

Comportamiento espacial de roya del cafeto en Amatepec, Estado de México

Spatial behavior of coffee rust in Amatepec, Estado de México

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

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMex. Centro Universitario el Cerrillo. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx.
Tel. (01 729) 296 55 31 ext. 139.
jfrd@uaemex.mx*

*Autor de correspondencia

Resumen

El café es un cultivo importante en la economía mundial; sin embargo, la roya ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix* es uno de los problemas fitosanitarios más comunes que limita su producción y llega a causar la muerte de plantas en infecciones altas. Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de roya del café para contribuir en el estudio de la dinámica espacial de la roya. El estudio se realizó en Amatepec, Estado de México, de septiembre de 2020 a agosto de 2021. Los muestreos fueron quincenalmente en cuatro parcelas de 0.5 h cada una. A través de la geoestadística se obtuvo una distribución espacial en agregados, modelos esféricos y mapas de distribución con focos de infección, así como una dependencia espacial alta. Se concluye que con este tipo de investigaciones se puede identificar y pronosticar el comportamiento de la roya en cafetales, la relación del ciclo biológico de la enfermedad y la fenología del cultivo dentro del proceso epidemiológico.

Palabras clave: *Hemileia vastatrix*; kriging; agregación; incidencia.

Abstract

The cultivation of coffee is important in the world economy; however, coffee rust caused by the *Hemileia vastatrix* fungus is one of the most common phytosanitary problems that limits its production and even causes the death of plants in high infections. Therefore, the objective of this study was to establish the spatial behavior of coffee rust populations to contribute to the study of the spatial dynamics of coffee rust. The study was carried out in Amatepec, Estado de Mexico, from September 2020 to August 2021. Samples were collected biweekly in four plots of 0.5 h each. Through geostatistics, it was obtained a spatial distribution in aggregates, spherical models, and distribution maps with infection foci, as well as a high spatial dependence. It is concluded that with this type of research it is possible to identify and forecast the behavior of rust in coffee plantations, the relationship between the biological cycle of the disease, and the phenology of the crop within the epidemiological process.

Keywords: *Hemileia vastatrix*; kriging; aggregation; incidence.

Recibido: 08 de mayo de 2023

Aceptado: 24 de julio de 2023

Publicado: 23 de agosto de 2023

Cómo citar: Pérez-Constantino, A., Ramírez-Dávila, J. F., Gutiérrez-Rodríguez, F., & Pérez-López, D. J. (2023). Comportamiento espacial de roya del cafeto Amatepec, Estado de México. *Acta Universitaria* 33, e3870. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3870>

Introducción

México ocupa el décimo lugar como productor de café a nivel mundial, con una producción de 947 092.21 t, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz. Con respecto al Estado de México, este cuenta con una producción de 622.29 t (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022; Sistema de Información Agrícola y Pecuaria [SIAP], 2020). Por otro lado, la roya es la principal enfermedad que ataca al cultivo del café, es ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, el cual ataca a las hojas de los cafetos de todas las variedades comerciales, provocando defoliaciones mayores al 60%, y en daños severos, puede causar la muerte de las plantas (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [Senasica], 2016). Si la infección ocurre en etapas tempranas, se puede presentar una reducción en el rendimiento; al contrario, si se presenta en etapas tardías, el efecto se observará en los niveles de amarre, fecundación de la flor y cuajado de fruto del siguiente ciclo del cultivo (American Phytopathological Society [APS], 2011).

Según datos de la plataforma epidemiológica de la roya del café (PVEF-Cafeto), del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader), en el Estado de México *Hemileia vastatrix* se detectó oficialmente en el año 2016, pero del 2019 a la fecha la severidad de roya en hoja y planta ha ido en aumento, lo que podría resultar en un aumento y surgimiento de nuevos focos de infestación si no se realizan actividades de control (Senasica, 2018).

En temas de manejo fitosanitario, es bien sabido que, para realizar acciones de control más eficientes, 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 contexto, en la presente investigación se analizaron los patrones del comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas, las cuales permitieron la elaboración de mapas de distribución del patógeno en un espacio continuo.

Por todo lo anterior, el objetivo de este estudio fue establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con métodos geoestadísticos en Amatepec, Estado de México, bajo la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix*) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio.

