

Efecto del cambio climático en la distribución global de la polilla de la papa (*Phthorimaea operculella* Zeller)

Effect of climate change on the global distribution of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella* Zeller)

Ligia Magali García-Rosero¹ , Fernando López-Morales^{2*} , Genaro Pérez-Jiménez³ ,
Gregorio Hernández-Salinas⁴ , César Sotelo-Leyva⁵ , Claudia García-Sánchez⁶ 

¹ Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva, C. Universitaria 342, 01001, Chachapoyas, Amazonas, Perú.

² Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Universidad 59, San Juan Acateno, 73695, Teziutlán, Puebla, México.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental San Martinito, Km. 56.5, Carretera Federal México-Puebla, 74100, Santa Rita Tlahuapan, Puebla, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Carretera a la Compañía s/n, Km. 4, 95005, Tepetitlanapa, Zongolica, Veracruz, México.

⁵ Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Av. Lázaro Cárdenas s/n, 39086, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, México.

⁶ Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Producción Agrícola y Animal-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, 04960, Coapa, Villa Quietud, Coyoacán, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: fernando.lopezmor@correo.buap.mx

Fecha de recepción:

9 de abril de 2022

Fecha de aceptación:

28 de mayo de 2025

Disponible en línea:

15 de diciembre de 2025

RESUMEN

Phthorimaea operculella (Zeller) (Lepidoptera, Gelechiidae) plaga de importancia mundial que afecta al cultivo de papa, tiene presencia en 105 países. Se distribución potencial se evaluó con CLIMEX bajo condiciones actuales y el escenario climático A2-2050. El área de establecimiento ($EI > 30$) pasó de 29,327,798 km² a 17,607,147 km² en el futuro. En América, África, Asia, Oceanía y Europa se estimaron incrementos porcentuales de 35.56 %, 53.69 %, 40.38 %, 41.27 % y 21.13 %, respectivamente, concentrándose la mayor expansión en América. Los resultados identifican regiones en riesgo y resaltan la necesidad de fortalecer el monitoreo y manejo sustentable.

PALABRAS CLAVE

CLIMEX, modelos de distribución de plaga, número de generaciones, escenario A2-2050.

ABSTRACT

Phthorimaea operculella (Zeller) (Lepidoptera, Gelechiidae), a globally important pest affecting potato crops, is present in 105 countries. Its potential distribution was evaluated using CLIMEX under current climate conditions and the A2-2050 scenario. The area suitable for establishment ($EI > 30$) decreased from 29,327,798 km² to 17,607,147 km² in the future. In the Americas, Africa, Asia, Oceania, and Europe, estimated percentage increases were 35.56 %, 53.69 %, 40.38 %, 41.27 %, and 21.13 %, respectively, with the largest expansion occurring in the Americas. These results identify regions at risk and highlight the need to strengthen monitoring and sustainable management strategies.

KEYWORDS

CLIMEX, pest distribution models, number of generations, A2-2050 scenario.

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

(CC BY-NC-SA 4.0)

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola requiere de un proceso de adaptación ante los presentes retos del cambio climático para hacer frente a la creciente demanda de alimentos (Gómez-Zavaglia et al., 2020). Lo anterior se ve reflejado en la existencia de afectaciones ambientales sobre el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) debido al cambio climático (Martín Martín y Jerez Mompie, 2017). Por ejemplo, en la región andina se han documentado variaciones significativas en la distribución temporal de la precipitación y fluctuación en la temperatura, lo que ha ocasionado la aparición de plagas en sitios nuevos (Julio et al., 2018).

La polilla de la papa *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera, Gelechiidae), es una especie nativa de América del Sur (Lyngkhai et al., 2022; Rondon, 2010) de distribución mundial, con alta dispersión en zonas cálidas, pero también se le encuentra en zonas frías como los Andes de Perú, Bolivia, Colombia y Venezuela (Kroschel et al., 2013). Además, se ha registrado en Kenia y Nepal (Quintana Salgado, 2024) y en el noroeste del Pacífico de los Estados Unidos (Adhikari et al., 2022). En los países de República de Moldavia y Bielorrusia es considerada plaga cuarentenaria, y en Azerbaiyán, como plaga no cuarentenaria regulada; mientras que en Rusia, Turquía y Ucrania es una plaga con una distribución limitada (European Food Safety Authority et al., 2024).

Phthorimaea operculella es considerada una de las plagas más importantes para la papa por las pérdidas económicas que produce, debido a su estrecha relación como hospedero, amplia adaptabilidad a los cambios estacionales y alto potencial reproductivo (Rondon, 2020). Específicamente en Perú, se registraron pérdidas hasta de un 50 % en superficies sin medidas fitosanitarias y 90 % en tubérculos almacenados durante cuatro meses (International Potato Center, 2017).

De acuerdo con Hódar et al. (2012) y Jactel et al. (2019), el cambio climático favorece el incremento en frecuencia de los insectos derivado de la rápida multiplicación en tiempos más cortos, impulsando una mayor fecundidad y sobrevivencia debido a que factores como la humedad, alimentación y temperatura influyen directamente en su ciclo biológico.

De esta manera, el cambio climático ha contribuido a la ampliación en la distribución global de los insectos plaga generando pérdidas económicas significativas en la agricultura, la biodiversidad y el medio ambiente (Angelotti

et al., 2024; Jactel et al., 2019). Ante la expansión de las plagas a regiones nuevas con potenciales condiciones climáticas adecuadas para su crecimiento y desarrollo, es necesario proponer estrategias de adaptación, mitigación, monitoreo y métodos de control efectivos que las regulen (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2000; Xu et al., 2020; Yan et al., 2017). Al respecto, los modelos de distribución espacial de especies son una herramienta útil en el monitoreo geográfico a través del tiempo, que predice la distribución de las especies; el cual se basa en la ecogeografía y brindan información que puede ser utilizada en la biología de la conservación (Mateo et al., 2012). Además, pueden describir la panorámica actual, son capaces de predecir escenarios futuros, analizar los efectos del cambio climático y estimar el riesgo potencial de invasión de una especie en una área específica o global (Plissock y Fuentes-Castillo, 2011).

Para identificar la distribución espacial de *P. operculella*, es necesario determinar sitios con condiciones climáticas mediante datos registrados en campo y fuentes secundarias. Como ejemplo, el número de generaciones en las zonas tropicales y subtropicales oscila entre 7 a 13 y la temperatura óptima para la oviposición y crecimiento es de 23-24 °C, mientras que el tiempo de desarrollo de huevo a adulto varía considerablemente (20-165 días) (Chandel et al., 2020). Estos datos pueden analizarse mediante modelos correlativos para entender los efectos del cambio climático. Dicha información es útil para entender su impacto sobre la distribución de *P. operculella*, según los requerimientos en cada región (Lacey et al., 2010; Rondon, 2020).

Jung et al. (2019) evaluaron la distribución geográfica potencial de la polilla de la papa en China e India en tres escenarios climáticos con CLIMEX. Este *software* fue usado para proyectar distribuciones de especies basadas en climas, proporcionando información valiosa sobre el alcance de la disposición geográfica invasiva de las especies, y, de esta manera, evaluar el riesgo de plagas (Wang et al., 2017); este modelo integra datos asociados de las respuestas semanales (temperatura, humedad y horas luz) de una población específica y su relación climática en una serie de índices anuales, identificando repuntes de variación climática (frío, calor y clima húmedo) de la especie en cuestión (García Rosero et al., 2015).

