

Comportamiento espacial de roya del café en Sultepec, Estado de México, México

Spatial behavior of coffee rust in Sultepec, Estado de México, México

Aurelio Pérez-Constantino¹ , José Francisco Ramírez-Dávila^{1*} ,
Francisco Gutiérrez-Rodríguez¹ , Delfina de Jesús Pérez-López¹ 

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario el Cerrillo, km 15, Carr. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo, Piedras Blancas, 50200, Toluca, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia: jframirezd@uaemex.mx

Fecha de recepción:

10 de marzo de 2023

Fecha de aceptación:

18 de octubre de 2023

Disponible en línea:

2 de julio de 2024

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)

RESUMEN

El café es uno de los productos más importantes en la economía mundial. La roya (*Hemileia vastatrix*) es uno de los problemas fitosanitarios más comunes que limita la producción del cultivo, reduce el rendimiento, y en infecciones altas causa la muerte de las plantas; por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café para contribuir en el estudio de la dinámica espacial de la roya. El estudio se realizó en Sultepec, Estado de México, México, de septiembre de 2020 a febrero de 2021, con muestreos quincenales en seis parcelas. Se obtuvo una distribución espacial en agregados, modelos esféricos, mapas de distribución con focos de infección y una dependencia espacial alta. La geoestadística puede identificar y pronosticar el comportamiento, la relación del ciclo biológico de la enfermedad y la fenología del cultivo dentro del proceso epidemiológico.

PALABRAS CLAVE

Hemileia vastatrix, Roya amarilla, focos de infestación, incidencia

ABSTRACT

Coffee is one of the most important products in the world economy. Rust (*Hemileia vastatrix*) is one of the most common phytosanitary problems that limits crop production, reduces yield, and in high infections causes plant death. Therefore, the present study aimed to establish the spatial behavior of coffee rust populations to contribute to the study of the spatial dynamics of the rust. The study was carried out in Sultepec, Estado de Mexico, from September 2020 to February 2021, with biweekly sampling in six plots. A spatial distribution was obtained in aggregates, spherical models, distribution maps with infection foci and a high spatial dependence. Concluding that Geostatistics can identify and predict the behavior, the relationship of the biological cycle of the disease and the phenology of the crop within the epidemiological process.

KEYWORDS

Hemileia vastatrix, infestation foci, incidence

INTRODUCCIÓN

México es un importante productor de café, uno de los granos más demandados a nivel mundial. A nivel nacional se producen 953,682.9 toneladas, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz; mientras que el Estado de México cuenta con una producción de 622.29 toneladas (SIAP 2020).

La principal enfermedad del cultivo de café es la roya (*Hemileia vastatrix*); el patógeno ataca a las hojas de los cafetos de todas las variedades comerciales, provoca defoliaciones mayores a 60 por ciento y, en daños severos, puede causar la muerte de las plantas. Si la infección ocurre en etapas tempranas se puede presentar una reducción en el rendimiento; en cambio, si ataca en etapas tardías, el efecto se observará en los niveles de amarre de fruto del siguiente ciclo del cultivo (APS 2011).

Según datos de la Plataforma Epidemiológica de la Roya del Cafeto (PVEF-Cafeto), del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), en el Estado de México, *Hemileia vastatrix* se detectó oficialmente en 2016, pero, del 2019 a la fecha, la severidad de roya en hoja y planta ha aumentado, lo que podría resultar en un aumento y surgimiento de nuevos focos de infestación si no se llevan a cabo las actividades de control (SENASICA 2019).

En temas de manejo fitosanitario, se sabe que para realizar acciones de control más eficiente es necesario conocer y tomar en cuenta la distribución del patógeno o plaga en la parcela, así como su ciclo biológico con respecto a la fenología del cultivo u hospedante (López et al. 2018). En este sentido, el presente estudio analizó los patrones del comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del cafeto mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas que permitieran elaborar mapas de distribución del patógeno en un espacio continuo (Ramírez et al. 2013). Por ello, el objetivo fue determinar el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café con métodos geoestadísticos en Sultepec, Estado de México, México, bajo la hipótesis de que estas poblaciones presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la localidad de Rincón del Cristo (Sultepec, Estado de México, México), entre septiembre de 2020 y febrero de 2021; esta localidad cuenta con un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con una elevación promedio de 1,236 msnm y una temperatura media anual de 21 °C (Joaquín 1999).

Se utilizaron seis unidades experimentales (UE) de 0.5 hectáreas cada una. Las variedades de café presentes fueron caturra y typica en edad productiva, con un sistema de policultivo tradicional asociado con plátano, mandarina, naranja y mango (Sánchez-Hernández 2018); su manejo es convencional, con una sombra entre 40 y 60 por ciento.

Para el muestreo, las UE se dividieron en cuadrantes de 10m x 10m para tener 50 cuadrantes; de cada uno se seleccionaron cuatro árboles al azar, para tener 200 árboles que se marcaron y georreferenciaron con un sistema de posicionamiento global diferencial (modelo Trimble® SPS361, Trimble, Dayton, Estados Unidos).

