



Artículo / Article

Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en bosques de coníferas, con escenarios de cambio climático

Potential distribution of *Lophodermium* spp. in conifer forests, with climate change scenarios

Ramiro Pérez Miranda¹, Martín Enrique Romero Sánchez¹,
Antonio González Hernández¹, Eduardo Pérez Sosa² y Víctor Javier Arriola Padilla¹

Resumen

En los bosques de coníferas de los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo, México se han registrado problemas de caída foliar, principalmente, por ataques de *Lophodermium* spp. Las alteraciones en las condiciones climáticas actuales tendrán un papel importante en la distribución futura del hongo. El objetivo del presente trabajo fue determinar la distribución potencial actual y con escenarios de cambio climático (CC) de *Lophodermium* spp. en la vegetación de las entidades antes mencionadas. Se aplicó el algoritmo *Genetic Algorithm for Rule-set Production* (GARP, por sus siglas en inglés) para generar los modelos potenciales de la distribución, a partir de diversas coberturas climáticas (actuales y escenarios de CC), y sitios de presencia del organismo. Los resultados sugieren que las áreas con alto potencial se ubican en la Sierra Norte de Puebla. La superficie de distribución potencial actual con categoría alta es mayor en el periodo de desarrollo (marzo-junio), 83 197 ha, con respecto a la fase de crecimiento (septiembre-diciembre), 74 829 ha. Con el escenario de CC, RCP4.5 (año 2039) la superficie con clase alta se presentó en el periodo de desarrollo, el cual fue de 159 433 ha; en contraste en el escenario RCP8.5 la extensión de la época de crecimiento fue superior, con un valor de 138 810 ha. La etapa de desarrollo del hongo en los escenarios actual y de CC RCP4.5 tuvo superficies con más potencial de presencia del organismo, y en la de crecimiento fue con el escenario RCP8.5.

Palabras clave: Acículas de pino, algoritmo GARP, Bosque de pino, cambio climático, distribución actual, *Lophodermium* spp.

Abstract

In the conifer forests of the states of *Puebla*, *Tlaxcala* and *Hidalgo*, Mexico, leaf fall problems have been registered, mainly due to attack by the *Lophodermium* spp. fungus. Alterations of the current climate conditions will play a significant role in the future distribution of the fungus. The objective of the present work was to determine the current potential distribution, in climate change (CC) scenarios, of *Lophodermium* spp. in the vegetation of the states mentioned above. The Genetic Algorithm for Rule-set Production (GARP) was applied to generate the potential distribution models based on various climate coverages (both current and with CC scenarios), and of sites of occurrence of the fungus. The results suggest that areas with a high potential are located on the *Sierra Norte de Puebla*. The current potential surface area with a high category is larger during the development period (March-June), with 83 197 ha, compared to the growth phase (September-December), with 74 829 ha. With the CC scenario RCP4.5 (for the year 2039), the high class surface area was presented as in a development stage, with 159 433 ha. In contrast, with scenario RCP8.5, the surface area during the growth phase was larger, with 138 810 ha. A higher risk of occurrence of the fungus was observed under the current and CC RCP4.5 scenarios in its development phase, and under scenario RCP8.5 in its growth phase.

Key words: Pine needles, GARP algorithm, pine forest, climate change, current distribution, *Lophodermium* spp.

Fecha de recepción/ Reception date: 18 de mayo de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 13 de agosto de 2016.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, INIFAP, México. Correo-e: perez.ramiro@inifap.gob.mx.

² Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Introducción

Lophodermium pinastri (Schrader) Chev. es conocido como el agente causal de la caída de acículas de pino (Cibrián *et al.*, 2007). Es un hongo que permanece durante todo su ciclo de vida en el árbol, y ataca individuos poco desarrollados y débiles (González, 2004). Las acículas son infectadas a finales de verano u otoño y el patógeno permanece en ellas el invierno de ese año. En la siguiente primavera, el hongo reinicia su crecimiento, en las acículas infectadas que desarrollan manchas pardas con márgenes amarillos, y, al final de la estación, causan la muerte de sus tejidos (Cibrián *et al.*, 2007; French, 1988).

La dispersión se presenta por acción del viento y la lluvia, una vez que se forman los histerotecios, después de que absorben humedad, maduran y descargan sus ascosporas. La infección ocurre, nuevamente, a través del micelio vegetativo en los tejidos de las hojas durante el invierno (Alvarado, 2005; Cordón, 2009). Minter (2015) señala que la distribución de *Lophodermium* es muy abundante en diversos bosques de pino alrededor del mundo y, generalmente, se presenta donde hay contaminación del aire y en altitudes mayores a 1 800 m Hattermer (1964) y Alvarado (2005) indican que los apotecios se desarrollan, principalmente, en las acículas muertas que caen al suelo, donde liberan esporas que infectan a las hojas verdes.

Durante 2015 se detectaron alrededor de 3 000 hectáreas con sintomatología de secamiento de follaje, asociado a *Lophodermium* sp. en los municipios de Zacatlán, Aquixtla y Tetela de Ocampo, estado de Puebla. De no atenderse esta problemática, el hongo podría extenderse a diferentes estados de la república mexicana.

Por otro lado, el cambio climático producirá en las especies forestales estrés hídrico, mayor incidencia de plagas y enfermedades, disminución en la polinización, baja productividad, entre otros impactos (Allen, 2009; Conafor, 2013; IPCC, 2014). Se prevé que el cambio climático originará movimientos a gran escala de especies hacia nuevas zonas de distribución, por lo que serán necesarias definir estrategias de reordenación forestal para compensar los desfases de adaptación de las poblaciones, para mantener la productividad y la salud de los bosques (Yanchuk y Allard, 2009).

El impacto del cambio climático en las plagas y enfermedades forestales afectará su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; además de provocará alteraciones en la fisiología de los organismos; cambios en las relaciones entre plagas, medio ambiente y asociación con otras especies (FAO, 2005; Menéndez, 2007; Moore y Allard, 2008; Samaniego, 2009; Sturrock *et al.*, 2011).

Los modelos climáticos simulan las complejas interacciones entre la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la nieve

Introduction

Lophodermium pinastri (Schrader) Chev. is known as the causative agent of the fall of (Cibrián *et al.*, 2007). This fungus remains on the tree throughout its life cycle and attacks weak, poorly developed individuals (González, 2004). The needles are infected at the end of the summer or in fall, and the pathogen agent remains within them during the following winter. In the subsequent spring, the fungus starts growing once more, on infected needles that develop brownish spots with yellow edges, which cause the death of their tissues at the end of the season (Cibrián *et al.*, 2007; French, 1988).

Dispersion occurs as a result of the action of wind and rain after the histerothecia are formed, absorb moisture, mature and release their ascospores. Infection occurs, again, via the vegetative mycelium in the tissue of the leaves during winter (Alvarado, 2005; Cordón, 2009). Minter (2015) points out that *Lophodermium* is very abundantly distributed in various pine forests across the world and generally occurs where there is air pollution and at altitudes of over 1 800 masl. According to Hattermer (1964) and Alvarado (2005), apothecia develop mainly in dead needles that fall on the ground, where they release spores that infect the green leaves.

Approximately 3 000 hectares with symptoms of leaf drying associated with *Lophodermium* sp. were detected in the municipalities of Zacatlán, Aquixtla and Tetela de Ocampo, in the state of Puebla. If this issue is neglected, the fungus may spread to several states of the Mexican Republic.

On the other hand, climate change will produce hydric stress in forest species, as well as a higher incidence of pests and diseases, reduced pollination and reduced productivity, among other impacts (Allen, 2009; Conafor, 2013; IPCC, 2014). Climate change is expected to bring about large scale movements of species toward new distribution areas; therefore, new forest restructuring strategies will be necessary to compensate the adaptation discrepancies between populations in order to maintain the productivity and good health of forests (Yanchuk and Allard, 2009).

The impact of climate change on forest pests and diseases will affect their development, survival, reproduction, distribution and spreading, as well as the alterations in the physiology of organisms, and changes in the relationships between the pests with other species and with the environment (FAO, 2005; Menéndez, 2007; Moore y Allard, 2008; Samaniego, 2009; Sturrock *et al.*, 2011).

Climate models simulate the complex interactions between the atmosphere, the ocean, the earth's land surface, snow and ice, the global ecosystem and a variety of chemical and biological processes (IPCC, 2013). Scenarios are tools for characterizing

y el hielo, el ecosistema global y una variedad de procesos químicos y biológicos (IPCC, 2013). Los escenarios son herramientas para caracterizar las futuras trayectorias socioeconómicas del cambio climático, sus riesgos, y las implicaciones de las políticas por implementar (IPCC, 2014); son representaciones de lo que acontecerá, debido a cambios en las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) ocasionados por la influencia humana y fuerzas naturales en el sistema climático (IPCC, 2014).