Otro ejemplo, es el modelo del efecto del cambio climático en la producción mundial del cultivo de papa con proyecciones en periodos de 2010-2039 y 2040-2069,

utilizando siete escenarios climáticos de cinco modelos climáticos diferentes de acuerdo con Raymundo et al. (2018). Estos autores determinaron un incremento de la temperatura entre 2.1 °C y 3.2 °C según el escenario climático, causando una disminución del rendimiento por la presencia de mayor cantidad de plagas y enfermedades en el cultivo. Por otra parte, Kroschel et al. (2013), indicaron la importancia de conocer los patrones de distribución de la polilla de la papa, debido a su potencial efecto negativo en la producción de zonas vulnerables al cambio climático. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la distribución actual de la polilla de la papa y su efecto ante el escenario de cambio climático A2-2050 a nivel global, empleando el modelo CLIMEX. Se seleccionó el escenario de cambio climático A2-2050 para analizar la distribución potencial de *P. operculella* en condiciones climáticas futuras, el cual muestra un incremento en la temperatura promedio de 1.58 °C a nivel global.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como se mencionó anteriormente, la distribución geográfica de la polilla de la papa se realizó a nivel mundial bajo condiciones de clima actual y el escenario de cambio climático A2-2050.

Para el caso de los registros de presencia de *P. operculella*, se utilizaron fuentes secundarias (literatura científica de acceso abierto, base de datos como Global Biodiversity Information Facility). Los datos de georreferenciación de los sitios de existencia de *P. operculella* se obtuvieron con las coordenadas geográficas y fueron representados mediante puntos (grados decimales, datum: WGS 1984.). En total se encontraron 1,473 registros de presencia de *P. operculella* y se concentraron en una hoja de Excel.

La distribución geográfica observada de *P. operculella* en África, Asia, América, Europa y Oceanía indicó la existencia de 1,473 registros de presencia; de los cuales, 1,151 presentan coordenadas espaciales. Las coordenadas son expresadas en grados decimales y el datum, en WGS 84 (puntos de color rojo); además, 322 registros fueron a nivel de país (polígonos de color verde) y región (polígonos de color amarillo), por lo que se determinó que *P. operculella* está presente en 105 países.

Los países que poseen la mayor cantidad de registros de presencia de *P. operculella* fueron: Egipto, el cual presentó 36 (23 son coordenadas espaciales y 13, a

nivel país o región), Estados Unidos presentó 832 (775 con coordenadas espaciales y 57 a nivel país o región), Costa Rica tuvo 10 (7 y 3, respectivamente), mientras que Perú presentó 46 registros (35 y 11, respectivamente). Para el continente asiático, la India tuvo 54 registros (38 con coordenadas espaciales y 16 a nivel país o región). Mientras que, para Europa, Italia presentó 2 de manera similar a Turquía, sin embargo, Turquía solo tuvo 4 registros a nivel país o región. Por último, en el continente de Oceanía, Australia, contó con 109 registros en total (84 con coordenadas espaciales y 25 a nivel país o región).

Para determinar la distribución potencial de *P. operculella*, se empleó el escenario actual (1961-1990) y el escenario A2-2050 para modelar el efecto del cambio climático, el cual muestra a nivel global un incremento de 1.58 °C en la temperatura promedio (IPCC, 2007).

El modelo CLIMEX Versión 3 (Maywald et al., 2007) sirvió para pronosticar la distribución potencial de *P. operculella* bajo diferentes escenarios de cambio climático. Por lo tanto, utilizó respuestas (fisiológicas) de la especie al clima en función de las observadas en los registros de la distribución. Como base en el ajuste de los parámetros del modelo CLIMEX, se emplearon las respuestas del clima en donde se desarrolla el organismo y los datos meteorológicos para predecir la distribución potencial de organismos poiquiloterms; todo ello, bajo condiciones climáticas actuales y futuras, a escala mundial. La función propia del programa CLIMEX empleada para este estudio fue "Compare Locations", puesto que permite describir la distribución potencial de las especies con relación al clima. Al ingresar al programa parámetros fisiológicos (temperatura) de *P. operculella* y variables climáticas, el modelo construye un índice ecológico (EI), que describe la condición ambiental que ofrece un determinado sitio para el establecimiento de la especie en estudio (Fischbein et al., 2019).

En el modelo CLIMEX se incluyó una base de datos de 2,400 estaciones meteorológicas en todo el mundo durante el periodo de 1951-1990, así como redes climáticas interpoladas, las cuales fueron proporcionadas por la Comunidad del Cambio Global a través del Climate Research Unit (CRU), IPCC y Global Climate Data (WorldClim), generando 6,789,612 datos meteorológicos mensuales para 565,801 localidades a nivel mundial (García Rosero et al., 2015; Kriticos et al., 2012). Los datos meteorológicos para condiciones actuales y futuras (escenario A2-2050) incluyeron: temperatura mínima promedio mensual en

grados centígrados (°C), temperatura máxima promedio mensual en °C, precipitación promedio mensual en mm y humedad relativa promedio mensual a las 9:00 y 15:00 horas, respectivamente.

El *EI* se calculó de la siguiente manera: $EI = GI_A \times SI \times SX$, donde (GI_A) representa el índice de crecimiento anual, el cual describe el crecimiento potencial de una población con los factores de estrés anuales que limitan su crecimiento en épocas menos favorables acumulado durante el año; *SI* es el índice de estrés anual, el cual está compuesto por los índices anuales de frío, sequía, calor, humedad y, por último, *SX* equivale al índice de interacción de estrés, el cual se compone de los índices anuales de frío-seco, frío-húmedo, calor-sequedad y calor-humedad (García Rosero et al., 2015). Todas estas son ecuaciones descritas por Fischbein et al. (2019). El *EI* toma valores entre 0 y 100, describiendo sitios inhabitables y óptimos, respectivamente. Un *EI* cercano a cero indica que la localidad no es favorable para la supervivencia a largo plazo de la especie; en cambio, un *EI* de 100 corresponde a un sitio de bajas condiciones constantes e ideales; mientras que los índices de crecimiento y estrés son combinados en el *EI*, el cual proporciona una medida de favorabilidad climática para la ocupación de un determinado lugar por la polilla de la papa (García Rosero et al., 2015).

Distribución potencial de *P. operculella*

Para determinar la distribución potencial mediante el modelo CLIMEX, se usaron dos metodologías complementarias: a) estimar la respuesta *P. operculella* a los diferentes parámetros ambientales (Cuadro 1), y

Cuadro 1. Umbrales de temperatura para *Phthorimaea operculella* Zeller. Tomado de Hernández Velázquez y Guerrero Rodríguez (1989).