Para la toma de datos, cada árbol se dividió en estrato bajo, medio y alto, en cada uno de éstos se seleccionó una rama por punto cardinal y tres hojas, con un total de 36 hojas por planta. Posteriormente, se registró el número de hojas con síntomas de la enfermedad, basado en la escala diseñada por SENASICA para el programa de café (SENASICA 2019).

El registro de la incidencia de la roya (número de hojas con roya) se realizó cada 14 días, de septiembre de 2020 a febrero de 2021. Los datos del muestreo fueron concentrados en bases de datos por fecha para su análisis de distribución espacial con el método de geoestadística.

Medición de factores climáticos. Con el objetivo de contribuir a explicar el comportamiento espacial del hongo *Hemileia vastatrix*, se colocó un sensor climático Datta Loggers HOB0® Pro V2 (HOB0, Lakeville, Estados Unidos), en la parte media de la parcela, sujetándolo al estrato medio de un cafeto; se registró temperatura y humedad relativa, y se calcularon medias, mínimas y máximas de temperatura de ambas variables (SENASICA 2019).

Análisis geoestadístico. Una vez verificada la normalidad de los datos con la prueba de Curtosis y el coeficiente de asimetría (Chilés y Delfiner 1999), se estimó el semivariograma experimental con los *softwares* Variowin® 2.2 (Spring Verlag, Nueva York, Estados Unidos) y WinGslib® 2002 (Maldonado et al. 2017); este análisis se hizo con los siguientes tres pasos.

Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma. Definiendo como semivariograma teórico una expresión analítica sencilla empleada para representar semivariogramas reales, los semivariogramas experimentales se ajustaron a modelos teóricos preestablecidos (gaussiano, exponencial, esférico, logarítmico, efecto pepita puro, efecto agujero y monómico) (Maldonado-Zamora et al. 2016), con el *software* Variowin 2.0.

Validación del modelo. Con el procedimiento de validación cruzada se efectuó la validación de los modelos ajustados a los semivariogramas experimentales (Gallardo 2006). Este procedimiento no paramétrico elimina un valor muestral y emplea el método de interpolación denominado krigeado, junto con el modelo de semivariograma a validar; esto se efectuó sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación cruzada: media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM) y error cuadrático medio adimensional (ECMA). Estos estadísticos determinan la validación del modelo ajustado (Gallardo 2006; Isaaks y Srivastava 1989; Hevesi et al. 1992).

Nivel de dependencia espacial. Se obtuvo de dividir el efecto pepita entre la meseta para conocer el grado al que están relacionados los datos. El resultado es expresado en porcentaje, tomando en cuenta el siguiente criterio: una proporción menor a 25 por ciento muestra un nivel de dependencia espacial alta; porcentajes entre 26 y 75 indican nivel de dependencia espacial moderado, y mayor a 76 señala que el nivel es bajo (Sayad et al. 2017).

Elaboración de mapas. Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes fueron validados, se elaboraron los mapas de densidad de las poblaciones de roya para cada muestreo en las respectivas parcelas de estudio, con el método geoestadístico denominado Krigeado Ordinario y el *software* Surfer

ver 16 (Golden Software, Golden, Estados Unidos). Con los mapas elaborados fue posible, además, calcular la superficie real infestada por la roya del café (Maldonado et al. 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todas las Unidades Experimentales tuvieron presencia de roya. Se obtuvieron mediciones de factores climáticos “humedad relativa y temperatura” en los seis meses de muestreo; también se comprobó la normalidad de los datos para poder realizar la modelización y elaboración de mapas de la enfermedad, y se calculó el porcentaje de infección para cada UE muestreadas, determinando la distribución espacial de roya.

Medición de factores climáticos. Para explicar la influencia de los factores climáticos medidos es necesario partir del triángulo de una enfermedad, el cual consta de tres factores: hospedante susceptible, patógeno agresivo y condiciones favorables. En el caso de la roya del cafeto, el hospedante es la planta de café, el patógeno es el hongo *Hemileia vastatrix* y las condiciones favorables se refieren a los factores abióticos que favorecen el desarrollo de una enfermedad (suelo, manejo, variedad, clima). En roya las condiciones inductivas son temperaturas entre los 20-22 °C con una humedad relativa mayor a 90 por ciento en ausencia de luz; a la suma de estas condiciones por día se le llama horas favorables (Mora et al. 2021; SENASICA 2018). De acuerdo a los datos registrados en los sensores climáticos, los meses con mayor humedad relativa fueron de septiembre a noviembre, correspondientes a la temporada de lluvias; con respecto al aumento de temperatura, ésta se dio a partir de diciembre, una vez concluido el periodo de lluvias; las temperaturas se registran con máximas en febrero y mínimas en enero, con 31.31 y 11.98 °C, respectivamente; los porcentajes más altos de humedad alcanzaron 100 por ciento de octubre a noviembre; no obstante, el mes que presentó el porcentaje de menor humedad fue febrero con 21.84 por ciento; el periodo más inductivo en donde se presentaron las horas favorables para la germinación de la roya fue de septiembre a noviembre (Cuadro 1). Los datos obtenidos concuerdan con lo reportado en el Estado de México, por el programa de vigilancia epidemiológica del cultivo de cafeto en 2017 (SENASICA 2018).

