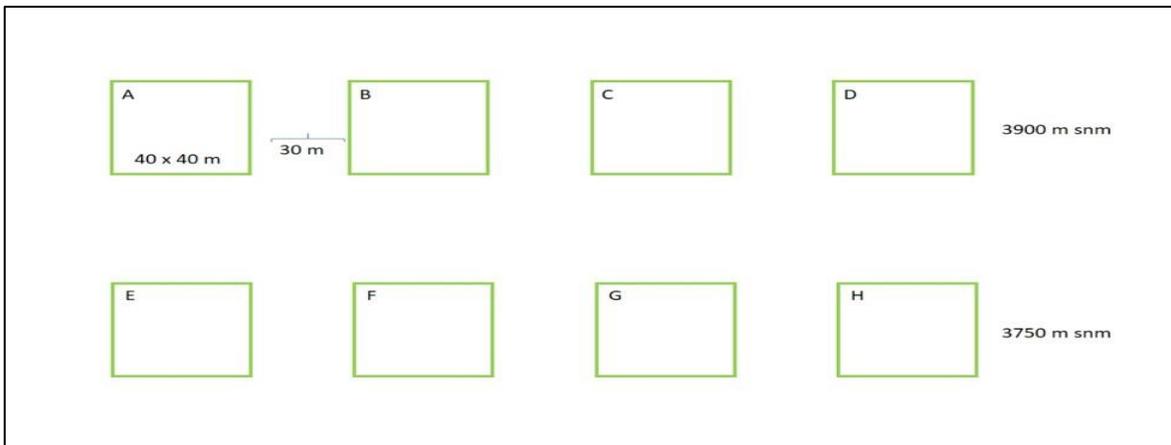


Figura 3. Diseño de los cuadros para el muestreo de las variables ecológicas en dos altitudes del bosque de *Pinus hartwegii* en la ladera Norte del PNLM.

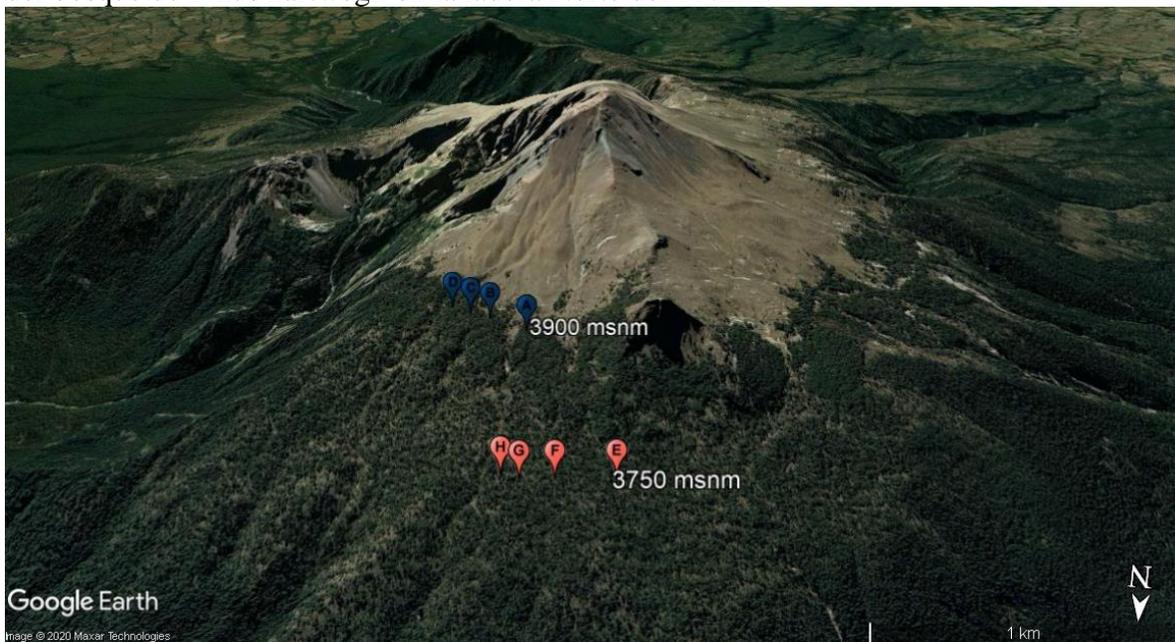


Figura 4. Ubicación de los cuadros de estudio en la ladera Norte del PNLM en el bosque de *Pinus hartwegii*.

### 6.3 Muestreo de esporomas

Para el muestreo de esporomas cada cuadro fue dividido en subcuadros de 10 x 10 m, esto con la finalidad de no sobreestimar la abundancia de algunas especies que tienen una distribución gregaria (Figura 4). Para la recolección, etiquetado y herborización de los HECM se usaron las técnicas descritas por Brundrett y cols. (1996). Los muestreos se realizaron de forma semanal, durante los meses de lluvia de junio hasta diciembre del 2018, para la extracción de los ejemplares se utilizó una pala de jardinería, posteriormente se colocaron en papel encerado para conservar sus condiciones físicas y se etiquetaron de acuerdo con su punto de extracción. Los ejemplares fueron transportados en canastas al Laboratorio de Interacciones Bióticas en el Centro en Investigación de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

A1	A2	A3	A4
10 x10 m			
			A8
			A12
			A16

Figura 5. Diseño de la división del cuadro de 40 x 40 m usada para la recolección de esporomas de HECM.

### 6.3.1 Identificación de esporomas

Después de cada recolecta se realizó la caracterización macroscópica, que considera información sobre la forma, textura, ornamentación, tamaño, olor y color de todas las estructuras del esporoma como estípites, laminas, volva, píleo (Munsell Color 1975, Delgado y cols. 2005; Franco-Molano y cols. 2005). A continuación, las muestras se procesaron para la herborización, que consistió en deshidratar todo el material biológico en una secadora con una temperatura aproximadamente de 60 °C, el tiempo de secado dependió del tamaño del esporoma (Vázquez-Mendoza 2002). Posteriormente las muestras se guardaron en bolsas de polietileno junto con su ficha de descripción y se almacenaron en un lugar fresco. Para la caracterización microscópica se utilizó los criterios de Largent y cols. (1997) y Singer (1986). Se realizaron diferentes cortes de las estructuras del esporoma y se observaron al microscopio (Axio Lab. A1), para ello se utilizaron diferentes reactivos (Hidroxido de potasio al 5 %, reactivo Melzer, rojo Congo, alcohol al 70 %), se tomaron datos del tamaño, forma, color, ornamentación etc., de las diferentes estructuras como esporas, basidios, cistidios, etcétera. Las características macro y microscópicas fueron utilizadas para la determinación taxonómica, basada en el concepto de morfoespecie, se utilizaron claves y trabajos de: Herrera y Guzmán 1972; Phillips 1981; Bandala y Montoya 1993; Kong y Estrada-Torres 1994; Tulloss 1994; Kong 1998; García y Garza 2001; Palanzón 2001; Brundrett 2002; Mueller y cols. 2004; Rinaldi y cols. 2008; Terdersoo y cols. 2010; así como páginas de internet como Index Fungorum (2019) <http://indexfungorum.org>. Los ejemplares se depositarán en el Herbario TLXM del Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

### 6.4 Evaluación de la estructura y sanidad del arbolado

En junio de 2018, dentro de cada cuadro de muestreo se realizó la medición de diferentes atributos a la población de *P. hartwegii*, con ello se obtuvo la estructura y composición arbórea. Los atributos que se consideraron fueron:

## Densidad y altura

La densidad se refiere al número de árboles que hay en determinada área. Además, a los árboles se les tomo la altura, utilizando un flexómetro para árboles pequeños y un clinómetro para árboles más altos (Haglof Vertex III). Con los datos obtenidos de las mediciones se realizó una clasificación por etapas de desarrollo de los individuos de *P. hartwegii*, que consiste en (1) plántulas: individuos menores a 30 cm de altura, (2) juveniles: individuos mayores a 30 cm menores de 130 cm y (3) adultos: individuos mayores a 130 cm (Santillán 1986).

## Diámetro a la altura del pecho (DAP)

Se registró el DAP a todos los individuos mayores a 130 cm de altura, utilizando una cinta diamétrica forestal. El DAP se transformó a área basal (AB) ( $\text{m}^2 \text{h}^{-1}$ ), la cual expresa el volumen de madera de un área determinada (Matteucci y Colma 1982). Para esto la utilizó la siguiente fórmula:

$$AB = \pi \frac{DAP^2}{4}$$

## Sanidad del bosque

Se evaluó el grado de infestación de *Arceuthobium globosum* a cada uno de los individuos de *P. hartwegii* presentes en cada cuadro. Se utilizó la metodología estandarizada de Hawksworth (1977), modificada en la evaluación final. La cual consistió en dividir verticalmente al árbol en tres partes iguales (Figura 5), posteriormente a cada sección se le asignó un valor dependiendo el grado de infestación, 0 corresponde a que no existe infestación visible, 1 corresponde a que hay una infestación leve (la mitad o menos del total de ramas están infestadas de la sección) y 2 corresponde a una infestación fuerte (más de la mitad del total de ramas están infestadas por sección). Después se sumaron todos los valores para obtener la categoría de sanidad, los rangos van de 0, 1-3, 4-6, que corresponden a un árbol sin riesgo, riesgo mínimo y alto riesgo respectivamente.

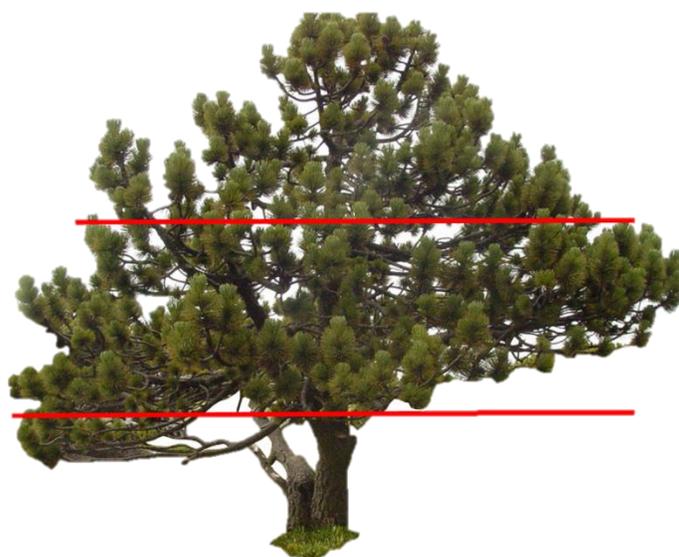


Figura 6. Esquema de la división de *Pinus hartwegii* para la evaluar de la infestación de *Arceuthobium globosum*.

### 6.5 Evaluación de variables ambientales

La evaluación de temperatura y humedad ambiental se consideró de abril 2018 a marzo 2019. Para el monitoreo de estas variables se colocó un sensor HOBO H8 (Onset Computer Corporation, Pocasset, MA) en cada cuadro de muestreo. Los HOBO´s fueron introducidos en cajas herméticas y colocadas en la parte media de los árboles para evitar daños antropogénicos y naturales. Los datos se analizaron para determinar promedios mensuales, máximos y mínimos de ambas variables.

### 6.6 Evaluación de las variables edáficas

Después de la época de lluvias en cada cuadro se realizó la extracción de cuatro bloques de suelo de aproximadamente 250 g (16 muestras por altitud). Las muestras de guardaron en bolsas de polietileno y se etiquetaron de acuerdo con el punto de extracción. Posteriormente

las muestras fueron secadas a temperatura ambiente sobre papel estraza, evitado la luz artificial y corrientes de aire. Cuando las muestras estuvieron secas se tamizaron con una malla #2 y a cada una se realizaron los indicadores edafológicos que posteriormente se describen de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000. Las pruebas de laboratorio se realizaron bajo el asesoramiento de la Dra. Elizabeth García Gallegos jefe del Laboratorio de Fertilidad del Suelos en el Centro de Investigaciones de Genética y Ambiente de La Universidad Autónoma de Tlaxcala.

### **pH del suelo**

Es aquella propiedad que establece el grado de acidez o de alcalinidad que el suelo presenta.

Se realizó a través del método AS-02: En un frasco de vidrio de 200 ml se agregaron 10 g de suelo y 20 ml de agua desionizada. Posteriormente, se agitó durante un minuto y se dejó reposar durante 10 min, este procedimiento se repitió dos veces. Después del tiempo transcurrido se hizo la lectura con un potenciómetro. Los resultados fueron interpretados con la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de pH del suelo

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

### **Densidad aparente**

Se define como el peso y organización al espacio ocupado por los poros que tiene el suelo en una unidad de volumen (Jaramillo 2002).

La densidad aparente fue determinada por el método de la probeta: En un capacillo de aluminio se pesaron 20 g de suelo, el cual, fue colocado en un horno de secado durante 24 h a 70 °C. Una vez transcurrido el tiempo, el suelo se colocó en una probeta de 100 ml (previamente pesada), y recibió 20 golpes de manera vertical en una superficie acolchonada.

Al finalizar el procedimiento se registró el volumen y peso de la probeta. Se utilizó la fórmula de densidad aparente y los datos obtenidos fueron interpretados con la tabla 3:

$$Densidad\ aparente = \frac{\text{peso final del suelo}}{\text{Volumen final del suelo}}$$

Tabla 3. Clasificación de la densidad aparente de suelos por el método de probeta.

Tipos de suelo	g/cm <sup>3</sup>
Orgánicos y volcánicos	Menor a 1.00
Minerales:	
Arcillosos	1.0 – 1.19
Francosos	1.20 – 1.32
Arenosos	Mayor a 1.32

### Porosidad del suelo

Es el volumen del suelo que no está ocupado por sólidos, es decir es el volumen que está disponible para los líquidos y gases (Jaramillo 2002). Para obtener la porosidad se aplicó la siguiente fórmula:

$$P = \left[ 1 - \frac{Densidad\ aparente}{Densidad\ real} \right] * 100$$

### Materia orgánica del suelo

También llamado humus, se define como la fracción orgánica que posee el suelo, excluyendo los residuos vegetales y animales sin descomponer (Rosell 1999).

Se realizó a través del método AS-07 de Walkley y Black: consiste en colocar y mezclar 0.125 g de suelo y 2.5 ml de dicromato de potasio 1N en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, se dejó reposar durante un minuto. Posteriormente, se añadieron 5 ml de ácido sulfúrico concentrado, se mezcló perfectamente. La muestra se diluyó con 50 ml de agua desionizada, se agregaron 2.5 ml de ácido fosfórico concentrado y 3 gotas de indicador difenilamina. La

solución se valoró con sulfato ferroso 1N, obteniendo un cambio de color de verde oscuro a verde esmeralda. Los resultados fueron interpretados con la tabla 4:

Tabla 4. Clasificación de porcentaje de Materia orgánica

Clase	% de Materia orgánica	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy alto	>16.1	>6.0

### Carbono orgánico del suelo

Es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos (FAO 2017). Para obtener el porcentaje de carbono orgánico (CO) se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Carbono orgánico} = \frac{\% \text{ de materia orgánica}}{1.724}$$

### Textura del suelo

Es aquella propiedad que indica las cantidades relativas que se encuentran en las partículas de un diámetro menor a 2 mm, cuyas partículas están divididas en tres separados: arena, limo y arcilla. La textura está relacionada con la retención de agua y aire.

Se realizó a través del método AS-09 de Bouyoucos: consiste en colocar 50 g de suelo en un vaso de acero junto con 250 ml de agua desmineralizada y 5 ml de hexametáfosfato de sodio. El vaso fue colocado en el agitador Halmitor durante 6 minutos. Posteriormente la suspensión se vertió en una probeta de 1000 ml, la cual se aforo con un hidrómetro adentro hasta 1130 ml. Después se extrajo el hidrómetro de la probeta, de manera manual se introdujo un agitador con movimientos de arriba hacia abajo hasta mezclar completamente. Inmediatamente se quitó el agitador y se realizó la primera lectura a los 40 segundos, de forma inmediata se introdujo el hidrómetro y se midió la temperatura, dicha lectura corresponde al contenido de

arena. La suspensión se dejó en reposo durante dos horas y se volvió a introducir el hidrómetro y termómetro para realizar la segunda lectura correspondiente al contenido de arcilla. Las fórmulas utilizadas para establecer los contenidos de los separados del suelo son:

$$A(\%) = 100 - \left( \frac{\text{Lectura corregida 40 s}}{\text{Peso muestra}} * 100 \right)$$

$$Ar(\%) = \frac{\text{Lectura corregida 2 h}}{\text{Peso muestra}} * 100$$

$$L(\%) = 100 - [A(\%) + Ar(\%)]$$

Para la clase textural se utilizó el Diagrama triangular (Figura4).