Parámetros	Valor en °C
DV0: temperatura mínima limitante	8-10
DV1: temperatura mínima óptima	16-18
DV2: temperatura máxima óptima	28
DV3: temperatura máxima limitante	32
PDD: días-grados	400

Donde el valor de DV0 a DV3 describe el rango de temperatura para *P. operculella* en el cual puede sobrevivir. PDD: mínimo de días-grados sobre DV0, necesarios para completar una generación.

b) afinar los parámetros de CLIMEX con la distribución actual de la especie (proceso iterativo: ajuste visual entre la distribución observada y la distribución potencial actual de *P. operculella*) (García Rosero et al., 2015).

Distribución observada y distribución potencial actual de *P. operculella*

El ajuste visual entre la distribución observada y la distribución potencial actual de *P. operculella* se denomina proceso iterativo. Los resultados para la distribución potencial actual de la polilla se obtuvieron mediante el modelo CLIMEX. Primero se calibraron periódicamente los parámetros de estrés y de humedad hasta que se representara la mejor aproximación entre la distribución potencial actual obtenida mediante CLIMEX (formato ráster) y la distribución observada de la especie (formato *shapefile*); ambos fueron exportados al programa ArcGIS versión 10 para una mejor observación. Los parámetros obtenidos en esta investigación definieron únicamente la distribución potencial para *P. operculella*. La calibración de la distribución potencial de la especie para condiciones actuales de clima se inició, en primer lugar, para América del Sur, por tratarse del origen de *P. operculella*. Posteriormente, los parámetros obtenidos fueron aplicados en el modelo a escala mundial.

Validación de generaciones/año observadas y generaciones/año estimadas de *P. operculella*

La validación consistió en realizar una correlación y suma de cuadrados para determinar el grado de asociación y error de predicción de CLIMEX, entre el número de generaciones por año estimadas y el número de generaciones observadas de *P. operculella*, para puntos de presencia en común, empleando el programa de cómputo Excel 2010, en condiciones actuales del clima. El modelo CLIMEX calcula el número de generaciones por año para cualquier especie. El resultado del número de generaciones por año de *P. operculella* para condiciones actuales del clima se representó en forma de mapa (formato ráster), del cual se extrajo el número de generaciones estimadas de *P. operculella* para las mismas coordenadas del número de generaciones observadas con ayuda del programa ArcGIS Versión 10.

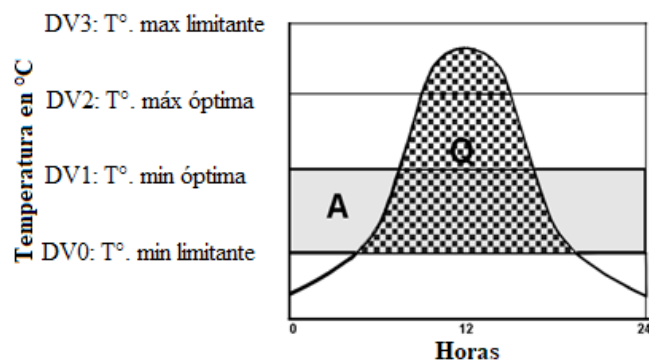


Figura 1. Índice de temperatura en relación con el ciclo diario de la temperatura. Q = área sombreada bajo la curva entre DV0 y DV3, y A = área sombreada entre DV0 y DV1. Con datos tomados de García Rosero et al. (2015).

Con la función “Spatial Analyst: extract values to point” de ArcGIS se extrajeron valores de celda en ubicaciones especificadas en una clase de entidad de punto, desde uno o más ráster y registrando los valores en la tabla de atributos de la clase de entidad de punto. El modelo CLIMEX utiliza el concepto de días-grados para el cálculo del índice de temperatura (TI) y el número de generaciones por año. El valor de los parámetros de temperatura DV0-DV3 de una especie describe el umbral de temperatura en el que puede vivir para un período de 24 h (Figura 1). Para calcular esta área, CLIMEX utiliza el algoritmo de Baskerville y Emin (1969), basado en días-grados de *P. operculella*, de huevo a adulto (García Rosero et al., 2015).

Los días-grados anuales totales por encima de la temperatura mínima limitante se utilizan para calcular el número de generaciones de la especie por año si un valor mayor que cero se ha introducido para PDD (días-grados) en el registro de parámetros. El algoritmo de Baskerville y Emin (1969) (Método Senoidal Simple), presenta cuatro fórmulas para calcular los días-grados ($^{\circ}\text{D}$ o PDD) para un periodo de 24 h y son empleados por el modelo CLIMEX para calcular el número de generaciones de *P. operculella* donde $T_U = DV3 =$ umbral superior, $T_L = DV0 =$ umbral inferior, $T_{\text{max}} =$ temperatura máxima y $T_{\text{min}} =$ temperatura mínima. La acumulación de días grado son las áreas de los diagramas sombreados.

Umbral de temperatura de *P. operculella*

El modelo CLIMEX presenta cuatro índices de temperatura: DV0, DV1, DV2 y DV3. DV0 y DV3 representan la temperatura mínima y máxima limitante, respectivamente, es decir, la especie no podrá sobrevivir a una temperatura semanal promedio por fuera de estos límites. DV1

y DV2 representan la temperatura mínima óptima y la temperatura máxima óptima, es decir, son el límite inferior y superior, respectivamente, del rango ideal de temperaturas para el crecimiento de la población.

La tasa de crecimiento de la población se reduce si la temperatura mínima semanal promedio está por debajo de DV1, o si la temperatura máxima semanal promedio está por encima de DV2. Asimismo, PPD representa el mínimo de días-grados por encima de DV0 necesarios para completar una generación. Los umbrales de temperatura y días-grados para *P. operculella* fueron calculados por Lyngkhai et al. (2022) (Cuadro 1), los cuales fueron ingresados al modelo CLIMEX. El número de generaciones observadas por año de *P. operculella* se obtuvo mediante la indagación en fuentes secundarias. Además, se determinó la cantidad de generaciones por año estimadas por el modelo CLIMEX para condiciones actuales de clima.

Se determinaron las zonas de establecimiento y ocurrencia de *P. operculella* a partir de observaciones climáticas mínimas (datos meteorológicos para condiciones actuales), proceso iterativo y los valores de los parámetros establecidos por el modelo CLIMEX para la distribución potencial, y se integraron para el EI. Respecto a los índices de humedad y parámetros de estrés, se ajustaron entre los valores de la distribución potencial actual estimada por el modelo y la distribución observada para *P. operculella*. Los parámetros de crecimiento, los índices de temperatura y los días-grados para *P. operculella* fueron los únicos datos proporcionados por el laboratorio, y fueron utilizados para la realización del modelo CLIMEX (Lyngkhai et al., 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Phthorimaea operculella se encuentra registrada actualmente en 105 países. El área de establecimiento del EI en condiciones del clima actual ($EI > 30$), indican una presencia en 29,327,798 km², mientras que en el escenario A2-2050 comprendería 17,607,147 km². En cuanto a continentes, América presentó mayor área para el establecimiento potencial de *P. operculella* en relación con los demás continentes. La menor superficie potencial se presentó en Europa, aunque Asia presentó más área para la ocurrencia de *P. operculella* en comparación con los demás continentes; mientras que Oceanía registró menos.