Cuadro 1. Temperatura y humedad relativa en el periodo de estudio septiembre de 2020 a febrero de 2021 en el municipio de Sultepec en el Estado de México, México.

Muestreo	Temp °C	HR %	Temp Max °C	Temp Min °C	HR Max %	HR Min %
Sep.1(1)	20.49	94.74	28.07	15.68	98.51	62.07
Sep.2(2)	19.60	95.94	25.45	15.34	98.55	72.39
Oct.1(3)	20.11	89.80	27.01	14.07	98.72	59.68
Oct.2(4)	20.27	94.48	27.09	15.58	100.00	59.51
Nov.1(5)	20.10	91.25	26.72	15.37	100.00	64.89
Nov.2(6)	20.53	90.84	26.50	15.15	100.00	63.07
Dic.1(7)	19.87	79.47	26.55	13.86	98.19	42.09
Dic.2(8)	19.09	73.38	26.45	13.16	95.62	37.06
Ene.1(9)	19.53	62.76	29.54	11.98	94.70	29.90
Ene.2(10)	20.04	56.68	28.87	12.34	93.79	24.55
Feb.1(11)	20.27	62.34	28.94	12.10	99.52	31.26
Feb.2(12)	23.44	51.07	31.31	15.51	82.09	21.84

Temp= Temperatura; HR= Humedad relativa; Temp Max= Temperatura máxima; Temp Min= Temperatura mínima; HR Max= Humedad relativa máxima; HR Min= Humedad relativa mínima

Según López et al. (2018) y Mora et al. (2021), el proceso epidemiológico de la roya resulta de la interacción de las variedades del huésped con el manejo agronómico, la sanidad vegetal, el patógeno y el clima; es decir, el desarrollo y diseminación de la roya es multifactorial y no depende exclusivamente de factores climáticos; por otra parte, Porrás (2000) indica que es importante analizar la incidencia y severidad de la enfermedad según las fluctuaciones de factores climáticos en el tiempo, para identificar las etapas críticas del patógeno, pronosticar su comportamiento epidémico y prevenir el daño potencial mediante el uso de alerta o detección temprana.

Análisis geoestadístico

Estimación de los parámetros del modelo de semi-variograma. Derivado de los datos obtenidos en los 12 muestreos en las seis UE, se realizaron 72 semi-variogramas teóricos que evidenciaron una distribución espacial en agregados; los modelos obtenidos en su totalidad fueron de tipo esférico, los cuales se ratificaron mediante los parámetros de validación cruzada (Cuadro 2), lo que indica que las agregaciones de *Hemileia vastatrix* se presentan en mayor cantidad en ciertas áreas de la UE con respecto al resto de puntos considerados en el muestreo. Espinoza-Zúñiga et al.

(2019) señalan que las áreas de infestación son focos de infección específicas, desde donde el hongo causante de la roya genera el inoculo que se dispersa al resto de las parcelas aledañas, lo cual concuerda con lo encontrado por Johnson et al. (2007), quienes determinaron patrones ajustados de tipo esférico en la distribución de *Puccinia melanocephala*, lo cual indica que el inoculo del patógeno se distribuye desde un foco de infección y muestra centros de agregación. Por otro lado, Sánchez-Pale et al. (2015) encontraron comportamientos agregados asociados a un modelo esférico en carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*), lo cual indica la existencia de focos de la enfermedad que se dispersan desde un punto nodal.

Por otro lado, los centros de agregación son aleatorios y se presentan como focos de infestación dentro de la UE; esto podría ser resultado de la diseminación o arrastre de las esporas del hongo por factores ambientales como el viento y la lluvia, o factores humanos, como el propio caficultor, que puede transportar inoculo en la ropa o herramienta de trabajo de una planta a otra y de una UE a otra; esto se observó en Mora et al. (2015), quienes indicaron que las esporas de la roya se diseminan y entran en latencia hasta presentarse las condiciones inductivas que permitan su germinación. Además, la presencia de patrones agregados en ciertas zonas específicas de la UE y en otras no indica que las interacciones entre los patógenos, el medio y

el huésped formen condiciones microclimáticas, como las horas favorables que completan el triángulo epidemiológico de la enfermedad en ciertas zonas de la UE (Tannure et al. 2002). Esto concuerda con un estudio realizado por Mora et al. (2015), en donde analizan las “consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la Fitosanidad de cultivos tropicales” y afirman que los procesos biológicos como patogénesis, supervivencia y dispersión son multifactoriales y no dependen sólo de la presencia del patógeno o de las condiciones climáticas, sino de una suma de estos factores y otros más, como la genética del hospedante, las características fisiográficas del medio, el manejo agrícola, entre otras causas probables para la formación de centros de agregación, y forman parte del proceso epidemiológico de la enfermedad.

Con respecto a los parámetros ajustados para verificar los modelos, Tapia-Rodríguez et al. (2020) mencionan que el rango es la distancia máxima a la que la variable está asociada; el efecto pepita indica el origen del semivariograma, y la meseta es el punto máximo de intersección de la variable. En este estudio se presentó una pepita igual a cero en todos los muestreos; con respecto al rango, éste va de los 11.8 m a los 40.6 m; en este sentido, de acuerdo con Ramírez et al. (2013), los valores bajos del efecto pepita afirman que no hubo errores de muestreo y la escala que se utilizó fue correcta para el levantamiento de datos de la roya del café; además, muestran un alto nivel de agregación de la incidencia del patógeno causante de la enfermedad.

