

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS



Casa abierta al tiempo

**“PTERIDOFITAS INDICADORAS DE ALTERACIONES
AMBIENTALES EN LA SIERRA NEVADA, TEXCOCO,
ESTADO DE MÉXICO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

P R E S E N T A

MA. LUCÍA RODRÍGUEZ ROMERO

CODIRECTORES DE TESIS:

Dra. Armida Letícia Pacheco Mota

Dr. José Alejandro Zavala Hurtado

ASESORA:

Dra. Mahinda Martínez y Díaz Salas

MÉXICO, D. F.

13 DE ABRIL DE 2011

El Doctorado en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma Metropolitana pertenece al Padrón de Postgrados de Excelencia del CONACYT y cuenta con el apoyo del mismo Consejo con el convenio PFP-20-93.

El jurado designado por la Comisión del Doctorado en Ciencias Biológicas de la
UAM (Unidades Cuajimalpa, Iztapalapa y Xochimilco)

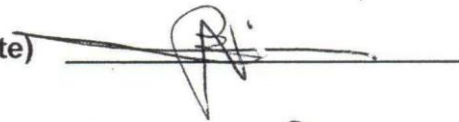
aprobó la Tesis que presentó

MA. LUCÍA RODRÍGUEZ ROMERO

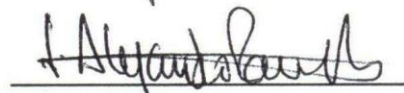
El día 13 de abril de 2011

Sinodales:

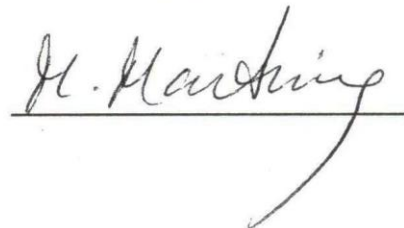
Dra. Armida Letícia Pacheco Mota (Presidente)



Dr. José Alejandro Zavala Hurtado (Secretario)



Dra. Mahinda Martínez y Díaz Salas (Vocal)



Dra. Alma Orozco Segovia (Vocal)



Dr. Pablo Corcuera Martínez del Río (Vocal)



COMITÉ TUTORIAL

Dra. Armida Letícia Pacheco Mota

Profesor Titular "C", Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. José Alejandro Zavala Hurtado

Profesor Titular "C", Universidad Autónoma Metropolitana

Dra. Mahinda Martínez y Díaz Salas

Profesor-Investigador, Facultad de Ciencias Naturales
Universidad Autónoma de Querétaro

SINODALES

Dra. Alma Orozco Segovia

Investigadora Titular "C", Instituto de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Pablo Corcuera Martínez del Río

Profesor Titular "A", Universidad Autónoma Metropolitana

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Biosistemática y Filogenia de Helechos y Licófitas, Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

Dedicatorias

A Eduardo Águila, mi motivación y orgullo

A Mercedes Romero y Aurelia Álvarez, por su ejemplo constante

A Juanita, Agustina, Reyna, Elisa, Juanchis y Ulayo por su apoyo incesante y cariño incondicional

A mis queridos abuelos Juan Rodríguez y Moisés Romero, *in memoriam*

A mi padre Antonio Rodríguez, *in memoriam*

A Ramón Riba, *in memoriam*



Agradecimientos

Agradezco a la Dra. Leticia Pacheco, al Dr. Alejandro Zavala y a la Dra. Mahinda Martínez y Díaz Salas por haber aceptado ser parte del Comité Tutoral, su constante labor crítica y útiles indicaciones hacia el presente trabajo de investigación. A la Dra. Alma Orozco y Dr. Pablo Corcuera por la revisión crítica y atinados comentarios al manuscrito. A Eduardo Águila, Juan Antonio Rodríguez y Eulalio Águila por su apoyo en el trabajo fotográfico y de campo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca recibida para la realización de mis estudios de doctorado en la UAM Iztapalapa

RESUMEN

Los helechos y licófitas tienen diversas estrategias reproductivas que las habilitan para invadir ambientes perturbados y áreas sin vegetación. En este trabajo se estudió la presencia, abundancia y estrategias reproductivas de helechos que crecen en suelos de bosques templados, en la Sierra Nevada, Estado de México.

Se eligieron cuatro áreas en las que se instaló un cuadrante permanente de 200 m² en cada una con el fin de registrar variables edáficas, ambientales y de vegetación. La relación entre helechos y variables edáficas se pudo explorar con análisis de varianza y Análisis Canónico de Correspondencia; la relación entre helechos y variables físicas y ambientales se pudo evaluar con un análisis discriminante, dando como resultado una clasificación definida por la presencia de especies de helechos en relación con el grado de alteración ambiental: baja, moderada y severa.

Se recolectaron cinco muestras de suelo en cada área para inducir la germinación de helechos y licófitas. Los resultados obtenidos revelaron una relación positiva entre el grado de alteración y la abundancia de *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata*.

En paisajes con baja alteración la riqueza de especies fue mayor comparada con paisajes de alteración severa, en los que la presencia de especies se redujo a *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata*, *C. purpusii*, y *Pellaea ternifolia*

subsp. *ternifolia*. Con base en lo anterior, se concluyó que *Cheilanthes marginata* o *C. bonariensis* y *C. marginata* indicaron que hubo un incendio forestal aunque éste ya no sea obvio.

Cheilanthes purpusii fue indicador de paisajes con alteración media y severa. Por otro lado, *Asplenium monanthes*, y *Cheilanthes lendigera* sólo estuvieron presentes en vegetación primaria. La abundancia relativa de *Cystopteris fragilis* y *Woodsia mollis* se incrementó en vegetación primaria y *Pleopeltis polylepis*, *Polypodium guttatum* y *P. thyssanolepis* fueron indicadores de condiciones edáficas.

El suelo fue un banco de esporas de *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* ya que las esporas permanecieron viables por diferentes intervalos de tiempo. La apogamia fue la estrategia reproductiva común para *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata* en ecosistemas alterados, aunque estas especies tuvieron reproducción sexual en ecosistemas naturales con suficiente agua. La apogamia puede estar relacionada con que la alternancia de generaciones se realice en menos tiempo, comparado con un ecosistema de baja alteración.

Palabras clave: alteración ambiental, apogamia, indicador, helechos y licófitas, Estado de México.

ABSTRACT

Ferns and lycophytes have different reproductive strategies that enable them to invade disturbed habitats and areas without vegetation. In this work, the presence, abundance and reproductive strategies of ferns that grow in soils of temperate forests in the Sierra Nevada, State of Mexico were studied.

Four areas were chosen, in each one a permanent quadrat of 200 m² was installed to record soil, vegetation and other environmental variables. The relationship between these variables was studied using variance analysis and Canonical Correspondence Analysis; the relationship between ferns and environmental variables was studied with Discriminant Analysis resulting in a classification defined by the presence of species of ferns in relation the degree of environmental change: low, moderate and severe.

Five soil samples in each area were collected to induce germination of ferns and lycophytes. Results showed a positive relationship between the degree of alteration and the abundance of *Cheilanthes bonariensis* and *C. marginata*.

In landscapes with low disturbance, species richness was higher compared to landscapes with severe disruption. In the later, species presence was reduced to *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata*, *C. purpusii* and *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*. Based on the foregoing it was concluded that *Cheilanthes marginata* or *C. bonariensis* and *C. marginata* indicated that there was a forest fire but it is not longer obvious.

Cheilanthes purpusii was an indicator of landscapes with moderate and severe disturbance, on the other hand, *Asplenium monanthes* and *Cheilanthes lendigera* indicate primary vegetation, the relative abundance of *Cystopteris fragilis* and *Woodsia mollis* also indicate primary vegetation and *Pleopeltis polylepis*, *Polypodium guttatum* and *P. thyssanolepis* were indicators of edaphic conditions.

The soil showed to be an effective bank of spores for *Cheilanthes* and *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* as their spores remained viable for different time intervals. Apogamy was a common reproductive strategy for *Cheilanthes bonariensis* and *C. marginata* in disturbed ecosystems; in despite of these species usually show sexual reproduction in natural ecosystems with adequate water availability. Apogamy may be related to the fact that alternation of generations takes place in less time, compared to landscapes with low environmental alteration.

Key words: apogamy, environmental alteration, ferns and lycophytes, indicator, State of Mexico.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
ANTECEDENTES	16
JUSTIFICACIÓN	25
HIPÓTESIS	27
OBJETIVO GENERAL	28
OBJETIVOS PARTICULARES	28
MÉTODOS	29
ÁREA DE ESTUDIO	29
Campo	29
Muestreo y trabajo de campo	33
HELECHOS Y LICÓFITAS	35
Recolección y siembra de esporas	35
Banco de esporas del suelo	37
RESULTADOS	41
Zonas	41
Helechos y licófitas	42
Siembra de esporas	46
Banco de esporas del suelo	48
DISCUSIÓN	57
CONCLUSIONES	67
PERSPECTIVAS	68
LITERATURA CITADA	69
ANEXO I. Zonas de estudio	77

ANEXO II. Banco de esporas del suelo	81
ANEXO III. Siembra de esporas	82
APÉNDICE I. Variables ambientales	83
APÉNDICE II. Variables edáficas	86
APÉNDICE III. Especies de helechos y licófitas reconocidas en campo en las zonas de estudio	87
APÉNDICE IV. Siembra de esporas de 24 individuos de helechos	88
APÉNDICE V. Presencia de gametófitos y esporófitos en el banco de esporas del suelo	89
APÉNDICE VI. Abundancia de especies de helechos en banco de esporas del suelo	90
APÉNDICE VII. Publicaciones: Rodríguez-Romero, M. L., J. A. Zavala-Hurtado & L. Pacheco. 2011. Presencia, abundancia y estrategias reproductivas de helechos en áreas alteradas de la Sierra Nevada, México. Rev. Biol. Trop. 59 (1):	91

INTRODUCCIÓN

Los helechos y licófitas son plantas vasculares cuyo ciclo de vida se divide en dos fases independientes: una generación dominante diploide llamada esporófito y una generación haploide llamada gametófito. El gametófito es verde, pequeño, frágil, vulnerable y dependiente de la cantidad de agua en el medio. En los helechos, los anteridios y los arquegonios se desarrollan en la cara ventral del prótalo. Los anteridios ordinariamente se observan antes que los arquegonios, sobre todo entre los rizoides. Los arquegonios generalmente se forman cerca de la escotadura, en el extremo anterior del gametófito (Raven *et al.* 1991).

Dentro de los anteridios se producen numerosos anterozoides que al ser liberados nadan hasta introducirse por el cuello del arquegonio. En la parte inferior del arquegonio la célula huevo se fecunda, diferencia y desarrolla hasta formar el esporófito. Por algún tiempo el esporófito depende del gametófito hasta que enraiza en el suelo y se hace independiente, es entonces cuando el gametófito se seca y muere (Raven *et al.* 1991). La fase sexual de los helechos tiene diferentes mecanismos de reproducción como son, autofecundación intra e intergametofítico, entrecruzamiento y apareamiento intergametofítico (Lloyd 1974).

Habitualmente la fase del gametófito es formadora de anteridios y arquegonios y la fase de esporófito produce esporas, sin embargo no siempre es así, en algunos individuos el ciclo de vida se modifica cuando presenta estrategias reproductivas como apogamia, aposporia, apomixis y propagación vegetativa llegándose a formar esporófitos y gametófitos adultos (Sheffield y Bell 1987).

ANTECEDENTES

La diversidad de helechos y licófitas del territorio mexicano corresponde a 1008 especies y 16 variedades o subespecies adicionales para un total de 1024 taxones distribuidas en 124 géneros (Mickel y Smith 2004). Para el estado de México, Tejero y Arreguín (2004) consideran aproximadamente 250 especies. Los helechos y licófitas se encuentran en la mayoría de hábitat ocupados por fanerógamas, excepto en los extremadamente áridos, siendo los helechos de climas húmedos los más abundantes en comparación con helechos de zonas secas en los que se incluyen principalmente *Cheilanthes*, *Notholaena* y *Pellaea* (Riba 1994).

Las esporas de los helechos son fácilmente dispersadas a grandes distancias por el viento. Su patrón de distribución no sólo va a depender de la dispersión anemócora sino también de la variabilidad genética, viabilidad de esporas, disponibilidad de un hábitat conveniente (Strasburger *et al.* 1993), tasa de crecimiento de gametófitos y esporófitos y estrategias reproductivas alternas como apogamia, aposporia, apomixis y propagación vegetativa

La apogamia es el desarrollo de esporófitos directamente de gametófitos en ausencia de singamia, ocurre de forma natural pero también puede ser inducida artificialmente en el laboratorio, cuando se priva de agua al gametófito o a través de niveles altos de luz (White 1979, Sheffield y Bell 1987, Farrar *et al.* 2008, Sheffield 2008). Aproximadamente un 10% de helechos y una desconocida proporción de licófitas presentan apogamia (Sheffield y Bell 1987).

El desarrollo de un esporófito a partir de células vegetativas de un talo gametofítico (apogamia) ocurre en menor tiempo que el de un esporófito de origen sexual (Rodríguez *et al.* 2008).

La apomixis se refiere a la formación de un embrión sin que medien procesos sexuales, cuando el embrión nace de un gameto femenino, el fenómeno apomíctico se denomina partenogénesis, para diferenciarlo de la apogamia, en donde las células que intervienen son vegetativas (Cocucci y Hunziker 1994).

El paso directo del esporófito al gametófito (aposporia), aunque no ocurre regularmente, produce gametófitos normales y funcionales, originando arquegonios y anteridios (Sheffield y Bell 1987).

La alta producción de esporas, la reproducción vegetativa por medio de yemas y la fragmentación del rizoma son mecanismos que favorecen a algunos helechos en su capacidad de expansión y abundancia lo cual explica su presencia y éxito colonizando espacios vacíos o perturbados como laderas taladas y bosques recientemente quemados (Zimmermann 1976, Margalef 1977, Strasburger *et al.* 1993, Dyer y Lindsay 1992, Rodríguez *et al.* 2008).

Los helechos y licófitas, como parte del sotobosque, comparten espacio físico con las angiospermas herbáceas. Rincón Gallardo (1991) menciona que aún no se ha determinado claramente su papel ecológico; sin embargo, para Page (1979) la diversidad de formas de vida de los helechos toma relevancia en los

diferentes tipos de vegetación. Las formas de crecimiento y habitat que muestran los helechos son, entre otras, epífitas, hemiepífitas, trepadoras, acuáticas y terrestres. Esta última es la más diversa en México (Strasburger *et al.* 1993, Pérez-García *et al.* 1995).

Las comunidades de helechos y licófitas cambian en el espacio y tiempo a causa de la variación en los factores físicos y biológicos, de tal manera que responden a estas variaciones en la medida en que sus rangos de tolerancia lo permiten, ejemplo de lo anterior son los diversos trabajos que se han realizado al respecto:

Wherry (1920) estudió las diferencias entre presencia y abundancia de ciertas especies de helechos, correlacionando parámetros edáficos como pH y contenido de calcio, presentando una clasificación edáfica de los helechos del noreste de Norteamérica; por ejemplo, a *Cystopteris fragilis* lo ubicó como helecho de suelo calcáreo, aunque tolerante a ciertas condiciones de acidez.

Kruckeberg (1964) relacionó a los helechos con suelos derivados de rocas de silicatos de hierro y magnesio, principalmente, en Washington, Oregon, California y Montana. Graves y Monk (1982) correlacionaron cuatro especies de helechos con parámetros edáficos de dos suelos de diferente material parental, mármol y esquistos de milonita en el norte de Georgia.

Valdés y Flores (1983) correlacionaron suelos yesosos o salinos con la presencia de helechos, teniendo como resultados catorce especies de helechos y licófitas que crecieron en suelos yesosos o salinos sódicos. De éstas, ninguna fue halófila obligada aunque dos son comunes en manglares, marismas salinos y lagunas costeras y de ocho especies yesófilas, tan sólo *Notholaena bryopoda* estuvo restringida a suelos yesosos y aparentemente es endémica del norte de México.

Por otro lado, Young y León (1989) hallaron 61 especies de helechos y licófitas en dos hectáreas, las cuales crecían en dos tipos de suelos contrastantes: arcilloso y arenoso.

Tuomisto y Ruokolainen (1994), estudiaron la diferencia en la abundancia de diversas especies de helechos y Melastomataceae correlacionándolas con condiciones de drenaje y acumulación de materia orgánica sobre la superficie del suelo.