Distribución geográfica de *P. operculella*

Se observó que *P. operculella* se encuentra distribuida a nivel mundial, lo que también reportan las investigaciones realizadas por Byeon et al. (2020) y Jung et al. (2019), quienes indican que la distribución de la plaga se ha extendido, lo que podría provocar graves daños en la pérdida de rendimiento de la papa al afectar los tubérculos (Figura 2).

Distribución potencial de *P. operculella*

La distribución potencial actual de *P. operculella* fue determinada a través de los índices de humedad y parámetros de estrés. Estos dos influyeron más en el modelo, a pesar que se utilizaron más parámetros como los que significan a continuación: los de crecimiento, los índices de temperatura y los días-grados para *P. operculella*, que fueron los únicos datos proporcionados por Lyngkhai et al. (2022), quienes también concluyeron que la polilla de la papa se pudo desarrollar en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y berenjena (*Solanum melongena* L.), completando su ciclo de vida; no obstante, la papa fue el hospedero preferido.

El EI muestra la distribución potencial actual de *P. operculella* con valores que van 0 a 100. Estos representan las áreas con condiciones para el establecimiento de la polilla de la papa. Los valores entre 30 y 100 indican zonas favorables; sin embargo, valores inferiores a 30 reflejan únicamente niveles de ocurrencia potencial de *P. operculella* a escala global, pero no condiciones adecuadas para su establecimiento (Figura 3).

Comparación entre el número de generaciones/año observadas y generaciones/año estimadas por el modelo CLIMEX para *P. operculella*

El modelo CLIMEX estimó entre 0 y 19 generaciones anuales de *P. operculella* bajo las condiciones climáticas actuales (Figura 4). Las áreas de color blanco representan zonas sin generaciones (0), mientras que las áreas en rojo indican el mayor número de generaciones, de 16 a 19 por año. De acuerdo con el Cuadro 2, el número de generaciones estimadas mostró una correlación positiva con los valores observados de *P. operculella* (Figura 5), lo que sugiere una adecuada correspondencia entre la simulación del modelo y la distribución real de la especie.

Los resultados obtenidos, al estimar entre 0 y 19 generaciones anuales de *P. operculella* bajo condiciones climáticas actuales mediante el modelo CLIMEX, ofrecen una clara evidencia de la vulnerabilidad creciente del sistema agrícola global ante el cambio climático. La correlación positiva entre el número estimado de generaciones y los valores observados en campo (Cuadro 2, Figura 5) confirma la robustez del modelo frente al patrón actual de distribución de la polilla. Estudios previos han señalado que el aumento de temperatura favorece la multiplicación de esta especie, lo que coincide con lo hallado en esta investigación (Kroschel et al., 2013). Además, la iniciativa del International Potato Center documentó que un modelo de fenología térmica vinculada con GIS permite anticipar incrementos en el ciclo anual de la plaga (Climate Change Agriculture and Food Security, 2011). Ello refuerza la interpretación de que climas más cálidos amplían el número de generaciones y, por tanto, el potencial de daño en tubérculos.

Cuadro 2. Comparación entre el número de generaciones/año observadas y generaciones/año estimadas para *P. operculella*.

País / localidad / altitud / temperatura media anual y coordenadas geográficas	Número de generaciones/año observadas	Estimación del número de generaciones/año con CLIMEX (escenario Actual)	Estimación del número de generaciones/año con CLIMEX (escenario A2-2050 \pm 1.58 °C)
Perú / San Ramón / 800 msnm / 24 °C, 11°10'S, 75°20'O	12 ^a	10.4	11.5
Perú / Arequipa / 1,140 msnm / 17 °C, 17°24'S, 71°48'O	7 ^a	7.9	12.4
Perú/Huancayo/3,250 msnm/ 12 °C, 12°10'S, 75°30'O	3 ^a	3.8	5.4
Perú / Huancayo / 3,250 msnm / 12 °C, 12°10'S, 75°30'O	4 ^a	3.8	5.4
Yemen / Sana'a / 2,150 msnm / 16 °C, 16°00'N, 44°15'E	8 ^{a, b}	10.6	9.2
Egipto / Giza / 10 msnm / 20 °C, 30°78'N, 31°00'E	10 ^{a, c}	11.2	12.7

^a = Kroschel et al. (2013); ^b = Kroschel and Koch (1994); ^c = Abdel-Wahab et al. (1987).