Nivel de dependencia espacial. El nivel de dependencia espacial se obtiene dividiendo el efecto pepita entre meseta, y el resultado se expresa en porcentaje (Tapia-Rodríguez et al. 2020). En los resultados, los valores de cero del efecto pepita divididos entre el valor de la meseta indicaron una alta dependencia espacial en todas las fechas de muestreo, con lo cual se supone que las poblaciones de roya dependen entre sí y su nivel de agregación es alto (Cárdenas-Pardo et al. 2017; Rossi et al. 1992). Esto permite suponer que las poblaciones del patógeno tienen una fuerte correlación influenciada directamente por diversos factores, como las condiciones climáticas y microclimáticas presentes en el área de estudio (Porrás 2000); asimismo, Espinoza-Zúñiga et al. (2019) indicaron que conocer la dependencia espacial es necesario para poder

determinar los procesos epidemiológicos de las enfermedades en campo.

Elaboración de mapas. En todos los casos se realizaron mapas de incidencia de la enfermedad con la técnica de krigeado ordinario; se obtuvieron 72 mapas en total, lo que permitió la visualización de la presencia de la infestación del hongo. Los mapas obtenidos en el muestreo por cuadrantes expusieron que las poblaciones de *H. vastatrix* se encuentran en centros de agregación (Figura 1 y 2). Respecto a las superficies infestadas, todas las UE muestreadas mostraron un intervalo que va de 55 a 83 por ciento entre septiembre y febrero, con un crecimiento de la infestación ascendente: septiembre el mes con menos incidencia y febrero el que reporta mayor presencia o superficie con roya (Cuadro 2). Esta técnica ha sido utilizada en diferentes estudios con otros problemas fitosanitarios, como el estudio de la distribución del gusano soldado en el Estado de México por Esquivel y Jasso (2014), y Ramírez-Dávila y Porcayo-Camargo (2008) con la distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Berg. & Zanon) (Hemiptera: Cicadellidae), en un viñedo en Andalucía, España.

Aunque la presencia del hongo sobre la superficie plantada es heterogénea y se presenta en la mayor parte de la UE, la acumulación de hojas con roya en los árboles evidencian los centros de agregación que generalmente están ubicados entre el centro y los límites del predio. Según el manual operativo del programa de vigilancia en café 2019 del SENASICA (2019), el periodo de germinación y generación de esporas va desde los 26 a los 60 días una vez iniciado el ciclo; esto coincide con lo mostrado en los mapas, en donde el mes uno de muestreo fue el de menor presencia de la roya y probablemente en ese momento se iniciaron uno o varios ciclos; en los siguientes meses, la presencia del hongo fue progresiva: los últimos mostraron más presencia con mayor generación de esporas como inóculo que entrará en latencia o infectará a otras hojas o plantas, a excepción de la UE uno, cuyos focos de infestación se mantuvieron homogéneos en cuanto a severidad en todos los muestreos.

La agregación de *H. vastatrix* mostrada en los mapas coincide por lo descrito por Mora et al. (2015), quienes describen el crecimiento de la roya en focos de infestación; estos focos o centros de agregación sirven como fuentes y reservorios de inóculo. Cabe señalar

que en la época de lluvia (septiembre y agosto) hubo poca presencia de roya, lo que podría deberse a que la precipitación lava las esporas visibles de la roya, pero también transporta el inoculo a las hojas y plantas aledañas. Con la salida de la lluvia, la humedad residual, el aumento de temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido nuevo en la planta en los días y meses siguientes, se crean las condiciones inductivas óptimas para el surgimiento de focos nuevos y el crecimiento o fortalecimiento de los ya existentes, como lo muestra la escala de colores en los mapas. Esto concuerda con lo encontrado por Coria-Contreras et al. (2014), quienes estudiaron la producción de inoculo de la roya de café y los factores asociados a su distribución y patogénesis.

Además, debido a la naturaleza policíclica del patógeno y su tendencia al establecimiento en focos localizados en áreas muy específicas, la intensidad de daño puede ser variable entre parcelas dentro de una misma región de control (Coria-Contreras et al. 2014); también fue evidente el progreso de la incidencia de *Hemileia vastatrix* en el tiempo, con la aparición de nuevos focos de infestación en los mapas, que permitieron ver la intensidad de la roya en algunas áreas de la UE. Por ello, de manera práctica, tomando en cuenta también el porcentaje de infestación, se pueden dirigir las estrategias de control de la roya de forma más precisa a las áreas con altos niveles de incidencia, reduciendo así los reservorios de inoculo que inician la propagación con el comienzo de las lluvias o la cosecha de café. Esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra para la aplicación; también se disminuirá el impacto ambiental, debido a que el químico que se aplique será menor. Incorporando la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad, también permitirá identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales, como podas de café, podas de sombra, deshierbe, con la finalidad de reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento del hongo de la roya (Santana-Peñaloza et al. 2015), lo que justificaría el uso de las técnicas de la agricultura de precisión como una herramienta que permite mantener o reducir los daños causados por la enfermedad en los cafetales del Estado de México (Rodríguez et al. 2020).