Tuomisto y Poulsen (1996), investigaron la abundancia de helechos en ocho sitios en el oeste del Amazonas. Los autores dedujeron que estas plantas son buenas indicadoras de ciertas condiciones ecológicas y edáficas, que su patrón de dispersión es probablemente el reflejo de la disponibilidad de un hábitat conveniente que limita su dispersión y concluyeron que el grado de especialización en muchos helechos y licófitas es suficiente para justificar que se usen como indicadores de la fertilidad del suelo.

Tuomisto *et al.* (1998) vincularon la presencia y abundancia de especies de *Adiantum* con la topografía, textura y contenido de cationes, sugiriendo que los patrones de distribución a escalas locales y regionales permiten entender patrones biogeográficos.

El estudio de Rodríguez *et al.* (2008) relacionó la distribución de los helechos con características edáficas y con otros factores ambientales y sugieren que la apogamia puede estar relacionada con el tipo de suelo.

Los estudios anteriores demuestran que los helechos pueden servir como indicadores de condiciones ecológicas y edáficas y por lo tanto es posible realizar estudios de pteridoflora en la zona de montaña de Texcoco, la cual sirve de límite territorial con los estados de Puebla y Tlaxcala (INEGI 2000).

El sistema montañoso para el Valle de México es de vital importancia debido a que funciona como receptor de la recarga natural del acuífero a través de la lluvia y los escurrimientos superficiales (Cosío 2001). Los ecosistemas de bosques templados han sido desde siempre fundamentales para el abasto de agua en el Valle, sin embargo, actualmente los problemas de sobreexplotación de los bosques, deforestación, incendios, cambio de uso del suelo y técnicas agrícolas inadecuadas, han provocado serias alteraciones de las condiciones ecológicas en la Sierra Nevada (Cruickshank 1998).

El estado de México cuenta con importantes recursos forestales constituidos principalmente por bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto y bosque mesófilo de montaña, no obstante, el proceso de deforestación ha tenido efectos negativos entre los que destacan: la degradación de los suelos, disminución de los mantos acuíferos al alterarse el ciclo del agua, pérdida de la biodiversidad y aparición de plagas en diversas zonas boscosas del estado (GEM 1999).

En un periodo de nueve años (1993-2002) el Estado de México perdió 3836 ha de bosque de coníferas, 7295 ha de bosque de latifoliadas, 309 ha de bosque mesófilo de montaña y 2250 ha de bosque mixto, sumando un total de 13691 ha de pérdida de estas coberturas (Pineda *et al.* 2008).

La deforestación generalmente se visualiza como catalizador de la desaparición de áreas verdes, desecación de acuíferos y erosión de los suelos; en el contexto del municipio de Texcoco, al problema de la deforestación se suma el de los incendios forestales que han ido en aumento en los últimos años, un total de 57 incendios afectaron 4515 ha del año 2005 a 2009, siendo las principales causas el pastoreo, quemas agrícolas, cambio de uso del suelo, cazadores furtivos y paseantes (Hernández 2009).

Los incendios forestales traen beneficios a los ecosistemas debido a que reducen combustibles y regulan poblaciones. Tal es el caso de plantas con tallos modificados como bulbos, rizomas o macollos que las hacen resistentes por lo

que permanecen en el área, en cambio, las plantas de raíces superficiales o epífitas están propensas a desaparecer (Juárez y Cano 2007). Por otro lado, al eliminar fauna, microorganismos y flora, hacen que sea difícil su recuperación (Montoya 2004).

Los incendios causan cambios en el contenido de nutrimentos, puede cambiar la acidez del suelo, incrementar la temperatura a nivel del suelo y disminuir la humedad (Juárez y Cano 2007), además, los incendios provocan erosión en el suelo haciéndolo menos productivo con el consecuente azolve de cuerpos de agua y contaminación de la atmósfera (Montoya 2004).

La acelerada destrucción y degradación de los bosques de la Sierra Nevada va de la mano con la ausencia de conocimientos sobre el manejo de los recursos, incluyendo el de la biodiversidad, no sólo para su explotación sino también para mantener un adecuado nivel de conservación de los ecosistemas y de las especies. Para el manejo de los recursos forestales y biodiversidad es elemental tener el conocimiento de cómo están distribuidas las especies.

Noss (1990) definió como indicador biológico a la especie que aporta información sobre el estado del ecosistema, sensibles a las actividades humanas o aquellas que juegan un papel esencial en sus ecosistemas. Lindenmayer *et al.* (2000) propusieron siete definiciones alternativas de especie indicadora:

- Especie que revela la presencia de un conjunto de otras especies y cuya ausencia indica la falta de tal juego entero de especies.

- Especie cuya adición o sustracción a un ecosistema acarrea cambios sustanciales en la abundancia y ocurrencia de, por lo menos, una especie (especie clave).
- Su presencia indica cambios de condiciones abióticas causadas por el hombre, tales como contaminación del aire o agua (a menudo llamadas especies indicadoras de contaminación).
- Provee una parte sustancial de la biomasa o del número de individuos en el área (especie dominante).
- Indica condiciones ambientales particulares tales como ciertos tipos de suelos o de rocas.
- Por cambios en su abundancia o por su presencia o ausencia es capaz de dar la señal de alarma cuando ocurren cambios ambientales, tales como calentamiento global o modificación del manejo de incendios (a veces llamadas especies bioindicadoras).
- Refleja los efectos de un cambio en el régimen o en la eficacia de los esfuerzos empleados para mitigar los efectos de alteraciones del medio ambiente que hayan tenido lugar previamente.

Tuomisto y Ruokolainen (1998) reconocieron que es muy costoso y lento hacer un análisis directo tanto de características químicas de suelos como de la composición florística o faunística total del bosque, pero consideraron que, como todas las especies están adaptadas a crecer en algunas condiciones ambientales preferidas, entonces existe la posibilidad de utilizar la presencia de relativamente pocas especies elegidas como indicadoras de las condiciones ambientales.

Es por eso que plantearon que la manera más eficaz para reconocer especies indicadoras es concentrando estudios ecológicos en uno o pocos grupos de plantas preseleccionadas.

Los grupos deben ser fáciles de coleccionar e identificar en el bosque, tienen que ser relativamente comunes y poseer suficientes especies para poder presentar una variación grande de adaptaciones, pero no deben tener tantas porque la identificación como indicadoras se complicaría demasiado.

Concluyen aceptando que la mayor ventaja en el uso de especies indicadoras es que es un sistema rápido y barato, pero su limitación está en que da solamente una aproximación de las características ambientales.

JUSTIFICACIÓN

El grupo de helechos y licófitas terrestres son parte importante del sotobosque, cumplen con las precisiones propuestas por Tuomisto y Ruokolainen (1998). Igualmente, las especies de helechos (al igual que otras plantas) cuando son generalistas modifican su abundancia con base al grado de alteración, las especies ya establecidas, cuyo rango de tolerancia se encuentra restringido, disminuyen su abundancia o tienden a desaparecer del área y las especializadas crecen en condiciones bien definidas.

Por otro lado, los helechos y licófitas tienen características suplementarias como son, invadir y colonizar diversos tipos de vegetación y ambientes alterados ya que de una hoja fértil es posible obtener millones de esporas, resultan ser un material biológico útil porque se obtienen con facilidad y son de propagación y crecimiento rápido.

Por lo anterior, las poblaciones y comunidades de helechos presentan diversas ventajas para estudiarlas tanto en campo como en laboratorio, por ejemplo, es posible manipular comunidades de esporas y gametófitos recolectadas en sus sustratos naturales y cultivarlos en el laboratorio (Sheffield 1996) además, es factible conservarlos y propagarlos a nivel individual y poblacional, por lo que pueden aprovecharse para docencia, investigaciones y conservación de germoplasma.

Asimismo, las esporas, gametófitos y la mayoría de esporófitos son susceptibles de ser trasladados de campo a laboratorio para manipularlos *in vivo* y por tanto estudiarlos,

La presente investigación describe el cambio en la abundancia, presencia y estrategias reproductivas de poblaciones de helechos y licófitas, con énfasis en helechos que previamente han sido descritos como indicadores de perturbaciones ambientales: *Cheilanthes bonariensis* (Willd.) Proctor, *Cheilanthes marginata* Kunth, *Pellaea ternifolia* (Cav.) Link subsp. *ternifolia*, *Adiantum andicola* Liebm., *Adiantum poiretii* Wikstr., *Argyrochosma incana* (C. Presl) Widham y *Dryopteris pseudo filix-mas* (Fée) Rothm. (Rodríguez *et al.* 2008), los cuales crecen en diferentes tipos de suelo de bosques alterados de clima templado, en la Sierra Nevada, Municipio de Texcoco, Estado de México, con la suposición de que la apogamia está relacionada con el suelo alterado por la remoción de la vegetación y la entrada de mayor cantidad de luz. Asimismo, con base en los resultados, se preferirá como especies indicadoras a las especializadas de condiciones ambientales relacionadas con el alto, medio o bajo deterioro ambiental.

HIPÓTESIS

- Si bajo un mismo clima se presentan bosques con diferente tipo y grado de alteración, entonces las características edáficas, de incidencia de luz y humedad serán modificadas en distinto grado, ocasionando cambios en la presencia y abundancia de helechos y licófitas terrestres y por lo tanto, solamente las especies que son capaces de invadir y sobrevivir en ambientes alterados o vacíos serán las que se establezcan en ellos, siendo éstas las que se considerarán como indicadoras de alteraciones ambientales

- Si las especies colonizadoras de ambientes perturbados poseen estrategias reproductivas que les confieran ventaja sobre las ya establecidas, entonces éstas tenderán a ser desplazadas disminuyendo su abundancia o incluso desapareciendo del hábitat alterado.

OBJETIVO GENERAL

Identificar las especies de helechos y licófitas que crecen en la Sierra Nevada, Texcoco, Estado de México, como indicadores de alteración ambiental con base en la evaluación de sus patrones de presencia, abundancia, distribución y estrategias reproductivas

OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir las características del área de estudio diferenciadas por la baja, media y severa alteración ambiental.
- Determinar las especies de helechos y licófitas terrestres presentes en las áreas de estudio.
- Registrar variables edáficas y medioambientales que pueden ser relevantes para definir el grado de alteración ambiental.
- Describir los patrones de presencia-ausencia, diversidad y abundancia de los helechos y licófitas de las áreas de estudio.
- Evaluar si existe correspondencia entre el grado de alteración causado por deforestación con la presencia-ausencia y abundancia de helechos y licófitas.
- Conocer las estrategias reproductivas de helechos y licófitas que crecen en las áreas de estudio y que pueden ser considerados como indicadores de alteración ambiental.
- Analizar si existe afinidad en los sitios estudiados con las estrategias reproductivas que presentan los helechos y licófitas terrestres registrados en las áreas de estudio.

MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo se realizó en la Sierra Nevada, municipio de Texcoco, estado de México. El sistema orográfico de la Sierra, en Texcoco, se conforma de 29 elevaciones que van de los 2500 hasta 4100 m y pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI 2000, Cosío 2001). El clima es semi-frío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad C(E)(w2), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad C(w2) y C(w1) templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (García 1973). En el intervalo de 2600 a 3000 m de altitud, la precipitación anual es de 800 a 1100 mm (Cosío 2001). El tipo de suelo predominante es Andosol y en menor proporción Cambisol. La franja erosionada comprende montes y cañadas situados entre la Sierra Tláloc y el cerro de Tlaixpan (Cosío 2001). La vegetación consiste de bosques templados conformados por *Quercus*, *Pinus* y *Abies* que se ubican en la Sierra Quetzaltépetl y el Parque Nacional Zoquiapan (INEGI 2000).

Campo: Se realizó un recorrido prospectivo en la Sierra para identificar paisajes y alteraciones o perturbaciones evidentes, ubicar rasgos reconocibles como veredas rurales, cruces de camino, formas geográficas sobresalientes y tipos de vegetación. A partir de lo anterior se seleccionaron cuatro áreas de estudio (Fig. 1) tomando en cuenta tipo de vegetación, cobertura y densidad vegetal, además del grado de erosión, evidenciado por la formación y tamaño de cárcavas. La caracterización de las áreas se apoyó utilizando las cartas temáticas E14B31 del

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática a escala 1:50000 (INEGI 1998). Al mismo tiempo, se registraron datos generales de longitud, latitud y altitud con un geoposicionador Garmin GPS12XL, versión 2.01 (Fig. 2).

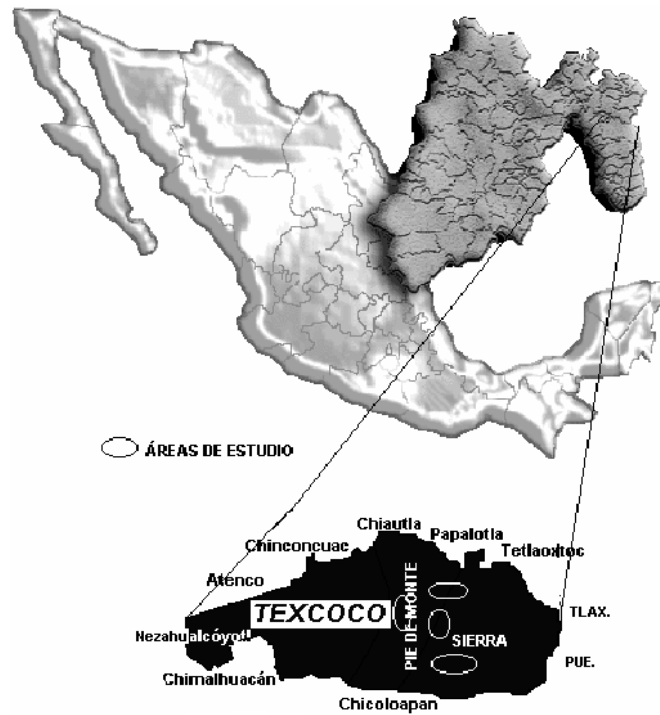


Figura 1. Localización del área de estudio.

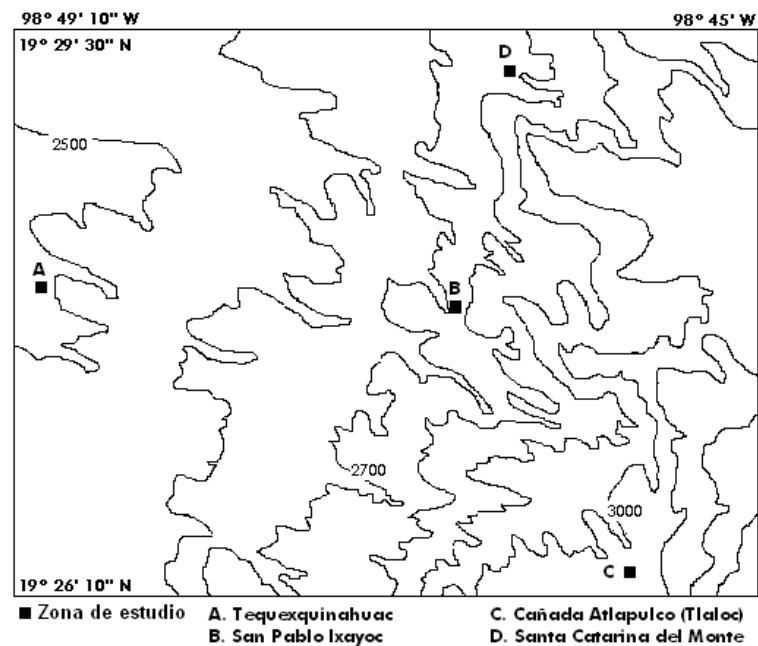


Figura 2. Mapa redibujado de la Carta Topográfica E14B31. (INEGI 1998).

Zona A. Tequexquihuac, ubicado a 19°28'08"N, 98°49'03"W y una altura promedio de 2512 msnm. La vegetación primaria es de cobertura discontinua y consiste de *Quercus* y *Juniperus* como estrato arbóreo más importante, con altura entre los 10 y 15 m. El estrato arbustivo está constituido por distintas especies de compuestas, gramíneas y leguminosas, además de individuos característicos de matorral cracicaule como *Opuntia*, *Mimosa* y *Acacia*. Los helechos y licófitas están ejemplificados por *Cheilanthes*, *Pellaea* y *Selaginella*. La vegetación secundaria consiste de bosques cultivados con *Pinus hartweggi* y *P. montezume*, con altura entre los 15 y 20 m, los arbustos de compuestas y gramíneas además de helechos terrestres representados principalmente por *Cheilanthes marginata*.