En el marco de la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5), el nuevo conjunto de escenarios de simulaciones recientes de modelos climáticos son las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), los cuales actualizan los modelos generales de circulación atmosférica desarrollados anteriormente (IPCC, 2014). Estos nuevos modelos se dividen en cuatro grupos: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, y se refieren a la radiación global de energía expresada en $W\ m^{-2}$ debido al aumento de gases de efecto invernadero (Cavazos *et al.*, 2013).

Derivado de la necesidad de modelar el impacto que el cambio climático tendrá sobre la distribución de plagas y enfermedades forestales y dada la importancia de los hongos fitopatógenos en la Sierra Norte de Puebla, la presente investigación tuvo como objetivo principal determinar la distribución potencial del agente causal de la caída foliar del pino (*Lophodermium* spp.) bajo escenarios de cambio climático en la Sierra Norte de Puebla y regiones circunvecinas. El algoritmo GARP se utilizó para modelar la distribución potencial de *Lophodermium* de acuerdo a las condiciones climáticas actuales y futuras. Los escenarios RCP generados por el IPCC sirvieron como base para el modelado de la distribución potencial futura del hongo.

Materiales y Métodos

Área de estudio y descripción física

El área de estudio comprendió los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, que se ubican entre las coordenadas extremas $96^{\circ}35'00''$ O, $18^{\circ}05'00''$ N, y $99^{\circ}30'00''$ O y $21^{\circ}25'00''$ N (Figura 1).

La vegetación está dominada por bosques de pino (*Pinus* spp.), encino (*Quercus* spp.), pino-encino, encino-pino, oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.), táscate (*Juniperus* spp.), así como especies crasicaules (Cervantes *et al.*, 1990).

En general, son tres grandes grupos de clima los presentes en el área de estudio: templado, semicálido y semiárido (García y Conabio, 1998). La temperatura media anual oscila entre 10 y 16 °C, mientras que la precipitación media anual va de los 500 a $1\ 000$ mm, aunque estos valores cambian en función del tipo de clima (Vidal, 1990; Conabio, 2015).

the future socioeconomic developments of climate change, their risks and the implications of the policies to be implemented (IPCC, 2014). Climate change scenarios are representations of what will happen as a consequence of changes in the Greenhouse Gases (GHG) caused by human influence and by natural forces in the climate system (IPCC, 2014).

Within the framework of the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), the new set of scenarios of recent simulations of climate models are the Representative Concentration Pathways (RCPs), which update the recently developed general atmospheric circulation models (IPCC, 2014). These new models are divided into four groups: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5, and they refer to the global energy radiation, expressed in terms of $W\ m^{-2}$, resulting from the increase in the amount of greenhouse gases (Cavazos *et al.*, 2013).

This research, which stems from the need to model the impact that climate change will have on the distribution of forest pests and diseases, as well as from the importance of the phytopathogenic fungi of the Sierra Norte de Puebla, had as its main objective to determine the potential distribution of the causative agent of the falling of pine needles (*Lophodermium* spp.) under climate change scenarios in the Sierra Norte de Puebla and its neighboring regions. The GARP algorithm was used to model the potential distribution of *Lophodermium* according to the current and future climate conditions. The RCP scenarios generated by the IPCC served as a foundation for modeling the potential future distribution of the fungus.

Materials and Methods

Study area and physical description

The study area comprises the states of Hidalgo, Puebla and Tlaxcala, located between the extreme coordinates $96^{\circ}35'00''$ W, $18^{\circ}05'00''$ N, and $99^{\circ}30'00''$ W and $21^{\circ}25'00''$ N (Figure 1).

The vegetation is dominated by pine (*Pinus* spp.), oak (*Quercus* spp.), pine-oak, oak-pine, sacred fir (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) and Pinchot juniper (*Juniperus* spp.) forests, and by crasicaule species (Cervantes *et al.*, 1990).

In general, three major climate groups are present in the study area: temperate, semiwarm and semiarid (García and Conabio, 1998). The mean annual temperature ranges between 10 and 16 °C, while the mean annual precipitation ranges between 500 and $1\ 000$ mm, although these values change in terms of the type of climate (Vidal, 1990; Conabio, 2015). The soil types are varied, with predominance of Acrisols, Luvisols, Regosols and Lithosols (Conabio, 2015).

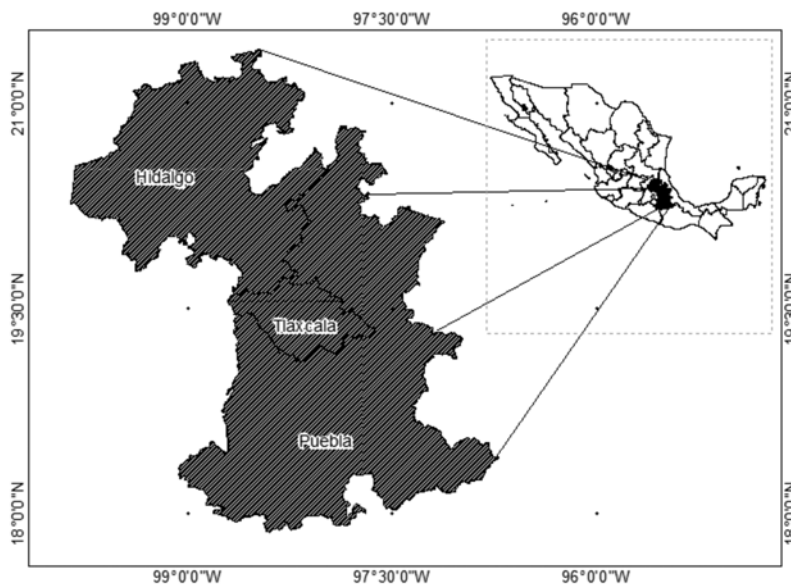


Figura 1. Área de estudio: estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala.
 Figure 1. Study area: states of *Hidalgo*, *Puebla* and *Tlaxcala*.

Los suelos son variados, de manera general predominan los Acrisoles, Luvisoles, Regosoles y Litosoles (Conabio, 2015).

Generación de coberturas ambientales digitales

Las capas ambientales que se utilizaron en el modelo de distribución potencial de *Lophodermium* spp. fueron las climáticas mensuales (precipitación acumulada, temperatura media, humedad relativa promedio y evapotranspiración); topográficas (altitud, exposición y pendientes); vegetación (bosques de pino y mixtos); así como de los sitios de presencia del hongo. Todas las coberturas se referenciaron al sistema de coordenadas geográficas Datum WGS84.

Capas climáticas actuales. Se obtuvieron datos históricos (2011 a 2014) de 12 estaciones meteorológicas: seis del estado de Hidalgo, tres de Puebla, tres de Tlaxcala y 12 de Veracruz, proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua. Las bases de datos se analizaron y procesaron para generar capas mensuales de temperatura media, precipitación acumulada, humedad relativa promedio y evapotranspiración. Esta última se estimó mediante la fórmula de Thornthwaite (1948). Se utilizó el programa *Visual FoxPro 6.0* (Microsoft Corporation, 2000) para calcular promedios del periodo 2011 a 2014 e interpolar los datos por medio del método IDW (*Inverse Distance Weighted*) (ESRI, 2016). La resolución de salida fue de 100 m.

Dado que *Lophodermium* spp. tiene dos fases biológicas importantes: una de crecimiento, conocida como de infestación (finales de verano y otoño); y otra de desarrollo (en primavera)

Generation of digital environmental coverages

The environmental layers used in the potential distribution model of *Lophodermium* spp. were: monthly climate layers (accumulated precipitation, mean temperature, mean relative humidity and evapotranspiration), topographic layers (altitude, exposure and slopes), vegetation (pine and mixed forests) and sites of occurrence of the fungus. All the coverages were referenced to the WGS84 Datum geographical coordinate system.

Current climate layers. Historical data (2011 to 2014) were obtained from 12 weather stations -six for the state of *Hidalgo*, three for *Puebla*, three for *Tlaxcala* and 12 for *Veracruz*- of the National Weather System and the National Water Commission. The databases were analyzed and processed in order to generate monthly layers for mean temperature, accumulated precipitation, mean relative humidity and evapotranspiration. The latter was estimated using Thornthwaite's formula (1948). The *Visual FoxPro 6.0* software (Microsoft Corporation, 2000) was used to calculate the averages for the years 2011-2014 and to interpolate the data using the Inverse Distance Weighted method (ESRI, 2016). The output resolution was 100 m.

Lophodermium spp. have two major biological phases: one of growth, known as infestation (in late summer and fall), and one of development (in spring) (Cibrián *et al.*, 2007). Coverages were generated for both -one in September through December, and the other in March through June.

(Cibrián *et al.*, 2007), se generaron coberturas para ambas; la primera correspondió de septiembre a diciembre y la segunda de marzo a junio.

Capas climáticas bajo escenarios de cambio climático. Las coberturas para escenarios de cambio climático se obtuvieron a partir de proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para México (Cavazos *et al.*, 2013). Se usaron los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para el horizonte 2039, disponibles en el portal electrónico del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (<http://escenarios.inecc.gob.mx>).