CONCLUSIONES

La distribución espacial se ajustó al modelo esférico, aseverando que la enfermedad de la roya de café se comportó en forma de agregados o focos de infección; éstos fueron específicos en las parcelas desde donde crecen o disminuyen parcialmente, debido a las condiciones climáticas que se presentan en las unidades experimentales. De esta forma, la estadística espacial permite identificar zonas de incidencia de plagas y enfermedades en zonas de cultivo, lo que vuelve más sencilla la creación de planes de manejo y control de fenómenos fitosanitarios. Este análisis geoestadístico demostró ser un método eficiente para determinar el comportamiento espacial agregado de las poblaciones de roya, al indicar que existe una alta dependencia espacial entre las poblaciones de la enfermedad.

Un enfoque focalizado y dirigido de estas actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de precisión a través del manejo único de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infestación es capaz de disminuir significativamente la dependencia de insumos externos, lo que reduce el costo de producción y el daño ambiental. De esta forma se pueden encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, ya que se satisface una necesidad del presente sin comprometer los medios para cubrir las necesidades en el futuro. Sumado a esto, los beneficios a la salud se harán evidentes, debido a que el riesgo de residuos de plaguicidas en el grano será eventualmente menor. Sumar la agricultura de precisión a actividades de control fitosanitario resultará en la obtención de alimentos más inocuos, sostenibles y amigables con el medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero otorgado por la Universidad Autónoma del Estado de México mediante el proyecto de investigación con clave 5098/2020SF.

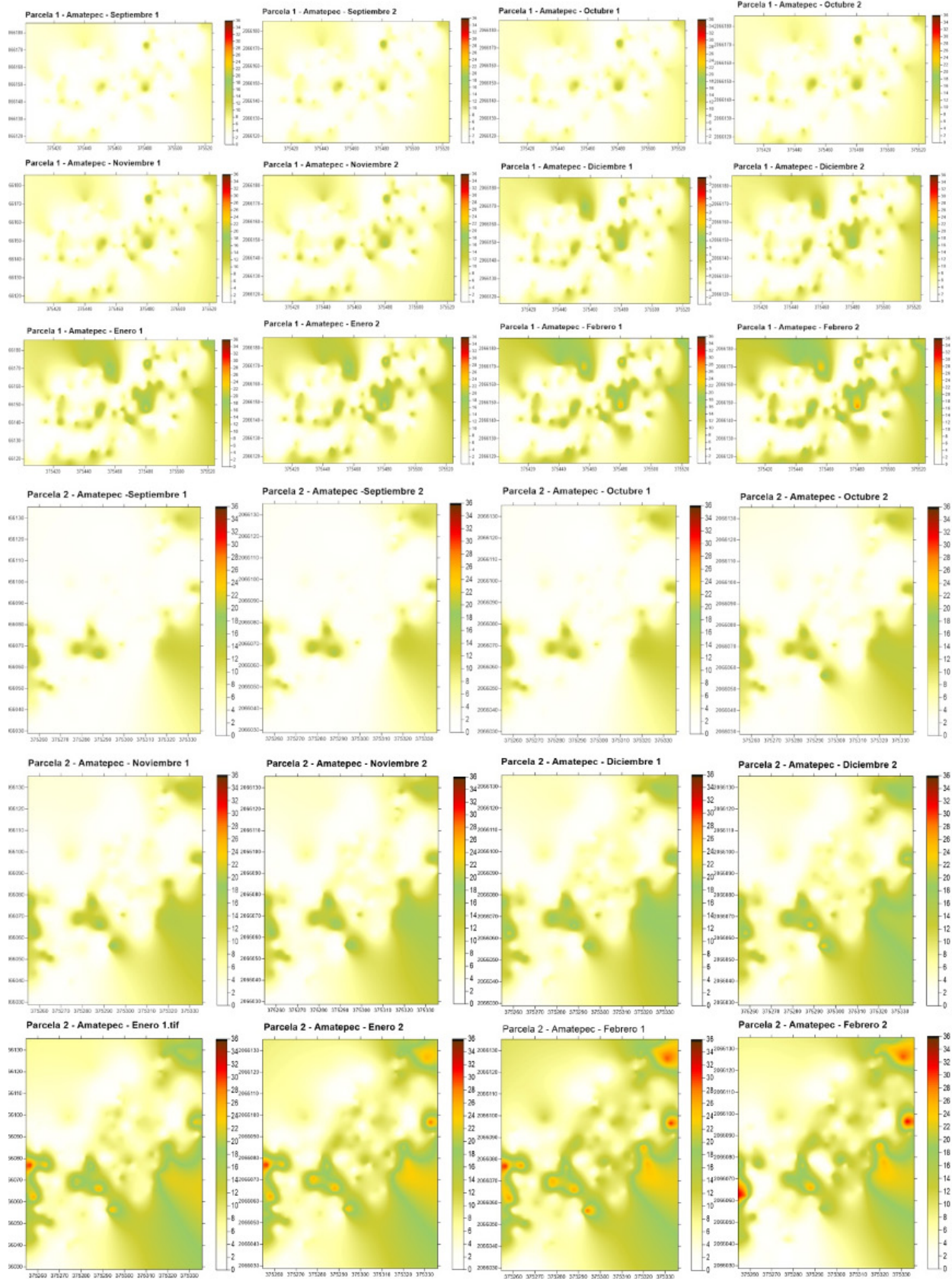


Figura 1. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo de café parcela 1 y 2 en Sultepec, Estado de México, México.