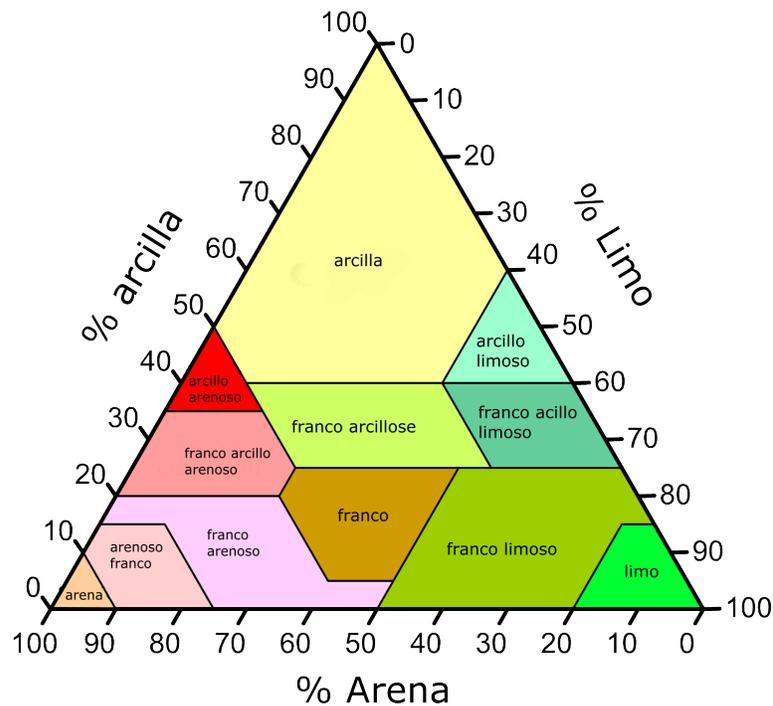


Figura 7. Diagrama triangular de textura del suelo en porcentaje.

## 6.7 Análisis de datos

### 6.7.1 Diversidad alfa de HECM

La diversidad alfa, se refiere a la riqueza de una comunidad considerada homogénea (Whittaker 1972). Se puede estimar por diferentes métodos de acuerdo con el objetivo del trabajo, ya sea por la cuantificación del número de especies presentes (riqueza específica) o por la estructura de la comunidad (abundancia relativa de los individuos). El último método se clasifica en dos secciones, (1) por la dominancia y (2) por la equidad de la comunidad (Moreno 2001). Para el presente trabajo se describió la diversidad alfa considerando los dos métodos de estructura de comunidad mediante los índices de Simpson ( $\lambda$ ) y de Shannon-Wiener ( $H'$ ). Para identificar las diferencias de la diversidad entre altitudes se utilizó la prueba t de Hutchenson. Para el análisis de los diferentes índices se utilizó el programa computacional Species Diversity and Richness (v. 4.1.2). Para calcular la equidad del índice de Shannon-Wiener se utilizó la fórmula de Pielou.

#### Índice de Simpson ( $\lambda$ ):

$$\Lambda = \sum pi^2$$

#### Índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ):

$$H' = -\sum(pi)(\ln pi)$$

Donde:

$pi$  = abundancia proporcional de la especie  $i$ , es decir, el número de individuos de la especie  $i$  dividida entre el número total de individuos de la muestra.

#### t de Hutchenson

- 1) Para cada altitud se calcula el índice de diversidad ponderado en función de la frecuencia de cada especie:

$$H_p = \frac{(N \log N) - (\sum f_i \log f_i)}{N}$$

Donde  $f_i$  es la frecuencia (Número de colectas registradas para la especie  $i$ ).

- 2) Para cada muestra calcular la varianza del índice de diversidad ponderado:

$$var = \frac{[\sum f_i \log^2 f_i - (\sum f_i \log f_i)^2]/N}{N^2}$$

- 3) Calcular la diferencia de las varianzas de ambas muestras:

$$Dvar = \sqrt{var1} + var2$$

- 4) Se obtiene el valor de  $t$ :

$$t = \frac{H_{p1} - H_{p2}}{Dvar}$$

- 5) Se calculan los grados de libertad asociados con el valor de  $t$ :

$$g.l. = \frac{(var1 + var2)^2}{(var1^2/N1 + var2^2/N2)}$$

- 6) Buscar en tablas estadísticas el valor de la distribución de  $t$  para los grados de libertad calculados (Moreno 2001).

### Índice de Pielou:

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Donde:

$H'_{max} = \ln S$

$H'$  = índice de Shannon- Wiener

$S$  = riqueza de especies

Pielou baso su índice en el índice de diversidad de Shannon-Wiener, la división entre  $\ln(S)$  intenta compensar el efecto de la riqueza de especies (Smith y Wilson 1996).

### 6.7.2 Diversidad verdadera de HECM

La diversidad verdadera (True diversity) se refiere a los números efectivos de especies presentes en una comunidad. La expresión de especies efectivas permite comparar la magnitud de la diferencia en la diversidad de dos o más comunidades. Para obtener esta diversidad se realizó una conversión a los índices de Shannon-Wiener (Moreno y cols. 2011). Se usó el paquete EstimateS 8.2.0

$$qD = \exp(H')$$

### 6.7.3 Diversidad beta de HECM

La diversidad beta, se refiere al comparar dos o más comunidades en función de los cambios en la composición de las especies o cambio biótico a través de gradientes ambientales (Whittaker 1972). Para medir la tasa de recambio se consideran distintos métodos que consideran presencia o ausencia de las especies o la importancia relativa de cada especie (Moreno 2001). Para el presente trabajo se utilizó el coeficiente de similitud de Jaccard, utilizando el paquete Multivariate statistics (MVSP 3.22). Para clasificar el índice de similitud que van de 0 a 1 se ocupó la escala de afinidad propuesta por Ramírez-González (2006).

**Coeficiente de similitud de Jaccard:**

$$IJ = \frac{c}{a + b - c}$$

Donde:

a = número de especies presentes en el sitio A

b = número de especies presentes en el sitio B

c = número de especies presentes en ambos sitios A y B

#### **6.7.4 Curvas de acumulación de especies de HECM**

El uso de las curvas de acumulación de especies nos permite determinar varios aspectos como dar fiabilidad a los inventarios biológicos, estimar el esfuerzo de muestreo, extrapolar el número de especies observadas para estimar el número de especies presentes en un lugar (Soberón y Llorente 1993, Gotelli y Colwell 2001). Para el presente trabajo se graficaron curvas de acumulación de especies de HECM, considerando el número de colectas como unidad del esfuerzo de muestro.

También se tomó la riqueza observada y estimada a través del estimador no paramétrico Chao2, dicho estimador se fundamenta en la incidencia, por lo cual maneja datos de presencia-ausencia de una especie en una muestra dada (Moreno 2001). Este modelo no asume ningún tipo de distribución particular ni una serie de supuestos *a priori* que los ajusten a un modelo determinado (Colwell y Codington 1994, Colwell y cols. 2004). Para el análisis de los datos se utilizó el programa EstimatesS 9.1.0 (Villareal y cols. 2006).

#### **6.7.5 Análisis multivariado**

Para analizar la correlación de las variables micológicas respecto a las variables ecológicas se realizó una correlación múltiple, en el programa estadístico SPSS ver. 21.

Para determinar que variables ecológicas determinan la presencia de los taxa de HECM se ejecutó un Constrained Análisis of Principal Component (CPCA) con el programa estadístico de R Studio.

## 7. Resultados

### 7.1 Hongos

El periodo de muestreo de esporomas abarcó de junio a diciembre de 2018, se realizaron un total de 18 salidas para la recolección de esporomas de HECM. Se registraron un total de 2161 esporomas de HECM, los cuales comprenden a 16 géneros y 72 morfoespecies (Tabla 5). Los géneros más abundantes fueron *Russula* (598), *Cortinarius* (514) y *Lactarius* (473), los meses de mayor abundancia fueron septiembre y octubre (636 y 801 respectivamente) (Anexo 1).

Para la altitud de 3900 m snm se registraron 1672 esporomas pertenecientes a 14 géneros y 62 morfoespecies, siendo las especies de mayor abundancia *Russula aff vinacea* (478), *Lactarius luculentus* (299), *Cortinarius aff collinitus* (115), *Cortinarius sp 2* y *Hygrophorus aff hypothejus* (63). Los géneros *Albatrellus* y *Ramaria* solo se encontraron en esta altitud. Para la altitud de 3750 m snm, se registraron 489 esporomas pertenecientes a 14 géneros y 50 morfoespecies, las morfoespecies con mayor abundancia fueron *Russula aff vinacea* (97), *Cyanoboletus aff pulverulentus* (64), *Lactarius luculentus* (56), *L. vinaceorufescens* (50) y *Xerocomellus sp 1* (49). Los géneros *Cyanoboletus*, *Gyromitra* y *Xerocomellus* solo fueron recolectados en esta altitud. (Tabla 5).

### 7.2 Curvas de acumulación

En la figura 8 se muestran las gráficas 1.A y 1.B, se presentan las curvas de acumulación de morfoespecies para ambas altitudes, se observa que en ninguna de las gráficas se obtiene la asíntota, sin embargo, en ambas altitudes se obtiene un porcentaje de eficiencia mayor al 80 % del muestreo (Tabla 6), indicando que el muestreo es representativo de la comunidad de HECM.

Tabla 5. Lista de las morfoespecies de HECM y abundancia por altitud, recolectados en el bosque de *Pinus hartwegii* de la ladera Norte del PNLM, en el periodo de junio - diciembre de 2018.

Phyllum Ascomycota				
Clase Pezizomycetes				
Orden	Familia	Morfoespecies	3900 m snm (abundancia)	3750 m snm (abundancia)
Pezizales	Discinaceae	<i>Gyromitra</i> aff. <i>ínfula</i>	0	2
Total: 1	1	1	0	2

Phyllum Basidiomycota				
Clase Agaromycetes				
Orden	Familia	Morfoespecie	3 900 m snm (abundancia)	3 750 m snm (abundancia)
Agaricales	Amanitaceae	<i>Amanita</i> aff. <i>rubescens</i>	6	4
		<i>Amanita</i> aff. <i>vaginata</i>	13	5
	Cortinariaceae	<i>Cortinarius</i> aff. <i>caperatus</i>	60	2
		<i>Cortinarius</i> aff. <i>collinitus</i>	115	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 1	5	1
		<i>Cortinarius</i> sp. 2	63	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 3	12	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 4	41	1
		<i>Cortinarius</i> sp. 5	13	1
		<i>Cortinarius</i> sp. 6	16	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 7	24	4
		<i>Cortinarius</i> sp. 8	11	1
		<i>Cortinarius</i> sp. 9	16	3
		<i>Cortinarius</i> sp. 10	46	2
		<i>Cortinarius</i> sp. 11	5	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 12	6	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 13	5	0
		<i>Cortinarius</i> sp. 14	47	2
	<i>Cortinarius</i> sp. 15	11	0	
	<i>Cortinarius</i> sp. 16	1	0	
Hygrophoraceae	<i>Hygrophorus</i> aff. <i>hypothejus</i>	63	0	
	<i>Hygrophorus</i> aff. <i>purpurascens</i>	19	1	
	<i>Hygrophorus</i> sp. 1	0	1	

	Hydnangiaceae	<i>Laccaria</i> aff. <i>laccata</i>	23	36
		<i>Laccaria</i> aff. <i>trichodermophora</i>	23	23
	Inocybaceae	<i>Inocybe</i> sp. 1	2	1
		<i>Inocybe</i> sp. 2	1	3
		<i>Inocybe</i> sp. 3	1	0
		<i>Inocybe</i> sp. 4	0	2
		<i>Inocybe</i> sp. 5	1	2
		<i>Inocybe</i> sp. 6	3	2
		<i>Inocybe</i> sp. 7	6	1
		<i>Inocybe</i> sp. 8	5	2
		<i>Inocybe</i> sp. 9	3	5
		<i>Inocybe</i> sp. 10	3	1
		<i>Inocybe</i> sp. 11	0	2
		<i>Inocybe</i> sp. 12	0	4
		<i>Inocybe</i> sp. 13	2	1
		<i>Inocybe</i> sp. 14	2	9
		<i>Inocybe</i> sp. 15	11	6
		<i>Inocybe</i> sp. 16	12	6
		<i>Inocybe</i> sp. 17	0	1
	Tricholomataceae	<i>Tricholoma</i> aff. <i>moseri</i>	5	1
		<i>Tricholoma</i> aff. <i>pardrum</i>	1	0
		<i>Tricholoma</i> aff. <i>portentosum</i>	5	2
		<i>Tricholoma</i> aff. <i>ustaloides</i>	18	0
		<i>Tricholoma</i> aff. <i>vaccium</i>	31	0
		<i>Tricholoma</i> aff. <i>virgatum</i>	32	0
		<i>Tricholoma</i> sp. 1	4	0
		<i>Tricholoma</i> sp. 2	5	0
		<i>Tricholoma</i> sp. 3	3	0
	Boletaceae	<i>Cyanoboletus</i> aff. <i>pulverulentus</i>	0	64
Boletales		<i>Xerocomellus</i> sp. 1	0	49
	Cantharellaceae	<i>Cantharellus</i> aff. <i>cibarius</i>	1	4
		<i>Clavulina</i> aff. <i>cineria</i>	2	1
Cantharellales		<i>Clavulina</i> aff. <i>cristata</i>	2	3
		<i>Clavulina</i> sp. 1	0	1
		<i>Clavulina</i> sp. 2	3	0
		<i>Clavulina</i> sp. 3	9	1
Gomphales	Gomphaceae	<i>Ramaria</i> aff. <i>bonii</i>	5	0
Hymenochaetales	Hymenochaetaceae	<i>Coltricia</i> aff. <i>perennis</i>	1	3

	Albatrellaceae	<i>Albatrellus</i> sp. 1	1	0
	Russulaceae	<i>Russula</i> aff. <i>brevipes</i>	0	4
		<i>Russula occidentalis</i>	3	1
		<i>Russula</i> aff. <i>vinacea</i>	478	97
Russulales		<i>Russula sancti-pauli</i>	5	8
		<i>Russula</i> sp. 1	1	1
		<i>Lactarius</i> aff. <i>alnicola</i>	1	0
		<i>Lactarius</i> aff. <i>badiosanguineus</i>	20	6
		<i>Lactarius luculentus</i>	299	56
		<i>Lactarius vinaceorufescens</i>	41	50
<b>Total:</b>		<b>6</b>	<b>12</b>	<b>71</b>
			<b>1672</b>	<b>489</b>

La clasificación se realizó con base en Index Fungorum (CABI BIOSCIENCES DATABASES, 2019)

### 7.3 Fenología de los géneros de HECM

En las figuras 9 y 10 se muestran las gráficas 2 y 3 se muestra la riqueza y abundancia de las morfoespecies de HECM recolectados durante cada mes en ambas altitudes, el promedio mensual de temperatura y humedad (abril 2018- mayo 2019). Al graficar la riqueza y la abundancia de HECM con respecto a la temperatura en ambas altitudes, a partir del mes de septiembre la temperatura descendió, a los 3900 m snm la riqueza y la abundancia aumentaron para el mes de octubre y a los 3750 m snm fueron los meses de octubre y noviembre. Cuando los parámetros ecológicos se graficaron con respecto a la humedad, a los 3900 m snm, se mostró que la humedad desciende al igual que la riqueza y abundancia. Sin embargo, a los 3750 m snm cuando la humedad disminuye la riqueza y abundancia de HECM aumenta.