Zona B. San Pablo Ixáyoc, se localiza entre los cerros Tepechichilco y Cuacale, con altitud que fluctúa entre 2560 a 2650 msnm y está ubicado a 19°28'03"N, 98°47'06"W. El suelo es profundo, formado por aluviales de textura fina y las pendientes son pronunciadas. La zona está formada por bosque de *Quercus*, con altura promedio de 15 a 20 m, acompañados de especies de *Pinus*, *Abies* y *Cupressus*. El estrato arbustivo está constituido por especies de compuestas, lamiáceas y leguminosas. El estrato herbáceo se caracteriza por la presencia de gramíneas y leguminosas; además de plantas no vasculares en las que sobresalen las briofitas. La mayor diversidad de helechos se encuentra en ésta zona entre los que destacan *Adiantum*, *Asplenium*, *Cystopteris*, *Pellaea*, *Pleopeltis*, *Polypodium* y *Woodsia*.

La vegetación secundaria es el resultado de perturbaciones ambientales ocasionadas por tala de árboles e incendios. En éstos parches se pueden observar compuestas, gramíneas y helechos terrestres representados principalmente por *Cheilanthes*.

Zona C. Tláloc, se localiza entre las cañadas Atlapulco y Carcases en las faldas del Tláloc, a 19°26'10"N, 98°45'49"W, entre 2820 a 3000 msnm, el suelo es profundo, las pendientes son pronunciadas y la alteración al ecosistema no es evidente. El bosque se desarrolla en las partes altas de la Sierra, la especie dominante es *Abies religiosa*, pero también es posible observar *Pinus*, *Garrya* y *Buddleia*, en el estrato arbustivo los géneros más comunes son *Eupatorium*, *Senecio*, *Arctostaphylos*, *Baccharis*, *Stevia* y *Buddleia*. En el estrato herbáceo destacan las compuestas, gramíneas, leguminosas como *Lupinus*, igualmente los helechos terrestres tales como *Adiantum*, *Cystopteris*, *Dryopteris*, *Pleopeltis* y *Polypodium*. Los musgos y hongos son abundantes.

Zona D. Santa Catarina del Monte, ubicada a 19°29'09"N y 98°46'10"W, a una altura que oscila entre 2625 a 2671 msnm. La mayor parte de la zona contiene lugares con altos índices de perturbación revelándose por grandes cárcavas, producto de erosión severa. La cobertura vegetal es rala o extremadamente escasa, conformada principalmente por gramíneas y helechos terrestres como *Cheilanthes* y *Pellaea*. Por otra parte, existen pequeños parches de bosque de *Quercus* acompañados por especies de *Juniperus*.

El estrato arbustivo y herbáceo está constituido por distintas especies de compuestas, lamiáceas, gramíneas y leguminosas aunado a helechos terrestres de *Cheilanthes*.

Muestreo y trabajo de campo: En cada área seleccionada se marcó una parcela permanente de 200 m², excepto en la Zona A donde se instalaron dos cuadrantes permanentes de 100 m²; uno, en un área con características de matorral crasicaule pero también con encinos de talla baja (menos de 15 m), y el segundo, en una plantación de pino. En cada parcela se establecieron 20 subunidades de muestreo de un metro cuadrado cada una.

Se registraron otros parámetros medioambientales: la altitud se obtuvo con un altímetro Thommen Classic, la pendiente se midió utilizando un clisímetro de mano y una estaca con marca a la altura de los ojos del observador, situada a diez metros en el sentido de la máxima pendiente. La clasificación de inclinación se hizo con base a los criterios propuestos por la Food and Agriculture Organization (Siebe *et al.* 1996), la exposición del sitio (azimut) se calculó con una brújula magnética, F-5008 Brunton compass internacional 0-360 grados escala, en dirección de la máxima pendiente. La dirección geográfica de la exposición se obtuvo con el rumbo magnético, al quedar éste en alguno de los intervalos de clase (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO).

Las categorías calificativas de la cobertura vegetal se basaron en el método de descripción fisonómica de la vegetación de Heyligers, que utilizó para describir la vegetación las formas de vida, altura y cobertura, y de Küchler que tomó en cuenta formas biológicas básicas, características de las zonas de estudio y del sitio de muestreo (Granados y Tapia 1990). La categorización de exposición a la luz se hizo con base a la distancia en metros de la máxima pendiente, orientación geográfica y cobertura vegetal.

El tipo de vegetación se registró con base en la clasificación propuesta por Rzedowski (1978). El nivel de alteración se determinó visualmente considerando tipo de vegetación, cultivos o senderos cercanos, evidencias de incendio, desmonte y erosión resumiendo en tres categorías: alteración baja, moderada y severa (Cuadro 1).

En cada parcela se establecieron cinco subunidades de muestreo, cuatro de ellas en los vértices del cuadrante y una en el centro para extraer muestras de suelo, eliminando previamente el mantillo, de aproximadamente 500 g a una profundidad de 10 cm; las muestras se depositaron en bolsas de polietileno negro para su transporte a laboratorio.

El pH se midió en una suspensión de suelo y agua 1:25 con un potenciómetro digital Hanna Instruments HI 8314 de precisión ± 0.01 Ph, ± 1 mV / ± 0.4 °C, el valor de pH se comparó con el cuadro propuesto por Siebe *et al.* (1996). El porcentaje de materia orgánica se determinó con la técnica desarrollada por

Walkley y Black (1934) la cual consiste en la oxidación de materia orgánica utilizando una reacción con dicromato de potasio y ácido sulfúrico y el resultado se valoró con la clave propuesta por Siebe *et al.* (1996). La determinación de color del suelo en seco y húmedo se llevó a cabo utilizando las cartas de Munsell (Department of Agriculture 1998).

HELECHOS Y LICÓFITAS

Se colectaron ejemplares de helechos y licófitas terrestres conforme al método clásico (Lorea y Riba 1990). Al mismo tiempo, se anotó la presencia y abundancia de éstos en cada parcela. Se determinaron con base en la obra de Mickel y Smith (2004). El material de respaldo se depositó en el Herbario Metropolitano “Dr. Ramón Riba y Nava Esparza” (UAMIZ).

Recolección y siembra de esporas: Se colectaron hojas fértiles de 24 individuos presentes en las áreas de estudio y se depositaron en sobres de papel con el fin de separar las esporas de las hojas, por medio de un tamiz con malla de acero de 0.074 mm de abertura. Las esporas fueron sembradas en suelo estéril que fue depositado en vasos térmicos desechables de 120 cc.

Los cultivos se mantuvieron en condiciones de laboratorio con luz artificial (lámparas de luz blanca de 20 W), con un fotoperiodo de 12 horas luz-oscuridad y temperatura de 24-30 °C. Se revisaron semanalmente para conocer número de individuos y tiempo de germinación además de confirmar las estrategias reproductivas: se consideraron esporófitos de origen apogámico cuando el

gametófito formó un esporófito sin fusión sexual, es decir, no se observó presencia ni de anteridios ni arquegonios en todo el cultivo. El medio se humedeció cada semana con 10 ml de agua potable.

Se sembraron esporas de 24 individuos pertenecientes a 15 especies recolectados en las zonas de estudio en suelo franco, expuestas a un fotoperiodo de ocho y catorce horas luz. Se revisaron semanalmente para conocer tiempo de germinación y observar presencia de anteridios, arquegonios y la primera hoja del esporófito. El esporófito se consideró apogámico sólo cuando no se observó la presencia de ambos gametangios. El medio se humedeció cada semana con 10 ml de agua potable.

De igual manera, se sembraron esporas de 24 individuos pertenecientes a 15 especies recolectados en tres áreas, sin alteración aparente, alteración media y alteración severa en dos tipos de suelo, franco arcilloso y franco.

Los cultivos se mantuvieron con un fotoperiodo de 12 horas luz-obscuridad. Se revisaron semanalmente para conocer tiempo de germinación además de anteridios, arquegonios y la primera hoja del esporófito. El esporófito se consideró apogámico sólo cuando no se observó ambos gametangios. El medio se humedeció cada semana con 10 ml de agua potable.

También fueron sembradas esporas de 24 individuos de 15 especies distintas en suelo franco, expuestas a 12 horas luz-obscuridad. El medio se mantuvo húmedo semanalmente en cantidades distintas: 24 muestras con 10 ml y otras 24 con 30 ml de agua potable. Se registró el tiempo en el que fueron observados anteridios, arquegonios y la primera hoja del esporófito.

Banco de esporas del suelo: Cada una de las muestras de suelo se tamizó en el laboratorio con una malla de acero de 0.84 mm de abertura para separar gravas y restos vegetales, con el fin de depositar 75 g de suelo tamizado en vasos térmicos desechables de 120 ml adicionándoles agua suficiente para inducir la germinación. El porcentaje de germinación se calculó tomando en cuenta la cobertura de gametófitos en un diámetro de 7 mm. Se cubrieron con vasos de plástico transparente y se regaron cada semana con 10 ml de agua potable hasta obtener esporófitos.

Las muestras de suelo se revisaron semanalmente con el fin de contar los gametófitos y esporófitos en cada recipiente y se anotó la presencia de anteridios y arquegonios hasta que se dio la fase esporofítica. Se consideraron esporófitos de origen apogámico cuando no se observó presencia ni de anteridios ni arquegonios en todo el cultivo. Los cultivos se mantuvieron en condiciones de laboratorio con luz artificial (lámparas de luz blanca de 20 W), con un fotoperiodo de 12 horas luz-obscuridad y temperatura de 20-27 °C.

Se valoró, con un análisis discriminante, si existe una relación entre las especies de helechos más abundantes y las variables físicas y ambientales en noventa sitios de muestreo como procedimiento de clasificación. El análisis se realizó con el paquete NCCS, 2004.

Se evaluó la correspondencia entre presencia y abundancia de helechos y licófitas encontradas en las zonas de estudio con variables físicas y ambientales en noventa sitios, con un análisis de correlación multivariado.

Con el fin de analizar los patrones de distribución y abundancia de las 32 especies en 20 muestras y su relación con las variables medioambientales, se realizó un análisis multivariado de correlación canónica (Kovach 2004). De esta manera se pudo evaluar la importancia de cada una de las variables en la determinación de los patrones espaciales de las comunidades. El análisis se realizó con el paquete MVSP, versión 3.12 (Kovach 2004).

Se construyó una matriz de variables físicas y edáficas y otra que correspondió al número máximo de gametófitos y esporófitos, además del número de individuos por especie obtenidos al inducir germinación en 20 muestras de suelo. La evaluación estadística de germinación de esporas y la comparación estadística del número de esporófitos de origen apogámico entre áreas de estudio, se llevó a cabo con un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis (Spiegel & Stephens 2002), con un nivel de significancia de 0.95.

La comparación de la velocidad de germinación entre sitios de estudio se realizó considerando el número de gametófitos a los 21 y 50 días después de inducir su germinación y se evaluó mediante un análisis de varianza de dos vías. También se evaluó el cambio de generación de gametófito a esporófito en las esporas germinadas, es decir el número de gametófitos de 50 días y de esporófitos de hasta 65 días después de inducir germinación entre áreas de estudio, a través de un análisis de varianza de dos vías (Spiegel & Stephens 2002). Los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia de 0.95.

Cuadro 1. Variables ambientales

Variable	Categorías
Color del suelo	1. Gris 2. Pardo oscuro 3. Pardo 4. Pardo claro 5. Rosáceo 6. Amarillo
Textura	1. Franco arenosa (CA) 2. Franca (C) 3. Franco limosa fina (CLf) 4. Franco arcillo arenosa (CRA) 5. Franco arcillosa (CR) 6. Franco arcillo limosa (CRL) 7. Arcillosa (R)
Capacidad de infiltración del suelo (ml/segundo)	1. 0 - 1 2. 1.01 - 2 3. 2.01 - 3 4. 3.01 - 4 5. >4
pH	1. Moderadamente ácido (5.01-6) 2. Ligeramente ácido (6.01- 6.5) 3. Muy ligeramente ácido (6.6-<7) 4. Muy ligeramente alcalino (7.01-7.5) 5. ligeramente alcalino (>7.5-8)
Contenido de materia orgánica (%)	1. Muy baja (<1) 2. Baja (1-2) 3. Media (2.1-4) 4. Media alta (4.1-8) 5. Alta (8.1-15) 6. Muy alta (15.1-30) 7. Extremadamente alta (>30)
Pendiente (grados)	1. Moderadamente inclinado (2 - 5) 2. Fuertemente inclinado (5.1 – 10) 3. Escarpado moderado (10.1 – 15)

	<ul style="list-style-type: none"> 4. Escarpado (15.1 – 20) 5. Muy escarpado (>20)
Cobertura (%)	<ul style="list-style-type: none"> 1. Ausente, casi ausente (0 – 5) 2. Escasa, rala (6 – 25) 3. En manchones o en grupos (26 – 50) 4. Interrumpida, discontinua (51 – 75) 5. Continua o densa (76 – 100)
Exposición a la luz	<ul style="list-style-type: none"> 1. Extremadamente escasa 2. Escasa 3. Interrumpida 4. Luminosa 5. Muy luminosa
Relieve	<ul style="list-style-type: none"> 1. Montaña 2. Loma 3. Cañada
Nivel de alteración	<ul style="list-style-type: none"> 1. Vegetación primaria sin alteración (baja) 2. Vegetación primaria sin alteración aparente (baja) 3. Vegetación con alteración de bajo impacto (baja) 4. Reforestación (moderada) 5. Vegetación resultado de Incendio (moderada) 6. campo agrícola rodeado de vegetación (moderada) 7. Erosión inicial (moderada) 8. Erosión evidente, cobertura vegetal rala (severa) 9. Erosión evidente, cobertura vegetal ausente (severa) 10. Erosión con formación de carcavas, sin vegetación (severa)

Variables y categorías utilizadas en 80 sitios de muestreo y 20 muestras de suelo obtenidas en Tequexquihuac, San Pablo Ixáyoc, Tláloc y Santa Catarina del Monte

RESULTADOS

Zonas: Los resultados de este estudio indicaron la existencia de tres zonas con características diferentes: 1. Tláloc y parte de San Pablo Ixayoc, zona con ecosistemas de vegetación primaria sin alteración aparente y algunos parches con alteración de bajo impacto ocasionada por paseantes (alteración baja); 2. Tequexquihuac reforestada con *Pinus*, San Pablo Ixayoc con pequeños parches con evidencias de incendio o terrenos de cultivo en medio del bosque y Santa Catarina del Monte en parches con erosión inicial (alteración moderada); 3. Santa Catarina del Monte con erosión evidente hasta formar cárcavas (alteración severa).

La primera consistió de vegetación primaria de bosques de encinos, de oyamel y mixtos, cobertura densa y continua (Apéndice I), suelos profundos de color pardo oscuro o pardos y de textura franca, franco arcillosa limosa y franco limosa fina, pH de moderadamente ácido a ligeramente ácido (5.33-6.57), alto contenido de materia orgánica (Apéndice II) con excepción de parches con suelo arenoso y con baja alteración evidente, sobre todo en el Tláloc.

La segunda zona incluye parches con evidencias de incendios antiguos en San Pablo Ixáyoc, pequeños parches de vegetación primaria de *Quercus* en Santa Catarina del Monte y bosques cultivados por *Pinus* en Tequexquihuac. Los suelos son generalmente amarillos y moderadamente profundos; la textura del suelo fue diversa desde franco arenosa a franco arcillosa, el pH osciló de moderadamente ácido a ligeramente alcalino (5.3-7.6), el contenido de materia

orgánica fue de bajo a muy alto, la alteración evidente fue por reforestación en Tequexquahuac y erosión inicial en Santa Catarina del Monte, ya que los parches de vegetación primaria estaban rodeados de áreas erosionadas. En cambio, en San Pablo Ixáyoc la alteración consistió de parches con pruebas evidentes de incendios (Apéndice I y II).

La tercera zona en Santa Catarina del Monte, se caracterizó por alta degradación a lo largo de una amplia franja erosionada formando algunas veces profundas cárcavas; la cobertura vegetal fue muy escasa o inexistente, los suelos delgados, someros e incluso sin horizonte A cubiertos de hojarasca acarreada por el viento, el pH osciló de 5.18 a 5.58, predominaron los suelos de color pardo claro, la textura se compuso principalmente de arcillas y el grado de alteración fue muy alto destacando en este sentido la Zona D (Apéndice I y II).