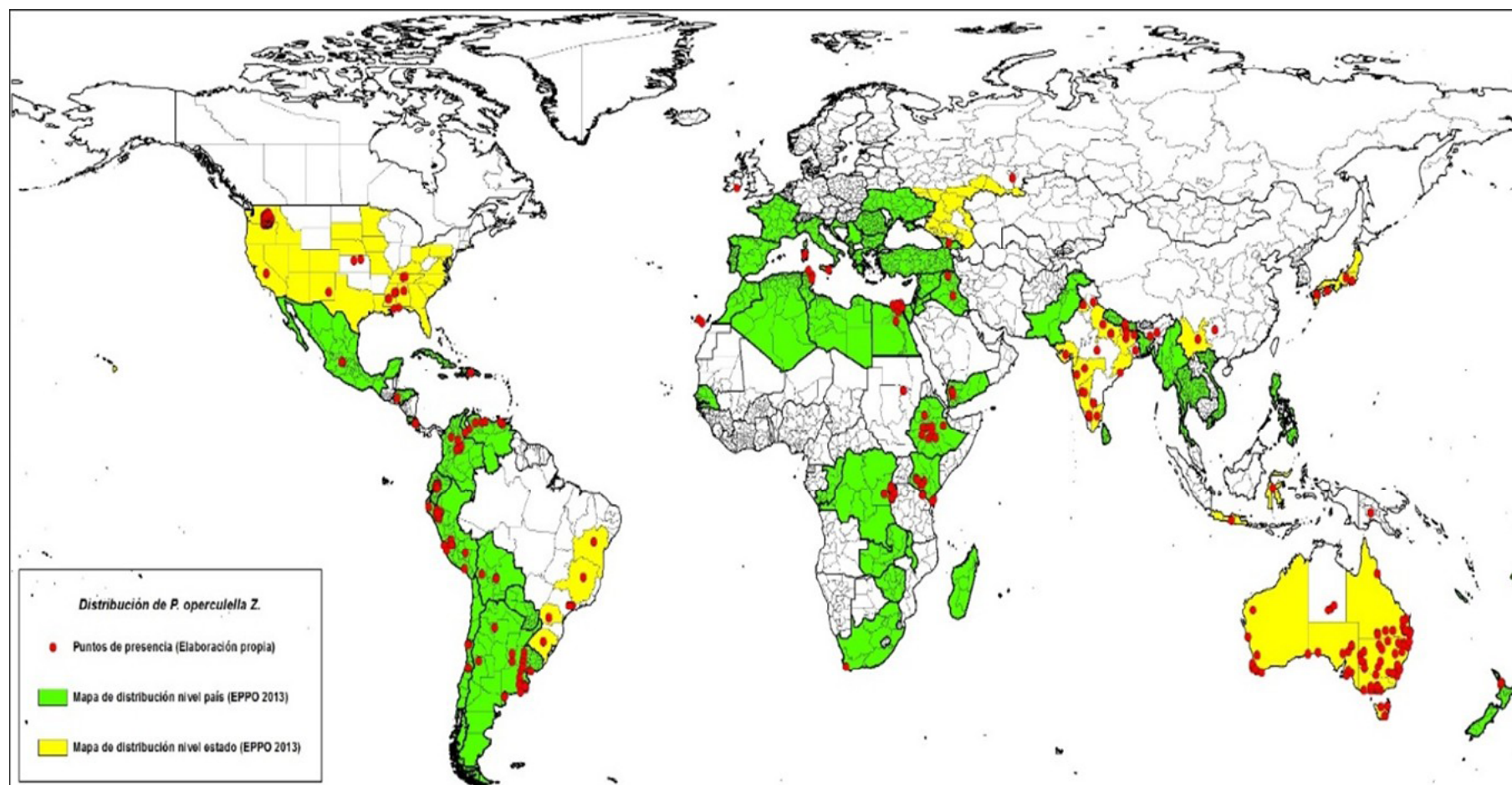


Figura 2. Distribución geográfica (año 2013) de *P. operculella*, donde los puntos de color rojo indican reportes de presencias de la polilla.

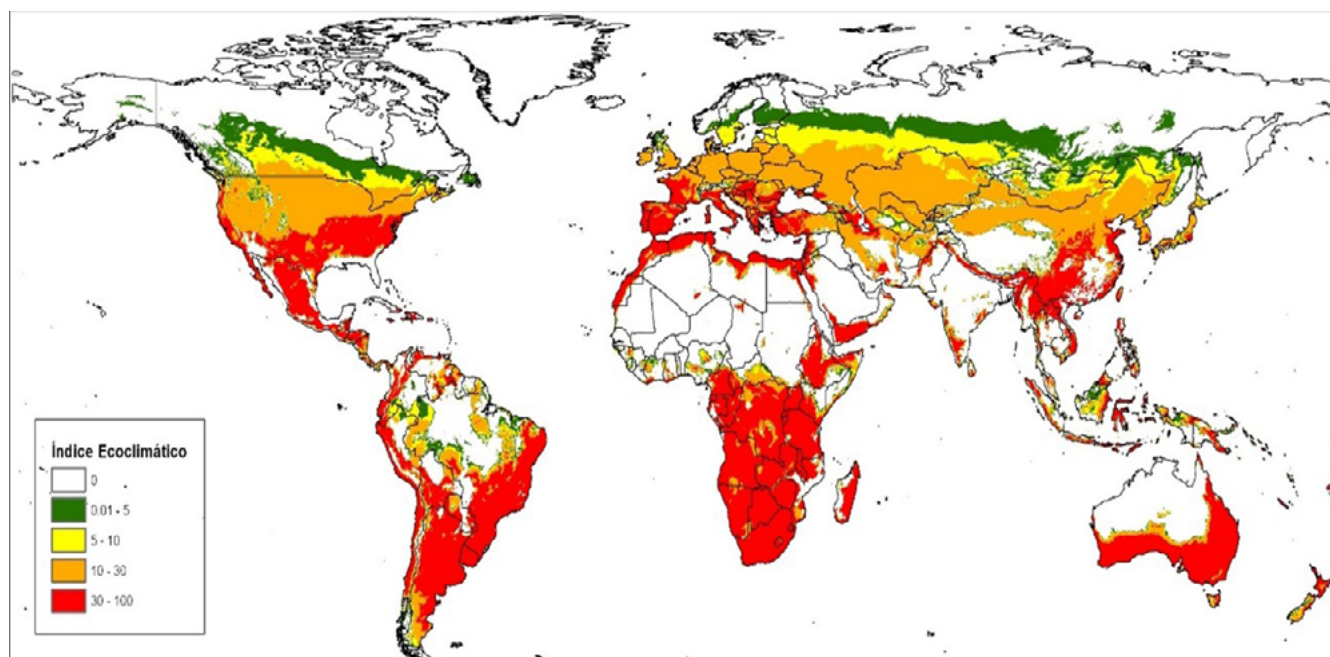


Figura 3. Distribución potencial actual de *P. operculella* con el modelo CLIMEX. Los valores del EI indican idoneidad climática, donde $EI > 30$ representa zonas más favorables para el establecimiento de la polilla de la papa.

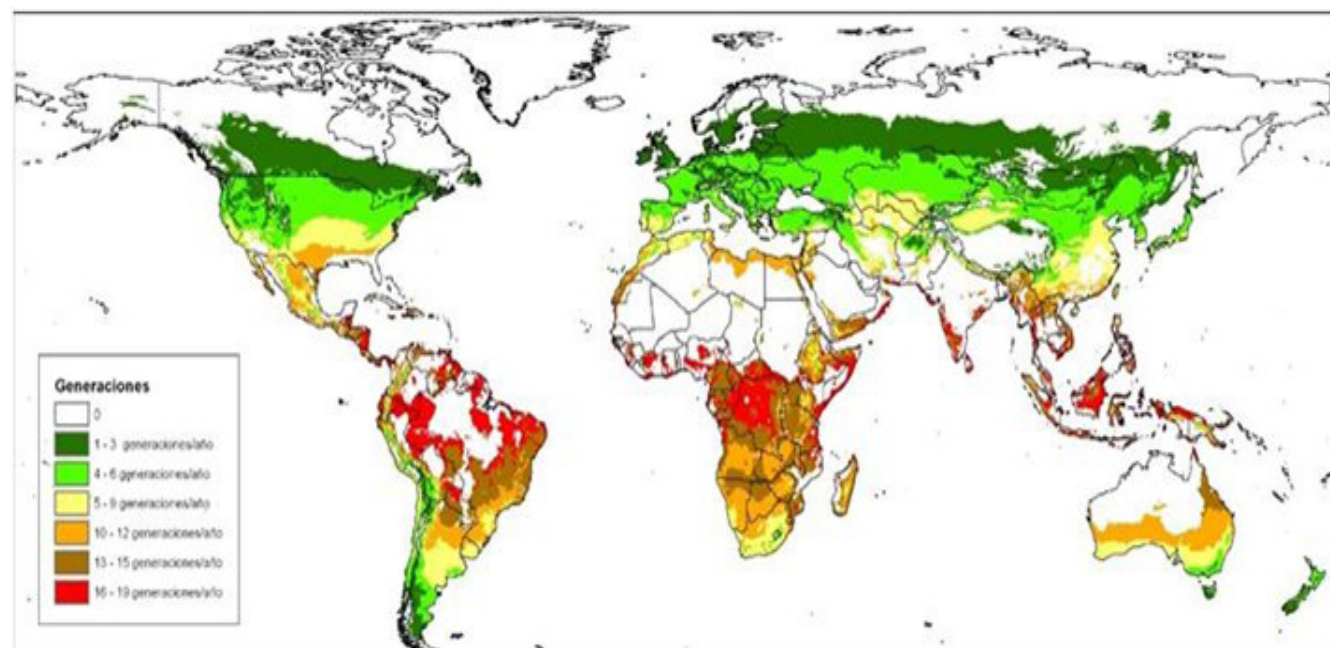


Figura 4. Número estimado de generaciones anuales de *P. operculella* bajo condiciones climáticas actuales, obtenido con el modelo CLIMEX.