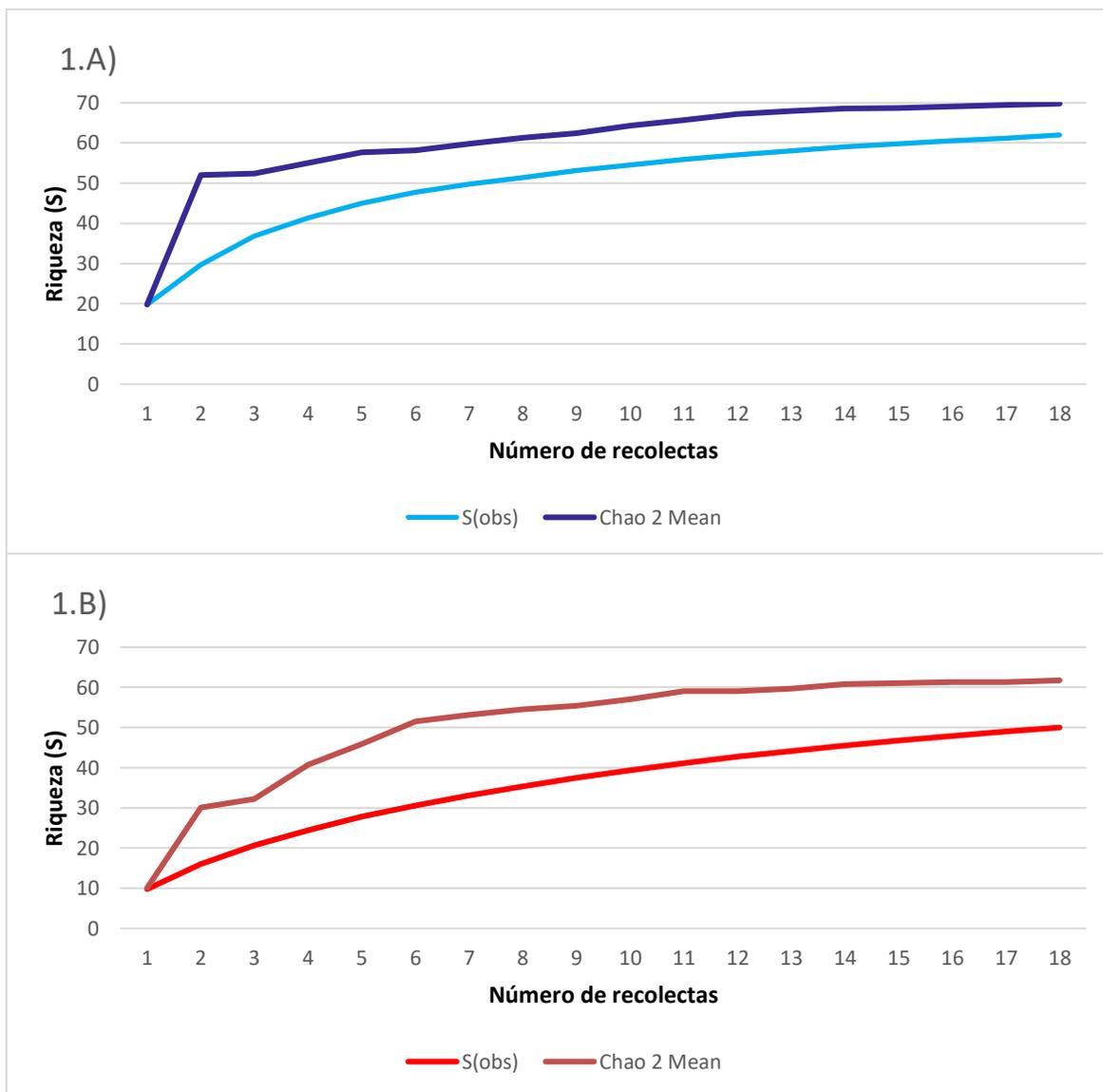


Figura 8. Curvas de acumulación de morfoespecies de HECM para cada altitud de estudio del bosque de *Pinus hartwegii* del PLNM [ A) 3900 y B) 3750 m snm].

Tabla 6. Riqueza observada y estimada de morfoespecies de HECM y nivel de eficiencia de muestreo.

	3900 m snm	3750 m snm
$S_{obs}$	62	50
Chao 2 ( $S_{est}$ )	69.79	61.74
Nivel de eficiencia (%)	<b>88.83</b>	<b>80.98</b>

\*Nota:  $S_{obs}$  es la riqueza observada, Chao 2 ( $S_{est}$ ) es la riqueza estimada

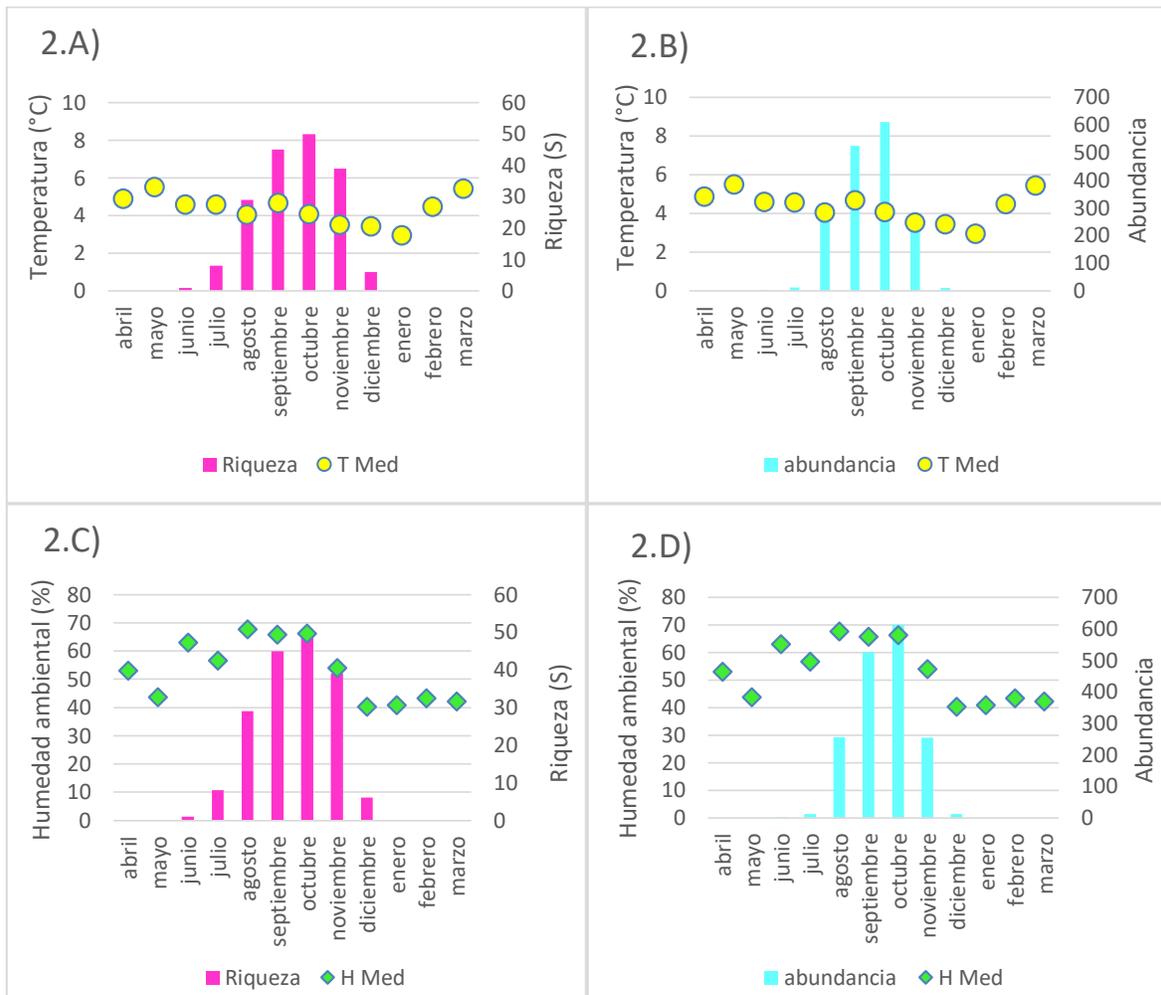


Figura 9. Fenología de la producción de morfoespecies de HECM con relación al promedio mensual de la temperatura y la humedad a los 3900 m snm. 2.A) relación de temperatura media y riqueza de morfoespecies de HECM, 2.B) relación de temperatura media y abundancia de morfoespecies de HECM, 2.C) relación de la humedad media y riqueza de morfoespecies de HECM y 2.D) relación de la humedad media y la abundancia de morfoespecies de HECM.

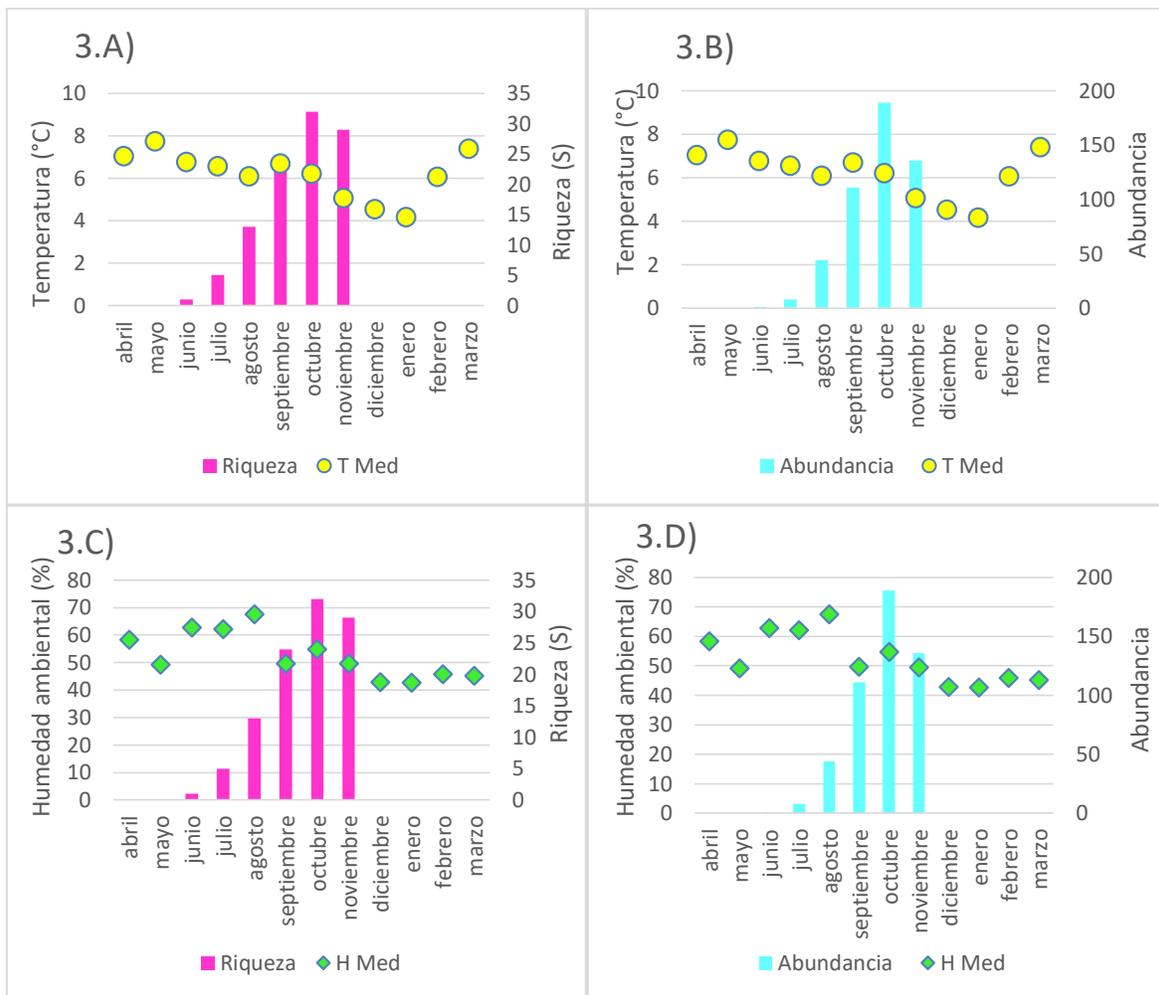


Figura 10. Fenología de la producción de morfoespecies de HECM con relación al promedio mensual de la temperatura y la humedad a los 3750 m snm. 3.A) relación de temperatura media y riqueza de morfoespecies de HECM, 3.B) relación de temperatura media y abundancia de morfoespecies de HECM, 3.C) relación de la humedad media y riqueza de morfoespecies de HECM y 3.D) relación de la humedad media y la abundancia de morfoespecies de HECM.

#### 7.4 Productividad de peso fresco

En la figura 11 se muestra la productividad de fresco de HECM de ambas altitudes, se observa que a los 3900 m snm la mayor productividad es el mes de septiembre con 20.93 kg/6400 m<sup>2</sup>, mientras que para los 3750 m snm es el mes de octubre con 6.122 kg/6400 m<sup>2</sup>. Los géneros que presentan mayor biomasa a los 3900 msn son *Cortinarius*, *Russula* y *Lactarius*, géneros que fueron los más abundantes durante el muestro (figura 12). Sin embargo, la

biomasa a los 3750 m snm está concentrada por los géneros *Russula*, *Cyanoboletus* y *Xerocomellus*, siendo los dos últimos quienes presentan una morfología más robusta (figura 13).

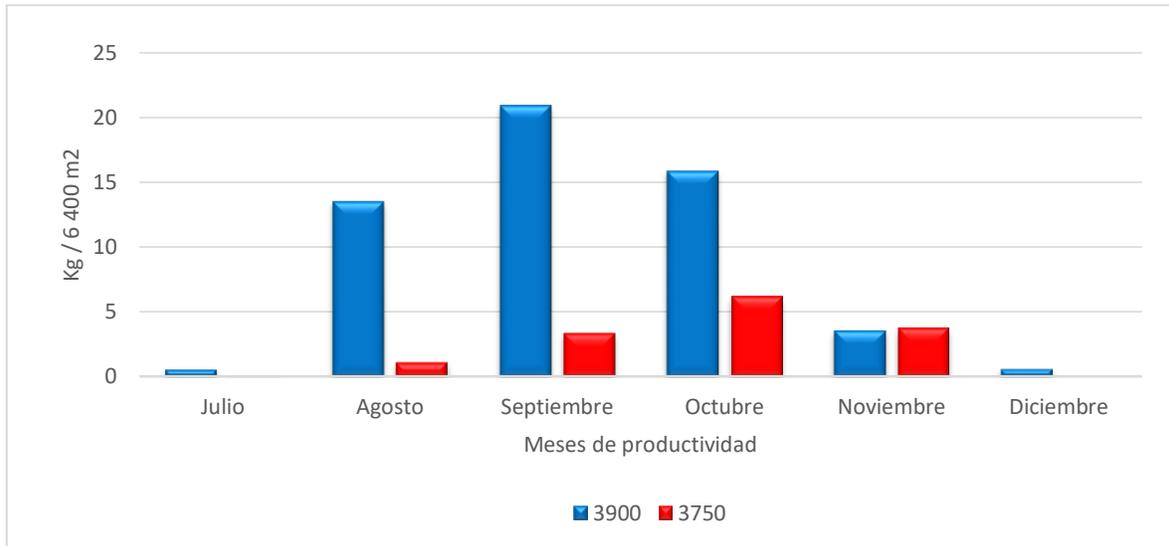


Figura 11. Productividad de biomasa en fresco de HECM asociados al bosque de *Pinus hartwegii* en dos altitudes del PNLM.