Helechos y Licófitas: Se determinó un total de 31 especies de helechos y licófitas distribuidas en 15 géneros y 7 familias (Apéndice III). La familia con mayor número de especies fue Pteridaceae, seguida de Polypodiaceae y Woodsiaceae. El género con mayor frecuencia de especies y de individuos fue *Cheilanthes* con excepción de la Zona C en donde se observó únicamente *C. lendigera*, destacando por su presencia *C. bonariensis* y *C. marginata*, sobre todo en las áreas más alteradas.

Del total de 31 especies de helechos y licófitas, 29 estuvieron presentes en áreas de baja alteración y sólo 11 en áreas de alteración moderada o alta (Cuadro 2). El número total de individuos registrados en las zonas de estudio fue de 532, siendo la mayor abundancia relativa en las áreas de alteración media y severa (Fig. 3). *Asplenium monanthes*, *Cyopterus fragilis*, *Cheilanthes lundigeri* y *Dryopteris pseudofilix-mas* fueron exclusivos de áreas sin alteración y muy baja alteración evidente.

Pleopeltis y *Polypodium* que ordinariamente fueron observadas como epífitas o epipétricas pueden ser terrestres cuando en el suelo la cantidad de materia orgánica es alta y el pH ligeramente ácido, *Selaginella* sólo fue encontrado en la Zona A (Apéndice III). En cambio, en áreas alteradas por deforestación, erosión, incendio y reforestación aumentó considerablemente la abundancia relativa de *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* en comparación con áreas de vegetación primaria. Es necesario subrayar que en lugares en donde hubo incendios (San Pablo Ixayoc), destacó por su abundancia *Cheilanthes marginata*, en contraste, *Cheilanthes purpusii* sólo fue visto en Santa Catarina del Monte (Cuadro 2, Fig. 3).

Las muestras de gametófitos silvestres correspondieron a *Adiantum poiretti*, *Asplenium monanthes*, *Cheilanthes bonariensis*, *Cystopteris* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* y se recolectaron en las Zonas B y C, en la parte media de Tepechichilco y en la parte baja de la cañada Atlapulco (Cuadro 3).

Cuadro 2. Presencia y abundancia de helechos y licófitas terrestres registrados en 90 sitios de muestreo en Tequexquahuac, San Pablo Ixayoc, Tláloc y Santa Catarina del Monte, Texcoco, Edo. de México ordenados en áreas de nula o baja alteración evidente (no alterado) y de media o severa alteración (alterado).

Núm	Especie	Presencia		Abundancia	
		no alterado	alterado	no alterado	alterado
1	<i>Adiantum andicola</i>	1	0	1	0
2	<i>Adiantum capillus-veneris</i>	1	0	1	0
3	<i>Adiantum poiretii</i>	1	1	6	4
4	<i>Argyrochosma incana</i>	1	1	2	1
5	<i>Asplenium monanthes</i>	1	0	61	0
6	<i>Astrolepis crassifolia</i>	1	0	2	0
7	<i>Athyrium bourgeauii</i>	1	0	1	0
8	<i>Botrychium virginianum</i>	1	0	1	0
9	<i>Cheilanthes arizonica</i>	1	0	1	0
10	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	1	1	9	84
11	<i>Cheilanthes kaulfusii</i>	1	0	1	0
12	<i>Cheilanthes lendigera</i>	1	0	28	0
13	<i>Cheilanthes marginata</i>	1	1	22	134
14	<i>Cheilanthes marsupianthes</i>	1	0	13	0
15	<i>Cheilanthes membranacea</i>	1	0	1	0
16	<i>Cheilanthes myriophylla</i>	1	1	1	4
17	<i>Cheilanthes purpusii</i>	0	1	0	2
18	<i>Cheilanthes pyramidalis</i>	1	1	1	3
19	<i>Cystopteris fragilis</i>	1	0	46	0
20	<i>Dryopteris pseudofilix-mas</i>	1	0	6	0
21	<i>Pellaea cordifolia</i>	1	1	5	1
22	<i>Pellaea ovata</i>	1	0	2	0
23	<i>Pellaea sagittata</i>	1	0	1	0
24	<i>Pellaea ternifolia</i> subsp. <i>ternifolia</i>	1	1	1	10
25	<i>Pleopeltis polylepis</i>	1	0	7	0
26	<i>Polypodium guttatum</i>	1	0	2	0
27	<i>Polypodium thyssanolepis</i>	1	0	10	0
28	<i>Polystichum fourmieri</i>	1	0	1	0
29	<i>Selaginella lepidophylla</i>	1	1	1	29
30	<i>Selaginella sellowii</i>	0	1	0	18
31	<i>Woodsia mollis</i>	1	0	9	0
	Total	29	11	243	290

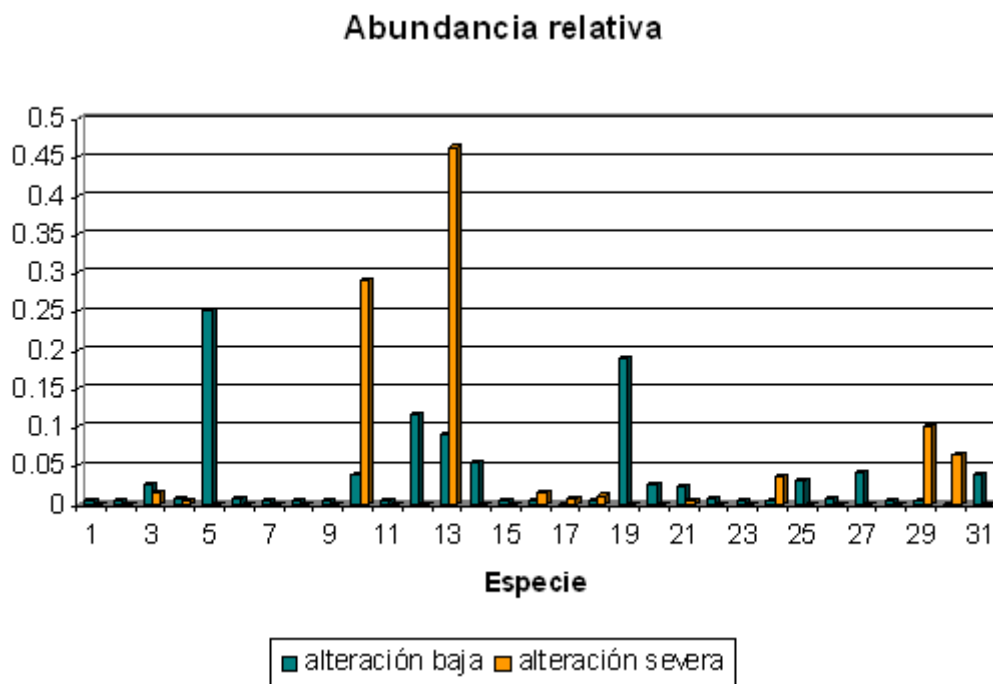


Figura 3. Gráfico que muestra la abundancia relativa de helechos y licófitas registrados en 90 sitios de muestreo en Tequexquihuac, San Pablo Ixayoc, Tláloc y Santa Catarina del Monte, Texcoco, Edo. de México ordenados en áreas de nula o baja alteración evidente (alteración baja) y de media o severa alteración (alteración severa). El número y nombre de la especie coincide con el Cuadro 2.

Cuadro 3. Gametófitos recolectados en zonas de estudio. Resultados a los 7 y 180 días después de haber recolectado gametófitos silvestres localizados dentro de la zona de estudio. Tepechichilco, San Pablo Ixáyoc y Atlapulco, Tláloc. **G c/g**, número de gametófitos con gametangios (anteridios y arquegonios) **E**, número de esporófitos.

Sitio	G c/g (7 días)	G c/g (180 días)	E (180 días)	Género
Tepechichilco	23	8	15	<i>Asplenium, Cheilanthes, Cystopteris</i>
Cañada Atlapulco	36	28	8	<i>Adiantum, Asplenium, Cheilanthes, Cystopteris, Pellaea</i>

Cuando se recolectaron los gametófitos silvestres se observaron anteridios y arquegonios y una semana después las primeras hojas del esporófito. Sin embargo, éstos no formaron esporangios después de tres años de estudio en *Cheilanthes bonariensis* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*; a diferencia de *Adiantum poiretti*, el cual presentó esporangios y esporas al final de los tres años. Los esporófitos de mayor talla (más de 15 cm de altura) fueron *C. bonariensis* y *P. ternifolia* subsp. *ternifolia*.

Siembra de esporas: La germinación de las esporas de 15 especies presentes en las zonas de estudio se obtuvo sólo en ocho 12 días después de haber sido este párrafo no se entiende sembradas en suelo franco, ya que se encontraban en las fases iniciales de formación de filamentos. Cinco especies alcanzaron la fase de esporófito: *Cheilanthes bonariensis*, *C. kaulfusii*, *Dryopteris pseudofilixmas* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* de origen sexual ya que fue posible observar anteridios y arquegonios, *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata* fueron apogámicos, el resto de las especies no alcanzaron la fase esporofítica o no germinaron (Apéndice IV).

De las 15 especies sembradas en condiciones de 8 o 14 horas luz, únicamente siete germinaron y alcanzaron la fase esporofítica. Los esporófitos de *Cheilantes bonariensis* fueron de origen sexual los cuales surgieron hasta 120 días después, y los que fueron expuestos a 14 horas luz dieron nacimiento a esporófitos de origen apogámico 50 días después de la siembra; *C. marginata* obtuvo esporófitos apogámicos con ocho horas luz y de origen singámico con 14 horas

luz, ambos con 80 días de edad; *C. pyramidalis* llegó a la generación esporofítica sólo en cultivos expuestos a 14 horas luz y fueron apogámicos; *C. myriophylla*, *Dryopteris pseudofilix-mas*, *Pellaea cordifolia* y *P. ternifolia* subsp. *ternifolia* desarrollaron esporófitos de origen sexual, el resto de las especies no germinaron o murieron antes de formar esporófitos.

Cuatro especies sembradas en suelo de textura franca arcillosa o franca fueron las que desarrollaron esporófitos: *Cheilanthes bonariensis* con esporófitos apogámicos, *C. marginata* esporófitos apogámicos, ambos entre 110 y 120 días en los dos tipos de suelo, *Dryopteris pseudofilix-mas* tuvo esporófitos después de que hubo singamia pero sólo después de 120 días en suelo franco y franco arcilloso y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* esporófitos apogámicos entre 70 y 80 días en suelo franco y singámicos entre 110 y 120 días en suelo franco arcilloso, el resto de individuos murieron antes de formar esporófitos.

Nuevamente sólo cuatro especies formaron esporófitos en medios de baja y alta humedad: *Cheilanthes bonariensis* tuvo esporófitos apogámicos pero en baja humedad hasta 120 días después de sembrados, en cambio en medio con alta humedad los esporófitos se formaron 50 días después de cultivados.

De igual forma, *C. marginata* en un medio con alta humedad los esporófitos surgieron entre 50 y 80 días.

Dryopteris pseudofilix-mas únicamente desarrolló esporófitos singámicos en medio de baja humedad, en alta humedad no hubo germinación; *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* en baja humedad tuvo esporófitos apogámicos entre 80 y 120 días pero en alta humedad murieron antes de desarrollar esporófitos.

Banco de esporas del suelo: La germinación y el desarrollo de gametófitos se encontró en 19 de las 20 muestras de suelo en las que se propició la germinación de esporas; la excepción fue la muestra C3. Fue posible observar a los primeros gametófitos en forma de filamentos a los 12 días. El mayor número fue en Santa Catarina del Monte y el menor en las áreas poco alteradas (Fig. 4). Los primeros esporófitos surgieron a los 50 días en la muestra obtenida en donde hubo evidencias de incendio (San Pablo Ixayoc), estos esporófitos fueron de origen apogámico (Apéndice V).

Generalmente la fase esporofítica inició entre 51 y 65 días, pero los gametófitos que les dieron origen no desarrollaron gametangios, por lo tanto fueron considerados apogámicos (Fig. 5). A los 65 días, en algunos gametófitos surgieron anteridios y arquegonios y después de 100 días de haber inducido la germinación se observaron esporófitos, probablemente de origen sexual (Apéndice V). Una situación diferente se observó en la muestra C2, en donde germinaron ocho individuos que permanecieron como gametófitos hasta después de un año y sólo después de 900 días, seis individuos completaron su ciclo, es decir, formaron esporangios.

En las 19 muestras de suelo que se estudiaron, germinaron 1538 individuos, de éstos 962 formaron esporófitos con 862 de origen apogámico. Los esporófitos encontrados en las muestras de A1, B2, C1, C2, C3 y C4 fueron de origen sexual, sin embargo, en donde hubo evidencias de incendio o alteración severa (muestras B4 y D1) el número de esporófitos apogámicos fue muy alto (389). Destaca la Zona C (Tlálóc) con el menor número de gametófitos y esporófitos; en contraste, la Zona D (Santa Catarina del Monte) tuvo el más alto registro de gametófitos y esporófitos de los cuales la mayoría fueron apogámicos.

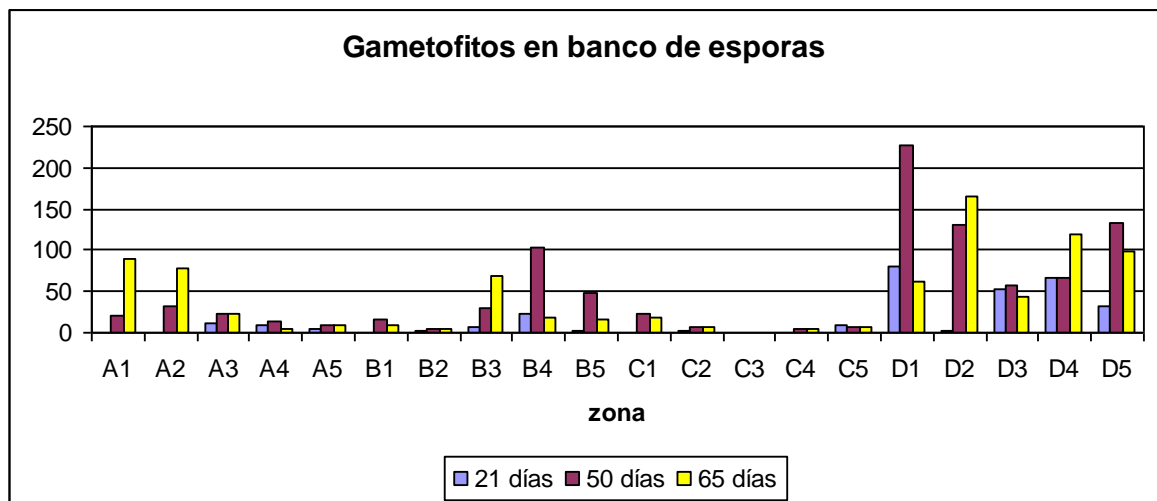


Figura 4. Número de gametófitos que germinaron en laboratorio en el banco de esporas del suelo a los 21, 50 y 65 días en las zonas de estudio. A, Tequexquihuac; B, San Pablo Ixayoc; C, Tlálóc; D, Santa Catarina del Monte.

Del total de gametófitos registrados en las 19 muestras, sólo 93 individuos (6.05%) sobrevivieron y completaron su ciclo al formar esporangios. El conjunto de muestras de la Zona A sumaron 31 individuos que sobrevivieron hasta formar esporas (Apéndice VI), destacando *Cheilanthes bonariensis* con 24 individuos.

En las Zonas B y D *Cheilanthes marginata* tuvo una mayor frecuencia con 13 y 15 individuos respectivamente mientras que en la Zona C la mayor frecuencia fue para *C. bonariensis* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* con seis individuos cada una.