Capas temáticas. Las capas temáticas (topografía y vegetación) proceden del sitio electrónico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2013). A partir del modelo de elevación digital se generaron las capas de altitud, exposición y pendiente, la resolución de salida fue de 100 m.

Capa de registro de presencia. Los registros de *Lophodermium* spp. se hicieron con base en muestreos en campo; para ello, se ubicaron, geográficamente, los árboles con sintomatología del agente causal de la caída foliar en pinos por medio de un geoposicionador marca Garmin™ GPSMAP 64s. Además, se incluyeron otros de áreas afectadas por *Lophodermium* spp. proporcionados por la Gerencia Estatal de Conafor en Puebla. Todos (127) fueron convertidos a formato vectorial (*.shp) para su integración y procesamiento con el modelo GARP.

Modelado en GARP

Para los modelos de distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático se emplearon soluciones estocásticas generadas por el modelado en GARP. Para la optimización paramétrica de los modelos se estableció el límite de convergencia a 0.001 y 1 000 iteraciones como máximo; en caso de que el valor de límite de convergencia sea cero, el modelo se detendrá hasta alcanzar el valor máximo de iteraciones. Las iteraciones se refieren a las generaciones, en las que los conjuntos de reglas son probadas, reproducidas y mutadas (Martínez, 2010). Del total de puntos de presencias (127), 50 % se usó para el entrenamiento y el resto para realizar la validación de los modelos.

Los modelos de distribución se generaron a partir de las coberturas de temperatura media, precipitación acumulada, humedad relativa promedio, evapotranspiración de los periodos marzo-junio y septiembre a diciembre; además de las coberturas de altitud, pendiente y exposición. El análisis GARP concluyó con un análisis espacial predictivo de la distribución del hongo. Cada predicción deriva de la aplicación de distintos algoritmos. Se siguió lo descrito por Anderson *et al.* (2003), y se tomaron en cuenta los mejores 10 modelos de un total de 100 generados para identificar el patrón de áreas de manera estable.

Climate layers under climate change scenarios. Coverages for climate change scenarios were obtained from short-term (2015-2039) and long-term (2075-2099) projections of 15 global circulation models for Mexico (Cavazos *et al.*, 2013). Scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were utilized for the 2039 horizon and are available at the website of *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático* (the National Institute of Ecology and Climate Change, (<http://escenarios.inecc.gob.mx>)).

Thematic layers. Thematic layers (topography and vegetation) are taken from the website of the *Instituto Nacional de Estadística y Geografía of Mexico* (National Institute of Statistics and Geography) (Inegi, 2013). Based on the digital elevation model, the altitude, exposure and slope layers were generated; the output resolution was 100 m.

Presence record layer. *Lophodermium* spp. records were made based on field samplings; for this purpose, the trees showing symptoms of the causative agent of leaf fall in pines were geographically located using a Garmin™ gpsmap 64s geolocator. Other records of areas affected by *Lophodermium* spp. provided by the state management of Conafor in Puebla were also included. They were all (127) converted to vectorial format (*.shp) for their integration and processing using the GARP model.

GARP modeling

Stochastic solutions generated by GARP modeling were utilized for the potential distribution models, under both current and climate change scenarios. For the parametric optimization of the models, the convergence limit was established at 0.001, with a maximum of 1 000 iterations. If the value for the convergence limit is equal to zero, the model will be stopped until the maximum number of iterations is reached. Iterations refer to the generations in which the sets of rules are tested, reproduced and mutated (Martínez, 2010). Out of the total number of presence points (127), 50 % were used for training, and the rest, for model validation.

Distribution models were generated from the coverages of mean temperature, accumulated precipitation, mean relative humidity, evapotranspiration of the March-June and September-December periods, as well as of altitude, slope and exposure. The GARP analysis concluded with a predictive spatial analysis of the distribution of the fungus. Each prediction is derived from the application of different algorithms. The procedure described by Anderson *et al.* (2003) was followed, and the best 10 out of a total of 100 models generated to identify the area pattern in a stable manner were taken into account.

The 10 best models were integrated into a consensus map with 10 categories, in which the maximum number corresponds to the area with most probability of occurrence of the fungus. The map was classified into potentiality categories: low, in which 1 to 3 models converge; medium, with convergence of

Los 10 mejores modelos se integraron en un mapa de consenso con 10 categorías, en las que el número máximo corresponde al área con mayor probabilidad de presencia del hongo. El mapa se clasificó en categorías de potencialidad: baja donde convergen de 1 a 3 modelos; media, de 4 a 7; alta de 8 a 10, ordenados de mejor a menor grado de ajuste. El último paso fue la modelación espacial de la distribución potencial, en los periodos de marzo a junio y de septiembre a diciembre. Las áreas de posible distribución de *Lophodermium* fueron restringidas a bosques templados con ayuda de la cobertura de vegetación Serie IV de Inegi.

Ajuste y selección de modelos

Se calcularon los errores de comisión y omisión de cada modelo comparando los puntos de prueba con los modelos generados. Los errores de comisión son errores tolerados, ya que pueden implicar que el área predicha es adecuada para la especie, pero está ausente por otro tipo de factores (como error de muestreo, barreras, competencia, etcétera), aunque también queda la posibilidad del verdadero error de comisión por ser el área predicha no adecuada para el taxón. Se eligieron los 10 mejores modelos basados en la distribución óptima del error para cada réplica individual de los mismos y los menores errores de omisión. Los modelos con un valor predeterminado de error de omisión con una tolerancia de 20 % (Stockwell y Peters, 1999; Anderson *et al.*, 2003; Paredes *et al.*, 2011) se usaron para crear el mapa final.

Resultados y Discusión

Caracterización climática actual

Los valores actuales de las variables temperatura, precipitación, evapotranspiración y humedad relativa correspondientes a las etapas de crecimiento y de desarrollo de *Lophodermium* spp. se muestran en el Cuadro 1. En promedio, la temperatura fue superior a 3.5 °C en el periodo de desarrollo, al igual que la evapotranspiración (35.05 mm), con respecto a la de crecimiento; en esta, la precipitación es mayor con 199.45 mm y la humedad relativa con 15.75 %.

Cuadro 1. Caracterización climática actual de las fases de crecimiento y desarrollo de *Lophodermium* spp.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (septiembre-diciembre)	13.6 - 14.2	473.0 - 584.3	213.7 - 219.2	75.8 - 80.2
Desarrollo (marzo-junio)	15.8 - 16.8	343.2 - 445.0	217.8 - 281.1	64.4 - 71.5

4 to 7 models, and high, with convergence of 8 to 10 models, from the highest to the lowest degree of adjustment. The last step was the spatial modeling of the potential distribution in the March-June and September-December periods. The areas of potential distribution of *Lophodermium* were restricted to temperate forests with the help of the vegetal coverage of Inegi Series IV.

Model adjustment and selection

Errors of commission and omission were calculated for each model by comparing the test points with the generated models. Errors of commission are tolerated, as they may imply that the predicted area is adequate for the species but is absent due to some other type of factors (such as sampling error, barriers, competition, etc.), although there is also the possibility of a true error of commission due to inadequacy of the predicted area for the taxon. The 10 best models were selected based on the optimal distribution of the error for each individual replica and the least number of errors of omission. Models with a predetermined omission error value with a 20 % tolerance (Stockwell and Peters, 1999; Anderson *et al.*, 2003; Paredes *et al.*, 2011) were used to create the final map.

Results and Discussion

Current climate characterization

The current values of the temperature, precipitation, evapotranspiration and relative humidity variables for the growth and development stages of *Lophodermium* spp. are shown in Table 1. In average, the temperature was above 3.5 °C in the development period and during evapotranspiration (35.05 mm), in relation to the development phase, during which precipitation and relative humidity were higher, with 199.45 mm and 15.75 %, respectively.



Table 1. Current climate characterization of the growth and development phases of *Lophodermium* spp.

Phases	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (September-December)	13.6 - 14.2	473.0 - 584.3	213.7 - 219.2	75.8 - 80.2
Development (March-June)	15.8 - 16.8	343.2 - 445.0	217.8 - 281.1	64.4 - 71.5

De acuerdo con González (2004), quien realizó un estudio de incidencia y severidad del *Lophodermium* sp en *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *Pinus maximinoi* H.E. Moore en Guatemala, agosto 2003 a enero 2004, registró que un valor alto de humedad relativa (87 a 89 %) favoreció el desarrollo del patógeno. Además, sugirió que temperaturas bajas (<14 °C) y humedad relativa alta son factores determinantes para la maduración y liberación de esporas, lo cual aumenta el riesgo de infección en los árboles de pinos. Por su parte, Prihatini *et al.* (2015), en Tasmania, identificaron una comunidad de hongos asociados a *Lophodermium* en las acículas de *Pinus radiata* D. Don con precipitaciones entre 714 a 1 439 mm anuales, y temperaturas de 5.3 a 8.6 °C. Las precipitaciones abundantes (>400 y <1 000 mm) y humedades relativas altas propician el crecimiento del hongo (González, 2004; Prihatini *et al.*, 2015), lo anterior concuerda con las características de los sitios con presencia del patógeno registrados en el presente estudio.