Materiales y métodos

El presente trabajo se llevó a cabo en la cabecera del municipio de Amatepec, Estado de México. Esta localidad cuenta con un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con una elevación promedio de 1389 m. s. n. m., con una temperatura media anual de 23 °C y una precipitación de 2200 mm (Cardoso, 1999). La duración del estudio fue de un año, de septiembre del 2020 a agosto del 2021.

Se utilizaron cuatro parcelas de café de 0.5 ha cada una, con variedades caturra y típica entre 10 y 15 años en un sistema de policultivo tradicional asociado con árboles maderables (Scamilla-Prado, 2018). Su manejo es convencional, con una sombra entre el 40% y 60%, constituida principalmente por cedros, cítricos y algunos encinos. Cada parcela se dividió en cuadrantes de 10 m x 10 m, dando un total de 50 cuadrantes, y en cada uno se seleccionaron cuatro plantas al azar, siendo 200 plantas las que se marcaron con listones de colores y georreferenciaron con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361).

Para realizar el registro de datos, cada árbol fue dividido por estratos (bajo, medio y alto), en cada uno fue seleccionada una rama en dirección a cada punto cardinal y se tomaron tres hojas, dando un total de 36 hojas por café. El muestreo fue cada 14 días, de septiembre de 2020 a agosto del 2021. Se registró el número de hojas que presentaba síntomas de la enfermedad utilizando la escala de severidad del programa de vigilancia epidemiológica en el cultivo del café (Senasica, 2018).

Medición de factores climáticos

Se realizó la medición de factores climáticos (temperatura y humedad relativa) mediante un sensor climático Datta Loggers HOBO Pro V2. Se colocó un sensor en el estrato medio de un árbol de café situado en la parte media de la parcela (Senasica, 2018) para identificar variaciones micro climáticas que pudieran explicar el comportamiento de *Hemileia vastatrix*.

Medición de etapas fenológicas del cultivo

Se realizó la medición del estado fenológico en los 200 árboles de cada parcela, se registró el número de árboles con brotes, floración, frutos lechosos, frutos consistentes y frutos maduros cada 14 días, y se hizo un análisis de los datos sumando la totalidad de los frutos de las cuatro parcelas para determinar y delimitar las etapas fenológicas en el área de estudio durante el ciclo de cultivo evaluado.

Análisis geoestadístico

Para realizar el análisis geoestadístico, se realizó un estudio de los datos verificando la normalidad de los datos mediante la prueba de curtosis y el coeficiente de asimetría (Chilés & Delfiner, 1999); posteriormente, se calculó el semivariograma experimental utilizando el programa Variowin 2.2 (*software* para análisis de datos espaciales en 2D, Springer Verlag, Nueva York, USA) y el WinGslib 2002 (Maldonado *et al.*, 2017). El semivariograma teórico se estimó mediante los siguientes pasos:

a) Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma

Una vez obtenido el semivariograma experimental, se ajustó a los modelos teóricos más utilizados (gaussiano, exponencial, esférico, logarítmico, efecto pepita puro, efecto agujero y monómico) con el programa Variowin 2.2 (Maldonado *et al.*, 2017). Se obtuvieron los parámetros ajustados para verificar los modelos, como el rango, que es la distancia máxima a la que la variable está asociada; el efecto pepita, que indica el origen del semivariograma; y la meseta, que es el punto máximo de intersección de la variable (Tapia *et al.*, 2020).

b) Validación del modelo

Se realizó la validación de los modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales (Gallardo, 2006), estimando las diferencias entre los valores experimentales y estimados con los estadísticos de validación cruzada (Hevesi *et al.*, 1992; Isaaks & Srivastava, 1989). Los parámetros validados fueron efecto pepita, meseta y rango con el procedimiento de ensayo y error hasta obtener los estadísticos de validación adecuados, empleando el programa Variowin 2.2 (Gallardo, 2006; Isaaks & Srivastava, 1989; Hevesi *et al.*, 1992).

c) Nivel de dependencia espacial

Se dividió el efecto pepita entre la meseta para obtener el nivel de dependencia espacial expresada en porcentajes para conocer el nivel de relación de los datos (Tapia *et al.*, 2020), basándose en el criterio siguiente: un porcentaje menor a 25% indica un nivel de dependencia espacial alta, porcentajes entre 26% y 75% indican nivel de dependencia espacial moderado y un porcentaje mayor a 76% indica que el nivel de dependencia es bajo (Sayad *et al.*, 2017).