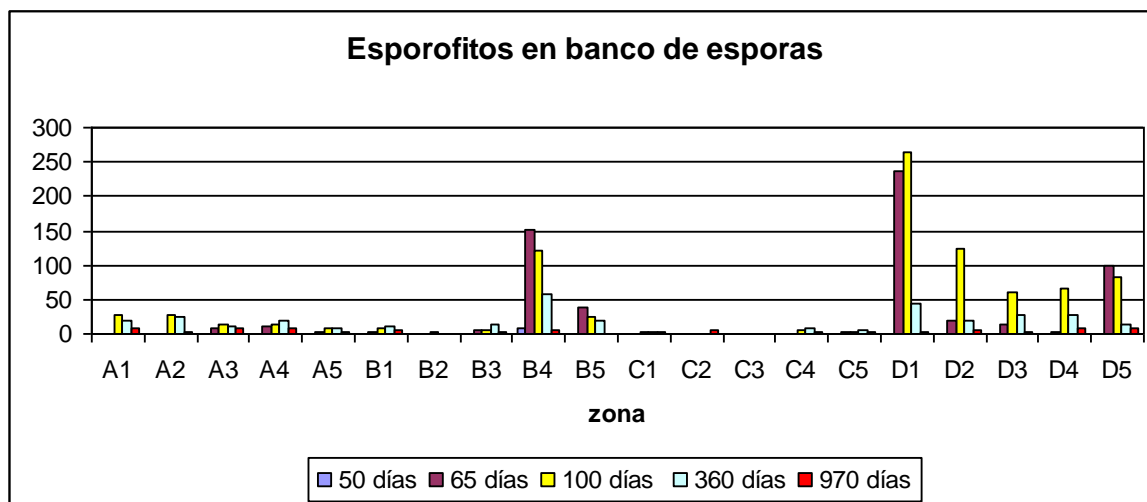


Figura 5. Número de esporófitos que se observaron en laboratorio en el banco de esporas del suelo a los 50, 65, 100, 360 y 970 días en las zonas de estudio. A, Tequexquahuac; B, San Pablo Ixayoc; C, Tláloc; D, Santa Catarina del Monte.

Por otro lado, en las cuatro áreas de trabajo se observaron 31 especies distintas de helechos y licófitas, pero en la muestra de suelo C4 se desarrolló la especie *Astrolepis integerrima*, la cual no había sido colectada durante los recorridos previos (Apéndice VI).

En resumen, del total de individuos que completaron su ciclo de vida en el banco de esporas de suelo, fueron *Cheilanthes bonariensis* 45.16%, *C. marginata* 31.18% y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* 11%.

El mayor número de gametófitos se observó en áreas alteradas, el surgimiento de la generación esporofítica fue precoz cuando se trató de esporófitos apogámicos (50-65 días) comparada con esporófitos de origen sexual (95-100 días). La diferencia en tiempo de germinación por zona fue significativa, ya que las esporas germinan en menor tiempo en áreas alteradas (12 días) comparadas con áreas de baja alteración (18-25 días). El número de esporófitos apogámicos tuvo diferencias significativas entre las zonas de estudio porque fue mayor en áreas alteradas y menor en áreas de baja alteración aparente (Cuadro 4).

Al analizar si existen diferencias significativas entre grupos, tomando en cuenta 17 especies que fueron las más abundantes en las áreas de estudio, con respecto a cinco variables ambientales se observaron tres grupos con una disimilitud de 1.05 (Fig. 6).

Los resultados del análisis discriminante (Cuadro 5) y el gráfico (Fig. 7) muestran tres grupos con respecto a las variables: filtración, luz, cobertura, relieve y alteración en las zonas de estudio.

Entre los 90 sitios de muestreo, la mayor correlación de siete variables físicas y ambientales correspondió a cobertura vegetal y grado de alteración (0.85), cobertura vegetal e incidencia de luz (0.78) y correlación negativa de 0.59 entre altitud e incidencia de luz, la correspondencia entre presencia y abundancia de helechos y licófitas terrestres fue de 0.66; la correspondencia entre altitud y cobertura fue -0.404.

En la Fig. 8 se observó que las variables con mayor correlación con los ejes de ordenación fueron materia orgánica (0.758), textura (-0.632), color (-0.550), incidencia de luz (-0.405), gametófitos (-0.262) y esporófitos (-0.226). En la muestra C2 se presentaron valores relativamente altos de materia orgánica, mientras que el resto de las muestras de este grupo presentaron valores más bajos. Por otro lado, las muestras de los grupos B y D revelaron niveles relativamente altos de alteración, de número de esporófitos y de número de gametófitos. Por su parte, las muestras del grupo A representaron niveles relativamente bajos de alteración, pH más básico y relativamente baja incidencia de luz.

Cuadro 4. Resultados de los análisis de varianza de una y dos vías tomando en cuenta el número de gametófitos de 21 y 50 días y el número de esporófitos apogámicos de 65 días después de inducir su germinación en 20 muestras de suelo recolectadas en cuatro áreas de estudio: Tequexquihuac, San Pablo Ixáyoc, Tláloc y Santa Catarina del Monte.

Gametófitos de 21 días entre zonas de estudio				
Fuente	Grados de libertad	Variación	Cuadrados medios	F calculada
Factor	3	6811.75	2270.583	8.71
Error	16	4172.8	260.8	
Total (ajustado)	19	10984.55		
Nivel de probabilidad: 0.001178*				
Número de esporófitos apogámicos entre zonas de estudio (prueba de Kruskal-Wallis)				
Método	Grados de Libertad	Ji – cuadrada (H)	Nivel de probabilidad	
Para tratamiento no corregido	3	9.254286	0.026094	
Para tratamiento corregido	3	9.578365	0.022512	
Velocidad de germinación al considerar el número de gametófitos de 21 y 50 días entre zonas de estudio (análisis de varianza de dos vías)				
Variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	Prob
Áreas= 40003.4	3	13334.4667	14.53	
Días (gametófitos)= 10562.5	1	10562.5	11.51	
Interacción= 7307.3	3	2435.76667	2.65	
Subtotal= 57873.2	7	8267.6	9.01	0.000004
Aleatoria o residual= 29362.4	32	9.17575		
Total= 87235.6	39			
Gametófitos de 50 días y esporófitos apogámicos de 65 días entre zonas de estudio (análisis de varianza de dos vías)				
Variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada	Prob
Áreas= 54937.075	3	18312.3583	7.22	
Días (gametófitos-esporófitos)=3330.625	1	3330.625	1.31	
Interacción= 3426.275	3	1142.09167	0.45	
Subtotal= 61693.975	7	8813.425	3.48	0.006996
Aleatoria o residual= 81156	32	2536.125		
Total= 142849.975	39			
Nivel de significación de $\alpha = 0.05$				

Cuadro 5. Resumen de los valores canónicos discriminantes de las variables: filtración, luz, cobertura, relieve y alteración con respecto a 17 especies en 90 sitios de muestreo dentro de cuatro zonas de estudio.

Sección de análisis canónico								
Fn	Valor de Lambda Inv(W)B	Porcentaje Ind	Porcentaje Total	Corr. Canon.	Valor-F	Denom DF	Prob DF	Nivel de Wilks
1	1.830792 0.069053	44.1	44.1	0.8042	2.5	95.0	325.7	0.0000
2	1.459292 0.195476	35.2	79.3	0.7703	1.9	72.0	265.8	0.0001
3	0.514530 0.480732	12.4	91.6	0.5829	1.1	51.0	203.3	0.2995
4	0.231545 0.728083	5.6	97.2	0.4336	0.7	32.0	138.0	0.8371
5	0.115242 0.896666	2.8	100.0	0.3215	0.5	15.0	70.0	0.9101
Los valores de las pruebas de F-si que están abajo son significativos								
Coeficientes canónicos								
Variable canónica aleatoria								
Variable	Variable aleatoria 1	Variable aleatoria 2	Variable aleatoria 3	Variable aleatoria 4	Variable aleatoria 5			
Constante	-0.636088	2.578667	2.598351	-3.440780	0.060201			
Filtración	0.461951	0.081800	-0.544049	-0.248644	-0.138775			
Luz	0.162021	-0.955087	-0.248666	1.051927	-0.822438			
Cobertura	0.144613	-0.255554	0.003421	-0.799306	0.759553			
Relieve	-0.549681	0.485935	-0.479489	1.269683	0.602169			
Alteración	-1.055306	-0.093952	-0.612109	-0.349764	-0.043234			

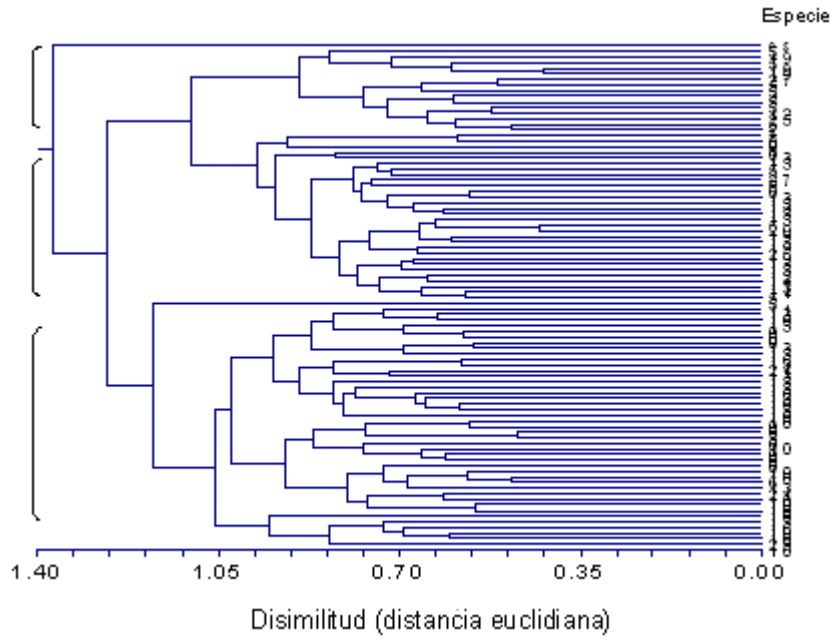


Figura. 6. Dendrograma que muestra la clasificación de 17 especies en 90 sitios de muestreo tomando en cuenta variables físicas y ambientales

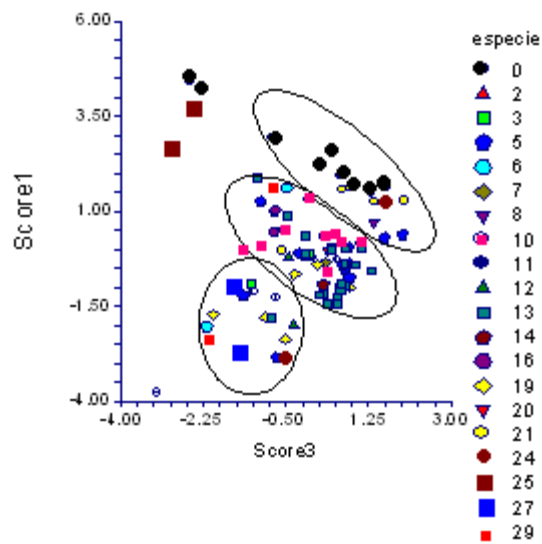


Figura. 7. Gráfico que muestra los grupos con respecto a las variables: filtración, luz, cobertura, relieve y alteración con respecto a la especie más abundante en 90 sitios de muestreo dentro de cuatro zonas de estudio. El número y nombre de la especie coincide con el Cuadro 2. Especie 0, ausencia de helechos.

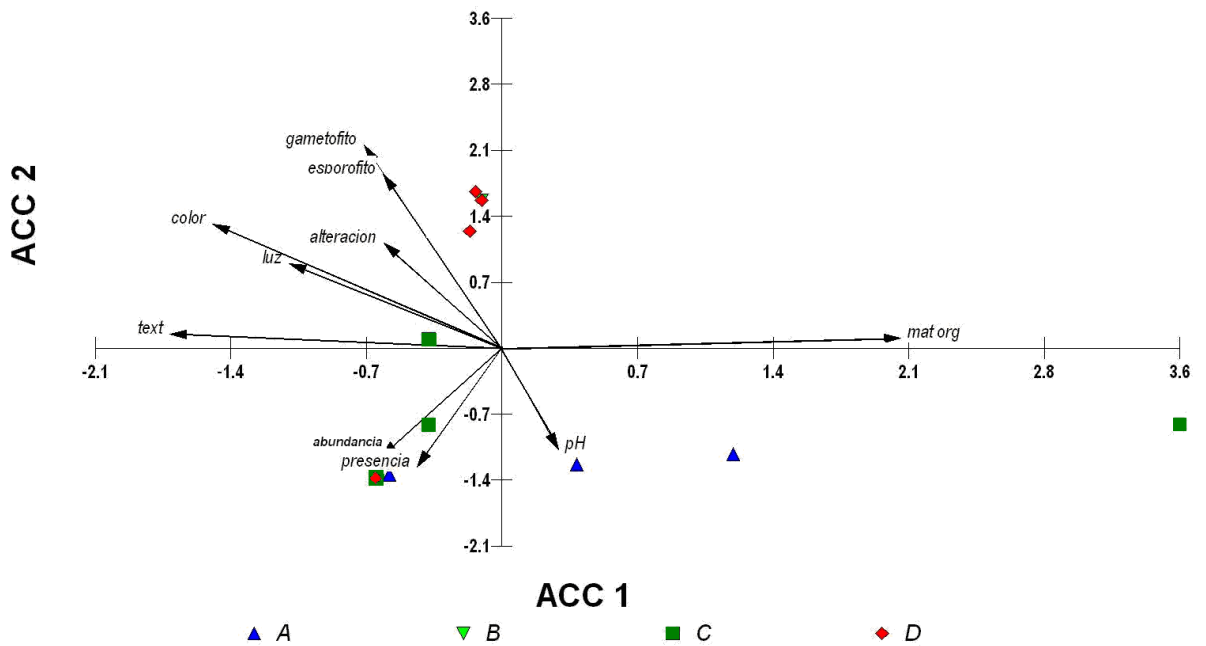


Figura. 8. Gráfico compuesto (dos vías) que muestra simultáneamente el espacio de ordenación definido por los dos primeros ejes extraídos por un Análisis de Correlación Canónica en la ordenación simultánea de la matriz de presencia-ausencia de 32 especies de helechos y licófitas y la matriz ambiental en 20 muestras dentro de cuatro localidades en la zona de estudio. Los vectores representan a las variables medioambientales más importantes en la determinación de la ordenación de las comunidades de helechos. Los símbolos indican las cuatro localidades muestreadas: ▲ A, Tequexquahuac; ▼ B, San Pablo Ixáyoc; ■ C, Tlálóc; ◆ D, Santa Catarina del Monte. Las muestras del sitio B se encuentran enmascaradas por las del sitio D.

DISCUSIÓN

Los resultados indicaron que la alteración negativa de ecosistemas de bosques primarios disminuye la diversidad de helechos, no obstante también favorece tanto la presencia como la abundancia de algunas especies de *Cheilanthes* en Santa Catarina del Monte, que fue la zona de mayor alteración, si bien cuando se manifiesta en forma de erosión severa la presencia no solo de helechos sino de otro tipo de plantas es escasa o nula.

Los helechos y licófitas terrestres son parte importante del sotobosque de ecosistemas templados de la Sierra Nevada del municipio de Texcoco, aún cuando los bosques han sido perturbados de alguna manera por cambio de uso del suelo, desmonte, incendios (Cruickshank 1998, Cosío 2001, Pineda *et al.* 2008, Hernández 2009) y otras acciones del hombre que se reflejan de manera dramática en la desertificación, sobre todo en Santa Catarina del Monte.

La intervención del hombre no siempre ha sido negativa, en los programas de reforestación implementados en Tequexquihuac a través de plantaciones de *Pinus* ha favorecido el incremento en la diversidad tanto de arbustos como de hierbas, incluyendo los helechos y especialmente la diversidad de *Cheilanthes* y *Pellaea*, es decir, están presentes especies que en el reciente estudio pueden calificarse como pioneras: *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* aparte de especies representantes de vegetación primaria como *C. kaulfusii*, *P. cordifolia* y *P. ovata*.

En los paisajes degradados de Santa Catarina del Monte se ha favorecido la abundancia relativa de *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*, *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata*, pero también destaca la presencia de *C. myriophylla*, *C. pyramidalis* y *C. purpusii*, este último sólo se registró en áreas alteradas, lo anterior no es raro si se toma en cuenta que ambos géneros son considerados por Riba (1994) como característicos de las zonas semiáridas del país. La mayor abundancia relativa se presentó en una sola especie, *Cheilanthes marginata* en áreas alteradas y aún se incrementó en áreas en la que han ocurrido incendios.

Por otra parte, en las áreas en la que todavía fue posible observar vegetación primaria caracterizada como bosques de encino, oyamel o mixtos, en los que la alteración no es evidente, se encontró la mayor diversidad, sobre todo en los bosques mixtos (*Quercus*, *Abies* y *Pinus*) de San Pablo Ixayoc. En estos bosques fue posible advertir *Adiantum andicola* y *A. capillus-veneris*, *Athyrium bourgeauii*, *Cheilanthes arizonica*, *C. marsuphiantes* y *Dryopteris pseudofilix-mas*; la mayor abundancia relativa de especies exclusivas de paisajes sin alteración aparente fue de *Asplenium monanthes*, seguido de *Cheilanthes lendigera* (Apéndice III).