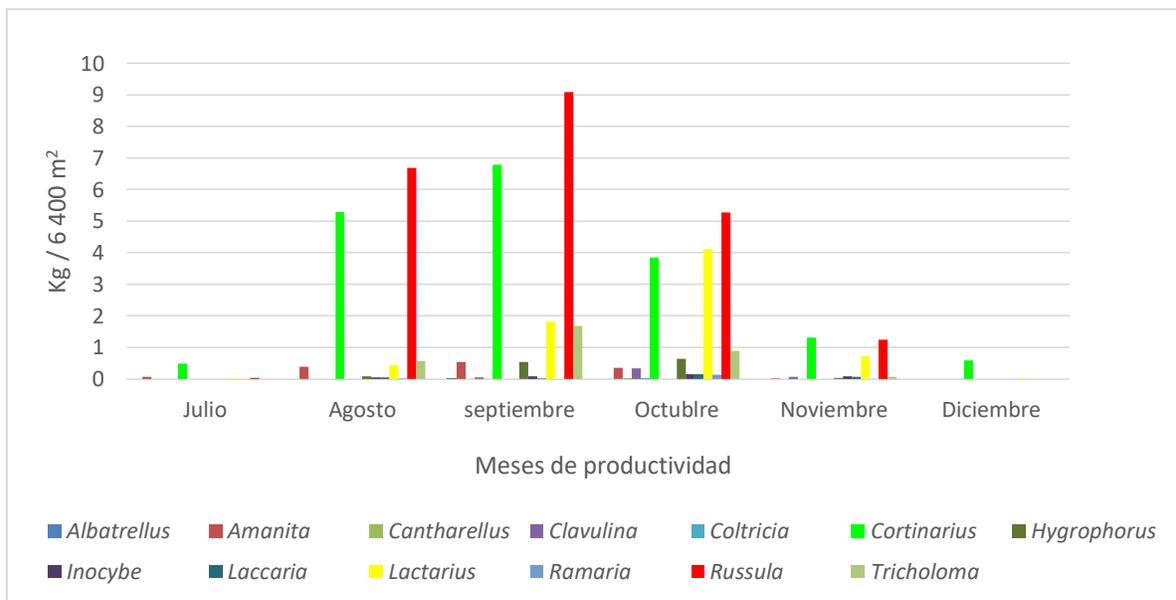


Figura. 12 Productividad de biomasa en peso fresco por géneros de HECM presente a en los 3900 m snm en la ladera Norte del PNLM.

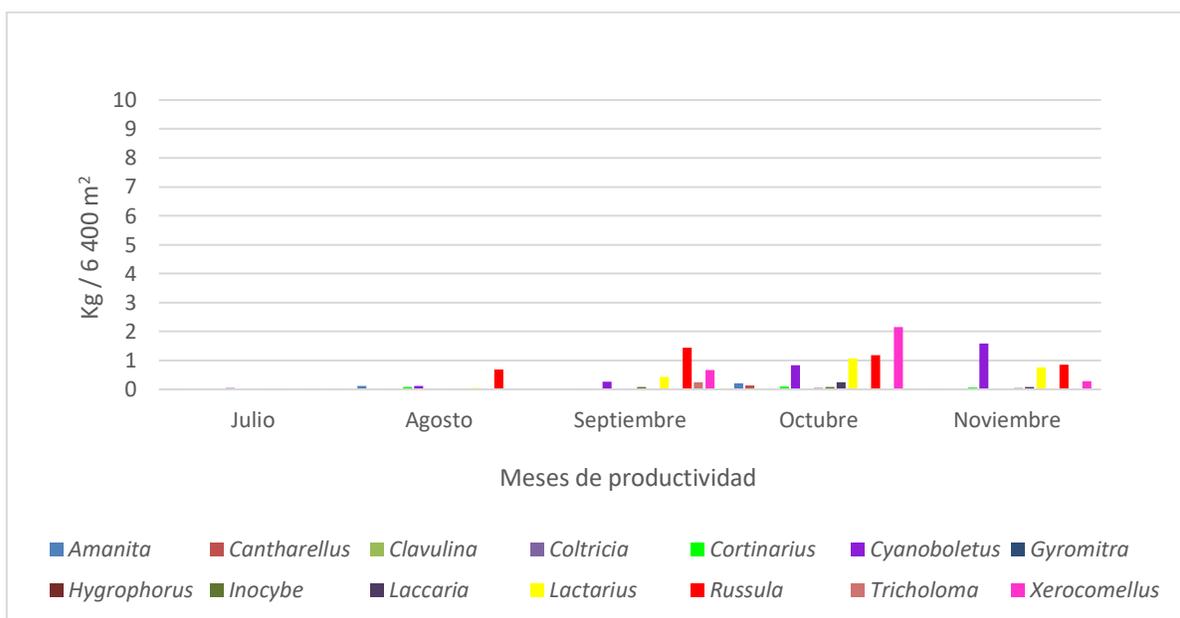


Figura 13. Productividad de biomasa en peso fresco por géneros de HECM presente a en los 3750 m snm en la ladera Norte del PNLM.

## 7.5 Diversidad alfa de HECM

En la tabla 7 se muestra que la altitud de 3900 m snm presenta la mayor riqueza de HECM, con 62 morfoespecies, mientras que a los 3750m snm se reconocen 50 morfoespecies. Con el índice de Shannon-Wiener encontramos que el valor máximo ( $H'$  de 2.825) se presentó a los 3900 m snm, correspondiéndole una diversidad de 16.861 especies efectivas de acuerdo con el índice de diversidad verdadero. Para los 3750 m snm el valor de  $H'$  es de 2.793 y una diversidad de 16.330 especies efectivas. Al aplicar la prueba de t de Hutcheson a los valores de los índices de Shannon-Wiener, no mostraron diferencias significativas, concluyendo que la diversidad a los 3900 es igual a 3750 m snm (Tabla 8). El índice de Pielou mostro valores superiores a 0.5 en ambas altitudes, derivado que la equitatividad de las morfoespecies respecto a su abundancia es semejante con un 50 %. Por lo cual, los valores del índice de Simpson son muy bajos, indicando que hay una baja dominancia de morfoespecies de HECM de cada altitud es baja (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación de la diversidad y riqueza de morfoespecies de HECM entre dos altitudes de la población de *Pinus hartwegii* de la ladera Norte del PNLM.

	3900 m smn	3750 m smn
Riqueza	62	50
Abundancia	1672	489
Shannon (H)	2.825	2.793
Pielou	0.685	0.714
qD	16.861	16.330
Simpson	0.127	0.204

Tabla 8. Comparación por altitud mediante la t de Hutchenson para las morfoespecies de HECM.

	t de Hutchenson	t <sub>0.05</sub>
3900 vs 3750 m smn	0.267	1.962

## 7.6 Diversidad beta de HECM

Al comparar la similitud de morfoespecies de HECM entre las altitudes a través del índice de Jaccard, se obtuvo un valor de 0.548. Al interpretar dicho valor con la escala de clasificación de similitud propuesta por Ramírez-González (2006), se obtiene una similitud dudosa. (Tabla 9).

Tabla 9. Escala de clasificación para índices de similitud, propuesta por Ramírez-González (2006).

Afinidad	Comunidades
0 – 0.5	Diferentes
>0.5 – 0.65	Similitud dudosa
>0.65 – 0.8	Semejantes
>0.8 – 1	Iguales

## 7.7 Estructura del bosque

Respecto a las variables estructurales del bosque, la densidad arbórea es mayor en los 3900 m smn, sin embargo, a esta altitud solo se presentan árboles juveniles y adultos y no hay

presencia de plántulas. En cuanto a la cantidad de árboles maduros es similar para ambas altitudes. El área basal es mayor a los 3900 m snm. La infestación de muérdago a los 3900 m snm es casi nula, solo el 2.67 % del arbolado presenta una infestación leve. Por lo contrario, a los 3750 m snm, se muestra que el 79.08 % de individuos presenta algún grado de infestación siendo de leve a severa (Tabla 10).

Tabla 10. Caracterización de los parámetros estructurales y sanidad del bosque de *Pinus hartwegii* en dos pisos altitudinales de la ladera Norte del PNLM.

Parámetros estructurales	3900 m snm	3750 m snm
Densidad arbórea (ind/1600 m <sup>2</sup> )	112 ± 16.23	101 ± 7.72
Individuos por etapas de desarrollo		
Plántula	0	0.8 ± 0.48
Juveniles	23 ± 6.05	11 ± 3.17
Maduros	89 ± 13.63	90 ± 6.54
Área basal (m <sup>2</sup> )	6.14 ± 0.6	2.98 ± 0.4
Infestación de muérdago		
Sin riesgo	102 ± 10.99	24 ± 2.72
	91.07 %	21.81 %
Riesgo leve	3 ± 3.25	63 ± 3.71
	2.67 %	57.27 %
Riesgo severo	0	15 ± 2.90
		13.63 %

Nota: los parámetros estructurales y sanidad del bosque se presentan con  $\bar{X} \pm E.E.$

## 7.8 Variables ambientales

Las variables de temperatura y humedad fueron monitoreadas por 12 meses (abril 2018-marzo 2019). En cuanto, a la variable de temperatura se observa que el promedio mensual fue más alta a los 3750 msnm. La temperatura promedio más alta para ambas altitudes se

registró en el mes de mayo, con valores de 5.51 y 7.74 °C para los 3900 y 3750 m snm, respectivamente, de igual forma la temperatura promedio de ambas altitudes desciende durante el mes de noviembre, lo que corresponde al inicio del invierno (figura 14).

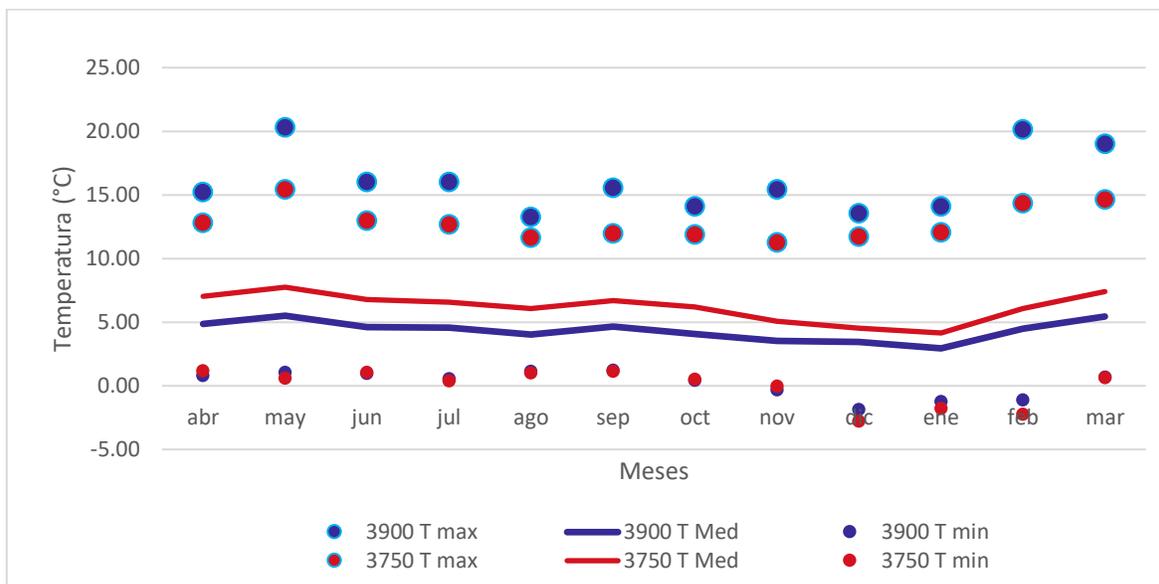


Figura 14. Temperatura ambiental de dos altitudes (3900 y 3750 m snm) de la población de *Pinus hartwegii* en la ladera Norte del PNLM.

Respecto a la humedad ambiental promedio mensual, en ambas altitudes los meses de verano-otoño se registraron los valores más altos. Específicamente en el mes de agosto los porcentajes son de 67.58 y 67.48 % para los 3900 y 3750 m snm, respectivamente. Posteriormente, en invierno se registraron los porcentajes más bajos (figura 15).

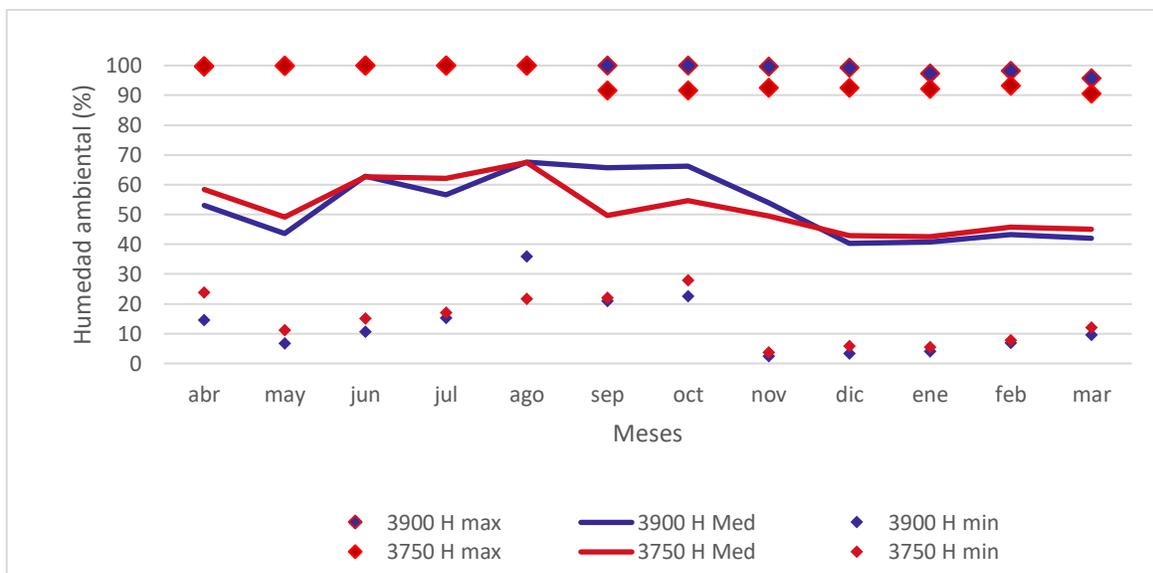


Figura 15. Humedad ambiental de dos altitudes (3900 y 3750 m snm) de la población de *Pinus hartwegii* en la ladera Norte del PNLM.

### 7.9 Variables edáficas

Respecto a los parámetros edafológicos, ambas altitudes presentan suelos moderadamente ácidos, mientras que el porcentaje de MO y de CO presentan la tendencia, que a mayor altitud el porcentaje disminuye. Los datos obtenidos para la Densidad aparente ( $D_a$ ), corresponden al tipo de suelo orgánico y volcánico para ambas altitudes, sin embargo, en la altitud de 3900 m snm presenta un valor cercano a  $1\text{g/cm}^3$  y su porosidad es baja, que de acuerdo a los criterios de la NOM021-SEMARNAT-2000 los valores cercanos a  $1\text{g/cm}$  son indicativos de compactación del suelo. La textura predominante a los 3900 m snm es arena, mientras que a los 3750 m snm es franco-arenoso (Tabla 11).

Tabla 11. Parámetros edafológicos de dos pisos altitudinales del bosque de *Pinus hartwegii* de la ladera Norte del PNLM.

Parámetros edafológicos	3900	3750
	m snm	m snm
pH	5.132 ± 0.07	5.327 ± 0.15
Da (g/cm <sup>3</sup> )	0.965 ± 0.05	0.732 ± 0.05
% Porosidad	63.607 ± 1.89	72.437 ± 2.12
% MO	3.595 ± 0.47	8.227 ± 1.03
% CO	2.107 ± 0.27	4.772 ± 0.60
% Arcilla	0.897 ± 0.07	1.63 ± 0.16
% Limo	12.705 ± 2.51	25.602 ± 1.93
% Arena	86.397 ± 2.46	72.76 ± 1.98
Textura	Arena / Arena-franca	Franca arenoso / Arena-franca

Nota: los parámetros edafológicos se presentan con  $\bar{X} \pm EE$ .