Distribución potencial actual del hongo *Lophodermium* spp.

De acuerdo a los resultados, los requerimientos climáticos de *Lophodermium* spp. existen en la Sierra Norte de Puebla, por lo que el patógeno tiene un gran potencial de presentarse y extenderse a nuevos rodales de coníferas, tanto en Puebla como en Tlaxcala e Hidalgo. En la Figura 2 se observa que la distribución potencial alta se localiza, fundamentalmente, en la Sierra Norte de Puebla y en el estado de Hidalgo.

Las superficies que corresponden a las probabilidades alta, media y baja de distribución potencial actual de la especie se muestran en el Cuadro 2.

According to González (2004), who carried out a study of incidence and severity of *Lophodermium* spp. in *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl and *Pinus maximinoi* H. E. Moore in Guatemala, from August 2003 to January 2004, a high relative humidity (87 to 89 %) favored the development of the pathogen. Furthermore, he suggested that low temperatures (<14 °C) and high relative humidity are decisive factors for spore ripening and release, which increases the risk of infection in pine trees. For their part, Prihatini *et al.* (2015), in Tasmania, identified a community of fungi associated to *Lophodermium* in the needles of *Pinus radiata* Don., with annual precipitations ranging between 714 and 1 439 mm and temperatures of 5.3 to 8.6 °C. Abundant precipitations (>400 y <1 000 mm) and high relative humidity levels favor the growth of the fungus (González, 2004; Prihatini *et al.*, 2015); this agrees with the characteristics of the sites where the pathogen was recorded to occur in the present study.

Current potential distribution of the *Lophodermium* spp. fungus

According to the results, the climate conditions required by *Lophodermium* spp. exist in the Sierra Norte de Puebla; therefore, the pathogen has a great potential of occurring and spreading to new conifer stands, both in Puebla and in Tlaxcala and Hidalgo. Figure 2 shows that the high potential distribution is located mainly in the Sierra Norte de Puebla and in the state of Hidalgo.

The surface areas with low, medium and high probabilities of current potential distribution of the species are shown in Table 2.

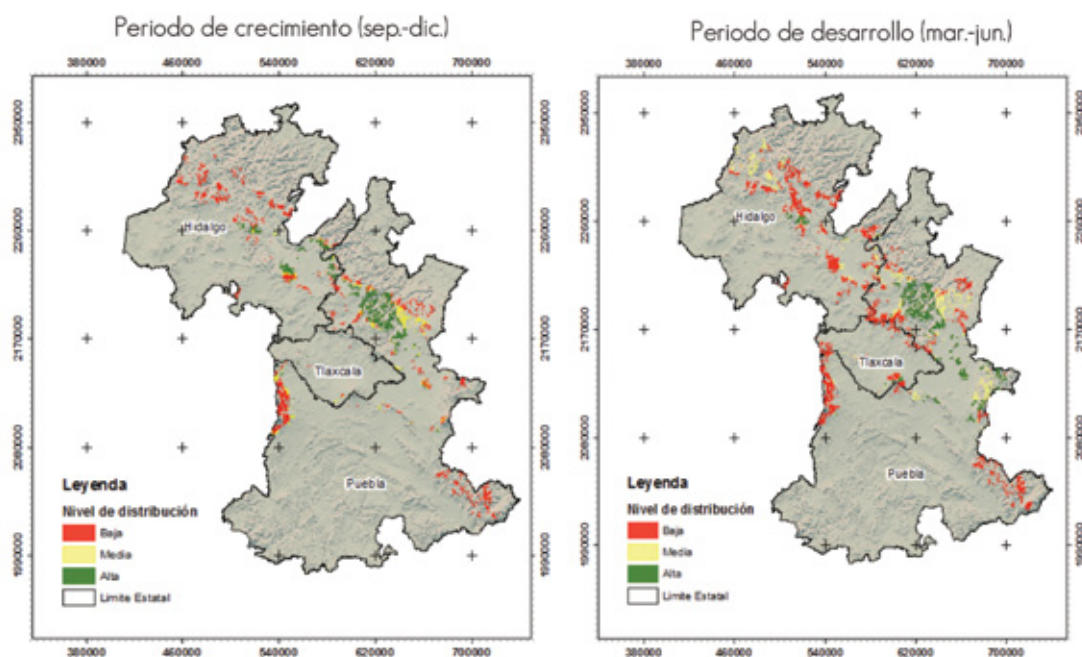
Cuadro 2. Distribución potencial actual (ha) de *Lophodermium* spp. para las dos etapas del ciclo biológico.

Probabilidad de presencia	Etapas de crecimiento	Superficie %	Etapas de desarrollo	Superficie %
Baja	143 018	56.6	240 433	58.0
Media	34 583	13.7	90 55	21.8
Alta	74 829	29.6	83 197	20.1
Total	252 430	100.0	414 188	100.0



Table 2. Current potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. for the two phases of the biological cycle.

Probability of presence	Growth phase	Surface area %	Development phase	Surface area %
Low	143 018	56.6	240 433	58.0
Medium	34 583	13.7	90 55	21.8
High	74 829	29.6	83 197	20.1
Total	252 430	100.0	414 188	100.0



Periodo de crecimiento (sept-dic) = Growth period (Sept.-Dec.); Periodo de desarrollo (mar-jun) = Development period (March-June).
 Figura 2. Distribución potencial actual de *Lophodermium* spp. en su etapa de crecimiento y desarrollo en el área de estudio.

Figure 2. Current potential distribution of *Lophodermium* spp. in the study area, in its growth and development phases.

Para la etapa de crecimiento, 56.6 % de la superficie fue catalogada con baja presencia del hongo y distribución en los estados de Puebla e Hidalgo. La probabilidad media de presencia de *Lophodermium* spp. correspondió a 13.7 % de la superficie; mientras que 29.6 % tiene una alta probabilidad, localizada, en su mayoría, en la Sierra Norte de Puebla y en menor medida en el sureste de Hidalgo.

En la etapa de desarrollo, 58.0 % de la superficie se estimó con baja probabilidad de presencia y se distribuyó, principalmente, en áreas de los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo. La distribución potencial media representa 21.8 % de la superficie y se extiende en Puebla e Hidalgo; la probabilidad de presencia alta fue de 20.1 % y se ubica, sobre todo en la Sierra Norte y centro de Puebla.

During the growth stage, 56.6 % of the surface area was classified as having a low presence of the fungus and a low distribution in the states of Puebla and Hidalgo. The medium probability of presence of *Lophodermium* spp. corresponded to 13.7 % of the surface, while 29.6 % has a high probability, mostly in the Sierra Norte de Puebla and, to a lesser extent, in southeastern Hidalgo.

During the development stage, 58.0 % of the surface was estimated to have a low probability of presence and was distributed mainly in the states of Puebla, Tlaxcala and Hidalgo. The medium potential distribution represents 21.8 % of the surface, in Puebla and Hidalgo; the high probability of presence was 20.1 % and was located mostly in the Sierra Norte and in central Puebla.

La superficie de la distribución potencial actual en etapa de desarrollo correspondió a 60.9 %, del total y 39.1 % a la de crecimiento. Estos resultados sugieren que las condiciones de mayor temperatura y evapotranspiración, así como la menor precipitación y humedad relativa propician el desarrollo de *Lophodermium*. No obstante, en la fase de crecimiento, las condiciones húmedas y de menor temperatura también son adecuadas para su propagación (González, 2004; Alvarado, 2005). Las condiciones frescas y húmedas, además de la alta densidad de plantas favorecen al hongo; asimismo, la presencia de lluvia proporciona humedad suficiente para la apertura de los histerotecios, aunque en condiciones secas igual ocurre (González, 2004; Alvarado, 2005). Lo anterior explica por qué las condiciones climáticas de la Sierra Norte de Puebla, Hidalgo y Tlaxcala son favorables para el crecimiento del hongo, en un periodo más húmedo y fresco, así como su desarrollo cuando el ambiente es más cálido y menos húmedo.

Distribución potencial bajo escenarios de cambio climático de *Lophodermium* spp

Las proyecciones climáticas para el 2039 indican que los valores de las variables en los bosques de coníferas se modificarán, lo cual beneficiará la presencia del hongo en los rodales de la Sierra Norte de Puebla, y municipios de los estados vecinos. Por consiguiente, el hongo tendrá mayores posibilidades de distribuirse en nuevas áreas cubiertas por coníferas, más allá de sus límites actuales.

Condiciones climáticas al 2039 bajo escenario RCP4.5

La temperatura, precipitación y evapotranspiración proyectadas al 2039 bajo el escenario RCP4.5 se resumen en el Cuadro 3. Se observan los contrastes en las diferentes etapas, puesto que uno es periodo húmedo y el otro seco.