A pesar de que *Cystopteris fragilis* y *Woodsia mollis* se mencionaron también en paisajes de alteración baja o moderada, su abundancia relativa se incrementa sustancialmente en vegetación primaria sin alteración aparente. Las formas de crecimiento y hábitat de helechos de *Pleopeltis* y *Polypodium* son epífitas, epipétricas y terrestres, ésta última representada en menor cantidad en bosques templados de *Quercus*, *Pinus*, *Abies* o mixtos. Las formas terrestres son

comunes siempre y cuando la vegetación sea primaria, en suelos pardos a pardo oscuro, de texturas francas, franco limoso fina o franco arcillo limosa, con pH moderadamente ácido a ligeramente ácido y con cantidad de materia orgánica de media alta a alta.

Con base a lo anterior, es posible afirmar que acciones de mejoramiento como la reforestación, propicia el incremento de la diversidad y regula la abundancia de dos o tres especies de helechos, de manera que conviven helechos de zonas semiáridas, templadas y algunos con características de pioneros como en Tequexquinahuac.

A *Cheilanthes purpusii* como ya se mencionó antes, sólo fue posible observarlo en paisajes alterados, por lo que se puede establecer que es indicador de este tipo de áreas, pero ¿qué caso tiene mencionar un indicador de perturbación ambiental cuando ésta es evidente? Podría parecer que ninguno; sin embargo, en los bosques templados de la Sierra Nevada de Texcoco no siempre es fácil reconocer la vegetación primaria de la que no lo es. A veces los manchones con matorral cracicaule como vegetación primaria son muy parecidos a los manchones con erosión inicial; en este sentido, si usamos como indicadora de alteración ambiental a *C. purpusii* nos dará una idea de que lo que estamos observando es un paisaje alterado y no uno cuyas características estén determinadas por condiciones físicas y ambientales.

Asimismo, un paisaje con poblaciones de helechos representados exclusivamente por *Cheilanthes marginata* o *C. bonariensis* y *C. marginata*, seguramente nos indican que hubo un incendio forestal aunque éste ya no sea obvio. De igual manera, la presencia de *Asplenium monanthes*, y *Cheilanthes lendigera*, o la abundancia relativa de *Cystopteris fragilis* y *Woodsia mollis* en comparación con otras poblaciones de helechos son indicadores de vegetación primaria (Apéndice III).

Helechos de formas terrestres de *Pleopeltis polylepis*, *Polypodium guttatum* y *P. thyssanolepis* son indicadoras de condiciones edáficas: la textura del suelo contiene limo, el pH es moderada a ligeramente ácido y el contenido de materia orgánica es alto.

En la Sierra Nevada el número de esporófitos de origen apogámico fue superior en suelo recolectado en las áreas alteradas por erosión, en Santa Catarina del Monte, y en suelo recolectado en áreas perturbadas por incendios en San Pablo Ixáyoc. Mickel y Smith (2004) mencionan que *Cheilanthes* presenta apogamia en muchas especies basándose en el número de esporas por esporangio. Sin embargo hasta ahora no se ha citado este tipo de estrategia reproductiva en estas condiciones medioambientales y para las especies que se estudiaron.

En contraste, en suelo de zonas con baja alteración, hubo menor número de esporófitos y éstos probablemente fueron producto de reproducción sexual por la presencia de anteridios y arquegonios.

En zonas no alteradas o con baja alteración como las que existen en San Pablo, en los bosques cultivados de Tequexquinahuac y en el Tláloc, hay mayor número de especies perennes y mayor cobertura vegetal; la exposición de la ladera es menor y el grado de humedad mayor, características propicias para el crecimiento y desarrollo de helechos en todo el año. Los gametófitos que provienen de estas zonas forman anteridios y arquegonios, produciendo más tarde esporófitos de origen sexual de *Adiantum*, *Asplenium*, *Cheilanthes* y *Cystopteris* (Cuadro 3).

En lugares de media a muy alta alteración, el desmonte, incendios o erosión propician la disminución de la cobertura vegetal o formación de “espacios vacíos”, que provoca mayor entrada de luz y disminución de la humedad, afectando de forma directa el sitio donde se depositan las esporas y por tanto el sitio donde se establecen los helechos y licófitas. El viento esparce no sólo esporas sino también partículas de suelo y materia orgánica, provocando degradación y modificando las condiciones de sombra y humedad.

El suelo de áreas alteradas funciona efectivamente como un depósito natural de esporas, sin embargo no todas tienen la capacidad de permanecer viables hasta que inicien las lluvias. Por ejemplo en *Cheilanthes marginata* y *C. bonariensis* solo presentó apogamia en estas condiciones, cuando vive en sitios no alterados la formación de esporófitos se lleva a cabo por vía sexual.

Por otro lado, Vázquez *et al.* (1997) describieron como un banco de semillas a aquel suelo que “está formado por las semillas viables no germinadas presentes en éste, ya sea enterradas, depositadas en la superficie o mezcladas en la capa de hojarasca y humus. Frecuentemente hay gran cantidad de semillas latentes en la mayoría de los suelos, su número depende de factores como la historia, la diversidad y la dinámica de la vegetación que cubre cada suelo”, de tal manera que si extrapolamos esta descripción podemos decir que el suelo es un resguardo natural que las esporas tienen (banco de esporas) hasta que lleguen las condiciones propicias para su germinación y desarrollo, que para climas templados es la temporada de lluvias entre junio y septiembre.

Las montañas de la Sierra Nevada permanecen ligeramente húmedas aun en la temporada de seca gracias a los manantiales, pequeños riachuelos e infiltración del agua de lluvia; en cambio en áreas erosionadas la humedad es escasa y por tanto, las esporas podrían formar parte del suelo prácticamente la mitad del año.

En este sentido se puede explicar la diferencia del número de gametófitos en las muestras de suelo recolectadas en áreas de baja alteración, como el Tláloc, en comparación con el número de individuos que germinaron en suelo de Santa Catarina del Monte. Si bien las esporas son llevadas por el viento, la mayoría queda a poca distancia del esporófito que les dio origen y podrían permanecer viables hasta que inicien las lluvias.

En San Pablo y Tláloc (altetración baja) es probable que las esporas inicien su germinación en cuanto llegan al suelo húmedo, eso explicaría el por qué sólo se encontraron gametófitos en los meses de seca en las cañadas de San Pablo y el Tláloc, por lo que en estos suelos no hay banco de esporas.

En cambio en parches de vegetación primaria rodeados de áreas erosionadas y en lugares con alto grado de degradación no fue posible observar helechos en generación gametofítica, pero sí un mayor número de esporas viables en el suelo.

Las esporas germinan hasta que inician las lluvias, así que durante el tiempo de seca en suelo de áreas alteradas, de baja humedad, erosionadas y expuestas por varias horas a la luz por la ausencia de cobertura vegetal, funciona como depósito de esporas, aumentando su número conforme avanza el tiempo.

Se ha observado que al inducir la germinación de esporas en muestras de suelo que han sido colectadas dos años atrás, aún se pueden obtener esporófitos de *Cheilanthes*, lo cual coincide con lo que Dyer (1994) sugiere para las esporas de otros helechos que llevan más de dos años de almacenamiento en el suelo.

Esto indica que quizá una ventaja adaptativa de *Cheilanthes* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* sea la capacidad de sus esporas a permanecer viables en el suelo por largos periodos de tiempo.

Page (1979) señaló que las especies de *Cheilanthes* con frecuencia crecen en suelo firme y duro, sobre todo en rocas ácidas de origen volcánico y sugiere que la causa es que sus hojas tienen una considerable resistencia a la desecación, por lo que se pueden desarrollar en zonas semiáridas. Tequexquinahuac y Santa Catarina, sin formar parte de zonas semiáridas, presentan características similares debido a la alteración y degradación a la que han sido sometidas, por ende la presencia y abundancia de *C. bonariensis*, *C. marginata* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* es posible tanto en estos ecosistemas como en las muestras de suelo.

Como *Cheilanthes* y *P. ternifolia* subsp. *ternifolia* en la generación esporofítica cuentan con hojas resistentes a la desecación, e incluso algunas especies tienen abundantes escamas que reducen la pérdida de agua, también pueden sobrevivir en condiciones de aridez y llegar a producir esporas, que en los meses de lluvia germinarán para dar inicio a la generación gametofítica.

Además, las esporas de *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata* formaron abundantes gametófitos y abundantes esporófitos antes que cualquier otra especie, pero son de origen apogámico (Apéndice VI). Windham y Rabe (1993) mencionan que *C. bonariensis* es apogámico para Norte América, en el caso de las plantas de la zona de estudio esta especie se comportó como apogámica sólo en sitios alterados.

En condiciones de laboratorio el desarrollo de un helecho es precoz, si en lugar de desarrollar gametangios pasa directamente a la generación de esporófito, sin embargo el ciclo no se completa hasta después de dos años, tiempo dos veces mayor que el requerido para un helecho que germina en un área alterada. Los esporófitos que se desarrollan en áreas alteradas alcanzan la madurez y completan su ciclo aproximadamente en un año y, por el contrario en laboratorio pasaron dos años sin que existan más cambios que su crecimiento.

Una situación diferente se presentó para *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*. Si bien hubo coincidencia con *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata*, en que son las especies que tienen esporas con mayor tiempo de viabilidad aun cuando permanecen por meses en el suelo y comparten espacio en áreas de alteración media a severa, después de germinar inician las diferencias.

El desarrollo del gametófito de *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* fue menos acelerado comparado con *Cheilantes* hasta formar gametangios después de tres meses de haber germinado, pero a los 400 días de edad estos individuos ya tienen esporangios aunque su talla no exceda los 15 cm, situación que también los hace exitosos en este tipo de ecosistemas debido a la terminación temprana de su ciclo de vida (Apéndice VI).

Los resultados indicaron que las áreas alteradas por erosión e incendios, son el medio propicio para que individuos de *Cheilanthes*, principalmente *C. bonariensis* y *C. marginata* invadan con éxito ambientes perturbados, colonicen espacios

vacíos ya que tienen una mayor tolerancia al sol y formen esporófitos en menor tiempo cuando son de origen apogámico o se desarrollen rápidamente, para así desarrollar esporas que den inicio a otro ciclo de alternancia de generaciones.

Por lo anterior se puede suponer que algunas especies como *Cheilanthes bonariensis* y *C. marginata* deben su éxito como invasoras de terrenos abiertos o como pioneras a la formación de esporófitos apogámicos ya que con esta estrategia su desarrollo es temprano, aprovecha la temporada de lluvias y los esporófitos son resistentes a mayor tiempo de incidencia de luz por tratarse de lugares abiertos.

Por lo tanto, el establecimiento exitoso de helechos y licófitas va a depender de la viabilidad de las esporas, de su germinación en sitios favorables y de tasas de crecimiento aceleradas en los gametófitos y esporófitos en sitios que son continua y regularmente alterados.

CONCLUSIONES

En la Sierra Nevada, la alteración de los ecosistemas ha modificado drásticamente la presencia y abundancia de helechos y licófitas, ya que aumenta el número de individuos de *Cheilanthes* en áreas alteradas pero disminuye la riqueza de especies, especialmente de aquellas que se reproducen sexualmente.

En bosques cultivados de *Pinus* aumenta la riqueza de especies aunque el tipo de especies es distinto comparado con bosque primarios.

Cheilanthes purpusii es indicador de paisajes con alteración moderada y severa.

Cheilanthes marginata o *C. bonariensis* y *C. marginata* indican que hubo un incendio forestal (alteración moderada) aunque éste ya no sea obvio.

Asplenium monanthes, y *Cheilanthes lendigera*, indican vegetación primaria o alteración baja en la Sierra Nevada.

La abundancia relativa de *Cystopteris fragilis* y *Woodsia mollis* también indican vegetación primaria y baja alteración.

Pleopeltis polylepis, *Polypodium guttatum* y *Polypodium thyssanolepis* son indicadores de condiciones edáficas: la textura del suelo contiene limo, el pH es moderada a ligeramente ácido y el contenido de materia orgánica es alto.

El suelo de áreas no alteradas o de baja alteración no es adecuado como resguardo de esporas de especies comunes del ecosistema, en cambio, el suelo en los que hubo desmonte, incendio o un claro proceso de erosión, es probable que sólo permanezcan viables esporas del género *Cheilanthes* y esporas de *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*.

La apogamia es probablemente una estrategia reproductiva exitosa para helechos del género *Cheilanthes* en ecosistemas alterados, porque el desarrollo es precoz y por tanto, la alternancia de generaciones se realiza en menos tiempo comparado con un ecosistema de baja alteración.

PERSPECTIVAS

La longevidad de las esporas, su fácil propagación, el tiempo relativamente pequeño en que pasa de la fase de gametófito a la de esporófito y su resistencia a la desecación de algunas especies de *Pellaea* y *Cheilanthes*, las hace potencialmente útiles para propagación, retención de suelo y restitución de cobertura vegetal en una primera etapa.

LITERATURA CITADA

- Cocucci, A. E. & A. T. Hunziker. 1994. Los ciclos biológicos en el reino vegetal. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, Argentina.
- Cosío, C. 2001. Panorama socioeconómico y demográfico de Texcoco. Indicadores para la planeación municipal. Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, México.
- Cruickshank García, G. 1998. Proyecto Lago de Texcoco. Rescate hidrológico. Comisión Nacional del Agua, México, D. F., México.
- Department of Agriculture. 1998. Munsell soil color charts. United States Department of Agriculture. Washington, D. C., EEUU.
- Dyer, A. F. 1994. Natural soil spore banks—can they be used to retrieve lost ferns? *Biodivers. Conserv.* 3: 160-175.
- Dyer, A. F. & S. Lindsay. 1992. Soil spore banks of temperate ferns. *Amer. Fern J.* 82: 89-122
- Farrar, D. R., C. Dassler, J. E. Watkins, Jr. & C. Skelton. 2008. Gametophyte ecology. Pp. 222-256. In T.A. Ranker & C.H. Haufler. (Eds.). *Biology and Evolution of Ferns and Lycophytes*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- GEM. 1999. Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México. Secretaría de Ecología. Toluca, México.
- Granados S., D. & R. Tapia V. 1990. Comunidades vegetales. Cuadernos Universitarios, Serie de Agronomía No. 19. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Graves, J. H. & C. D. Monk. 1982. Herb-soil relationships on lower north slope over marble. Bull. Torrey Bot. Club 109: 500-507.
- Hernández, O. A. 2009. Los incendios forestales en la Región III Texcoco, Estado de México durante el periodo 2005-2009. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- INEGI. 1998. Carta topográfica Chalco E14B31, escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2000. Cuaderno Estadístico Municipal de Texcoco, Estado de México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.

- Juárez O., S. & Z. Cano S. 2007. El cuarto elemento y los seres vivos. *Ciencias* 85: 4-12
- Kovach, W.L. 2004. MVSP—A MultiVariate Statistical Package for Windows, ver. 3.12. Kovach Computing Services, Pentraeth, Gales, Reino Unido.
- Kruckeberg, A. R. 1964. Ferns associated with ultramafic rocks in the Pacific Northwest. *Am. Fern J.* 54: 113-126.
- Lindenmayer, D. B., C. R. Margules & D. B. Botkin. 2000. Indicators of biodiversity for ecologically sustainable forest management. *Conservation Biology* 14 (4): 941–950.
- Lloyd, R. M. 1974. Reproductive biology and evolution in the pteridophyta. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 61: 318-331.
- Lorea, F. & R. Riba. 1990. Guía para la recolección y preparación de ejemplares para herbario de pteridofitas. Consejo Nacional de la Flora de México, México D. F., México.
- Margalef, R. 1977. *Ecología*. Omega. Barcelona, España.
- Mickel, J. T. & A. R. Smith. 2004. The Pteridophytes of Mexico. *Mem. New York Bot. Gard.* 88: 1-1054.