## 7.10 Análisis multivariado

### Análisis de correlación múltiple

El análisis de correlaciones entre las variables micológicas y variables ambientales se realizó de manera general. La abundancia de morfotipos tuvo una correlación positiva con la densidad total del arbolado, con el arbolado libre de infestación y con el porcentaje de arena, mientras que tuvo una relación negativa con el arbolado de infestación severa de muérdago y con el porcentaje de arcilla y limo. La riqueza de morfotipos tuvo una correlación positiva con el porcentaje de porosidad y una correlación negativa con la densidad aparente y el porcentaje de arena. La diversidad ( $H'$ ) tuvo una correlación negativa con la temperatura ambiental. La productividad de kg en peso fresco de HECM estuvo correlacionada positivamente con la densidad de árboles adultos. En los resultados obtenidos la correlación es significativa al nivel  $p < 0.05$  se indicó con un asterisco y al nivel  $p < 0.01$  se indicó con dos asteriscos como un superíndice en el valor.

Tabla 12 Correlación de las variables micológicas entre las variables ambientales, estructurales y edafológicas.

	D(H')	RM	AM	Productividad (Kg en fresco)
Ta	-0.838 **	0.602	-0.554	-0.286
%Hr	-0.287	0.12	-0.472	-0.31
DT	0.479	-0.381	0.905**	0.071
Dp	0.078	0.563	-0.452	0.234
Dj	0.367	-0.154	0.491	0.442
Dad	0.325	-.058	0.323	0.934**
AB	0.024	-.0528	0.619	-0.048
S.I	0.27	-4.28	0.732*	0.22
I.L	-.027	0.053	-0.781	0.122
I.S	-0.306	0.641	-0.71*	-0.127
pH	0.072	0.295	-0.095	-0.333
Da	0.17	-0.777*	0.482	0.47
%Por	-0.275	0.761*	-0.571	-0.524
%MO	-0.18	0.602	-0.667	-0.238
%CO	-0.18	0.605	-0.667	-0.238
%Ar	-0.216	0.307	-0.881**	-0.095
%L	-0.563	0.565	-0.786*	-0.429
%A	0.228	-0.822*	0.714*	0.405

Ta = Temperatura ambiental, %Hr = Humedad relativa, DT = Densidad arbórea total, Dp = Densidad de plántulas, DJ = Densidad de juveniles, Dad = densidad de adultos, AB = Área basal, S.I = Sin infestación por muérdago, I.L = Infestación leve de muérdago, I.S = Infestación severa de muérdago, Da = Densidad aparente, %Por = Porosidad, %MO = Materia orgánica, %CO = Carbono orgánico, %Ar = Arcilla, %L = Limo, %A = Arena, D(H') = Diversidad de HECM, RM = Riqueza de morfotipos de HECM y AM = Abundancia de morfotipos de HECM.

#### Análisis de CPCA

Durante el trabajo de campo se obtuvieron 18 variables, a partir del análisis CPCA fue posible resumir la información. De manera general se observa que las siguientes figuras están

separadas en dos grupos diferentes los cuales son los sitios de muestro de las dos altitudes analizadas. En la figura 16, se representa la información conjunta de las variables estructurales del bosque que tienen un afecto en las morfoespecies de HECM. Las variables que se muestran son el área basal y la densidad total, las morfoespecies de HECM que están correlacionadas a los 3900 son *Lactarius luculentus*, *Hygrophorus aff hypothejus*, *Cortinarius aff caperatus*, *C. sp. 2*, mientras que a los 3750 m snm son *Laccaria aff laccata*, *Cyanoboletus aff pulverulentus* y *Xerocomellus sp. 1*.

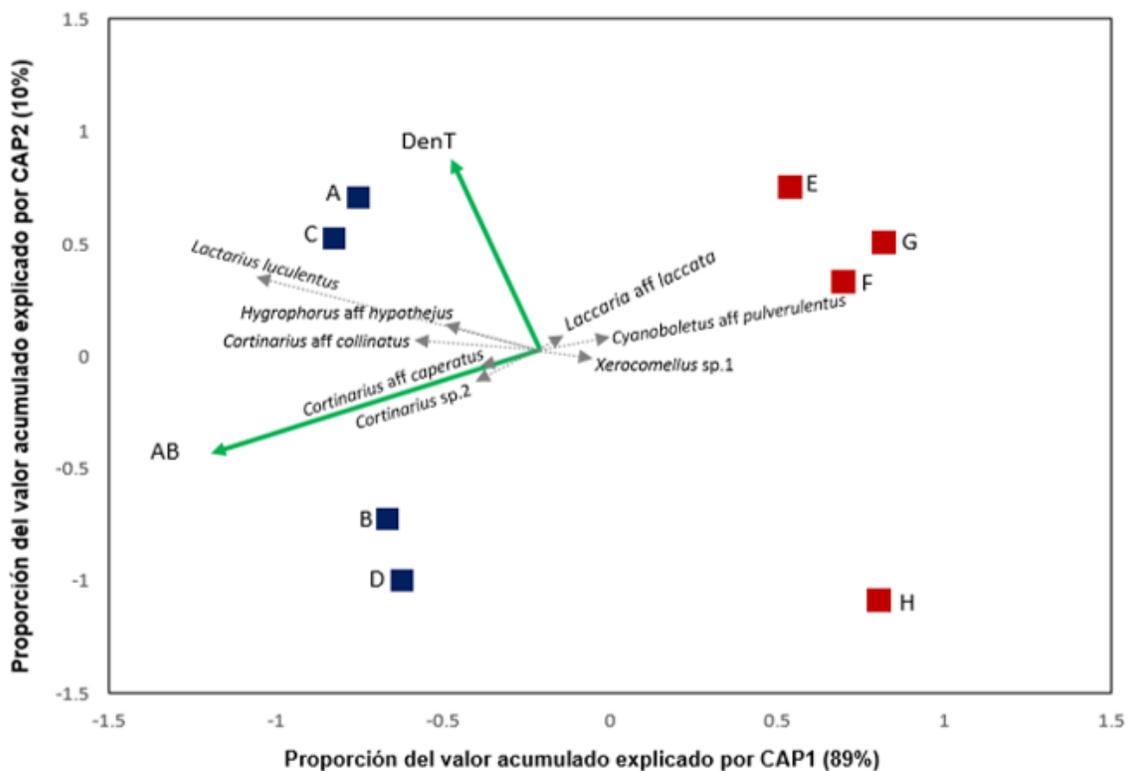


Figura 16. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables estructurales del bosque y las morfoespecies de HECM. DenT = densidad total, AB= área basal, Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.

En la figura 17, se muestra la relación de la sanidad arbórea entre a las morfoespecies de HECM, se observa que a las 3900 m snm la variable sin infestación de muérdago influye en las morfoespecies de *Russula aff vinacea*, *Lactarius luculentus*, *Cortinarius aff caperatus*, *C. aff collinitus*, *C. sp 2*, *Hygrophorus aff hypothejus*. Mientras que a los 3750 m snm las

variables de infestación leve y severa por muérdago tienen influencia en *Xerocomellus* sp 2, *Cyanoboletus* aff *pulverulentus* y *Laccaria* *laccata*.

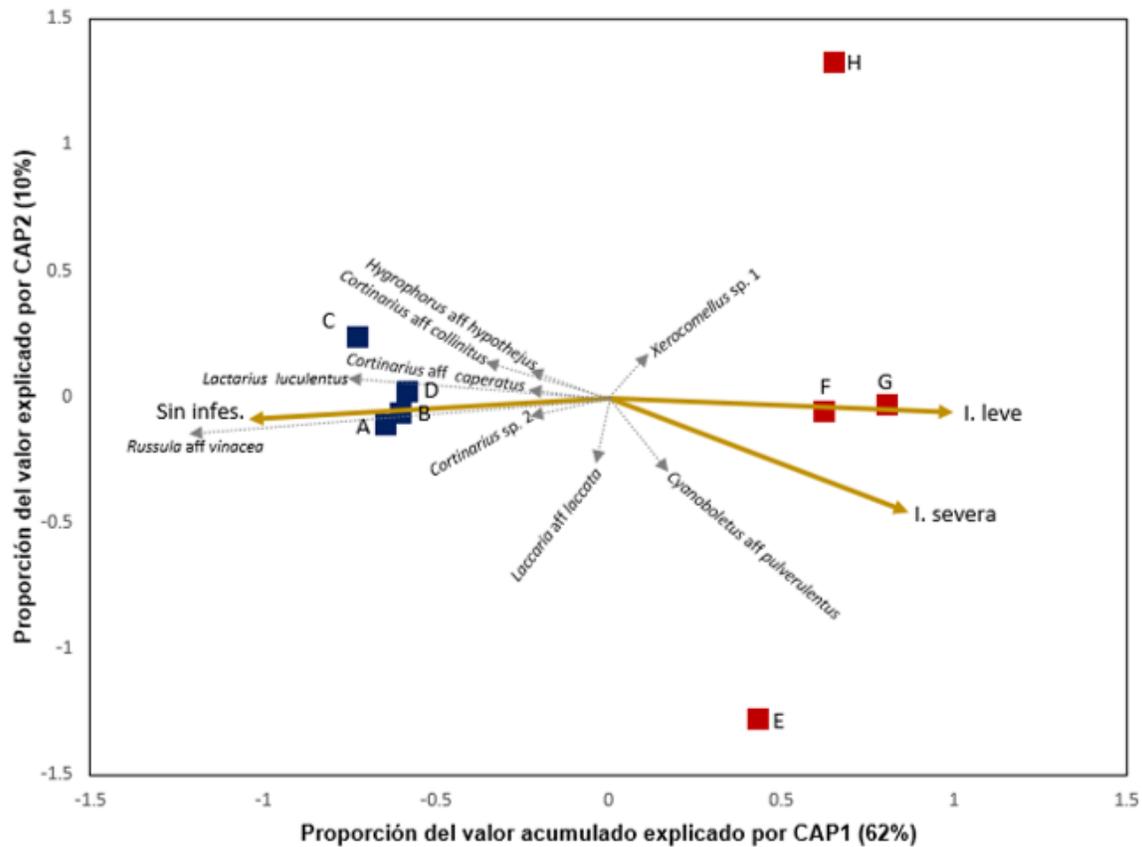


Figura 17. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables de sanidad del bosque y las morfoespecies de HECM. Sin infes. = sin infestación, I. leve= infestación leve y I. severa = infestación severa. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.

En la figura 18, se observa la relación de las variables ambientales entre las morfoespecies de HECM. Se muestra que las de humedad relativa y temperatura ambiental, tienen una relación con las morfoespecies de *Laccaria* aff *laccata*, *L. aff trichodermophora*, *Cyanoboletus* aff *pulverulentus*, *lactarius* aff *vinaceorufescens* y *Xerocomellus* sp 1 a los 3750 m snm y en *Cortinarius* sp. 4, *C. aff collinatus*, *C. aff caperatus*, *Hygrophorus* aff *hypothejus* y *Russula* aff *vinacea* a los 3900 m snm.

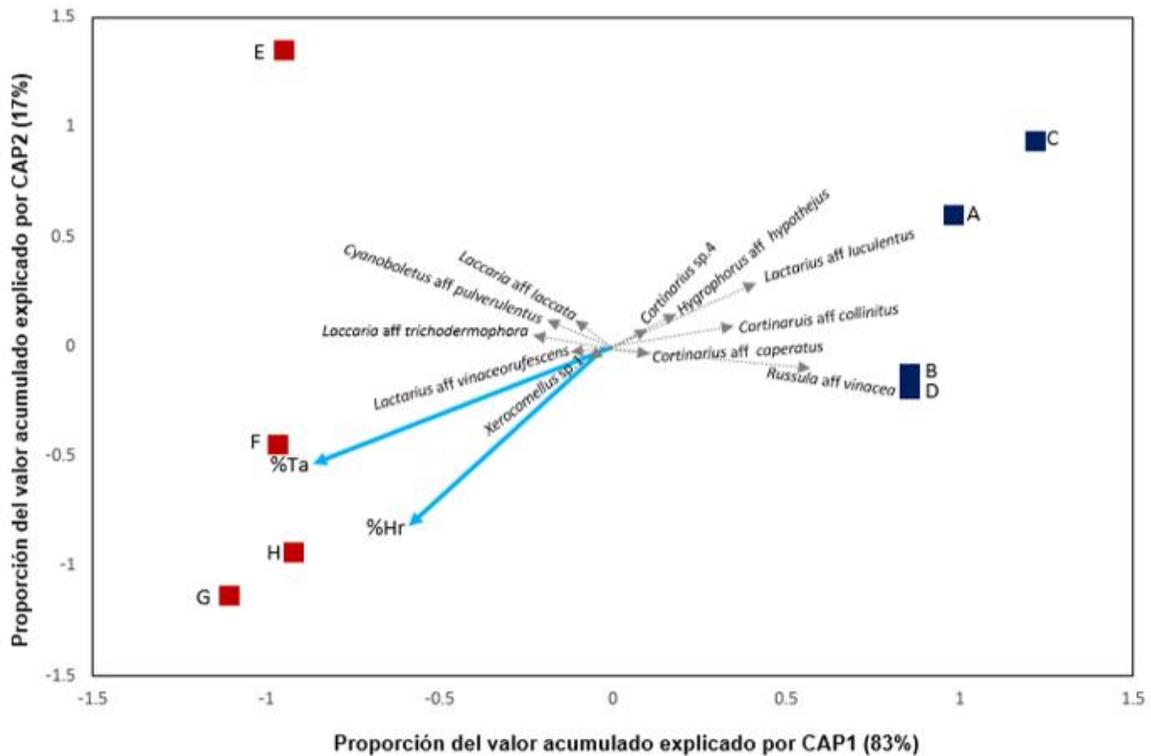


Figura 18. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables ambientales y las morfoespecies de HECM. %TA= porcentaje de temperatura ambiental y %Hr = porcentaje de humedad relativa. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.

Por último, en la figura 19, se muestra la relación de las variables edafológicas entre las morfoespecies de HECM. Se observa que a los 3900 m snm las variables densidad aparente y el porcentaje de arena influyen en *Lactarius luculentus*, *Hygrophorus aff hypothejus*, *Russula aff vinacea*, *Cortinarius aff collinatus*, *C. aff caperatus* y *C. sp. 2*. Mientras que a los 3750 m snm las variables de pH, porcentaje de porosidad, de carbono orgánico y de arcilla, son las que influyen en *Xerocomellus sp.2*, *Russula aff brevipes* y *Cyanoboletus aff pulverulentus*.

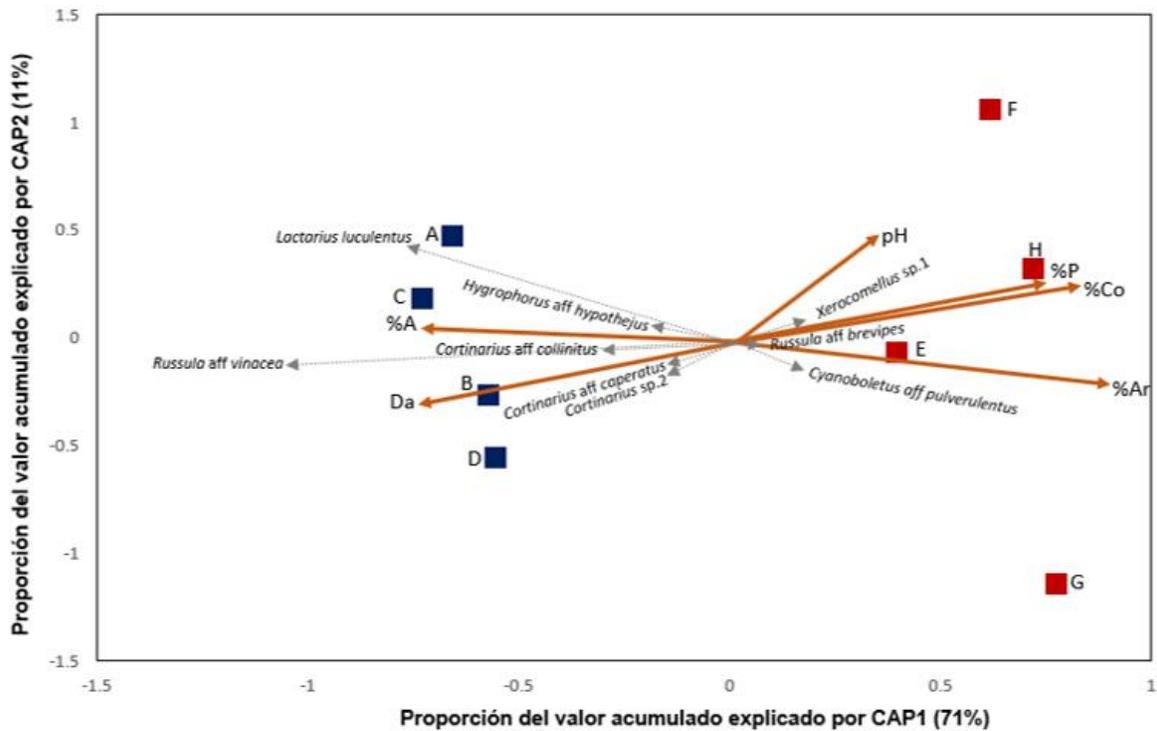


Figura 19. Biplot del análisis restringido de coordenadas principales (CACP) para las variables edafológicas y las morfoespecies de HECM. %A= porcentaje de arena, %Ar = porcentaje de arcilla, %P = porcentaje de porosidad, %CO = porcentaje de carbono orgánico y Da =densidad aparente. Cuadros azules (A, B, C, D) sitios de la altitud de 3900 m snm y los cuadros rojos (E, F, G, H) = sitios de la altitud de 3750 m snm.