Cuadro 3. Caracterización climática bajo escenario de cambio climático RCP4.5 (año 2039) de las etapas de crecimiento y desarrollo del hongo.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (septiembre-diciembre)	17.7 - 18.7	369.4 - 402.6	64.4 - 66.3	84.8 - 86.9
Desarrollo (marzo-junio)	19.6 - 21.2	234.8 - 270.0	81.5 - 83.7	82.4 - 83.3

Table 3. Climate characterization of the growth and development phases of the fungus under climate change scenario RCP4.5 (year 2039).

Phase	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (September-December)	17.7 - 18.7	369.4 - 402.6	64.4 - 66.3	84.8 - 86.9
Development (March-June)	19.6 - 21.2	234.8 - 270.0	81.5 - 83.7	82.4 - 83.3

The surface area of the current potential distribution was 60.9 % of the total in the development phase, and 39.1 % in the growth phase. These results suggest that conditions of higher temperature and evapotranspiration and lower precipitation and relative humidity favor the development of *Lophodermium*. However, during the growth phase, the conditions of high humidity and a lower temperature are also adequate for its propagation (González, 2004; Alvarado, 2005). Cool and humid conditions and a high density of the plants also favor the fungus; furthermore, the presence of rain provides enough humidity for the opening of the histerothecia, although this also occurs under dry conditions (González, 2004; Alvarado, 2005). This explains why the climate conditions of the Sierra Norte de Puebla, Hidalgo and Tlaxcala are favorable for the development of the fungus, in a more humid and cooler period, as well as its development in warmer and less humid environments.

Potential distribution of *Lophodermium* spp. under climate change scenarios

The climate projections for 2039 show that the values of the variables in the conifer forests will change, which will benefit the presence of the fungus in the stands of the Sierra Norte de Puebla and municipalities of the neighboring states. Thus, the fungus will have better possibilities of spreading beyond its present limits to new areas covered by conifers.

Climate conditions by 2039 under scenario RCP4.5

Table 3 summarizes the projected temperature, precipitation and evapotranspiration for the year 2039 under scenario RCP4.5. It also registers the contrasts in the various stages, as one of them is humid while the other is dry.

En el periodo de crecimiento del hongo las diferencias, en promedio, de las variables del tiempo actual al año 2039 con escenario del cambio climático RCP4.5 son notables: cambios positivos en temperatura y humedad relativa de 6.35 °C y 12.3 %, respectivamente; mientras que cambios negativos se observarán en la precipitación (194 mm) y evapotranspiración (225 mm).

En el periodo de desarrollo del hongo, las diferencias en promedio de las variables del tiempo actual al año 2039 serán de igual magnitud. Asimismo, se observarán aumentos en temperatura (6.0 °C) y humedad relativa (12.3 %), y disminuciones en precipitación (196 mm) y evapotranspiración (235 mm).

Los cambios en las variables climáticas a futuro, descritos anteriormente, tendrán repercusión en la distribución potencial de *Lophodermium* spp. para el año 2039, ya que se espera que las condiciones ambientales le serán favorables; en consecuencia, aumentará el riesgo de infección por el hongo en los bosques de coníferas bajo estudio.

Distribución espacial bajo escenario RCP4.5 (año 2039) de *Lophodermium* spp.

La vulnerabilidad de los bosques al ataque del patógeno en los bosques de coníferas en la región bajo estudio es factible, de acuerdo a los resultados obtenidos con el escenario RCP4.5 de cambio climático. Los mapas de distribución potencial para el año 2039, con el escenario RCP4.5 correspondientes a las etapas de crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 3. Se observa que la distribución potencial alta se localiza en la Sierra Norte de Puebla, con dirección al noroeste.

Las superficies que corresponden a las distribuciones potenciales alta, media y baja con escenario de cambio climático RCP4.5 (año 2039) se consignan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución potencial (ha) de *Lophodermium* spp. para el año 2039 bajo escenario RCP4.5 para las dos etapas del ciclo biológico.

Probabilidad de presencia	Etapas de crecimiento	% Superficie	Etapas de desarrollo	% Superficie
Baja	293 208	69.4	213 283	50.6
Media	26 096	6.2	48 829	11.6
Alta	102 895	24.3	159 433	37.8
Total	422 199	100.0	421 54	100.0

Table 4. Potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. for the two phases of the biological cycle by the year 2039 under scenario RCP4.5.

Probability of presence	Growth phase	% Surface area	Development phase	% Surface area
Low	293 208	69.4	213 283	50.6
Medium	26 096	6.2	48 829	11.6
High	102 895	24.3	159 433	37.8
Total	422 199	100.0	421 54	100.0

During the growth period of the fungus, the average differences in the variables between the present time and the year 2039 under climate change scenario RCP4.5 are significant, with positive changes in temperature and relative humidity of 6.35 °C and 12.3 %, respectively, and negative changes in precipitation (194 mm) and evapotranspiration (225 mm).

In the fungus development period, the average differences of the variables of real time to 2039 will have the same magnitude. Also, increase in temperature (6.0 °C) and relative humidity (12.3 %) will be observed, as well as reductions in rain precipitation (196 mm) and evapotranspiration (235 mm).

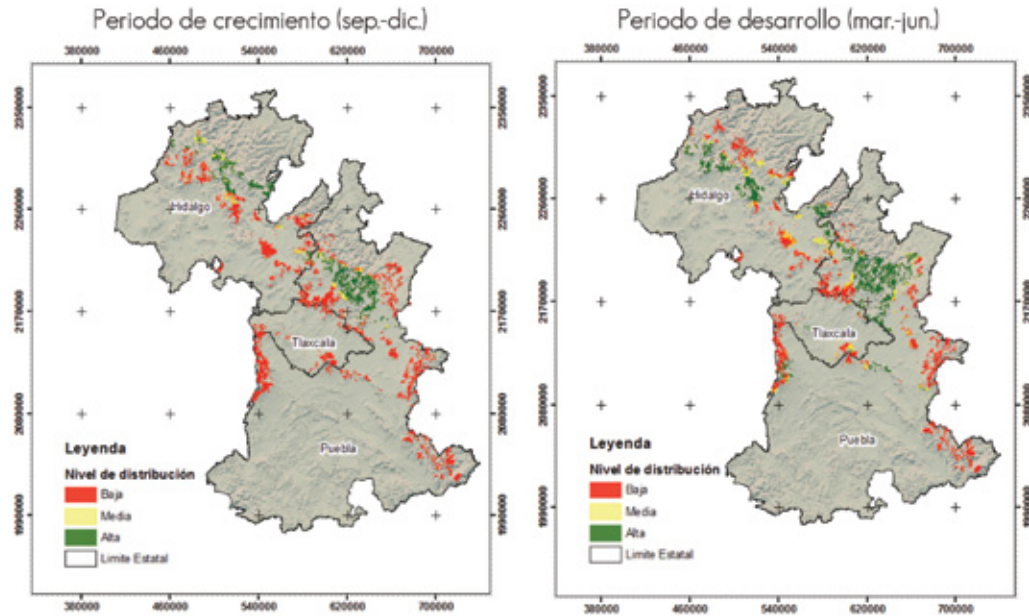
The changes previously described for climate variables in the future will have an impact on the potential distribution of *Lophodermium* spp. for the year 2039, as the environmental conditions are expected to be favorable to it; consequently, the risk of infection by the fungus in the studied forests will increase.

Spatial distribution of *Lophodermium* spp. under scenario RCP4.5 (year 2039)

The forests are likely to be vulnerable to attack by the pathogen in conifer forests in the studied region, according to the results obtained for climate change scenario RCP4.5. Figure 3 shows the potential distribution maps for the growth and development phases by the year 2039, under scenario RCP4.5. A high potential distribution is observed in the Sierra Norte de Puebla, toward the northwest.

Table 4 shows the surface areas corresponding to the high, medium and low potential distributions under climate change scenario RCP4.5 (year 2039).





Periodo de crecimiento (sept-dic) = Growth period (Sept.-Dec.); Periodo de desarrollo (mar-jun) = Development period (March-June).
 Figura 3. Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en sus etapas de crecimiento y desarrollo para el año 2039 con escenario RCP4.5, en el área de estudio.

Figure 3. Potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases by the year 2039 in the study area under scenario RCP4.5.

Durante la fase de crecimiento, 69.4 % de la superficie total de distribución del hongo tendrá una probabilidad de presencia baja, dispersa en los tres estados; mientras que la distribución potencial media y alta será de 6.2 % y 24.3 %, respectivamente. Por otra parte, para la fase de desarrollo, la distribución potencial aumenta en la categoría alta y media, pero disminuye en la baja con relación a la fase de crecimiento (Cuadro 4). Las áreas de distribución se mantienen, de acuerdo a los resultados, en la Sierra Norte de Puebla y en la parte central de Hidalgo.