- Montoya, J. A. 2004. Los incendios forestales en el Estado de Chiapas. Memoria de experiencia profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Noss, R. F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology* 4: 355-364.
- Page, C. N. 1979. The diversity of ferns. An ecological perspective, p. 9-56. In: A. F. Dyer. (Ed.). *The experimental biology of ferns*. Academic editorial, Londres, Reino Unido.
- Pérez-García, B., R. Riba & I. Reyes-Jaramillo. 1995. Helechos mexicanos: formas de crecimiento, hábitat y variantes edáficas. *Contactos* 11:22-27.
- Pineda, N. B., J. Bosque, M. Gómez & W. Plata. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Boletín del Instituto de Geografía* 69: 33-52
- Raven, P. H., R. F. Evert & S. E. Eichhorn. 1991. *Biology of Plants*. Worth Publishers. New York.

- Riba, R. 1994. El Desarrollo de los estudios sobre pteridofitas de México. In: J. Llorente & J. Luna (eds.) *Taxonomía biológica*. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica. México, D. F.
- Rincón-Gallardo, P. E. 1991. Análisis estructural de la comunidad de helechos terrestres en una selva húmeda en "Los Tuxtlas", Veracruz, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., México.
- Rodríguez, L., L. Pacheco & J. A. Zavala. 2008. Pteridofitas indicadoras de alteración ambiental en el bosque templado de San Jerónimo Amanalco, Texcoco, México. *Rev. Biol. Trop.* 56: 641-656.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México, D. F. México.
- Sheffield, E. & P. R. Bell. 1987. Current studies of the pteridophyte life cycle. *Bot. Rev.* 53: 442-489.
- Sheffield, E. 1996. From pteridophyte spore to sporophyte in the natural environment. In: J. M. Camus, M. Gibby & R. J. Johns (eds.). *Pteridology in Perspective*, pp. 541-49.

- Sheffield, E. 2008. Alternation of generations, p. 49-63 In T. Ranker A. & C. H. Haufler (Eds.). *Biology and Evolution of ferns and Lycophytes*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Siebe, C., R. Jahn & K. Stahr. 1996. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Publicación Especial 4. Chapingo, Texcoco, México.
- Spiegel, M. R. & L. J. Stephens. 2002. *Estadística*. McGraw-Hill Interamericana. México D. F., México.
- Strasburger, E. F. Noll, H. Schenk & A. F. Schimper. 1993. *Tratado de botánica*. Omega. Barcelona, España.
- Tejero Díez, D. & M. L. Arreguín Sánchez. 2004. Lista con anotaciones de las Pteridofitas del Estado de México. *Acta Botán. Mex.* 69: 1-82.
- Tuomisto, H. & A. D. Poulsen. 1996. Influence of edaphic specialization on pteridophyte distribution in neotropical rain forests. *J. Biogeography* 23: 283-293.
- Tuomisto, H., A. D. Poulsen & R. C. Moran. 1998. Edaphic distribution of some species of the fern genus *Adiantum* in western Amazonia. *Biotropica* 30: 392-399.

- Tuomisto, H. & K. Ruokolainen. 1994. Distribution of pteridophyta and Melastomataceae along an edaphic gradient in an Amazonian rain forest. *J. Veg. Sci.* 5: 25-34.
- Tuomisto, H. & K. Ruokolainen. 1998. Uso de especies indicadoras para determinar características del bosque y de la tierra. *In: R. Kalliola & S. Flores Paitán (Eds.). Geoecología y desarrollo amazónico, estudio integrado en la zona de Iquitos, Perú. Annales Universitatis Turkuensis* 114: 481-491.
- Valdés, J. & H. Flores. 1983. Las pteridofitas en la flora halófila y gipsófila de México. *Serie Botánica. An. Inst. Biol. Univ. Nal. Autón. México* 54: 173-188.
- Vázquez, C., A. Orozco, M. Rojas, M. E. Sánchez & V. Cervantes. 1997. La reproducción de las plantas: semillas y meristemas. *Ciencia* 157. Fondo de Cultura Económica. México, D. F., México.
- Walkley, A. & I. A. Black. 1934. An examination of the Detjareff method for determining soil organic matter and propose modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wherry, E. T. 1920. The soil reactions of certain rock ferns –II. *Amer. Fern J.* 10: 45-52.

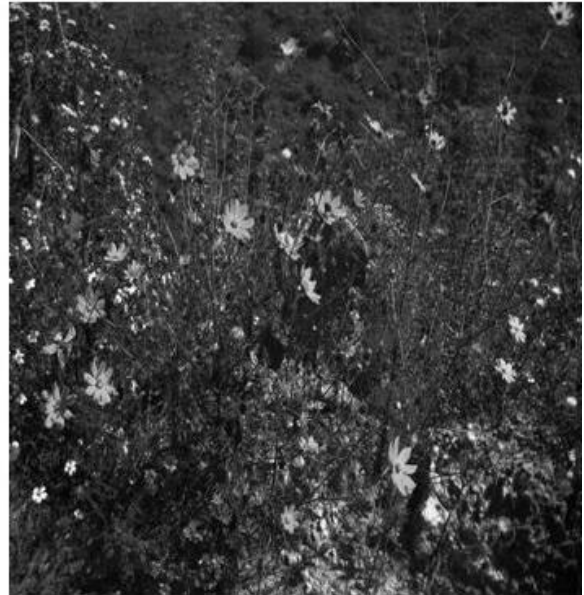
- White, R. A. 1979. Experimental investigations of fern sporophyte development, p. 505-549. In: A. F. Dyer (Ed.). The experimental biology of ferns. Academic editorial?, Londres, Reino Unido.
- Windham, M. D. & E. W. Rabe. 1993. *Cheilanthes*. Pp: 152-170. In N.R. Morin (Ed.) Flora of North America North of Mexico. Oxford University Press, Nueva York, EEUU.
- Young, K. R. & B. León. 1989. Pteridophyte species diversity in the Central Peruvian Amazon: importance of edaphic specialization . *Brittonia* 41(4): 388-395.
- Zimmermann, W. 1976. Evolución vegetal. Omega. Barcelona, España.

Anexo I. Zonas de estudio

Tequexquihuac



a)



b)



c)



d)

Zona A. Tequexquihuac. **a)** *Pinus* cultivados; **b)** *Opuntia* y compuestas;
c) *Pellaea cordifolia* y *Cheilanthes bonariensis*; **d)** *Cheilanthes bonariensis*
y *C. myriophylla*

San Pablo Ixáyoc



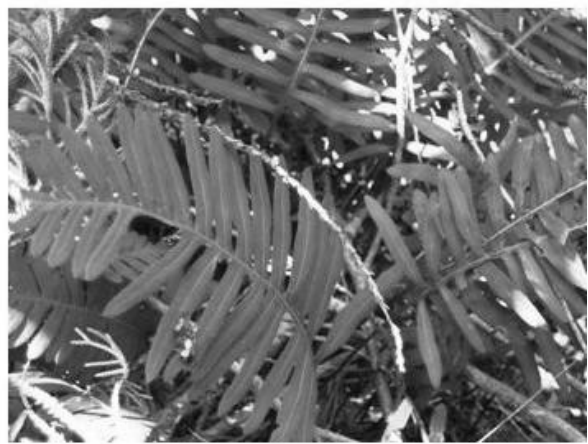
a)



b)



c)



d)

Zona B. San Pablo Ixayoc. **a)** Bosque de *Quercus*; **b)** Sotobosque; **c)** *Adiantum poiretii* y *Cystopteris fragilis*; **d)** *Polypodium thyssanolepis*

Tlálloc



a)



b)



c)



d)

Zona C. Tlálloc. a) Bosque de *Abies*; **b)** Sotobosque; **c)** *Pleopeltis polylepis* y *Polypodium thyssanolepis*; **d)** *Dryopteris pseudofilix-mas*

Santa Catarina del Monte



a)



b)



c)



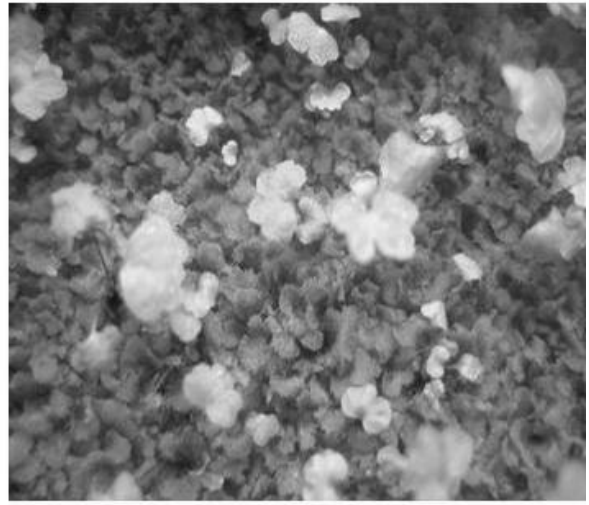
d)

Zona D. Santa Catarina del Monte. **a)** Erosión inicial; **b)** Erosión media;
c) *Adiantum poiretii*; **d)** *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*

Anexo II. Banco de esporas del suelo



a)



b)



c)



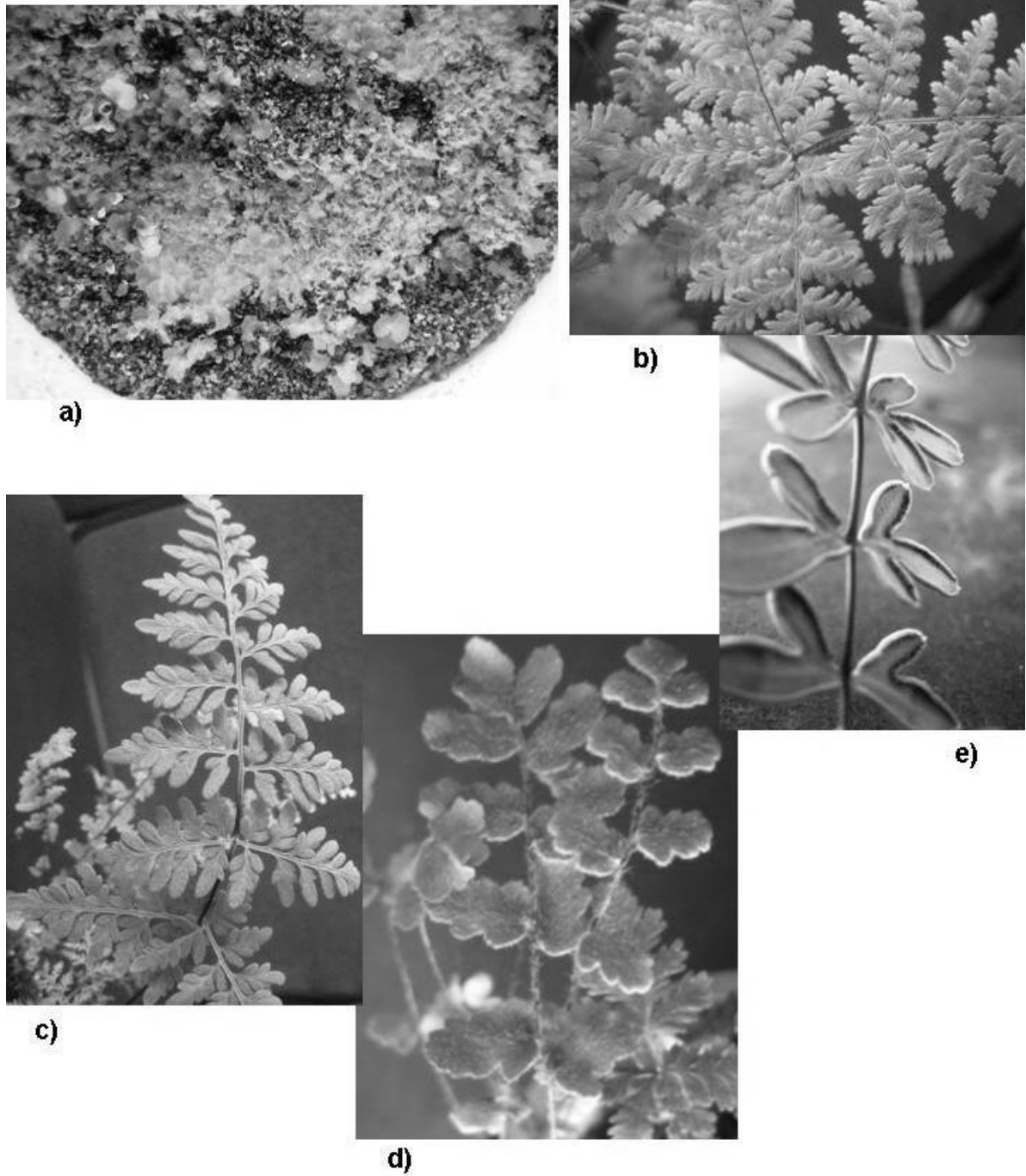
d)

Espórofito y gametófitos. Individuos obtenidos de muestras de suelo.

a) Germinación y desarrollo de gametófitos y esporófitos; **b)** numerosos gametófitos y reducido número de esporófitos apogámicos; **c)** *Cheilanthes bonariensis* y *C. myriophylla*; **d)** *Cheilanthes bonariensis*, *C. kaulfusii* y *C. marginata*

Anexo III. Siembra

Siembra de esporas



Siembra. a) Gametófitos de *Dryopteris pseudofilix-mas*; b) *Cheilanthes kaulfusii*; c) *Cheilanthes marginata*; d) *Cheilanthes bonariensis*; e) *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia*

APÉNDICE I

Variables ambientales

Muestra	altitud	azimut	intervalo	pendiente	filtración	luz	cobertura	relieve	alteración
A1	2375	50	NE	10	2.00	5	4	2	3
A2	2390	58	NE	11	2.00	5	4	2	3
A3	2395	40	NE	12	3.00	5	2	2	3
A4	2400	33	NE	12	3.00	4	2	2	4
A5	2398	34	NE	15	2.00	4	2	2	4
A6	2395	50	NE	10	2.00	5	4	2	3
A7	2400	50	NE	13	0.67	5	4	2	3
A8	2403	30	NE	15	1.36	4	4	2	7
A9	2425	27	NE	9	2.00	4	2	2	3
A10	2419	33	NE	12	0.55	4	6	2	3
A11	2372	43	NE	11	0.40	4	2	2	4
A12	2390	40	NE	4	2.00	3	2	2	4
A13	2400	70	E	7	7.50	3	2	2	4
A14	2405	75	E	17	2.50	4	3	2	4
A15	2400	70	E	3	4.29	4	3	2	4
A16	2403	75	E	4	7.50	4	3	2	5
A17	2400	85	E	12	1.07	4	3	2	5
A18	2418	77	E	10	1.76	3	3	2	5
A19	2397	70	E	9	0.43	3	3	2	5
A20	2405	90	E	6	2.14	3	4	2	3
A21	2380	55	NE	10	2.00	5	4	2	3
A22	2375	73	E	7	7.50	3	2	2	3
A23	2403	72	NE	15	3.00	4	3	2	3
A24	2365	41	NE	4	2.00	2	1	2	4
B1	2574	60	SW	17	0.81	3	1	1	2
B2	2620	19	S	20	0.75	3	1	1	2
B3	2610	10	S	20	2.00	3	1	1	1
B4	2592	10	S	27	1.11	3	1	1	6
B5	2562	40	SW	25	0.64	4	1	1	1
B6	2560	70	E	13	2.00	3	1	1	1
B7	2597	5	S	22	1.50	2	1	1	2
B8	2610	65	NE	27	0.47	3	1	1	2
B9	2610	75	E	22	0.35	3	1	1	1
B10	2615	75	E	30	0.94	2	1	1	1
B11	2592	70	E	20	0.75	2	1	1	1
B12	2630	75	E	27	1.00	2	1	1	1
B13	2640	90	E	25	2.50	2	1	1	1
B14	2640	80	E	28	0.46	3	1	1	1
B15	2610	60	NE	25	0.06	3	1	1	1
B16	2640	80	E	20	1.30	2	1	1	1
B17	2642	74	E	30	0.48	3	1	1	1
B18	2650	80	E	35	0.35	4	1	1	1
B19	2640	60	NE	31	0.07	4	2	1	5
B20	2648	55	NE	25	0.86	3	2	1	5
B21	2595	60	SW	17	0.80	3	2	1	1

B22	2615	75	E	30	0.94	2	1	1	1
B23	2597	5	S	22	1.50	2	1	1	1
B24	2610	10	S	20	2.00	3	1	1	1
C1	2895	40	SE	30	0.35	2	1	1	1
C2	2870	80	E	17	1.20	3	1	1	3
C3	2867	40	SW	20	1.43	2	1	3	1
C4	2855	70	W	35	0.97	2	1	3	1
C5	2842	55	SW	33	0.42	3	1	3	1
C6	2900	40	SE	20	2.00	2	1	1	3
C7	2880	5	S	20	0.75	2	1	1	2
C8	2865	55	SW	21	1.07	2	1	3	1
C9	2849	52	SW	35	2.00	2	1	3	1
C10	2820	60	SW	27	0.94	2	1	3	1
C11	2885	65	SW	30	2.31	2	1	3	1
C12	2870	65	SW	29	3.00	2	1	3	1
C13	2830	5	S	27	7.50	2	1	3	1
C14	2875	5	S	32	4.29	2	1	3	1
C15	2840	30	SW	20	3.75	2	1	3	1
C16	2820	30	SW	40	3.00	2	1	3	1
C17	2840	45	SW	20	0.86	2	1	3	1
C18	2820	30	NE	35	3.75	1	2	3	1
C19	2830	20	S	32	2.50	2	1	3	1
C20	2835	50	NE	15	3.75	2	1	1	1
C21	2830	50	NE	15	3.75	2	1	1	1
C22	2900	40	SE	20	2.00	2	1	1	1
D1	2645	55	NE	6	3.33	3	3	2	3
D2	2625	65	NE	17	0.39	4	4	2	7
D3	2640	65	NE	10	0.20	3	3	2	3
D4	2642	80	E	6	0.18	4	4	2	3
D5	2655	60	NE	14	0.30	4	4	2	7
D6	2671	50	SE	4	0.55	5	6	2	8
D7	2640	50	NE	15	3.33	5	5	2	10
D8	2652	80	E	9	1.15	5	5	2	9
D9	2660	67	NE	4	0.75	4	3	2	10
D10	2645	18	N	15	1.76	5	4	2	8
D11	2671	60	NE	12	2.00	4	5	2	9
D12	2665	70	E	9	0.60	4	4	2	8
D13	2650	44	NE	23	0.35	5	5	2	7
D14	2668	31	NE	10	0.11	3	3	2	10
D15	2670	90	E	4	0.67	3	4	2	7
D16	2665	35	SE	10	0.10	4	3	2	8
D17	2657	50	NE	28	1.03	5	5	2	7
D18	2661	74	E	8	0.45	4	5	2	7
D19	2660	55	NE	12	0.40	3	2	2	8
D20	2660	10	N	15	0.29	3	2	2	9

Muestra: **A**, Tequexquinahuac; **B**, San Pablo Ixayoc; **C**, Tláloc; **D**, Santa Catarina del Monte.