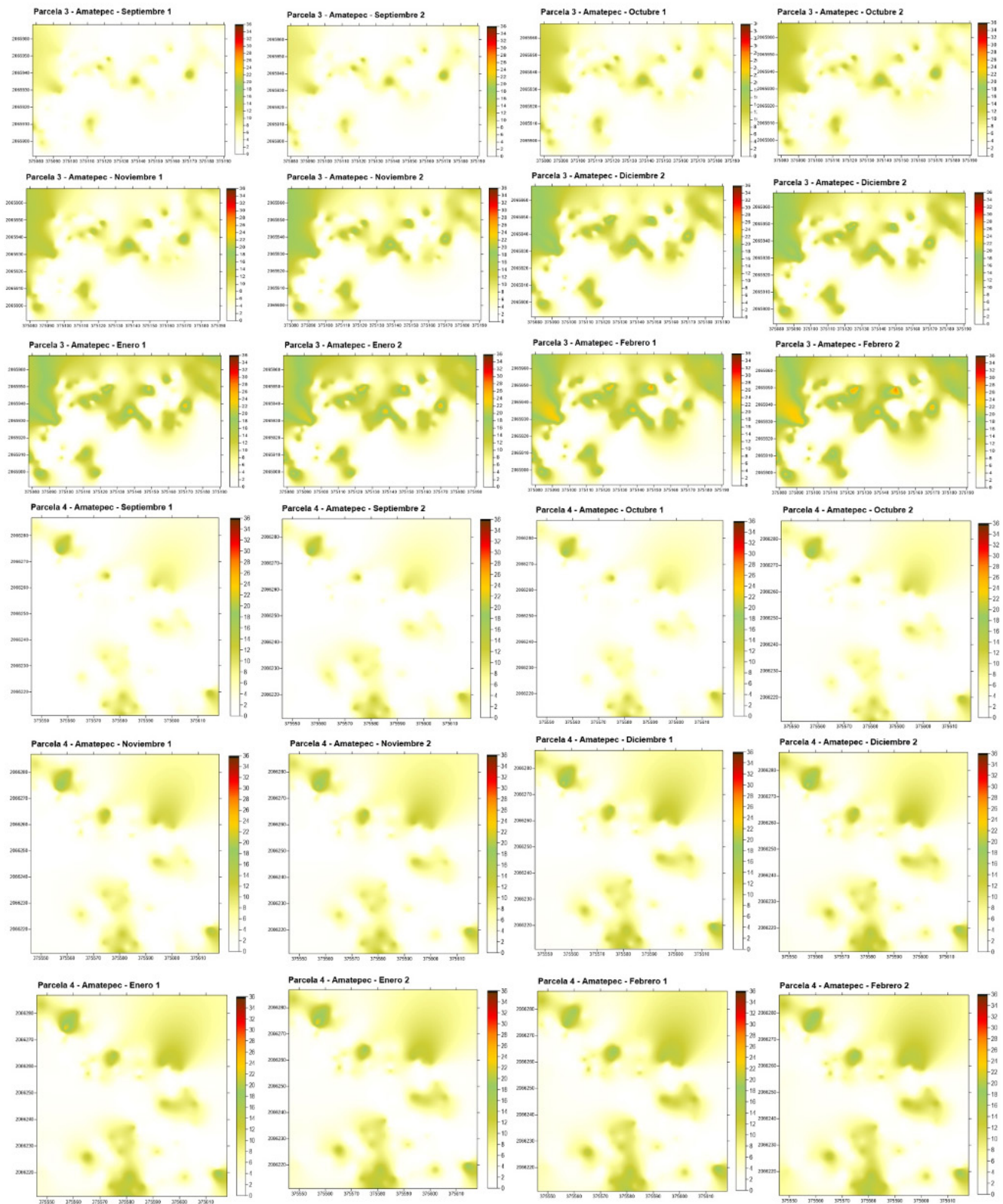


Figura 2. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo de café parcela 3 y 4 en Sultepec, Estado de México, México.

Cuadro 2. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia y porcentaje de superficie infectada de roya de café en Sultepec.