## 8. Discusión

El muestreo de los esporomas de HECM abarcó la última semana de junio a la primera semana de diciembre de 2018. La determinación taxonómica de los HECM se estableció con base en el concepto de morfoespecie, considerando que la mayoría de las claves taxonómicas provienen de Europa o Norteamérica y corresponden a especies crípticas. Se ha descrito que las comunidades de hongos en México son diferentes a las de otras regiones, y por lo tanto se encuentran muchas especies no reportadas para la ciencia (Aguirre-Acosta y cols. 2014). A pesar de que los hongos constituyen un grupo taxonómico de gran diversidad, el conocimiento sobre su riqueza y diversidad es muy escaso (Schmit y Muller 2007). La mayoría de las especies se determinaron como aff o sp, debido a que sus características macro y micro morfológicas no incidieron en su totalidad con la literatura, por lo que es probable que correspondan a nuevas especies, sin embargo, es necesario llevar a cabo otro tipo de estudios como análisis moleculares para poder corroborar su identidad.

En el presente estudio se registraron 62 morfoespecies pertenecientes a 16 géneros de HECM. Anteriormente, Meza-Ramírez (2010) reportó ocho de estos géneros, (*Laccaria*, *Amanita*, *Inocybe*, *Tricholoma*, *Cantharellus*, *Coltricia*, *Lactarius* y *Russula*) para el bosque de *P. hartwegii*, en la Cuenca del Río Magdalena, México. En ambos trabajos se coincide que los géneros más abundantes son *Russula* y *Lactarius*. En el trabajo de Baeza y cols (2017), analizaron directamente la morfología e identificación molecular de la ectomicorriza para el bosque de *P. hartwegii* en el Cofre de Perote en Veracruz, reportaron que el género más abundante fue *Cortinarius*, el cual, en el presente trabajo también se reporta como uno de las más abundantes.

La mayoría de los géneros de HECM más abundantes reportados en el presente trabajo han sido descritos para asociaciones de etapas tardías respecto a su hospedero (Mason y cols. 1982, Bowen 1994) y para bosques de coníferas (Gardes y Bruns 1996 y Stendell y cols. 1999). Por ejemplo, las morfoespecies que se reportan a los 3 900 m snm son *Russula*, *Cortinarius* y *Lactarius* y a los 3 750 m snm son *Russula*, *Xerocomellus* y *Cyanoboletus*. Las morfoespecies menos abundantes en ambas altitudes, corresponden a los géneros *Inocybe* y *Laccaria* las cuales han sido reportadas para asociaciones de etapa temprana (Dighton y Mason 1985 y Last y cols. 1987), lo anterior se puede atribuir al bajo número de plántulas

encontrados en las zonas y puede ser indicativo de que estos bosques presentan una baja regeneración natural del arbolado en ambas altitudes.

Al evaluar la eficiencia del esfuerzo de muestreo con en las curvas de acumulación de morfoespecies de HECM, no se logró establecer una asíntota. De acuerdo con Richard y cols. (2004) este comportamiento es común para este grupo de organismos, ya que algunas especies no presentan fructificaciones anuales. Teerdesoo y cols. (2006) mencionan que en zonas de ecosistema templado es común que se alcance la mitad de las especies de la comunidad de HECM, debido a que las especies raras. Por lo anterior, Salgueiro (2007) recomienda que los inventarios fúngicos deben estar sistematizados en el tiempo entre cada recolecta siendo semanal o mensual y durante varios años de muestreo, ya que se ha reportado que algunas especies de HECM pueden fructificas casa 10 años o más (Fernández-Toirán 2006). Con todo lo anterior y considerando que en este trabajo la sistematización entre cada recolecta fue continua y obteniendo un porcentaje de eficiencia superior al 80 % en ambas altitudes, se puede considerar que el esfuerzo de muestreo realizado fue aceptable.

La fenología de hongos se refiere a la producción de las estructuras reproductivas (esporomas) durante los meses del año, la cual está relacionada con diversos factores climáticos, principalmente la temperatura y la humedad (Brunner y cols. 1992 y Garibay y cols. 2009). En el presente trabajo se observa que en el mes de septiembre la temperatura comienza a descender y la humedad obtiene sus puntos más altos debido a la precipitación, posterior a ello en los meses de octubre y noviembre la abundancia y riqueza de HECM es mayor. Lo anterior es apoyado por Laganá y cols. (2002) donde ellos mencionan que el aumento de la producción de esporomas coincide con las precipitaciones. Esto se debe, porque al disminuir la temperatura, también se reduce la evapotranspiración dando como resultado un mayor tiempo de retención de la humedad en el suelo (Villanueva-Jiménez y cols. 2006). Gómez y cols. (2002) ya habían visto este patrón, que al aplicar riego a unas plantaciones antes de la temporada de lluvias obtenían mayor humedad y se adelantaba la emergencia de esporomas. Toda esta información nos permite determinar la disponibilidad temporal de los HECM y caracterizar los hábitats para complementar los programas de micosilvicultura de la zona (Savoide y Largeteau 2011).

Frecuentemente para evaluar la diversidad de especies en comunidades ecológicas hay un gran número de índices. Uno de los más utilizados es el índice de Shannon que sus intervalos son de cero a cinco, pero que por sí solo no representa la diversidad de una comunidad. Por lo tanto, al realizar comparaciones entre comunidades no es una forma certera. Para lo anterior, se ha propuesto emplear el uso de números efectivos que permiten una mejor interpretación de la diversidad entre las comunidades (Moreno y cols.,2011). Siendo que la diversidad verdadera se refiere al número de especies que tendría una comunidad virtual cuyas especies fueran igualmente comunes, conservando la abundancia relativa de la comunidad (Jost 2006). Una ventaja de expresar la diversidad a través de este índice, es que permite comparar directamente la magnitud de la diferencia en la diversidad entre dos o más comunidades, lo cual no es posible con los índices de diversidad tradicionales. Por ejemplo, en este estudio, los valores del índice de  $H'$  a los 3 900 m snm fue de 2.825 y a los 3750 m snm de 2.793, donde solo podemos reportar quien es más alto, pero no cuál es la diferencia entre ellos. Al aplicar el índice de diversidad verdadera reportamos valores de 16.861 y 16.330 para las altitudes antes mencionadas. Así mismo se reporta que la diversidad de la comunidad fúngica a los 3900 m snm es 1.032 mayor que a los 3750 m snm. Para el análisis de disimilitud se utilizó el índice de Jaccard cuyo valor es 0.548 que de acuerdo a Ramírez-González (2006) las semejanzas de los sitios de estudios son dudosa ya que cada sitio tiene una estructura de comunidad particular.

Aunque la comparación de biomasa en peso fresco suele ser complicada, nos muestra un escenario importante. En este estudio la mayor biomasa provino de los géneros más abundantes (*Russula*, *Cortinarius* y *Lactarius*) y de aquellos donde su morfología es robusta (*Xerocomellus* y *Cyanoboletus*). En este aspecto podemos observar que géneros poco abundantes pueden llegar a ser primeros lugares en biomas como anteriormente lo había reportado Garibay y cols. (2009). Sin embargo, para el aspecto de producción de kg/ha, en el trabajo antes mencionado, los autores reportan una producción de 5.59 kg de HCS/ha para bosques de *Pinus-Quercus* de Ixtlan donde el 75 % de los hongos son ectomicorrizógenos. Anteriormente Montoya (2005) para La Malinche reportó una productividad de 1.17 kg de HCS/ha, donde el 72 % son ectomicorrizógenos. Al comparar los datos el presente estudio se obtuvo una productividad de 2.11 kg de HECM/ha, aunque hay que tomar en cuenta que no se evaluó HCS es un buen indicador de biomasa.

Las variables ecológicas determinan la distribución de los hongos, debido a que éstas pueden ser diferentes en cortas distancias, lo que genera una amplia diversidad de hábitats (Steubing y cols. 2002). Pilz y Molina (2005) y Fernández-Toirán y cols. (2011) mencionan que las características estructurales del bosque como su edad, la composición y la estructura de la comunidad vegetal, determinan las especies de hongos que las acompañan, promoviendo la abundancia y distribución espacial de hongos debido que estas les proveen fuentes de energía para la mayoría de las especies fúngicas.

Las características estructurales del bosque de *Pinus hartwegii* más evidentes en el presente estudio son la baja o nula presencia de plántulas, la disminución del área basal conforme disminuye la altitud y la sanidad del arbolado (infestación por muérdago) en donde a mayor altitud el arbolado presenta una infestación leve (2%), y este se va agravando conforme desciende la altitud. Estos datos concuerdan con el trabajo de Portillo (2017), donde evaluó algunas características silvícolas de este bosque, reporta que la infestación por muérdago en el bosque a la altitud de 4000 m snm es nula y está aumenta conforme a la altitud desciende, de igual forma este patrón también se muestra en la densidad arbórea. Las variables estructurales del bosque que tienen mayor relación con la presencia de las morfoespecies de HECM fueron la densidad total, el área basal, en cuanto a la sanidad el bosque se observa que la ausencia de muérdago promueve la presencia de varias especies. Trabajos anteriores han reportado que la diversidad y estructura de las plantas hospederas tienen gran influencia para la comunidad fúngica (Kernaghan 2005). Durall y cols. (2006) reportaron que existe una relación de la riqueza de HECM entre las etapas sucesionales del hospedero, y con estructura del bosque (Goldmann y cols. 2015). Simard y cols. (2012) menciona que las diferencias de las etapas sucesionales de los hospederos constituyen la fuente de energía para las especies fúngicas que a su vez forman redes que conectan a varios hospederos para el intercambio de nutrientes.

Las características ambientales presentan una función importante para que los hongos se puedan desarrollar y reproducirse, en el presente trabajo solo se evaluaron la humedad relativa y la temperatura ambiental. Los resultados muestran que ambas variables son determinantes para que se presente la fructificación de hongos. En este estudio se presenta el patrón que tiempo antes de que los esporomas fructifique la temperatura empieza a descender

y la humedad relativa se mantiene en un rango de 50 – 67 %. Esto ya se había reportado anteriormente en el bosque de *Pinus hartwegii* en Santa Catarina del Monte, Estado de México, donde la humedad y otras variables tienen una relación positiva con la producción y diversidad de hongos comestibles (Arteaga y Moreno 2006). De la misma forma Gómez-Hernández y Williams-Linera (2011) reportan que la temperatura ambiental tiene influencia que la fructificación de esporomas de los hongos en general.

Con respecto a las características edafológicas se ha determinado que es de suma importancia debido a que en ellas se encuentra parte la disponibilidad nutrimental para los hongos ectomicorrizógenos (Zamora-Morales y cols. 2018), por lo tanto, las variables químicas y físicas del suelo pueden ser un factor limitante que influyen en la diversidad de HECM (Baar y Braak 1996, Terdesoo, 2014). En el presente trabajo se reporta que la densidad aparente, la textura, el pH, carbono orgánico y la porosidad tienen un efecto sobre la producción de HECM. Anteriormente estas variables se han documentado de manera independiente o algunas en conjunto. La densidad aparente está relacionada con la compactación del suelo que, de acuerdo a los resultados del estudio, los suelos de mayor altitud presentan una ligera compactación la cual se debe a la orografía del lugar y no a las alteraciones antrópicas. Becerra y cols. (2005), reportaron que los HECM como *Cortinarius* sp., *Suillus* sp., y *Gyrodon* sp., se desarrollan en suelos ricos de materia orgánica y pH moderadamente ácido, en este trabajo solo se reporta un género, sin embargo, es uno de los más abundantes. En otros trabajos se ha reportado que la textura arenosa de los suelos afecta la emergencia de los esporomas, debido a que disminuyen la retención de agua (Taylor y cols. 2014), sin embargo, los resultados obtenidos difieren con lo antes citado, y junto con la densidad aparente y el porcentaje de porosidad influyen en la abundancia de los HECM.

Finalmente, es necesario mencionar que los métodos de muestreo y análisis de diversidad que se utilizan para hongos son muy escasos y han sido diseñados para evaluar tipos de vegetación, por lo que muchos de los métodos usados para este tipo de investigaciones son adaptaciones de trabajos llevados a cabo en botánica o ecología vegetal, sin embargo, con la adaptación de los índices y análisis de diversidad podemos darnos una idea del estado actual de la diversidad de HECM a nivel local y regional.

Por lo tanto, este estudio es uno de los pocos trabajos realizados en México que contempla el efecto que tiene las diferentes variables abióticas y bióticas en la diversidad de esporomas de HECM en un ecosistema tan particular como son los bosques de *Pinus hartwegii*, además de que brinda información esencial para la implementación de estrategias para la conservación de dicha especie.

## 9. Conclusiones

El listado de morfoespecies fúngicas obtenido para el bosque de *Pinus hartwegii* de la ladera Norte del PNLN, comprende de 62 morfoespecies agrupados en 16 géneros. Todos los taxa identificados comprenden nuevos registros para la zona de estudio.

Respecto a la distribución de las morfoespecies de HECM en los diferentes pisos altitudinales, a los 3900 m se reportó el mayor número de morfoespecies con 62 (con dos géneros exclusivos), a los 3750 m fueron 50 morfoespecies (con tres géneros exclusivos), dichas altitudes comparten 40 morfoespecies.

La diversidad de obtenida para ambas altitudes no presentó diferencias significativas, sin embargo, la composición de especies y sus abundancias fueron diferentes.

La productividad (Kg) fue mayor a los 3900 m snm siendo *Cortinarius* aff. *caperatus* quien determino gran parte de ella, mientras que a los 3750 m nsm la productividad estuvo determinada por *Xerocomellus* sp.1 y *Cyanoboletus* aff. *pulverulentus*, cuyos esporomas son de complejión robusta.

De manera general se encontró que los esporomas de HECM están influenciados por la humedad ambiental, densidad del arbolado, área basal, el grado infestación por muérdago en los hospederos, el pH, el porcentaje de carbono orgánico, la porosidad y el contenido de arena.

De forma altitudinal a los 3900 m snm las morfoespecies como *Russula* aff *vinacea*, *Lactarius* aff *luculentus*, *Hygrophorus* aff *hypothejus*, *Cortinarius* aff *collinitus* y *C.* aff *caperatus*, y a los 3750 m snm las morfoespecies de *Cyanoboletus* aff *pulverulentus*, *Laccaria* aff *laccata*, *L. trichodermopora* y *Xerocomellus* sp. 1 juegan un papel importante en el mantenimiento del bosque de *P. hartwegii* del PNLN.

Este estudio constituye el primer trabajo que aborda el efecto de las variables macroecológicas sobre la comunidad de HECM asociada a *P. hartwegii*, contribuyendo al

conocimiento de esta asociación micorrízica en los bosques de alta montaña, lo anterior puede coadyuvar al planteamiento de estrategias para su conservación.

## 10. Perspectivas

Debido a factores endógenos y exógenos que determinan la productividad fúngica, se considera que los estudios que evalúen la diversidad de hongos impliquen tiempos prolongados de muestreo.