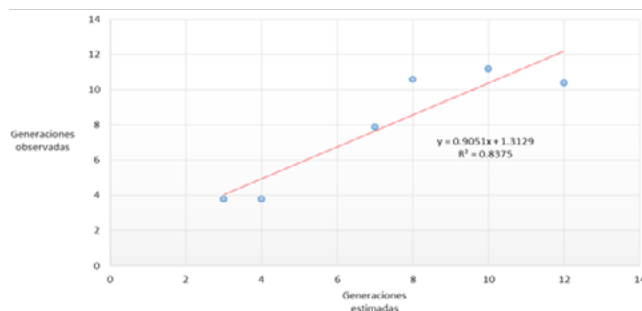


Figura 5. Correlación entre el número de generaciones/año estimadas y número de generaciones/año observadas para *P. operculella* en condiciones de clima actual.

Efecto del cambio climático sobre la distribución y número de generaciones/año de *P. operculella*

Los Cuadros 3 y 4 presentan baja idoneidad ($EI < 30$) y alta idoneidad ($EI > 30$) en la distribución de *P. operculella* en un modelo climático A2-2050. Por ejemplo, para América, África, Asia y Oceanía se observa una reducción de la superficie para la ocurrencia de la polilla de la papa (Cuadro 3). En cambio, para un $EI (< 30)$ las zonas más favorables son Asia y Europa para que se establezca *P. operculella* al existir un incremento en el área de distribución (Cuadro 4).

De acuerdo con las proyecciones generadas por el modelo CLIMEX, las regiones donde *P. operculella* podría

completar el mayor número de generaciones anuales (16 y 19) se concentran principalmente en zonas tropicales y subtropicales. Estas áreas incluyen gran parte de Centroamérica y Sudamérica, así como regiones del África central, el sur de Medio Oriente y diversas zonas del Extremo Oriente. La elevada frecuencia de generaciones en estas regiones se asocia a condiciones ambientales cálidas y estables que favorecen el desarrollo continuo del insecto a lo largo del año.

En contraste, el modelo estimó únicamente entre 1 y 5 generaciones anuales en latitudes más altas, particularmente en la mayor parte de Norteamérica, Europa y Asia central. En estas zonas, las temperaturas más bajas y la marcada estacionalidad limitan de manera importante la velocidad de desarrollo y la capacidad reproductiva de *P. operculella*, reduciendo así el número de ciclos biológicos que pueden completarse cada año (Figura 6). Este patrón espacial refleja la fuerte influencia de la temperatura y la disponibilidad de condiciones favorables en la dinámica poblacional del insecto, indicando una mayor presión potencial en regiones cálidas y una menor actividad en climas templados y fríos.

Cuadro 3. Medida del cambio de áreas potenciales para el establecimiento ($EI > 30$) de *P. operculella* en los escenarios actual y futuro a nivel global.

Continente	Área total (km ²)	Área potencial: escenario actual (km ²)	Área potencial: escenario A2-2050 (km ²)	Diferencia (km ²)	% Cambio
América	41,947,055	10,208,139	6,578,215	-3,629,924	-35.56
África	30,001,151	9,990,507	4,626,536	-5,363,971	-53.69
Asia	44,851,729	4,597,591	2,741,166	-1,856,425	-40.38
Europa	9,898,597	1,602,393	1,940,992	338,599	21.13
Oceanía	8,130,759	2,929,168	1,720,238	-1,208,930	-41.27
Total	134,829,291	29,327,798	17,607,147	-	-

Cuadro 4. Medida del cambio de áreas potenciales para la ocurrencia ($EI < 30$) de *P. operculella* en los escenarios actual y futuro (A2-2050) a nivel global.

Continente	Área total (km ²)	Área potencial: escenario actual (km ²)	Área potencial: escenario A2-2050 (km ²)	Diferencia (km ²)	% Cambio
América	41,947,055	13,194,051	12,467,453	-726,598	-5.51
África	30,001,151	2,594,016	2,227,079	-366,937	-14.15
Asia	44,851,729	18,209,830	18,499,032	289,202	1.59
Europa	9,898,597	7,038,042	7,615,122	577,080	8.20
Oceanía	8,130,759	744,800	534,455	-210,345	-28.24
Total	134,829,291	41,780,740	41,343,142	-	-

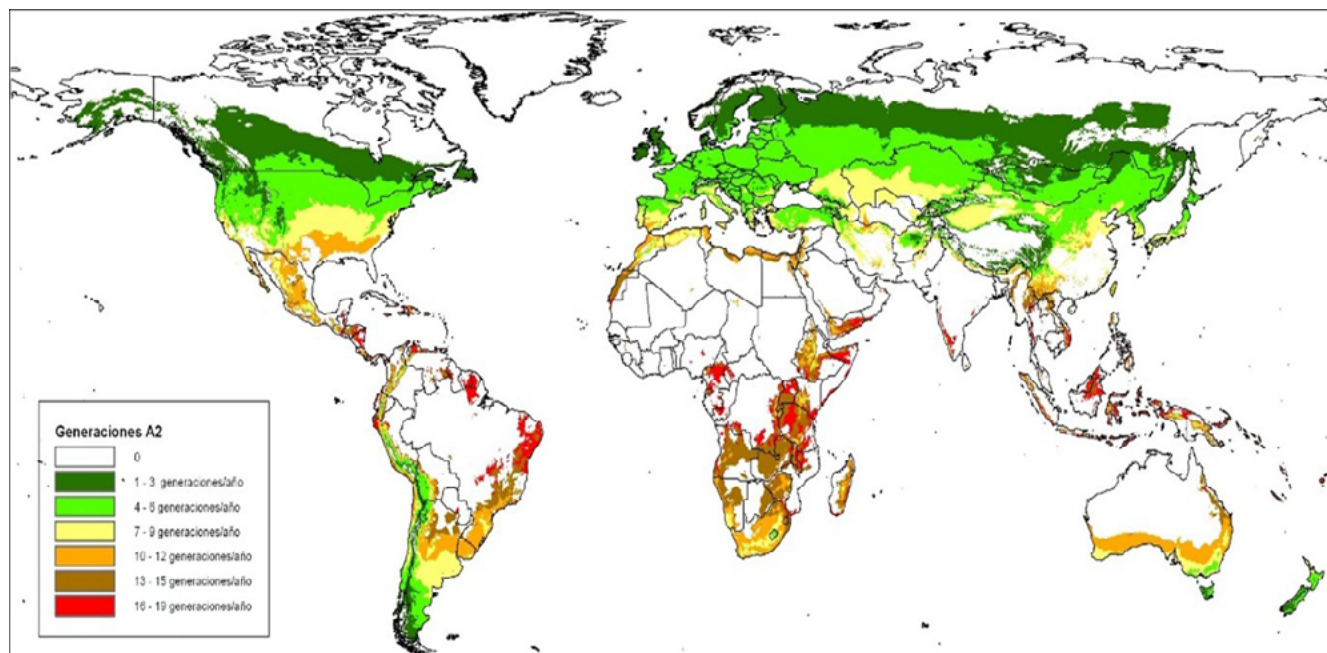


Figura 6. Número de generaciones/año de *P. operculella* para un escenario de cambio climático A2-2050.