UE	Muestreo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/ mes	DE	%I	UE	Muestreo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/ mes	DE	%I
1	sep-1 (1)	1	0	17.86	19.2	0	alta	55	2	sep-1 (1)	1	0	4.15	22.5	0	alta	73
1	sep-2 (2)	1	0	24.59	19.2	0	alta	55	2	sep-2 (2)	1	0	9.31	15	0	alta	73
1	oct-1 (3)	1	0	30.30	19.2	0	alta	55	2	oct-1 (3)	1	0	12.69	13.5	0	alta	74
1	oct-2 (4)	1	0	32.50	18.0	0	alta	55	2	oct-2 (4)	1	0	16.79	18	0	alta	74
1	nov-1 (5)	1	0	34.92	19.2	0	alta	56	2	nov-1 (5)	1	0	17.19	19	0	alta	75
1	nov-2 (6)	1	0	34.90	19.2	0	alta	56	2	nov-2 (6)	1	0	22.20	19.95	0	alta	75
1	dic-1 (7)	1	0	38.95	21.6	0	alta	57	2	dic-1 (7)	1	0	12.74	22.5	0	alta	77
1	dic-2 (8)	1	0	41.00	21.0	0	alta	57	2	dic-2 (8)	1	0	16.74	16.2	0	alta	77
1	ene-1 (9)	1	0	43.60	22.8	0	alta	58	2	ene-1 (9)	1	0	13.44	24	0	alta	78
1	ene-2 (10)	1	0	44.80	21.6	0	alta	59	2	ene-2 (10)	1	0	15.90	16	0	alta	80
1	feb-1 (11)	1	0	47.04	22.4	0	alta	59	2	feb-1 (11)	1	0	17.90	19.9	0	alta	81
1	feb-2 (12)	1	0	49.92	20.4	0	alta	60	2	feb-2 (12)	1	0	60.80	16	0	alta	82
3	sep-1 (1)	1	0	16.49	14	0	alta	75	4	sep-1 (1)	1	0	10.45	14.06	0	alta	58
3	sep-2 (2)	1	0	26.88	33.6	0	alta	75	4	sep-2 (2)	1	0	14.72	11.84	0	alta	59
3	oct-1 (3)	1	0	27.16	22.8	0	alta	76	4	oct-1 (3)	1	0	20.8	15.4	0	alta	59
3	oct-2 (4)	1	0	28.80	24	0	alta	76	4	oct-2 (4)	1	0	28.5	24.64	0	alta	59
3	nov-1 (5)	1	0	44.10	26.4	0	alta	77	4	nov-1 (5)	1	0	29.14	25.41	0	alta	60
3	nov-2 (6)	1	0	49.10	20.4	0	alta	77	4	nov-2 (6)	1	0	44.16	24.64	0	alta	60
3	dic-1 (7)	1	0	65.20	22.8	0	alta	78	4	dic-1 (7)	1	0	64.2	18.48	0	alta	61
3	dic-2 (8)	1	0	70.56	22.8	0	alta	79	4	dic-2 (8)	1	0	64.02	14.8	0	alta	62
3	ene-1 (9)	1	0	69.84	20.4	0	alta	79	4	ene-1 (9)	1	0	88.35	13.32	0	alta	62
3	ene-2 (10)	1	0	91.00	17.2	0	alta	80	4	ene-2 (10)	1	0	90.24	13.32	0	alta	63
3	feb-1 (11)	1	0	90.20	16.8	0	alta	82	4	feb-1 (11)	1	0	112.8	12.58	0	alta	64
3	feb-2 (12)	1	0	99.00	15.6	0	alta	83	4	feb-2 (12)	1	0	119.6	15.4	0	alta	64

* % I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café; DE: dependencia espacial; 1: modelo esférico

Cuadro 2. Continuación.

UE	Muestreo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/ mes	DE	%I	UE	Muestreo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/ mes	DE	%I
5	sep-1 (1)	1	0	21.84	27.596	0	alta	61	6	sep-1 (1)	1	0	12.3	31.9	0	alta	71
5	sep-2 (2)	1	0	29.76	25.5	0	alta	61	6	sep-2 (2)	1	0	12.32	31.9	0	alta	72
5	oct-1 (3)	1	0	43.70	22.5	0	alta	62	6	oct-1 (3)	1	0	18.8	31.9	0	alta	72
5	oct-2 (4)	1	0	64.90	24	0	alta	62	6	oct-2 (4)	1	0	23.25	40.6	0	alta	73
5	nov-1 (5)	1	0	82.00	25.5	0	alta	62	6	nov-1 (5)	1	0	31.28	34.8	0	alta	74
5	nov-2 (6)	1	0	87.42	24	0	alta	63	6	nov-2 (6)	1	0	39.06	37.7	0	alta	75
5	dic-1 (7)	1	0	53.80	25.5	0	alta	63	6	dic-1 (7)	1	0	41.85	31.9	0	alta	75
5	dic-2 (8)	1	0	72.80	15.4	0	alta	64	6	dic-2 (8)	1	0	47.43	31.9	0	alta	76
5	ene-1 (9)	1	0	68.82	21	0	alta	64	6	ene-1 (9)	1	0	53.58	34.8	0	alta	76
5	ene-2 (10)	1	0	77.42	18	0	alta	65	6	ene-2 (10)	1	0	47	31.9	0	alta	77
5	feb-1 (11)	1	0	85.00	18	0	alta	66	6	feb-1 (11)	1	0	51.7	26.1	0	alta	78
5	feb-2 (12)	1	0	84.64	18	0	alta	66	6	feb-2 (12)	1	0	50.76	26.1	0	alta	79

* % I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café; DE: dependencia espacial; 1: modelo esférico