La importancia del riesgo alto por la presencia del patógeno, según el escenario RCP4.5 a nivel municipal en su época de desarrollo, estarán presentes de la siguiente manera: Hidalgo en Meztlán (27 714 ha), Nicolás Flores (17 033 ha), Atotonilco (16 412 ha) y otros; Puebla en Ixtacamaxtitlán (55 690 ha), Aquixtla (53 191 ha), Tepetzintla (48 744 ha) y Zautla (46 926 ha); y Tlaxcala en Alzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha). En la época de crecimiento corresponden a Hidalgo: Eloxochitlán (16 257 ha), Tlahuiltepa (15 235 ha), Metztitlán (15 213 ha), San Agustín Metzquititlán (10 653 ha), Zacualtipán (10 653 ha); en Puebla: Ixtacamaxtitlán (55 014 ha), Aquixtla (43 932 ha), Zacapoaxtla (40 143 ha), Zautla (39 225 ha); y en Tlaxcala no habrá áreas de riesgo alto de presencia.

During the growth phase, 69.4 % of the total distribution of the fungus will have a low probability of presence, scattered in the three states; while the medium and high potential distribution will be 6.2 % 24.3 % and, respectively. On the other hand, the potential distribution increases in the high and medium categories, but decreases in the low category in relation to the growth phase (Table 4). According to the results, the distribution areas remain in the Sierra Norte de Puebla and in central Hidalgo.

Scenario RCP4.5 predicts a high risk due to the presence of the pathogen in its development phase in the following municipalities: Meztlán (27 714 ha), Nicolás Flores (17 033 ha), Atotonilco (16 412 ha) and others, in Hidalgo; Ixtacamaxtitlán (55 690 ha), Aquixtla (53 191 ha), Tepetzintla (48 744 ha) and Zautla (46 926 ha), in Puebla, and Alzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha), in Tlaxcala. As for its growth phase, the municipalities at high risk will be: Eloxochitlán (16 257 ha), Tlahuiltepa (15 235 ha), Metztitlán (15 213 ha), San Agustín Metzquititlán (10 653 ha) and Zacualtipán (10 653 ha), in Hidalgo; Ixtacamaxtitlán (55 014 ha), Aquixtla (43 932 ha), Zacapoaxtla (40 143 ha) and Zautla (39 225 ha), in Puebla; there will be no high risk of the presence of the pathogen in Tlaxcala.



Condiciones climáticas al 2039 bajo escenario RCP8.5

Los valores de temperatura, precipitación y evapotranspiración proyectados al 2039 bajo el escenario RCP8.5 se resumen en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Caracterización climática bajo escenario de cambio climático RCP8.5 (año 2039) de las etapas de crecimiento y desarrollo del hongo.

Etapas	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Humedad Relativa (%)
Crecimiento (sep.-dic.)	18.1 - 19.1	397.0 - 439.9	64.7 - 67.4	88.4 - 89.5
Desarrollo (mar.-jun.)	20.1 - 21.7	244.5 - 302.6	81.7 - 83.4	83.8 - 85.0

Table 5. Climate characterization of the growth and development phases of the fungus under climate change scenario RCP8.5 (year 2039).

Phases	Temperature (°C)	Precipitation (mm)	Evapotranspiration (mm)	Relative humidity (%)
Growth (Sept.-Dec.)	18.1 - 19.1	397.0 - 439.9	64.7 - 67.4	88.4 - 89.5
Development (March-June)	20.1 - 21.7	244.5 - 302.6	81.7 - 83.4	83.8 - 85.0

En el periodo de crecimiento las diferencias, en promedio, de las variables del tiempo actual al año 2039 son observables: la temperatura tendrá un cambio adicional de 6.95 °C, la precipitación de 148 mm menos, la evapotranspiración de 225 mm menor y la humedad relativa de 17.25 %.

De la misma manera, en el periodo de desarrollo del hongo, las diferencias en promedio de las variables del tiempo actual al año 2039 son considerables, la temperatura tendrá un cambio de 6.75 °C, la precipitación de 170 mm menos, la evapotranspiración de 235 mm menor y la humedad relativa de 26 %.

Distribución espacial bajo escenario RCP8.5 (año 2039) de *Lophodermium* spp.

En el escenario RCP8.5, los bosques de pino serán altamente vulnerables debido al ataque del hongo en la región bajo estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos. Los mapas de distribución potencial para el año 2039 con el escenario RCP8.5, de *Lophodermium* spp. en las etapas de crecimiento y desarrollo se presentan en la Figura 4. De manera general, la distribución potencial alta y media se localizan en la Sierra Norte de Puebla con dirección al noroeste; mientras que la distribución potencial baja se ubica, principalmente, al centro del área de estudio.

Las superficies que corresponden a las probabilidades de alta, media y baja distribución bajo escenario de cambio climático RCP8.5 (año 2039) se integran en el Cuadro 6.

Climate conditions by 2039 under scenario RCP8.5

Table 5 summarizes the temperature, precipitation and evapotranspiration values for the year 2039 under scenario RCP8.5.

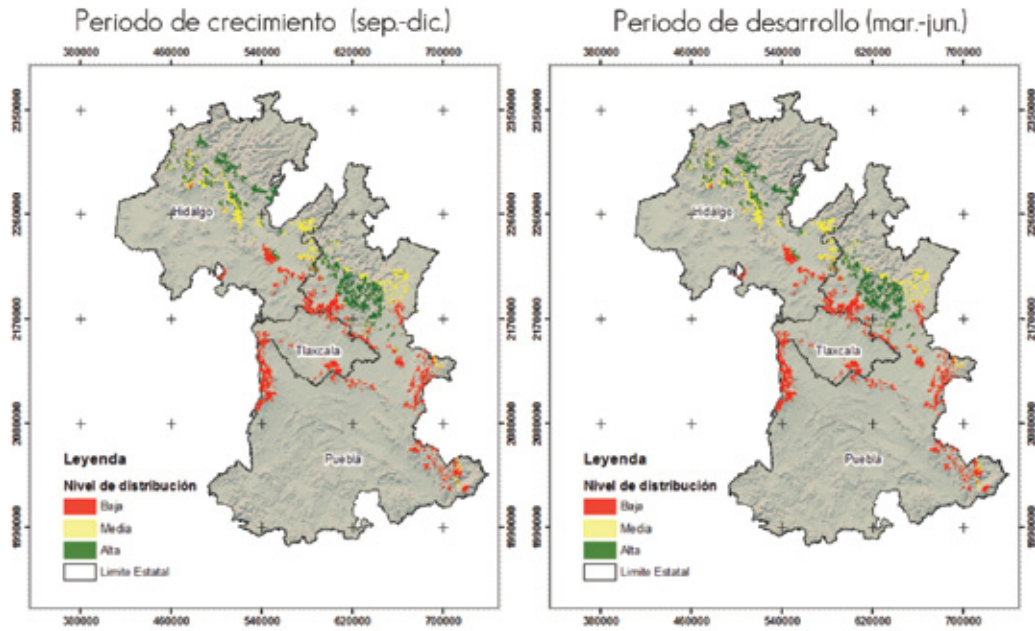
The average differences between the present time and the year 2039 for the growth phase are visible: the temperature will have an additional change of 6.95 °C; the precipitation will decrease by 148 mm; evapotranspiration, by 225 mm, and the relative humidity, by 17.25 %.

Likewise, considerable differences are predicted for the development phase of the fungus between the current time and 2039: the temperature will change by 6.75 °C, and the precipitation will decrease by 170 mm; evotranspiration, by 235 mm, and the relative humidity, by 26 %.

Spatial distribution of *Lophodermium* spp. under scenario RCP8.5 (year 2039)

According to the results obtained for scenario RCP8.5, pine forests will be highly vulnerable due to attack by the fungus in the studied region. Figure 4 shows the potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases maps for the year 2039 under scenario RCP8.5. In general, the high and medium potential distributions are located in the Sierra Norte de Puebla toward the northeast, while the low potential distribution is located mainly at the center of the study area.

The surface areas with high, medium and low probabilities of distribution under climate change scenario RCP8.5 (year 2039) are shown in Table 6.



Periodo de crecimiento (sept-dic) = Growth period (Sept.-Dec); Periodo de desarrollo (mar-jun) = Development period (March-June)
 Figura 4. Distribución potencial de *Lophodermium* spp. en sus etapas de crecimiento y desarrollo para el año 2039 con escenario RCP8.5, en el área de estudio.

Figure 4. Potential distribution of *Lophodermium* spp. in its growth and development phases in the study area by the year 2039 under scenario RCP8.5.

Cuadro 6. Distribución potencial (ha) de *Lophodermium* spp. para el año 2039 bajo escenario RCP8.5 para las dos etapas del ciclo biológico.

Potencialidad	Etapas de crecimiento	% Superficie	Etapas de desarrollo	% Superficie
Baja	195 358	46.3	258 316	61.3
Media	87 471	20.8	70 381	16.7
Alta	138 810	32.9	92 877	22.0
Total	421 639	100.0	421 574	100.0

Table 6. Potential distribution (ha) of *Lophodermium* spp. In the two phases of the biological cycle for the year 2039 under scenario RCP8.5.