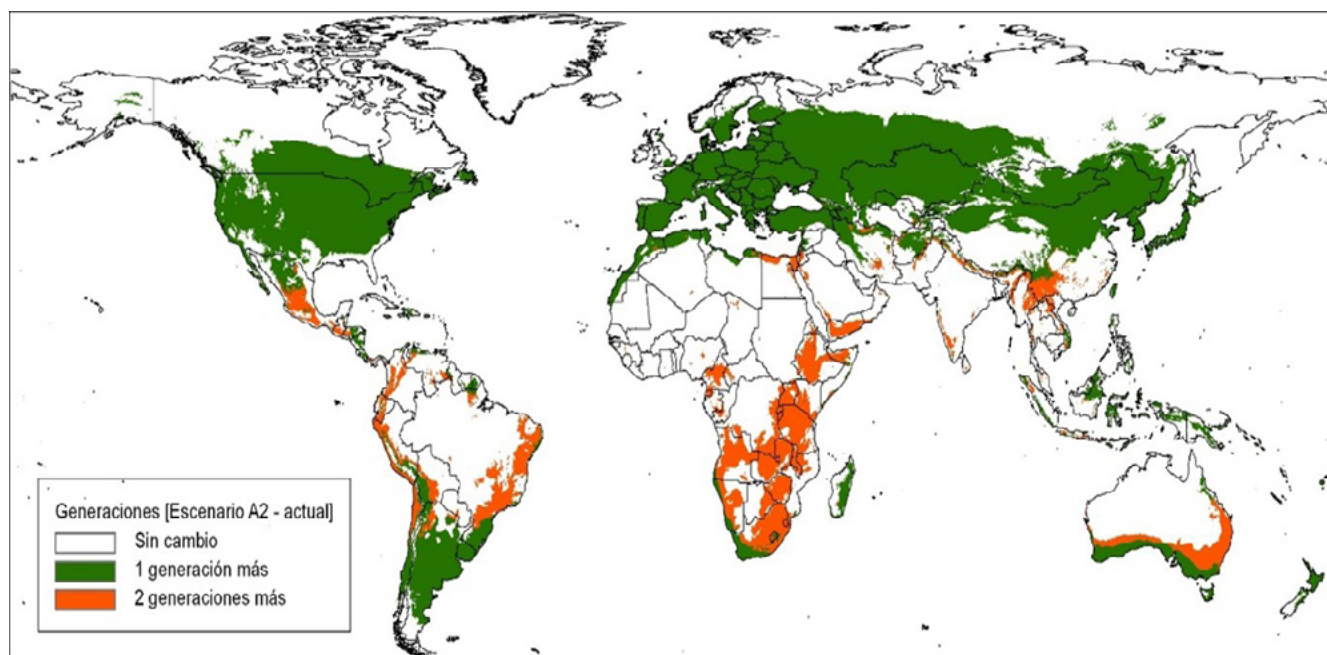


Figura 7. Diferencia del número de generaciones/año para un escenario A2-2050 frente al número generaciones/año para condiciones actuales de clima de *P. operculella*.

Por otra parte, los factores geográficos desempeñan un papel determinante en la distribución de las especies. En este sentido, Jung et al. (2020), mediante modelación con CLIMEX, determinaron que la polilla de la papa se ha expandido hacia el norte de China, alcanzando los 47° de latitud norte debido, principalmente, a la menor precipitación registrada en esta región en comparación con el sur del país.

El escenario climático A2-2025 proyecta un incremento global en el número anual de generaciones de *P. operculella* (Figura 7). De acuerdo con el modelo, amplias zonas templadas de Norteamérica, Europa y Asia central presentarían una generación adicional, resultado de un ascenso térmico que permitiría alcanzar condiciones cercanas al rango óptimo de desarrollo del insecto (28-30 °C) (Sporleder et al., 2004). En contraste, el modelo predice hasta dos generaciones más en regiones tropicales y subtropicales, particularmente en áreas de Brasil, Perú, México, África central, China y el sur de Australia, donde las temperaturas actuales ya favorecen un desarrollo acelerado de la plaga y el calentamiento adicional intensificaría esta tendencia. La expansión geográfica del número potencial de generaciones hacia el año 2050 representa un riesgo significativo, directo e indirecto, para las interacciones insecto-planta, al influir en la morfología, la fisiología, los parámetros poblacionales y el rol ecológico de las especies involucradas (Cornelissen, 2011). Finalmente, es importante considerar lo señalado por Souza et al. (2023), quienes distinguen que los modelos de distribución de especies presentan limitaciones significativas al realizar predicciones futuras, ya que no integran de manera holística todos los factores bióticos y abióticos que influyen en la distribución real de las especies.

CONCLUSIONES

El modelo CLIMEX evidencia que América presenta condiciones ambientales particularmente favorables para el desarrollo, multiplicación y dispersión de *Phthorimaea operculella*, en contraste con amplias regiones de Europa, donde la idoneidad climática para la especie es considerablemente menor. Si bien la plaga ya ha sido registrada en ambos continentes, estos contrastes en la idoneidad climática resaltan la necesidad de reforzar los programas de monitoreo y

mejorar las estrategias de manejo, con el fin de limitar su avance hacia nuevas áreas vulnerables y mitigar los impactos negativos sobre los sistemas productivos de papa.

Asimismo, las proyecciones bajo el escenario de cambio climático A2 indican un aumento significativo de *P. operculella*. En las zonas tropicales se anticipa un incremento promedio de dos generaciones adicionales por año; mientras que, en las regiones de los hemisferios norte y sur, se prevé un aumento promedio de una generación adicional por año respecto a los niveles actuales.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Wahab M., A., Abdel-Galil, F. A., Mohamed, K. K., & Soliman, M. M. (1987). Some biological aspects of the potato tuber worm, *Phthorimaea operculella* Zeller in Upper Egypt (Lepidoptera: Gelechiidae). *Assiut Journal of Agricultural Sciences*, 18(3), 363-378.
- Adhikari, A., Oli, D., Pokhrel, A., Dhungana, B., Paudel, B., Pandit, S., Bigyan, G. C., & Dhakal, A. (2022). A review on the biology and management of potato tuber moth. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 68(3), 97-109. <https://doi.org/10.2478/agri-2022-0009>
- Angelotti, F., Hamada, E., & Bettiol, W. (2024). A comprehensive review of climate change and plant diseases in Brazil. *Plants*, 13(17), 2447. <https://doi.org/10.3390/plants13172447>
- Baskerville, G. L., & Emin, P. (1969). Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*, 50(3), 514-517. <https://doi.org/10.2307/1933912>
- Byeon, D.-H., Jung, S., Lee, S.-G., Jeon, S.-W., Kwon, M., Kim, J., Kim, K.-H., & Lee, W.-H. (2020). Changes in spatiotemporal distribution of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) in South Korea in response to climate change determined using a field survey. *Agronomy*, 10(9), 1270. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091270>
- Climate Change Agriculture and Food Security. (2011). *Climate change gives edge to pests*. [Informe en línea]. <https://ccafs.cgiar.org/news/climate-change-gives-edge-pests>
- Cornelissen, T. (2011). Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns. *Neotropical*