Elaboración de mapas

Con el método geoestadístico denominado krigado ordinario se procedió a elaborar mapas de densidad de la enfermedad con el programa Surfer 16.0 (SurfaceMappingSystem, Golden Software Inc. 809, 14th Street, Golden, Colorado 80401-1866, USA). Con los mapas obtenidos fue posible calcular la superficie real infestada por la roya del café para cada parcela en las diferentes fechas de muestreo (Maldonado *et al.*, 2017).

Resultados

Medición de factores climáticos

Según los datos registrados en los sensores bioclimáticos, de septiembre a noviembre del año 2020 y de junio a agosto del 2021 se encontraron los meses con mayor porcentaje de humedad, periodo que concuerda con la precipitación, siendo septiembre el que presentó una mayor precipitación (210 mm) y porcentaje de humedad (90%); dicho periodo se encuentra dentro de la época de lluvias.

A su vez, la temperatura se comportó inversamente proporcional a los porcentajes de humedad y precipitación, ya que de febrero a junio mostró un aumento gradual, siendo mayo el mes con mayor temperatura (31.6 °C).

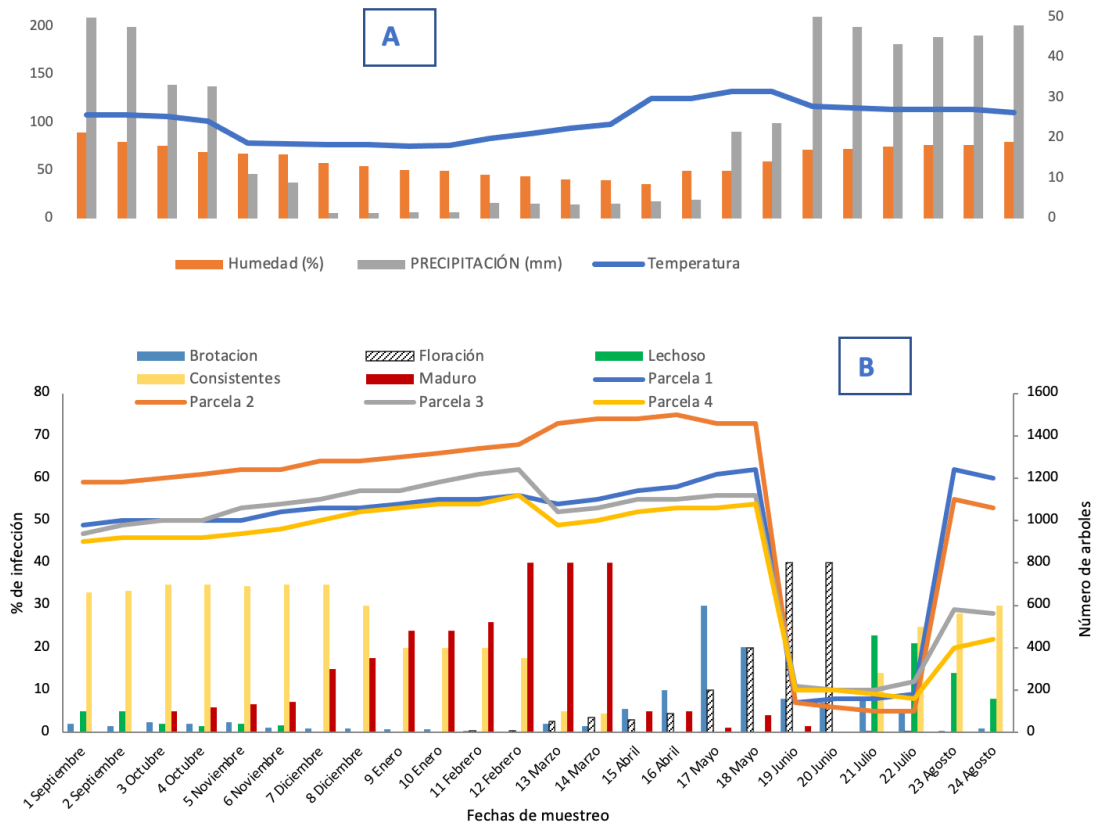


Figura 1. a) Temperatura, precipitación y porcentaje y b) Porcentaje de infección de roya y fenología del cultivo, de septiembre a diciembre de 2020 y de enero a agosto de 2021 en el municipio de Amatepec en el Estado de México, México.
Fuente: Elaboración propia.