Potentiality	Growth phase	% Surface area	Development phase	% Surface area
Low	195.358	46.3	258.316	61.3
Medium	87.471	20.8	70.381	16.7
High	138.810	32.9	92.877	22.0
Total	421.639	100.0	421.574	100.0

Durante la fase de crecimiento, con el escenario de cambio de climático RCP8.5, 46.3 % de la superficie total tendrá una probabilidad de presencia del hongo baja, mientras que la categoría alta y media representan 32.9 % y 20.8 %, respectivamente. En el caso de la fase de desarrollo de *Lophodermium* spp. la superficie se reduce en la categoría alta y media, y aumenta en la baja con respecto a la fase de crecimiento, como se aprecia en el Cuadro 6.

Under climate change scenario RCP8.5, 46.3 % of the total surface area will have a low probability of presence of the fungus in the growth phase, while the high and medium probabilities represent 32.9 % and 20.8 % of the surface area, respectively. As for the development phase of *Lophodermium* spp., the surface area decreases in the high and medium categories, and increases in the low category with respect to the growth phase, as shown in Table 6.

El escenario RCP8.5 indica que habrá condiciones climáticas adecuadas para la presencia de *Lophodermium* spp. La humedad relativa es cercana y la temperatura superior a las que cita González (2004), 87 % y 14 °C, respectivamente, con un porcentaje de severidad de 42 %.

La importancia del riesgo alto por la presencia del hongo, con el escenario RCP8.5, a nivel municipal en la época de desarrollo del patógeno, estarán dispuestos de la siguiente forma: en Hidalgo, Metztlán (23 728 ha), Tulancingo (12 730 ha), Atotonilco (11 281 ha), Cuauhtepic (10 415 ha); en Puebla, Aquixtla (45 242 ha), Ixtacamaxitlán (41 562 ha), Tepetzintla (39 060 ha), Zautla (36 895 ha), Tetela de Ocampo (36 461 ha), y en Tlaxcala, Altzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha) y Españaita (952 ha). En la época de crecimiento, en Hidalgo: San Agustín Metzquitlán (23 575 ha), Zacualtipán (23 575 ha), Tlahuiltepa (18 887 ha), Metztlán (18 629 ha) y Eloxochitlán (15 475 ha); en Puebla: Ixtacamaxitlán (62 242 ha), Aquixtla (45 032 ha), Zacapoaxtla (41 738 ha), Zautla (41 333 ha), Xochiapulco (41 103 ha) y Tetela de Ocampo (38 670 ha), y en Tlaxcala no habrá alta probabilidad de presencia.

Con base en los resultados de la modelación de la distribución de *Lophodermium* spp. con los escenarios RCP4.5 y 8.5, las condiciones ambientales proyectadas serán favorables para el hongo a finales de la década de los 30, pues habrá un aumento de los bosques de pinos afectados. Las diferencias de superficies entre etapas de desarrollo y crecimiento y entre escenarios, es porcentualmente baja. Lo anterior indica que las variables climáticas de humedad relativa, temperatura y precipitación pronosticadas con los escenarios RCP4.5 y 8.5 son similares a los registrados por González (2004), quien señala una alta incidencia y severidad del hongo.

Los valores obtenidos en este trabajo coinciden con lo documentado por Tchebakova *et al.* (2016), autores que registran, en el corto plazo (año 2020), una mayor cantidad de áreas forestales dañadas por *Lophodermium* spp. Aunque, se utilizaron escenarios de cambio climático diferentes al presente estudio (B1 y A2: modelo HadCm3), citan una tendencia a condiciones favorables para el desarrollo de *Lophodermium* spp. Si bien, no hay comparación para el largo plazo con este trabajo, es importante hacer mención que, según estos autores, para el 2080 habrá una reducción de los bosques dañados, debido a las particularidades del área de estudio que utilizaron.

Por otro lado, los modelos predictivos de distribución de especies han ido en aumento, ya que son una herramienta que permite realizar estimaciones a futuro de manera relativamente precisa (Martínez *et al.*, 2004 citado por Paredes *et al.*, 2011). Dichos modelos generan un área intermedia entre la que ocupa la especie y la potencial (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008), o lo que podría ser una aproximación al área de distribución.

According to scenario RCP8.5, the climate conditions will be adequate for the presence of *Lophodermium* spp. The relative humidity is close to, and the temperature, higher than those cited by González (2004), 87 % and 14 °C, respectively, with a severity percentage of 42 %.

Under scenario RCP8.5, the municipalities with high risk due to the presence of the fungus in its development phase will be: Metztlán (23 728 ha), Tulancingo (12 730 ha), Atotonilco (11 281 ha) and Cuauhtepic (10 415 ha), in Hidalgo; Aquixtla (45 242 ha), Ixtacamaxitlán (41 562 ha), Tepetzintla (39 060 ha), Zautla (36 895 ha) and Tetela de Ocampo (36 461 ha), in Puebla, and Altzayanca (3 016 ha), Huamantla (2 607 ha), Terrenate (1 338 ha) and Españaita (952 ha), in Tlaxcala. In the growth phase of the fungus, the municipalities at high risk will be San Agustín Metzquitlán (23 575 ha), Zacualtipán (23 575 ha), Tlahuiltepa (18 887 ha), Metztlán (18 629 ha) and Eloxochitlán (15 475 ha), in Hidalgo, and Ixtacamaxitlán (62 242 ha), Aquixtla (45 032 ha), Zacapoaxtla (41 738 ha), Zautla (41 333 ha), Xochiapulco (41 103 ha) and Tetela de Ocampo (38 670 ha) in Puebla; there will be no high probability of presence of the fungus in Tlaxcala.

Based on the results of the distribution models of *Lophodermium* spp. under scenarios RCP4.5 and 8.5, the projected environmental conditions will be favorable for the fungus in the late 2030s, for the number of affected pine forests will increase. The differences in the surface areas between the development and growth phases and between scenarios is low in terms of percentage. This indicates that the climate variables of relative humidity, temperature and precipitation predicted for scenarios RCP4.5 and 8.5 are similar to those registered by González (2004), who points out a high incidence and severity of the fungus.

The values estimated in this work agree with those obtained by Tchebakova *et al.* (2016), who registered a larger amount of forest areas damaged by *Lophodermium* spp. in the short term (year 2020); although they used different climate change scenarios from those utilized in the present study (B1 and A2: model HadCm3), they cite a tendency toward favorable conditions for the development of *Lophodermium* spp. No comparison was made with this study for the long term; however, we should note that, according to these authors, the surface area of damaged forests will decrease by 2080, due to the particular characteristics of their study area.

On the other hand, the predictive models of species distribution have increased in number, as they are a tool that allows relatively accurate estimations for the future (Martínez *et al.*, 2004 quoted by Paredes *et al.*, 2011). These models generate an intermediate zone between the surface areas currently and potentially occupied by the species (Jiménez-Valverde *et al.*, 2008), or what might be an approximation to the distribution area.

El algoritmo GARP para la distribución de *Lophodermium* spp. determinó que las áreas donde está presente y las que tienen condiciones óptimas para su desarrollo tienen similitud espacial, e.g. la región Sierra Norte de Puebla para ambas etapas en el periodo actual. Por otro lado, bajo escenarios de cambio climático, los resultados sugieren que el área cuyas condiciones ambientales son favorables para la presencia y desarrollo del hongo serán más amplias. Los escenarios climáticos futuros prevén que la disponibilidad de humedad en los bosques será fuertemente afectada, lo cual tendrá un impacto directo en el ciclo de vida de *Lophodermium*. Esto podría explicarse, a partir de que las temperaturas más cálidas producen mayores pérdidas de agua por evapotranspiración y reducen la capacidad de las plantas para hacer un uso más eficiente del vital líquido (Mortsch, 2006).

Conclusiones

Lophodermium tendrá una distribución potencial amplia en el futuro cercano, debido a los cambios climáticos. Los resultados evidencian que nuevas áreas de bosques de pino serán afectadas, ya que los factores climáticos favorecerán el crecimiento y desarrollo del hongo más allá de donde se distribuye actualmente. Los factores climáticos más importantes que determinan la presencia del hongo en los pinos son las precipitaciones moderadas, temperaturas frías y humedades relativas alta.

El uso del algoritmo GARP permite la determinación cuantitativa de las probabilidades de presencia de *Lophodermium*, actual y con escenarios futuros. Este trabajo representa un esfuerzo para modelar la distribución potencial de *Lophodermium*, a fin de planear con tiempo medidas para mitigar el impacto de este hongo en los recursos forestales del área bajo estudio. 🍃

Agradecimientos

A la Comisión Nacional Forestal por el financiamiento del proyecto "Determinación, distribución y control del agente causal denominado Caída Foliar del Pino en Puebla" y al Sistema Meteorológico Nacional y a la Comisión Nacional del Agua por las facilidades de proporcionar las bases de datos de las estaciones meteorológicas.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno.