- Entomology*, 40(2), 155-163. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000200001>
- Chandel, R. S., Vashisth, S., Soni, S., Kumar, R., & Kumar, V. (2020). The potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller), in India: Biology, ecology, and control. *Potato Research*, 63, 15-39. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09426-z>
- European Food Safety Authority, Tramontini, S. Gilioli, G., Rzepecka, D., Antoniou, A., Krusteva, R., Scala, M., Sánchez, B., Nougadère, A., Vos, S., Council for Agricultural Research and Economics, Barbieri, F., & Paoli, F. (2025) *Agrilus planipennis Pest Report to support the ranking of EU candidate priority pests* [Reporte técnico]. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2025.EN-9432>
- Fischbein, D., Lantschner, M. V., & Corley, J. C. (2019). Modelling the distribution of forest pest natural enemies across invaded areas: Towards understanding the influence of climate on parasitoid establishment success. *Biological Control*, 132, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.02.016>
- García Rosero, M., Soplin Villacorta, H., Alegre Orihuela, J., Rodríguez Berrio, A., Canto Sáenz, M., Veneros Guevara, J., Vilatuña Rodríguez, J., & Salas Mujica, D. (2015). Modelando a *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) para Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 2(3), 35-42. <https://doi.org/10.26423/rctu.v2i3.54>
- Gómez-Zavaglia, A., Mejuto, J. C., & Simal-Gandara, J. (2020). Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems. *Food Research International*, 134, 109256. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109256>
- Hernández Velázquez, V. M., & Guerrero Rodríguez, E. (1989). Determinación de la temperatura umbral y constante térmica de la palomilla de la papa *Phthorimaea operculella* (Zeller). *Agraria*, 5(2): 162-166. <https://doi.org/10.59741/agraria.v5i2.117>
- Hódar, J. A., Zamora, R., Cayuela, L. (2012). Cambio climático y plagas: algo más que el clima. *Ecosistemas*, 21(3), 73-78. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.09>
- International Potato Center. (2017). *Annual Report 2017*. Centro Internacional de la Papa, Perú, mayo de 2025. <https://cipotato.org/annualreport2017/wp-content/uploads/sites/7/2018/09/ANNUAL-REPORT-2017.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *Informe especial del IPCC: escenarios de emisiones, resumen para responsables de políticas*. IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC.
- Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103-108. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>
- Julio, G., Ruiz, I., & Cuesta, X. (2018). Ampliando la frontera agrícola de la papa (*Solanum tuberosum* L.) para disminuir los efectos del cambio climático. *Universidad y Sociedad*, 10(1), 46-51.
- Jung, J.-M., Lee, S.-G., Kim, K.-H., Jeon, S.-W., Jung, S., & Lee, W.-H. (2019). The potential distribution of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella*) based on climate and host availability of potato. *Agronomy*, 10(1): 12. <http://doi.org/10.3390/agronomy10010012>
- Kriticos, D. J., Webber, B. L., Leriche, A., Ota, N., Macadam, I., Bathols, J., & Scott, J. K. (2012). CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1), 53-64. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00134.x>
- Kroschel, J., & Koch, W. (1994). Studies on the population dynamics of the potato tuber moth (*Phthorimaea operculella* Zell. (Lep., Gelechiidae) in the Republic of Yemen. *Journal of Applied Entomology*, 118(1-5), 327-341. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1994.tb00808.x>
- Kroschel, J., Sporleder, M., Tonnang, H. E. Z., Juarez, H., Carhuapoma, P., Gonzales, J. C., & Simon, R. (2013). Predicting climate-change-caused changes in global temperature on potato tuber moth *Phthorimaea operculella* (Zeller) distribution and abundance using phenology modeling and GIS mapping. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.017>
- Lacey, L. A., Kroschel, J., Arthurs, S. P., & De La Rosa, F. (2010). Microbial control of the potato tuber moth *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 36(2), 181-189. <https://doi.org/10.25100/socolen.v36i2.9141>
- Lyngkhoh, P. R., Ningthoujam, K., Pathak, M., Rajesh, T., & Kadam, V. (2022). Biology of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) on three solanaceous host plants. *Indian Journal of Hill Farming*, 35(2), 147-151. <https://doi.org/10.56678/iahf-2022.35.02.21>

- Martín Martín, R., & Jerez Mompie, E. (2017). Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad romana. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 75-80.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2012). Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo interdisciplinar. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240. <http://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Maywald, G. F., Kriticos, D. J., Sutherst, R. W. & Bottomley W. (2007). *CLIMEX version 3: User's Guide*. Hearne Scientific Software, CSIRO.
- Organización Europea y Mediterránea para la Protección de las Plantas. (2024). Base de datos global de la EPPO. <https://gd.eppo.int>
- Pliscoff, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, 48, 61-79. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Quintana Salgado, E. (2024). Manejo integrado de plagas en el cultivo de papa: control de la mosca blanca. *Revista Latinoamericana de Ciencias Agrarias*, 2(2), 31-43. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14788844>
- Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R., Hareau, G., & Wolf, J. (2018). Climate change impact on global potato production. *European Journal of Agronomy*, 100, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008>
- Rondon, S. I. (2010). The potato tubeworm: A literature review of its biology, ecology, and control. *American Journal of Potato Research*, 87(2), 149-166. <https://doi.org/10.1007/s12230-009-9123-x>
- Rondon, S. I. (2020). Decoding *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) in the new age of change. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(2), 316-324. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62740-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62740-1)
- Sporleder, M., Kroschel, J., Gutierrez Quispe, M. R., & Lagnaoui, A. (2004). A temperature-based simulation model for the potato tuberworm, *Phthorimaea operculella* Zeller (Lepidoptera; Gelechiidae). *Environmental Entomology*, 33(3), 477-486. <http://doi.org/10.1603/0046-225X-33.3.477>
- Souza, P. G. C., Aidoo, O. F., Farnezi, P. K. B., Heve, W. K., Júnior, P. A. S., Picanço, M. C., Ninsin, K. D., Ablormeti, F. K., Shah, M. A., Siddiqui, A. A., & Silva, R. S. (2023). *Tamarixia radiata* global distribution to current and future climate using the climate change experiment (CLIMEX) model. *Scientific Reports*, 13, 1823. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29064-3>
- Wang, C., Hawthorne, D., Qin, Y., Pan, X., Li, Z., & Zhu, S. (2017). Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetles. *Scientific Reports*, 7, 4489. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04607-7>
- Xu, D., Li, X., Jin, Y., Zhuo, Z., Yang, H., Hu, J., & Wang, R. (2020). Influence of climatic factors on the potential distribution of pest *Heortia vitessoides* Moore in China. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01107. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01107>
- Yan, Y., Wang, Y.-C.; Feng, C.-C.; Wan, P.-H. M., & Chang, K. T.-T. (2017). Potential distributional changes of invasive crop pest species associated with global climate change. *Applied Geography*, 82, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.011>