Medición de etapas fenológicas del cultivo

El registro de datos de roya del café mostró incidencia durante todo el año del muestreo; sin embargo, la severidad fue diferente según la fecha de muestreo, manteniéndose entre el 40% y el 80% de infección de septiembre a mayo (Figura 1).

Análisis geoestadístico

Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma

Se obtuvieron 96 semivariogramas teóricos del análisis de los datos de las cuatro parcelas evaluadas, los cuales mostraron una distribución espacial en agregados. Los modelos obtenidos fueron exponencial, gaussiano y esférico, que fueron validados con los parámetros de validación cruzada, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia y porcentaje de superficie infectada de roya del café en Amatepec.

Parcela	Muestreo	Modelo	Pepita (P)	Meseta (Ms)	Rango	P/Ms	DE	%I	Parcela	Muestreo	Modelo	Pepita (P)	Meseta (Ms)	Rango	P/Ms	DE	%I
1	1	Esférico	0	10.12	20.4	0	alta	55	1	13	Exponencial	0.29	39.48	16.8	0.007345	alta	55
1	2	Esférico	0	10.23	19.2	0	alta	55	1	14	Exponencial	0.29	44.18	19.8	0.006564	alta	55
1	3	Esférico	0	11.6	16.8	0	alta	55	1	15	Gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	55
1	4	Esférico	0	13.16	20.4	0	alta	55	1	16	Gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	55
1	5	Esférico	0	15.64	15.6	0	alta	56	1	17	Gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602	alta	56
1	6	Esférico	0	18.4	18	0	alta	56	1	18	Gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602	alta	56
1	7	Esférico	0	22.62	14.4	0	alta	57	1	19	-	-	-	-	-	-	57
1	8	Esférico	0	23.4	16.8	0	alta	57	1	20	-	-	-	-	-	-	57
1	9	Esférico	0	31.68	18	0	alta	58	1	21	-	-	-	-	-	-	58
1	10	Esférico	0	31.9589	16.992	0	alta	59	1	22	-	-	-	-	-	-	59
1	11	Esférico	0	39.48	16.8	0	alta	59	1	23	Esférico	1	10.45	3.48	0.095694	alta	59
1	12	Esférico	0	44.18	19.8	0	alta	60	1	24	Esférico	1	10.45	3.48	0.095694	alta	60
2	1	Esférico	0	13.16	22.8	0	alta	73	2	13	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	73
2	2	Esférico	0	14.1	16.8	0	alta	73	2	14	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	73
2	3	Esférico	0	14.72	21.6	0	alta	74	2	15	Esférico	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	74
2	4	Esférico	0	17.67	25.196	0	alta	74	2	16	Esférico	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	74
2	5	Esférico	0	20.24	19.2	0	alta	75	2	17	Esférico	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	75
2	6	Esférico	0	20.24	20.4	0	alta	75	2	18	Esférico	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	75
2	7	Esférico	0	26.6	19.2	0	alta	77	2	19	-	-	-	-	-	-	77
2	8	Esférico	0	20.24	19.2	0	alta	77	2	20	-	-	-	-	-	-	77
2	9	Esférico	0	38.8	18	0	alta	78	2	21	-	-	-	-	-	-	78
2	10	Esférico	0	43.5237	19.2	0	alta	80	2	22	-	-	-	-	-	-	80
2	11	Esférico	0	20.02	19.2	0	alta	81	2	23	Exponencial	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	81
2	12	Esférico	0	46.8	21.6	0	alta	82	2	24	Exponencial	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	82
3	1	Esférico	0	11.04	22.8	0	alta	75	3	13	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728	alta	75
3	2	Esférico	0	13.02	26.4	0	alta	75	3	14	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728	alta	75
3	3	Esférico	0	16.4894	24	0	alta	76	3	15	Esférico	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	76
3	4	Esférico	0	17.67	19.8	0	alta	76	3	16	Esférico	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	76
3	5	Esférico	0	24	21.6	0	alta	77	3	17	Exponencial	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	77
3	6	Esférico	0	33.48	22.8	0	alta	77	3	18	Exponencial	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	77
3	7	Esférico	0	41.36	21.6	0	alta	78	3	19	-	-	-	-	-	-	78
3	8	Esférico	0	44.18	19.2	0	alta	79	3	20	-	-	-	-	-	-	79
3	9	Esférico	0	49.92	18	0	alta	79	3	21	-	-	-	-	-	-	79
3	10	Esférico	0	5376	20.4	0	alta	80	3	22	-	-	-	-	-	-	80
3	11	Esférico	0	59.78	18	0	alta	82	3	23	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	82
3	12	Esférico	0	62.08	19.2	0	alta	83	3	24	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	83
4	1	Esférico	0	12.74	24	0	alta	58	4	13	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517	alta	58
4	2	Esférico	0	12.88	24	0	alta	59	4	14	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517	alta	59
4	3	Esférico	0	12.74	20.08	0	alta	59	4	15	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	59
4	4	Esférico	0	14.56	20.8	0	alta	59	4	16	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	59
4	5	Esférico	0	17.1	17.6	0	alta	60	4	17	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	60
4	6	Esférico	0	19.2	21.6	0	alta	60	4	18	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	60
4	7	Esférico	0	21.34	21.6	0	alta	61	4	19	-	-	-	-	-	-	61
4	8	Esférico	0	21.56	16.8	0	alta	62	4	20	-	-	-	-	-	-	62
4	9	Esférico	0	22.08	16	0	alta	62	4	21	-	-	-	-	-	-	62
4	10	Esférico	0	22.95	17.8	0	alta	63	4	22	-	-	-	-	-	-	63
4	11	Esférico	0	23.5	16.4	0	alta	64	4	23	Esférico	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	64
4	12	Esférico	0	24	18.4	0	alta	64	4	24	Esférico	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	64