Evaluar la relación de la diversidad de HECM entre grados de perturbación antrópica.

Evaluar otros factores que puedan afectar la diversidad de HECM, como la temperatura y humedad edáfica, la comunidad microbiana, la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo.

Evaluar la diversidad de HECM a través de análisis moleculares.

Caracterizar morfológica y molecularmente la diversidad de HECM asociada a las raíces del arbolado.

## 11. Referencias

Ágreda T, Fernández M y Martínez F. 2010. Los hongos y el bosque. Principales especies, su ecología y aprovechamiento en Soria. Serie Técnica. Junta de Castilla y León. España.

Aguirre-Acosta, E, Ulloa M, Aguilar S, Cifuentes J y Valenzuela R. 2014. Biodiversidad de hongos en México. Revista mexicana de biodiversidad. 85: S76-S81.

Alexopoulos CJ y Mims CW. 1985. Introducción a la micología. Ediciones Omega. España.

Arnolds E. 1988. Status and classification of fungi communities. En: Barkman. (Ed.) Dependant plant communities. Sykora K.V. SPB Acad. Publ. Amsterdam. 153-165.

Arteaga Martínez B y Moreno Zárate C. 2006. Los Hongos Comestibles Silvestres De Santa Catarina Del Monte, Estado De México Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 12(2):125-131.

Baeza-Guzmán Y, Medel-Ortiz R y Garibay-Orijel R. 2017. Caracterización morfológica y genética de los hongos ectomicorrízicos asociados a bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz. Revista Mexicana de Biodiversidad. 88:41-48.

Bandala VM y Montoya L. 1993. Nuevos registros de hongos del Estado de Veracruz, V. Nuevos Aphylophorales y Agaricales. Revista Mexicana de Micología. 9:85-118.

Bonet-Lledós J. 1996. Efecto de la edad de la estación en la producción de hongos micorrízicos comestibles en masas de *Pinus sylvestris* L. Tesis de licenciatura. Universidad de Lérida.

Bowen GD. 1994. The ecology of ectomycorrhiza formation and functioning. Plant and Soil. 159:61-67.

Brundrett MC, Bougher N, Dell B, Grove T y Malajckuk N. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. Canberra: Australian Center of International Agricultural Research.

Brundrett MC. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*. 154:275-304.

Brunner I, Brunner F y Laursen GA. 1992. Characterization and comparison of macrofungal communities in an *Alnus tenuifolia* and an *Alnus crispa* forest in Alaska. *Canadian Journal of Botany*. 70(6):1247-1258.

Burrola-Aguilar C, Garibay-Orijel R y Argüelles-Moyao A. 2013. *Abies religiosa* forests harbor the highest species density and sporocarp productivity of wild edible mushrooms among five different vegetation types in a neotropical temperate forest region. *Agroforest Syst*. 87:1101-1115.

Cepero De García MC, Restrepo S, Franco-Molano AE, Cárdenas M y Vargas N. 2012. *biología de hongos*. Universidad de los Andes, Edición Uniandes

Colwell RK, Mao CX y Chang J. 2004. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology*. 85:2717-2727.

Colwell RK, y Coddington JA. 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society (Series B)*. 345:101-118.

Comandini O, Rinaldi AC y Kuyper TW. 2012. Measuring and estimating ectomycorrhizal fungal diversity: a continuous challenge. En: *Mycorrhizal: Occurrence in natural and restored environments*. Marcela Pagano. 165-200.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2013. Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl.

Deacon J. 2010. *Fungal Biology*. Reino Unido. Blackwell Publishing.

Delgado A, Villegas M y Cifuentes J. 2005. *Glosario ilustrado de los caracteres macroscópicos en Basidiomicetes con himenio laminar*. Las prensas de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Dighton J y Mason PA. 1985. Mycorrhizal dynamics during forest tree development. 117-139. En: Moore D, Castellano LA, Wood D y Frankland JC. Development biology of higher fungi. University Press Cambridge, Cambridge.

Domínguez NJA, Planelles R y Rodríguez BJA. 2004. Influencia de la micorrización con trufa negra (*Tuber melanosporum*) en el crecimiento, intercambio gaseoso y nutrición mineral de plántulas de *Pinus halapensis*. Invest. Agrar: Sist. Recur. For. 13(2):317-327.

Durall DM, Gamiet S, Simard SW, Kudrna L y Sakakibara SM. 2006. Effects of clearcut logging and tree species composition on the diversity and community composition of epigeous fruit bodies formed by ectomycorrhizal fungi. Canadian Journal of Botany. 84:966-980.

Ek del V y Boege K. 2012. Ecología y evolución de las interacciones bióticas. Editorial Fondo de Cultura Económica. México.

Estrada-Torres A, Galindo G, Hernández-Cuevas L y Rodríguez-Palma M. 1991. Análisis biogeográfico de los mixomicetos de un bosque de *Abies-Pinus* en el Volcán La Malinche, Tlax. in: Memorias del IV Congreso Nacional de Micología. Tlaxcala, Tlax. México. 64pp.

FAO. 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.

Fernández-Toirán L, Ágreda T y Olano JM. 2006. Stand age and sampling year effect on the fungal fruit body community in *Pinus pinaster* forests in central Spain. Botany. 84(8):1249-1258.

Fernández-Toirán, L, Agreda T, Agueda B y Martínez-Peña F. 2011. Manual para la gestión forestal en Castilla y León. Junta de Castilla y León, España.

Flores VO y Gerez P. 2004. Biodiversidad y conservación en México: Vertebrados, vegetación y uso del suelo. México: UNAM-CONABIO.

Flores-Rentería DY. 2010. El efecto de los hongos ectomicorrizógenos en las condiciones ecofisiológicas de plántulas de *Pinus hartwegii* Lind. y *Abies religiosa* (Kunth. Schltld. Et

Cham.): un enfoque para el análisis de la restauración de ambientes deteriorados en la Cuenca del Río Magdalena, D.F. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM, México, D.F.

Franco-Molano A, Vasco-Palacios A, López-Quintero y Boekhout. 2005. Macrohongos de la región del Medio Caquetá, Colombia. Universidad de Antioquia. Colombia.

Frank B. 1885. Ueber die auf Wurzelsymbiose beruhende Ernährung gewisser Bäume durch unterirdische Pilze. Baerichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft. 3:128-145.

García AA y González MS. 2003. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A.C. Comisión Nacional Forestal. México.

García J y Garza F. 2001. Conocimiento de los hongos de la familia Boletaceae de México. Ciencia UANL. 4(3):336-344.

Gardes, M., Bruns, T.D. 1996. Community structure of ectomycorrhizal fungi in a *Pinus muricata* forest: above- and belowground views. Canadian Journal of Botany. 74:1572-1583.

Garibay-Orijel R, Martínez-Ramos M y Cifuentes J. 2009. Disponibilidad de esporomas de hongos comestibles en los bosques de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Revista Mexicana de Biodiversidad. 80: 521-534.

Garza-Ocaña F, García Jiménez J, Estrada Castellón E y Villalón Mendoza H. 2002. Macromicetos, Ectomicorrizas y Cultivo de *Pinus culminicola* en Nuevo León. Ciencia UANL. 5(2):204-210.

Gernandt DS y Pérez-de la Rosa JA. 2014. Diversidad de Pinophyta (Coníferas) en México. Revista Mexicana de Biodiversidad. 85:5126-5133.

Goldmann K, Schöning I, Buscot and Wubet T. 2015. Forest Management Type Influences Diversity and Community Composition of Soil Fungi across Temperate Forest Ecosystems. Front. Microbiol. 6:1300.

Gómez M, Castellanos JF, Zamora-Martínez MC, Cano MA, Bravo E, Rodríguez G y Valdés M. 2002. Factores limitantes para la conservación del hongo blanco de ocote en Oaxaca. 173-177.

Gómez-Hernández M y Williams-Linera G. 2011. Diversity of macromycetes determined by tree species, vegetation structure and microenvironment in tropical cloud forests in Veracruz, Mexico. *Botany*.

Gómez-Reyes VM, Gómez-Peralta M y Terrón AA. 2011. Efecto de las variables ambientales sobre la biomasa de macromicetos ectomicorrízicos. *biológicas*. 13(1):70-76.

Gotelli KJ y Colwell RK. 2001. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecol. Lett.* 4:379-391.

Guillen G, Asensio S, Pérez M y Benavente V. 2004. Iniciación a la micología. *Revista de Educación del CPR de Toledo*. 6:98-132.

Guzmán G. 1998. Inventorying the fungi of Mexico. *Biodiversity and Conservation*. 7:369-384.

Hawksworth DL. 2001. The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revised. *Mycological Research*. 105:1422-1432.

Hawksworth FG. 1977. The 6 class dwarf mistletoe rating system. USDA. Gen. Tec. Rep. RM-48. Fort Collins CO. USA. 6p.

Hernández L. 1998. Evaluación de la productividad de los hongos comestibles silvestres en el Volcán La Malintzi, Estado de Tlaxcala. Tesis de Licenciatura en Biología Agropecuaria. Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Herrera T y Guzmán G. 1972. Especies de macromicetos citadas de México, III. Agaricales. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Micología* 6:61-91.

Herrera T. 2000. Hongos en peligro de extinción que habitan en México. *Revista sobre conservación y biodiversidad*. 9:13-14.

Honrubia M, Torres P, Diaz G y Cano A. 1992. Proyecto LUCDEME VIII. Manual para micorrizar plantas en viveros forestales. ICONA. España.

Jaramillo JDF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Jost L. 2006. Entropy and diversity. *Oikos*. 113:363-375.

Jumpponen A y Egerton-Warburton LM. 2005. Mycorrhizal fungi in sucesional environments: a community assembly, model incorporating host plant, environmental and biotic filters. En: Dighton J, White JF y Oudemans P (Eds.). *The fungal community. Its organization and role The ecosystems*. CRC Press. Boca Raton, FL. USA. 139-167 pp.

Kausrud L, Stige C, Vik JO, Økly RH, Høily K y Stenseth NC. 2008. Mushroom fruiting y climate change. *PNAS*. 105:3811-3814.

Kendrick B. 2000. *The Fifth Kingdom*. Third edition. Mycologue publications, Focus Publishing, U.S.A. 197-199.

Kernaghan G, Sigler L y Khasa D. 2003. Mycorrhizal and root endophytic fungi of containerized *Picea glauca* seedlings assessed by rDNA sequence analysis. *Microbial Ecology* 45:128-136.

Kong A y Estrada-Torres A. 1994. A new species of *Lactarius* from Mexico. *Mycotaxon*. 52:443-466.

Kong A. 1998. Ectomycorrhizal Agaricales from Tlaxcala, Mexico. *McIlvainea*. 13:13-24.

Kranabetter JM, Frieser J, Gamiet S y Kroeger P. 2005. Ectomycorrhizal mushroom distribution by stand age in western hemlocklodgepole pine forests of northwestern British Columbia. *Can J For Res*. 35:1527-1593.

Laganà A, Angiolini C, Loppi E, Salerni E, Perini C, Barluzzi C y Dominicis V. 2002. Periodicity, fluctuations and sucesions of macrofungi in fir forests (*Abies alba* Miller) in Tuscany, Italy. *For. Ecol. Mang*. 169:187-202.

Lakhanpal TN. 2000. Ectomycorrhizal an overview. En: *Mycorrhizal Biology*. Mukerji KG, Chamola BP, Single J. Kluwer Academic Plenum Publishers, USA. 101-118.

Lange M. 1978. Fungus flora in August. Ten years observations in a Danish beech wood district. Bot. Tidsskr. 73:21-54.

Largent DL, Johnson D y Watling R. 1977. How to identify mushrooms to genus III: microscopic features. 3rd ed. Eureka: Mad River Press Inc.

Last FT, Dighton J y Mason PA. 1987. Successions of sheathing mycorrhizal fungi. Trends in Ecology and Evolution. 2:157-161.

Leake J, Johnson D, Donnelly D, Muckle G, Boddy L y Read D. 2004. Networks of power and influence: The role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. Canadian Journal of Botany. 82:1016-1045.

Lodge D, Ammirati J, Dell, y Mueller G. 2004. Collecting and describing macrofungi.

López-Domínguez JC y Acosta R. 2004. Descripción del Parque Nacional Malinche. En: Fernández Fernández, J.A. y J.C. López-Domínguez. 2005. Biodiversidad del Parque Nacional Malinche Tlaxcala, México. Coordinación General de Ecología del Gobierno del Estado de Tlaxcala, México.

Martínez P. 2008. Producción de carpóforos de macromicetes epigeos en masas ordenadas de *Pinus sylvestris* L. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid, España.

Mason P, Last F, Palma J y Ingleby K. 1982. Ecology of some fungi associated with an ageing stand of birches (*Betula pendula* and *B. pubescens*). Ecology. 4:19-39.

Matteucci DS y Colma A. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C. 168 pp.

Meza-Ramírez DR. 2010. Estudio de los hongos ectomicorizógenos (Basidiomycetes) que se asocian a dos tipos de vegetación (Bosque de *Abies religiosa* y Bosque de *Pinus hartwegii*) de la Cuenca del Río Magdalena D.F. Tesis de Licenciatura en Biología Agropecuaria. Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Montoya EA. 2005. Aprovechamiento de los hongos silvestres comestibles en el Volcán La Malinche, Tlaxcala. Tesis de Doctorado en Ciencias. Facultad de Ciencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. 154 pp.

Montoya S, Gallegos J, Sucerquía A, Peláez B, Betancourt O y Arías D. 2010. Macromicetos observados en bosques del departamento de Caldas: su influencia en el equilibrio y la conservación de la biodiversidad. Boletín Científico. Museo de Historia Natural. 14(2):57-73.

Moreno CE, Barragán F, Pineda E y Pavón NP. 2011. Reanalizando la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. Revista Mexicana de Biodiversidad. 82:1249-1261.

Moreno CE. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA, Vol.1. Zaragoza.

Moreno G, Manjón JL y Álvarez-Jiménez. 2015. Los hongos y el cambio climático. Impactos y Vulnerabilidad. 129-135.

Mueller G, Bills G y Foster M. 2004. Biodiversity of fungi. Inventory and Monitoring Methods, Elsevier Academic Press. California. E.U.A.

Munsell Color. 1975. Munsell soil color charts. Baltimore: MacBeth Div.

NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Odum EP y Banett GW. 2006. Fundamentos de ecología. Thomson. 5ta edición. México.

Palanzón F. 2001. Setas para todos. Pirineos, península ibérica. Pirineo Huesca.

Pardavé DLM, Flores PL, Franco REV y Robledo CM. 2007. Contribución al conocimiento de los hongos (Macromicetos) de la Sierra Fría, Aguascalientes. Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. 37:4-12.

- Pazos A. 2007. Los hongos en el ecosistema. *Agrupación Micológica A Zarrota*. 2(6):1-18.
- Peay KG, Kennedy PG y Bruns TD. 2008. Fungal community ecology: a hybrid beast with a molecular master. *Bioscience*. 58:799–810.
- Perea-Estrada V, Pérez-Moreno J, Villarreal-Ruiz L, Trinidad-Santos A, Bauer Ma, Cetina-Alcalá V y Tijerina-Chávez L. 2009. Humedad edáfica, nitrógeno y hongos ectomicorrízicos comestibles en el crecimiento de pino. *Revista Fitotecnia*. 32(2):93-102.
- Perea-Estrada V. 2009. Ectomicorrizas, humedad y depósito de nitrógeno en pinos de invernadero y en bosques aledaños a la Ciudad de México. Tesis de Postgrado en Higrociencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México, México.
- Pérez-Moreno J y Read DJ. 2000. Mobilization and transfer of nutrients from litter to tree seedling via vegetative mycelium of ectomycorrhizal plants. *New Phytol*. 145:301-309.
- Pérez-Moreno J. y Read DJ. 2004. Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. *INCI*. 29(5).
- Perry JP. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Portland, Oregon, EUA. Timber Press.
- Peterson RL, Massicotte HB y Melville LH. 2004. *Mycorrhizas: Anatomy and cell biology*. National Research Council of Canada. Ottawa, Ontario, Canada.
- Pilz, D. y R. Molina. 2005. Inoculación controlada con hongos ectomicorrízicos en la producción de planta destinada a repoblaciones forestales: estado actual en España. 14(3): 419-433.
- Portillo CI. 2017. Estructura vertical y horizontal de bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional La Malinche: análisis de la regeneración natural y los factores que la afectan. Tesis de Licenciatura. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala.