Altitud, metros sobre el nivel del mar. **Azimut**, se refiere a la exposición geográfica dominante con su respectivo intervalo de clase: N, norte; NE, noreste; E, Este; SE, sureste; S, sur; SW, suroeste; W, oeste; NW, noroeste. **Pendiente**, indica el porcentaje de la máxima pendiente. **Cobertura**, porcentaje de vegetación que cubre el suelo en cada sitio de muestra o alrededor: 1. Ausente, casi ausente (0 – 5); 2. Escasa, rala (6 – 25); 3. En manchones o en grupos (26 – 50); 4. Interrumpida, discontinua (51 – 75); 5. Continua o densa (76 – 100). **Relieve**, 1. Montaña; 2. Loma; 3. Cañada.

Alteración, 1. Vegetación primaria sin alteración (baja); 2. Vegetación primaria sin alteración aparente (baja); 3. Vegetación con alteración de bajo impacto (baja); 4. Reforestación (moderada); 5. Vegetación resultado de Incendio (moderada); 6. Campo agrícola rodeado de bosque (moderada); 7. Erosión inicial moderada); 8. Erosión evidente, cobertura vegetal rala (severa); 9. Erosión evidente, cobertura vegetal ausente (severa); 10. Erosión con formación de carcavas, sin vegetación (severa).

APÉNDICE II

Variables edáficas

Muestra	color	textura	mo ₁	mo ₂	pH ₁	pH ₂
A1	4	6	2.06	2.06	5.20	5.48
A2	3	5	6.70	7.22	5.38	5.05
A3	1	4	6.29	5.67	6.76	6.39
A4	3	6	8.66	7.52	7.64	7.56
A5	6	6	7.73	8.04	7.32	7.29
B1	3	5	8.04	7.08	6.91	6.36
B2	6	6	3.79	3.64	6.67	6.56
B3	3	3	10.72	8.04	6.24	6.19
B4	3	3	5.93	7.85	6.68	6.67
B5	2	2	16.46	19.33	5.75	5.65
C1	3	6	9.00	9.95	5.99	5.68
C2	2	2	19.33	17.04	6.29	6.12
C3	1	1	0.50	0.38	6.89	6.43
C4	3	4	5.74	5.21	5.58	5.33
C5	2	2	10.41	9.04	6.38	6.04
D1	4	5	4.98	7.20	5.18	5.07
D2	4	5	6.51	7.35	5.27	5.04
D3	3	5	8.88	8.81	5.52	5.24
D4	4	5	6.36	6.51	5.58	5.15
D5	6	7	4.90	5.90	5.57	5.52

Muestra: **A**, Tequexquinahuac; **B**, San Pablo Ixayoc; **C**, Tlálloc; **D**, Santa Catarina del Monte.

color: 1, gris; 2, pardo oscuro; 3, pardo; 4, pardo claro; 5, rosáceo; 6, amarillo. **textura:** 1, franco arenosa; 2, franca; 3, franco limosa fina 4, franco arcillo arenosa; 5, franco arcillosa; 6, franco arcillo limosa; 7, arcillosa. **mo₁** y **mo₂**: porcentaje de materia orgánica. **pH₁**, **pH₂**: pH (1-14).

APÉNDICE III

Especies de helechos y licófitas reconocidas en campo en las zonas de estudio

Num	Especie	A	B	C	D	Pi
1	<i>Adiantum andicola</i> Liebm.			X		0.002
2	<i>Adiantum capillus-veneris</i> L.		X			0.002
3	<i>Adiantum poiretii</i> Wikstr.	X	X	X	X	0.015
4	<i>Argyrochosma incana</i> (C. Presl) Windham		X		X	0.004
5	<i>Asplenium monanthes</i> L.		X	X		0.117
6	<i>Astrolepis crassifolia</i> (T. Moore & Houlston) D. M. Benham & Windham	X				0.002
7	<i>Athyrium bourgeauii</i> E. Fourn			X		0.002
8	<i>Botrychium virginianum</i> (L.) Sw.		X			0.004
9	<i>Cheilanthes arizonica</i> (Maxon) Mickel		X			0.002
10	<i>Cheilanthes bonariensis</i> (Willd.) Proctor	X	X		X	0.180
11	<i>Cheilanthes kaulfussii</i> Kunze	X	X			0.002
12	<i>Cheilanthes lendigera</i> (Cav.) Sw.		X	X		0.053
13	<i>Cheilanthes marginata</i> Kunth	X	X	X	X	0.291
14	<i>Cheilanthes marsupianthes</i> (Fée) T. Reeves ex Mickel & A. R. Sm.		X	X		0.024
15	<i>Cheilanthes membranacea</i> (Davenp.) Maxon	X				0.002
16	<i>Cheilanthes myriophylla</i> Desv.	X	X		X	0.009
17	<i>Cheilanthes purpusii</i> T. Reeves				X	0.004
18	<i>Cheilanthes pyramidalis</i> Fée	X			X	0.008
19	<i>Cystopteris fragilis</i> (L.) Bernh.	X	X	X		0.086
20	<i>Dryopteris pseudofilix-mas</i> (Fée) Rothm			X		0.011
21	<i>Pellaea cordifolia</i> (Sessé & Moç) A. R. Sm.	X	X			0.009
22	<i>Pellaea ovata</i> (Desv.) Weath.	X	X			0.004
23	<i>Pellaea sagittata</i> (Cav.) Link	X				0.002
24	<i>Pellaea ternifolia</i> (Cav.) Link subsp. <i>ternifolia</i>	X	X		X	0.021
25	<i>Pleopeltis polylepis</i> (Roemer ex Kunze) T. Moore		X	X		0.011
26	<i>Polypodium guttatum</i> Maxon		X	X		0.004
27	<i>Polypodium thyssanolepis</i> A. Braun ex Klotzsch		X	X		0.021
28	<i>Polystichum fournieri</i> A. R. Sm.	X				0.002
29	<i>Selaginella lepidophylla</i> (Hook. & Grev.) Spring	X				0.056
30	<i>Selaginella sellowii</i> Hieron	X				0.034
31	<i>Woodsia mollis</i> (Kaulf.) J. Sm.	X	X	X	X	0.017

Presencia de helechos y licófitas en las zonas de estudio: **A**, Tequexquahuac; **B**, San Pablo Ixáyoc; **C**, Tláloc; **D**, Santa Catarina del Monte. **Pi**, abundancia relativa. Se ordenaron alfabéticamente y se asignó un número.

APÉNDICE IV

Siembra de esporas de 24 individuos de helechos

Número de colecta	Género	Lugar de colecta	% de germinación	Gametófito (17 días)	Esporófito (origen)
LRR-190	<i>Asplenium monanthes</i>	A	3	Filamento	NP
LRR-192a	<i>Cheilanthes marsupianthes</i>	A	0	NP	NP
LRR-192	<i>Pellaea cordifolia</i>	A	0	NP	NP
LRR-193	<i>Woodsia mollis</i>	A	0	NP	NP
LRR-194	<i>Pellaea sagittata</i>	A	70	Filamento	NP
LRR-195	<i>Cheilanthes myriophylla</i>	A	15	Filamento	NP
LRR-195a	<i>Cystopteris fragilis</i>	A	0	NP	NP
LRR-199	<i>Cheilanthes kaulfusii</i>	A	10	Filamento	Sexual
LRR-201	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	A	65	Filamento	Sexual
LRR-203	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	A	90	Filamento	Apogamia
LRR-204	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	A	90	Lámina joven	Apogamia
LRR-221	<i>Pellaea cordifolia</i>	B	0	NP	NP
LRR-223	<i>Cheilanthes marsupianthes</i>	B	10	Filamento	NP
LRR-226	<i>Pellaea ovata</i>	B	0	NP	NP
LRR-228	<i>Cystopteris fragilis</i>	B	0	NP	NP
LRR-233	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	B	45	Filamento	Sexual
LRR-234	<i>Cheilanthes marginata</i>	B	80	Lámina joven	Apogamia
LRR-191	<i>Dryopteris pseudofilix-mas</i>	C	0	NP	NP
LRR-261	<i>Dryopteris pseudofilix-mas</i>	C	90	Filamento	Sexual
LRR-216	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	D	90	Lámina joven	Apogamia
LRR-217	<i>Cheilanthes pyramidalis</i>	D	0	NP	NP
LRR-218	<i>Cheilanthes purpusii</i>	D	0	NP	NP
LRR-219	<i>Cheilanthes marginata</i>	D	15	Filamento	Apogamia
LRR-220	<i>Pellaea ternifolia</i> subsp. <i>ternifolia</i>	D	5	Filamento	Sexual

LRR: recolector Lucía Rodríguez Romero. Lugar de colecta: **A**, Tequexquinahuac; **B**, San Pablo Ixáyoc; **C**, Tláloc; **D**, Santa Catarina del Monte. **% de germinación**, se calculó tomando en cuenta la cobertura de gametófitos en un diámetro de siete mm 15 días después de la siembra. **Gametófito**, 17 días después de sembrados. **Esporófito**, origen sexual o apogámico. **NP**, no se observó

APÉNDICE V

Presencia de gametófitos y esporófitos en el banco de esporas del suelo

Muestra	21 G	50 G	50 EA	65 G	65 EA	100 G c/g	100 G s/g	100 E	100 EA	360 G	360 E	900 E	No. Máximo		
													G	E	E A
A1	0	21	0	89	0	73	0	27	0	0	20	8	100	27	0
A2	0	33	0	78	1	86	0	28	1	0	25	4	114	29	1
A3	11	23	0	23	7	0	17	13	13	0	11	9	30	13	13
A4	9	13	0	4	12	0	5	15	15	0	18	7	20	18	18
A5	5	10	0	9	2	1	2	7	2	0	9	4	11	9	2
\bar{x}	5	20	0	41	4.4	32	4.8	18	6.2	0	16.6	6.4	55	19	6.8
B1	0	16	0	10	2	0	9	8	8	0	10	5	17	10	8
B2	2	4	0	4	0	0	0	4	4	0	1	0	4	4	4
B3	8	29	0	68	5	0	13	6	6	0	14	4	73	14	6
B4	22	103	9	18	151	1	29	120	120	0	57	5	169	151	151
B5	2	49	0	15	39	24	2	26	26	0	20	0	54	39	39
\bar{x}	6.8	40.2	1.8	23	39.4	5	10.6	32.8	32.8	0	20.4	2.8	63	44	41.6
C1	0	24	0	18	0	0	24	3	2	0	2	2	24	3	3
C2	3	6	0	8	0	1	8	0	0	8	0	6	9	6	0
C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C4	0	4	0	5	0	0	4	5	5	0	8	4	9	5	5
C5	9	6	0	7	2	2	2	4	2	0	6	3	9	4	2
\bar{x}	2.4	8	0	8	0.4	0.6	7.6	2.4	1.8	1.6	3.2	3	10	3.6	2
D1	81	227	0	62	238	0	58	263	263	0	43	4	300	263	263
D2	3	131	0	166	18	24	70	124	18	0	18	6	184	142	18
D3	53	58	0	44	15	9	20	61	15	0	28	3	61	61	15
D4	66	66	0	119	2	44	43	66	27	0	27	9	153	66	27
D5	33	134	0	99	98	71	0	82	15	0	15	7	197	98	98
\bar{x}	47. 2	123.2	0	98	74.2	29.6	38.2	119.2	67.6	0	26.2	5.8	179	126	84.2

Resultados a los 21, 50, 65, 100, 360 y 900 días después de inducir germinación en 20 muestras de suelo recolectadas en las cuatro áreas de estudio. \bar{x} , promedio por zona de estudio. **A**, Tequexquahuac; **B**, San Pablo Ixáyoc; **C**, Tlálóc; **D**, Santa Catarina del Monte. **G**, número de gametófitos; **G c/g**, número de gametófitos con gametangios (anteridios y arquegonios); **G s/g**, número de gametófitos sin gametangios; **E**, número de esporófitos; **EA**, número de esporófitos de origen apogámico.

APÉNDICE VI

Abundancia de especies de helechos en banco de esporas del suelo

Muestra	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	26	31	32
A1					7																
A2					3												1				
A3					5												4				
A4	1				6																
A5					3				1												
Total	1				24				1								5				
B1					5																
B2								4													
B3								4													
B4								5													
B5																					
Total					5			13													
C1					1			1													
C2																	6				
C3																					
C4					2					1											1
C5					3																
Total					6			1		1							6				1
D1								4													
D2					6																
D3								3													
D4					1			8													
D5						7															
Total					7	7		15													

Número de individuos por especie obtenidos en 20 muestras de suelo de cuatro zonas de estudio, después de 900 días de haber inducido su germinación. El número de especie corresponde al listado del Apéndice B. Destaca por su abundancia *Cheilanthes bonariensis*, *C. marginata* y *Pellaea ternifolia* subsp. *ternifolia* con 42, 29 y 11 individuos respectivamente. **A**, Tequexquahuac; **B**, San Pablo Ixáyoc; **C**, Tláloc; **D**, Santa Catarina del Monte. El número 32 se refiere a *Astrolepis integerrima* (Hook.) D. M. Benham & Windham, la cual no había sido recolectada en campo durante los recorridos previos.

APÉNDICE VII

Rodríguez-Romero, M. L., J. A. Zavala-Hurtado & L. Pacheco. 2011. Presencia, abundancia y estrategias reproductivas de helechos en áreas alteradas de la Sierra Nevada, México. *Rev. Biol. Trop.* 59 (1):

Aceptado el 16 de septiembre de 2010.



16 de setiembre 2010
RBT-A239-2010

A QUIEN INTERESE

El manuscrito "**Presencia, abundancia y estrategias reproductivas de helechos en áreas alteradas de la Sierra Nevada, México**" por Ma. Lucía Rodríguez Romero, José Alejandro Zavala Hurtado & Leticia Pacheco, ha sido aceptado para publicación en la Revista de Biología Tropical / International Journal of Tropical Biology and Conservation (ISSN-0034-7744). Se incluirá en el volumen 59-1 de marzo 2011.

Atentamente,

Julián Monge-Nájera
Director