LITERATURA CITADA

- [APS] The American Phytopathological Society. 2011. Coffee Rust (*Hemileia vastatrix*). Disponible en: <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>
- Cárdenas-Pardo NJ, Darghan A, Sosa-Rico MD, Rodríguez A. 2017. Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 22: 209-220. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Chilés JP, Delfiner P. 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos.
- Coria-Contreras J, Mora-Aguilera G, Martínez-Bolaños M, Guzmán-Deheza A, Acevedo-Sánchez G, Flores-Sánchez J. 2014. Epidemiología de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32: 43-53.
- Espinoza-Zúñiga P, Ramírez-Dávila JF, Cibrián-Tovar D, Villanueva-Morales A, Cibrián-Llenderal VD, Figueroa-Figueroa DK, Rivera-Martínez R. 2019. Modelación de la distribución espacial del muérdago (Santalales: Loranthaceae) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan, México. *Bosque (Valdivia)* 40: 17-28. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002019000100017>
- Esquivel HV, Jasso GY. 2014. Distribución espacial y mapeo de gusano soldado en seis localidades del Estado de México, en el año 2011. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 923-935.
- Gallardo A. 2006. Geostadística. *Ecosistemas* 15: 48-58.
- Hevesi JA, Istok JD y Flint AL. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part. I. Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology* 31: 661-680. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2)
- Isaaks EH, Srivastava RM. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. Nueva York, Estados Unidos.
- Joaquín S. 1999. Monografía de Sultepec. Instituto Mexiquense de Cultura, Asociación Mexiquense de Cronistas Municipales, A.C. Toluca, Estado de México, México.
- Johnson RM, Grisham MP, Richard EPJr. 2007. Relationship between sugarcane rust severity and soil properties in Louisiana. *Phytopathology* 97: 748-755. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-6-0748>
- López JM, Marín-Ramírez G, Gaitán A, Ángel CA. 2018. Diagrama de área estándar para la estimación visual de severidad de roya del café. *Avances Técnicos Cenicafe* 498: 1-8.
- Maldonado FI, Ramirez JF, Lara AV, Acosta DA, Rivera R, Rodríguez TA. 2017. Mapeo de la distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en parcelas comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec Harinas, Estado de México. *Ecosistemas* 26: 52-60. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Maldonado-Zamora FI, Ramírez-Dávila JF, Rubí Arriaga M, Némiga XA, Lara-Díaz AV. 2016. Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 845-856.
- Mora AG, Acevedo SG, Calderón EG, Flores SJ, Domínguez MS, Baker P, González GR. 2014. Epidemiological considerations of climate change on tropical crops health. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32: 147-167.
- Mora AG, Acevedo SG, Contreras J, González GR, López BA, López JM. 2015. Alertas tempranas para el manejo de focos de roya del café en México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33(S): 62-70.
- Mora AA, Sánchez G, Guzmán HE, Flores CO, Coria CJ, Mendoza R, Coral MBV, López BA, González GR, Javier LM. 2021. Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en roya del café. *Revista Mexicana de Fitopatología* 39: 452-492. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>
- Porras A. 2000. Evaluación de la actividad *in vitro* del género *Hypocrea* contra 2 hongos fitopatógenos de importancia agrícola (*Fusarium sp.* y *Mycena citricolor*). Tesis de Licenciatura en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Dulce Nombre, Costa Rica.
- Ramírez JF, Porcayo-Camargo E, Sánchez JR. 2013. Modelización de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Trioziidae) en *Solanum tuberosum* L. (Solanales: Solanaceae). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 45: 13-27.
- Ramírez-Dávila JF y Porcayo-Camargo E. 2008. Distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología* 34: 169-175.
- Ramírez-Dávila JF, Porcayo-Camargo E. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago

- enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque (Valdivia)* 31: 28-38.
- Rodríguez AT, Ramírez-Dávila JF, Siclán MLS, Vildózola ÁC, Zamora FIM, Díaz AVL. 2020. Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología* 52: 72-81.
- Rossi R, Mulla J, Journel G, Franz H. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62: 277-314. <https://doi.org/10.2307/2937096>
- Sánchez-Hernández S. 2018. Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad* 11: 80-86.
- Sánchez-Pale JR, Ramírez-Dávila JF, González-Huerta A, De León C. 2015. Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1467-1480.
- Santana-Peñaloza B, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras JJ, Mora-Aguilera G, González-Gómez R, López-Buenfil A. 2015. CALCULA-HF v1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33(S): 119.
- Sayad E, Boshkar E, Gholami S. 2017. Different role of host and habitat features in determining spatial distribution of mistletoe infection. *Forest Ecology and Management* 384: 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.012>
- [SENASICA] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. [internet]. 2018. [citado 2022 diciembre 22]. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica>
- [SENASICA] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. [internet]. 2019. [citado 2022 diciembre 22]. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica>
- [SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [internet]. 2020. Anuario estadístico de la producción agrícola. [citado 2022 diciembre 22]. Disponible en: www.siap.gob.mx
- Syrjala E. 1996. A statistical test for a difference between the spatial distributions of two populations. *Ecology* 77: 75-80. <https://doi.org/10.2307/2265656>
- Tannure CL, Mazza SM, Giménez LI. 2002. Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*). *Revista Agraria* 5: 1-4.
- Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Salgado-Siclán ML, Castañeda-Vildózola Á, Maldonado-Zamora FI, Lara-Díaz AV. 2020. Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología* 52: 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>