Phillips, R. 1981. Mushrooms and other fungi of Great Britain & Europe, Pan Books. Inglaterra.

Ramírez-González A. 2006. Ecología: métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Ramos-Fernández A, López-Ramírez F, Flores-Estevez N y Jimenez-Montano M. 2015. Riqueza de hongos ectomicorrícicos presentes en un gradiente altitudinal y térmico en un bosque de *Abies* en Veracruz. En: Sánchez-Velásquez L, Pineda-López MR y Noa-Carrazana JC. 2015. Ecología, biotecnología y conservación del género *Abies* en Mexico. Editorial Académica Española.

Richard F, Millot S, Gardes M y Selosse MA. 2005. Diversity and specificity of ectomycorrhizal fungi retrieved from an old-growth Mediterranean forest dominated by *Quercus ilex*. *New Phytol.* 166:1011-1023.

Richard F, Monreau PA, Selosse MA y Gardes M. 2004. Diversity and fruiting patterns of ectomycorrhizal and saprobic fungi in an old-growth Mediterranean forest dominated by *Quercus ilex* L. *Canadian Journal of Botany.* 82:1711-1729.

Rinaldi AC, Comadini O y Kuyper TW. 2008. Ectomycorrhizal fungal diversity: separating the wheat from the chaff. *Fungal Diversity* 33:1-45.

Rojas GF. 2008. Consideraciones para el balance de carbono: evaluación del movimiento de biomasa en El Parque Nacional Malinche. Posgrado de Ciencias Biológicas. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Royo A. 1994. Reserva Ecológica "El Pedregal de San Ángel", ecología, historia natural y manejo. Universidad Nacional Autónoma de México.

Rosell RA. 1999. Materia orgánica, fertilidad de suelos y productividad de cultivos. *Proceed. XIV congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo.* Pucón, Chile.

Ruiz J. 2001. "El asombroso reino de los hongos". *Avance y perspectiva.* 20:275-281.

- Salgueiro JA. 2007. Hongos y setas: Tesoro de nuestros montes. Cálamo, Palencia.
- Salerni E, Lagaña A, Perini C, Loppi S y De Dominicis V. 2002. Effects of temperatura and rainfall on fruiting of macrofungi in oak forests of the Mediterranean área. *Israel Journal of Plant Sciences*. 50:189-198.
- Sánchez GA. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*. 14(1):107-120.
- Sánchez-Colín MJ. 2005. Microbiología, aspectos generales. Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México.
- Sandoval GI. 2010. Efecto de los hongos ectomicorizógenos en el crecimiento y supervivencia de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. Et Cham.): Un enfoque para la restauración de ambientes deteriorados en la Cuenca del Río Magdalena D.F. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias. UNAM, México, D.F.
- Santillán J. 1986. Elementos de Dasonomía. Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales. Chapingo México.
- Sarukhán J, Coleff P, Caravias J, Soberon J Dirso R, Llorente BJ, Halffeter G, González R, March I, Mohar A, Anta S y Maza J. 2009. Síntesis Capital Natural de México. Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comision Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Savoie, J. M., y M. L. Largeteau. 2011. Production of edible mushrooms in forests: trends in development of a mycosilviculture. *Applied Microbiology Biotechnology* 89:971-979.
- Schmit JP y GM Mueller. 2007. An estimate of the lower limit of global fungal diversity. *Biodiversity and Conservation*. 16:99-111.
- Segura G. 1997. the state of Mexico's forest resources. Management and conservation. Centro de Ecología. UNAM. Mexico.

Simard SW, Beiler KJ, Bingham MA, Deslippe JR, Philip LJ y Teste FP. 2012. Mycorrhizal networks: mechanisms, ecology and modelling. *Fungal Biology Reviews*. 26(1):39-60.

Singer R. 1986. *Agaricales in Modern Taxonomy*. 4a. ed. Koeltz Scientific Books, Koenigstein.

Smith B y Wilson J. 1996. A consumer's guide to evenness measure. *Oikos*. 76:70-72.

Smith JE, Molina R, Huso MMP, Luoma DL, McKay D, Castellano MA, Lebel R y Valachovic Y. 2002. Species richness, abundance and composition of hypogeous and epigeous ectomycorrhizal fungal sporocarps in young, rotation-age, and old-growth stands of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Cascade Range of Oregon, USA. *Can. J. Bot.* 80:186-204.

Smith ME, Douhan GW y Rizzo DM. 2007. Ectomycorrhizal community structure in a xeric *Quercus* woodland based on rDNA sequence analysis of sporocarps and pooled roots. *New Phytol.* 174:847-863.

Smith SE y Read DJ. 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. Third edition. Academic Press. San Diego-London.

Soberón, J. Y J. Llorente. 1993. The use of species accumulation functions for the prediction of species richness. *Conservation biology*. 7:480-488.

Stendell, E.R., Horton, T.R., Bruns, T.D. 1999. Early effects of prescribed fire on the structure of the ectomycorrhizal fungus community in a Sierra Nevada ponderosa pine forest. *Mycological Research*. 103:1353-1359.

Steubing L, Godoy R y Alberdi M. 2002. *Métodos de Ecología Vegetal*. Santiago: Editorial Universitaria. 345 pp.

Tedersoo L, Suvi T, Larsson E y Kõljalg U. 2006. Diversity and community structure of ectomycorrhizal fungi in a wooded meadow. *Mycological Research*. 110(6):734-748.

Tedersoo L, May TW y Smith ME. 2010. Ectomycorrhizal lifestyle in fungi: global diversity, distribution and evolution of phylogenetic lineages. *Mycorrhiza* 20:217-263.

Trappe JM y Luoma D. 1992. The ties that bind: fungi in ecosystems. En Carroll G y Wicklow DT. The fungal community-its organization and role in the ecosystem. Marcel Dekker. New York.

Trudell SA y Edmonds RL. 2004. Macrofungus communities correlate with moisture and nitrogen abundance in two old-growth conifer forests, Olympic National Park, Washington, USA. Canadian Society Journal of Botany. 82:781-800.

Taylor D L, Hollingsworth TN, McFarland JW, Lennon NJ, Nushbaum C y Ruesch RW. 2014. A first comprehensive census of fungi in soil reveals both hyperdiversity and fine-scale niche partitioning. Ecological Monographs. 84:3-20.

Vázquez MG. 2010. Estudio de la factibilidad para un mercado local de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca Valle de Bravo-Amanalco. Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.

Vázquez-Mendoza S. 2002. Estudio Fungístico de los Macromicetos de la Sierra Norte del Estado de Puebla. Tesis de Licenciatura E.N.C.B.-Instituto Politécnico Nacional. México.

Villanueva-Jiménez, E., M. Villegas-Ríos, J. Cifuentes-Blanco y H. León-Avenidaño. 2006. Diversidad del género Amanita en dos áreas con diferente condición silvícola en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Revista Mexicana de Biodiversidad. 77:17-22.

Villarreal H, Álvarez M, Córdoba S, Escobar F, Fagua G, Gast F, Mendoza H, Ospina M y Umaña AM. 2006. Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Segunda edición. Bogotá, Colombia.

Villarruel J y Cifuentes J. 2007. Macromicetos de la cuenca del Río Magdalena y zonas adyacentes, Delegación Magdalena Contreras, México, D.F. Revista Mexicana de Micología. 25:59-68.

Webster J y Weber R. 2007. Introduction to Fungi. Third edition. Cambridge University Press.

Whittaker RH. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*. 21: 213-251.

WMO. 2006. El Sistema Climático Global en 2006. World Meteorological Organization. 56:3.

Zamora-Martínez M, Alvarado-López C y Domínguez JM. 2000. Hongos silvestres comestibles de Tlaxcala. Parte I. INIFAP. Campo Experimental Tlaxcala. Folleto Técnico No. 21. Tlaxcala, Tlax. México.

Zamora-Martínez MA. 2010. El monitoreo de las poblaciones de macromicetos ectomicorrícicos y su relevancia en estudios ecológicos y el manejo sustentable. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

Zamora Morales B, Zamora-Martínez M, Nieto de Pascual Pola M y García Campusano F. 2018. Condiciones edáficas, abundancia y riqueza de hongos ectomicorrizógenos comestibles. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*. 9:48.

## 12. Anexos

Anexo 1. Abundancia de géneros de esporomas de HECM de forma mensual.

	Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Total
	3900	3750	3900	3750	3900	3750	3900	3750	3900	3750	3900	3750	3900	3750	
Albatrellus sp 1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Amanita aff rubescens	0	0	0	0	2	2	1	0	2	2	1	0	0	0	10
Amanita aff vaginata	0	0	3	1	4	1	3	0	3	3	0	0	0	0	18
Cantharellus aff cibarius	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	0	0	5
Clavulina aff cineria	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	3
Clavulina aff cristata	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	2	0	0	5
Clavulina sp 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Clavulina sp 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
Clavulina sp 3	0	0	0	0	0	0	1	1	7	0	1	0	0	0	10
Coltricia aff perennis	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	4
Cortinarius aff caperatus	0	0	1	0	24	1	20	0	7	1	4	0	4	0	62
Cortinarius aff collinitus	0	0	0	0	27	0	36	0	32	0	19	0	1	0	115
Cortinarius sp 1	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	1	0	0	0	6
Cortinarius sp 10	0	0	1	0	4	0	10	0	23	1	8	1	0	0	48
Cortinarius sp 11	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0	0	5
Cortinarius sp 12	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	1	0	0	0	6
Cortinarius sp 13	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	5
Cortinarius sp 14	0	0	0	0	6	0	6	0	22	0	13	2	0	0	49
Cortinarius sp 15	0	0	2	0	1	0	3	0	2	0	3	0	0	0	11
Cortinarius sp 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Cortinarius sp 2	0	0	0	0	6	0	32	0	21	0	4	0	0	0	63
Cortinarius sp 3	0	0	0	0	0	0	5	0	6	0	1	0	0	0	12
Cortinarius sp 4	0	0	1	0	3	0	8	0	21	0	7	1	1	0	42
Cortinarius sp 5	0	0	0	0	1	0	5	0	3	0	4	1	0	0	14
Cortinarius sp 6	0	0	1	0	6	0	5	0	3	0	1	0	0	0	16
Cortinarius sp 7	0	0	0	0	0	0	5	0	15	4	4	0	0	0	28
Cortinarius sp 8	0	0	0	0	0	0	6	1	4	0	0	0	1	0	12
Cortinarius sp 9	0	0	0	0	3	0	2	0	2	1	9	2	0	0	19
Cyanoboletus aff pulverulentus	0	0	0	2	0	8	0	14	0	17	0	23	0	0	64
Gyromitra aff infula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Hygrophorus aff hypothejus	0	0	0	0	0	0	32	0	24	0	7	0	0	0	63
Hygrophorus aff purpurascens	0	0	0	0	1	0	7	0	9	1	2	0	0	0	20
Hygrophorus sp 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Inocybe sp 1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3
Inocybe sp 10	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	4
Inocybe sp 11	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Inocybe sp 12	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	4
Inocybe sp 13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Inocybe sp 14	0	0	0	0	0	2	1	0	1	4	0	3	0	0	11
Inocybe sp 15	0	0	0	0	0	0	3	2	3	3	5	1	0	0	17
Inocybe sp 16	0	0	0	0	0	0	2	1	6	2	4	3	0	0	18
Inocybe sp 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Inocybe sp 2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	4
Inocybe sp 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Inocybe sp 4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
Inocybe sp 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	3
Inocybe sp 6	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	1	0	0	5
Inocybe sp 7	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	4	0	0	0	7
Inocybe sp 8	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	1	0	0	0	7
Inocybe sp 9	0	0	0	0	0	1	3	3	0	0	0	1	0	0	8
Laccaria aff laccata	0	0	0	0	2	1	6	4	11	19	4	12	0	0	59
Laccaria aff trichodermophora	0	0	0	3	3	2	1	4	11	9	8	5	0	0	46
Lactarius aff alnicola	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Lactarius aff badiosanguineus	0	0	0	0	0	0	4	0	13	3	2	3	1	0	26
Lactarius luculentus	0	0	1	0	29	7	74	10	124	22	68	17	3	0	355
Lactarius vinaceorufescens	0	0	0	0	2	0	7	10	24	17	8	23	0	0	91
Ramaria aff bonii	0	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5
Russula aff brevipes	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	0	0	4
Russula aff occidentalis	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	4
Russula aff vinacea	1	1	2	1	109	16	171	34	149	26	46	19	0	0	575
Russula sancti-pauli	0	0	0	0	0	1	3	3	1	3	1	1	0	0	13
Russula sp 1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2
Tricholoma aff moseri	0	0	0	0	2	0	1	0	2	0	0	1	0	0	6
Tricholoma aff pardrum	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Tricholoma aff portentosum	0	0	0	0	2	0	2	2	1	0	0	0	0	0	7
Tricholoma aff ustaloides	0	0	0	0	3	0	7	0	7	0	1	0	0	0	18
Tricholoma aff vaccium	0	0	0	0	2	0	16	0	10	0	3	0	0	0	31
Tricholoma aff virgatum	0	0	0	0	6	0	16	0	9	0	1	0	0	0	32
Tricholoma sp 1	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	4
Tricholoma sp 2	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5
Tricholoma sp 3	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Xerocomellus sp 1	0	0	0	1	0	0	0	8	0	34	0	6	0	0	49
Total general	1	1	12	8	256	44	525	111	612	189	255	136	11	0	2161

Anexo 2. Análisis de la variación de datos ecológicos, explicados por los 4 los componentes principales (eficiencia del 91.6 %).

Parámetros	Abreviatura	C1	C2	C3	C4
Riqueza	<b>RM</b>	0.7066	0.3001	<b>0.4359</b>	0.2406
Abundancia	<b>AM</b>	-0.8369	-0.3026	0.3748	0.1477
Biomasa	<b>BM</b>	-0.9123	-0.0246	0.3529	0.0913
Densidad de pinos	<b>DPT</b>	-0.2604	<b>-0.9492</b>	-0.1136	0.1107
Densidad de plántulas	<b>DP</b>	0.6101	-0.4156	0.3694	-0.0981
Densidad de juveniles	<b>DJ</b>	-0.4585	-0.3917	0.1621	<b>0.7559</b>
Densidad de adultos	<b>DA</b>	-0.0982	<b>-0.8971</b>	-0.2542	-0.2789
Área basal	<b>AB</b>	<b>-0.9231</b>	0.3263	0.007	-0.184
% de infestación sin riesgo	<b>%SR</b>	<b>-0.9484</b>	0.0916	0.2792	-0.0036
% de infestación leve	<b>%RL</b>	0.9165	-0.1015	-0.328	-0.0653
% de infestación severa	<b>%RS</b>	<b>0.9241</b>	-0.178	0.0476	-0.2241
% humedad ambiental	<b>%Ha</b>	-0.5095	0.4376	-0.731	0.0686
Temperatura	<b>Ta</b>	0.7885	-0.4675	-0.0922	0.002
pH del suelo	<b>pH</b>	0.4987	0.1502	<b>0.5066</b>	-0.607
Densidad aparente	<b>Da</b>	<b>-0.9178</b>	-0.1317	-0.1478	-0.1741
% de porosidad	<b>%P</b>	<b>0.9203</b>	0.1358	0.1415	0.172
% de materia orgánica	<b>%MO</b>	<b>0.9501</b>	-0.0418	0.05	0.031
% de carbono orgánico	<b>%CO</b>	<b>0.9504</b>	-0.0415	0.0504	0.0319
% de arcilla	<b>%Ar</b>	0.836	-0.1214	-0.2019	-0.021
% de limo	<b>%L</b>	0.8715	0.2424	-0.2241	0.3214
% de arena	<b>%A</b>	<b>-0.9338</b>	-0.1463	-0.1072	-0.2508