Contribución por autor

Ramiro Pérez Miranda: dirección y desarrollo de la investigación, participación en la elaboración del manuscrito; Martín Enrique Romero Sánchez: desarrollo y supervisión del análisis con el modelo GARP, elaboración y revisión del manuscrito; Antonio González Hernández: elaboración de la cartografía base y desarrollo de las capas de información a partir de escenarios de cambio climático; Eduardo Pérez Sosa: desarrollo de los análisis y síntesis de la información, elaboración del manuscrito; Víctor Javier Arriola Padilla: definición de los requerimientos ecológicos del hongo, revisión y análisis de los resultados; así como la elaboración y revisión del escrito.

The GARP algorithm for the distribution of *Lophodermium* spp. determined a spatial similarity between the areas where it occurs and those with optimal conditions for its development, e.g. the region of the *Sierra Norte de Puebla* for both phases at the present time. On the other hand, under climate change scenarios, the results suggest that the surface areas with favorable environmental conditions for the presence and development of the fungus will be wider. Future climate scenarios foresee that the availability of moisture in the forests will be strongly affected; this will have a direct impact on the life cycle of *Lophodermium*. This may be explained by the fact that warmer temperatures produce greater losses of water by evapotranspiration and reduce the ability of the plants to use this vital fluid more efficiently (Mortsch, 2006).

Conclusions

Lophodermium will have a wide potential distribution in the near future due to climate changes. The results show that new areas of the pine forests will be affected, as the climate conditions will favor the growth and development of the fungus beyond its current distribution. The main climate factors determining the presence of the fungus in pine trees are moderate precipitations, cold temperatures and relatively high humidity.

The use of the GARP algorithm allows quantitative determination of the probabilities of presence of *Lophodermium* both currently and under future scenarios. This work represents an effort to model the potential distribution of *Lophodermium* in order to plan timely actions for mitigating the impact of this fungus on the forest resources of the study area. 🍃

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the *Comisión Nacional Forestal* (the National Forestry Commission) for funding the "Determination, distribution and control of the causative agent named Leaf Fall in Pine Trees of Puebla" Project as well as to the *Sistema Meteorológico Nacional* (the National Meteorological System) and to the *Comisión Nacional del Agua* (the National Water Commission) for providing the databases of their weather stations.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interests.

Contribution by author

Ramiro Pérez Miranda: developed and led the research and participated in the drafting of the manuscript; Martín Enrique Romero Sánchez: development and supervision of the analysis with the GARP model, drafting and revision of the manuscript; Antonio González Hernández: base cartography and development of information layers based on climate change scenarios; Eduardo Pérez Sosa: developed the analyses and the information synthesis and participated in the drafting of the manuscript; Víctor Javier Arriola Padilla: determination of the ecological requirements of the fungus, revision and analysis of the results, drafting and revision of the manuscript.

End of the English version

Referencias

- Alvarado, R. D. 2005. Enfermedades y agentes abióticos en árboles en México: conceptos, diagnosis y manejo. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de Méx., México. 275 p.
- Allen, C. D. 2009. Muerte regresiva del bosque inducida por el clima: ¿un fenómeno mundial en aumento? *Unasylva* 60(231-232):43-49.
- Anderson, R. P., D. Lewc and A. Townsend P. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162:211-232.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto G., A. C. Conde Á., A. Quintanar I., J. S. Santana S., R. Romero C., M. E. Maya M., J. G. Rosario de La C., M. del R. Ayala E., H. Carrillo T., O. Santiesteban y M. E. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC. <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html> (2 de diciembre de 2015).
- Cervantes Z., Y., S. L. Cornejo O., R. Lucero M., J. M. Espinoza R., E. Miranda V. y A. Pineda V. 1990. Provincias Fisiográficas de México. Extraído de Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Vectorial (shp). Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México.
- Cibrián T., D., D. Alvarado R. y S. E. García D. 2007. Enfermedades forestales en México. Forest diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo: CONAFOR-SEMARNAT, México; Forestry Service USDA, EUA; NRCAN Forest Service, Canadá y Comisión Forestal de América del Norte, COFAN, FAO. Chapingo, Edo. de Méx., México. 587 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 2015. Temperatura media anual en México (1910-2009), escala: 1:1000000. Vectorial (shp) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D. F., México. s/p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía Básica. Área de Proyectos y Mercados Forestales de Carbono. Zapopan, Jal., México. 87 p.
- Cordón C., P. R. 2009. Caracterización fitosanitaria de las plantaciones del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) en los Departamentos de Alta Verapaz y el Petén, Guatemala. Tesis Maestría. Programa de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 57 p.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2016. ArcGIS Desktop. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>. (10 de enero de 2016).
- French, D. W. 1988. Forest and Shade Tree Pathology. University of Minnesota. Department of Plant Pathology. St. Paul, MN, USA. 271 p.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Vectorial (shp). Escala 1:1000000, México. D. F., México. s/p.
- González S., M. L. 2004. Caracterización del complejo de patógenos causales del tizón de la acícula del pino en la Finca Saquichai, Cobán, Alta Verapaz. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos. Guatemala, Guatemala. 42 p.
- Hattemer, H. H. 1964. Geographic variation of resistance to *Lophodermium pinastri* in scots pine. In: Gerhold, H. D., R. E. McDermott and E. J. Schreiner (ed.). *Breeding Pest-Resistant Trees: Proceedings of a NATO and N. S. F. Pennsylvania State University*. Philadelphia, PA, USA. pp. 97-102.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recreat/usuarios/Default.aspx> (26 de enero de 2016).
- Jiménez-Valverde, A., J. M. Lobo and J. Hortal. 2008. Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modeling. *Diversity and Distributions* 14:885-890.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005. Adaptation of forest ecosystems and the forest sector to climate change. Forests and Climate Change Working Paper Num. 2. Rome, Italy. 87 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Bases físicas. Resumen técnico. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf (20 de marzo de 2016).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio Climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wg2_spm_es.pdf (3 de marzo de 2016).
- Martínez M., E., A. T. Peterson and W. W. Hargrove. 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 13:305-314.
- Martínez, N. 2010. Apuntes sobre modelación de nichos ecológicos. Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental, del Instituto de Ecología de la UNAM. ftp://148.231.212.8/Backups/Eaton/Bibliotesis/Modelado%20de%20nichos/Apuntes_ENM_W.pdf. (17 de diciembre de 2015).
- Menéndez, R. 2007. How are insects responding to global warming? *Tijdschrift voor Entomologie* 150: 335-365.
- Microsoft Corporation. 2000. Manual del programador, Parte 1: Programación en Visual FoxPro 6.0. Redmond, WA, USA. 83p.
- Minter, D. W. 2015. Fungi of Ukraine, Rhytismatales. CABI Bioscience, Bakeham Lane, Egham, Surrey. UK. <http://www.cybertruffle.org.uk/papers/rhytukra/index.htm#abs> (11 de enero de 2016).
- Moore, B. y G. Allard. 2008. Los impactos del cambio climático en la sanidad forestal. Sanidad y Bioseguridad Forestal. FAO. Roma, Italia. 42 p.
- Mortsch, L. D. 2006. Impact of climate change on agriculture, forestry and wetlands. In: Bhatti, J. S., R. Lal, M. J. Apps and M. A. Price (eds.). *Climate change and managed ecosystems*. Taylor and Francis, CRC Press. Boca Ratón, FL, USA. pp. 45-67.
- Paredes G., D. M., A. Ramírez B. and M. A. Martínez M. 2011. Distribución y representatividad de las especies del género *Crotalus* en las áreas naturales protegidas de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(2): 689-700.
- Prihatini, I., M. Glen, T. J. Wardlaw, D. A. Ratkowsky and C. L. Mohammed. 2015. Needle fungi in young *Tasmanian Pinus radiata* plantations in relation to elevation and rainfall. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 45:25. DOI: 10.1186/s40490-015-0055-6.
- Samaniego, J. L. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile, Chile. 148 p.
- Stockwell, D. R. B. and D. P. Peters. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13:143-158.
- Sturrock, R. N., S. J. Frankelb, A. V. Brownc, P. E. Hennond, J. T. Kliejunasb, K. J. Lewise, J. J. Worrallf and A. J. Woodsg. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology* 60: 133-149.
- Tchebakova, N. M., N. A. Kuzmina, E. I. Parfenova, V. A. Senashova and S. R. Kuzmin 2016. Potential climate-induced distributions of *Lophodermium* needle cast across central Siberia in the 21 century. *Web Ecology* 16: 37-39.



Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38 (1): 55-94.

Vidal Z., R. 1990. Precipitación media anual. En *Precipitación*, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1:4000000. (shp). Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. s/p.

Yanchuk A. y Allard G. 2009. Los programas de mejoramiento de árboles para la salud de los bosques: ¿pueden seguir el mismo ritmo de los cambios climáticos? *Unasyva* 60(231/232):50-56.