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

Fuente: Elaboración propia.

Los centros de agregación encontrados son aleatorios y se presentaron como focos de infección. La pepita fue igual a 0 en el primer semestre y de 0.01 a 1 en el segundo semestre de muestreo para todas las parcelas muestreadas. En cuanto al rango, este va de 15.6 a 26.4 en el primer semestre y de entre 2.56 a 20.4 en el segundo semestre.

Nivel de dependencia espacial

Los valores bajos del efecto pepita divididos entre el valor de la meseta evidenciaron una alta dependencia espacial en todo el año de muestreo.

Elaboración de mapas

De las cuatro parcelas evaluadas se obtuvieron un total de 94 mapas de incidencia, cada uno permitió visualizar el comportamiento en agregados de la roya con respecto al espacio de muestreo (Figura 2 y 3).



Figura 2. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Amatepec (septiembre de 2020–febrero de 2021), Estado de México, México.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Amatepec (marzo de 2020–agosto de 2021), Estado de México, México.
Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de superficie infectada va del 55% al 83% en el año de muestreo: se mostró con crecimiento ascendente de septiembre a febrero, luego se mantuvo con ligeras alteraciones hasta el mes de mayo y después se muestra un descenso evidente hasta julio.

Discusión

Es necesario analizar los factores climáticos medidos en el presente trabajo, partiendo desde la importancia que estos tienen en el triángulo epidemiológico de una enfermedad, el cual, según Mora *et al.* (2021), se compone de tres factores: uno es el hospedante susceptible, que en este caso es la planta de café; uno más es el patógeno agresivo, que es la roya; y finalmente están las condiciones favorables, que son todos los factores abióticos que favorecen el desarrollo de una enfermedad (suelo, manejo, variedad, clima). Para este caso particular, nos referimos a las condiciones climáticas existentes en el medio. Para la roya del café, temperaturas entre los 20 °C-22 °C y una humedad relativa mayor al 90% en ausencia de luz generan las condiciones inductivas u horas favorables; por lo tanto, a los meses con mayor cantidad de horas favorables se les conoce como meses inductivos (Mora *et al.*, 2021; Mora *et al.*, 2014; Senasica, 2018).

En este sentido, los meses más inductivos fueron de septiembre a noviembre de 2020 y de junio a agosto del 2021, lo que concuerda con lo reportado para el Estado de México por el programa de vigilancia epidemiológica del cultivo del café (Senasica, 2018). Sin embargo, López *et al.* (2018) y Mora *et al.* (2021) describen al proceso epidemiológico de la roya como resultado 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 enfermedad es un fenómeno multifactorial y no depende exclusivamente de factores climáticos, por lo que es de importancia comprender el proceso epidemiológico de la enfermedad y cómo se desarrolla durante el ciclo fenológico del café.

Con los resultados fenológicos obtenidos se puede inferir que el ciclo epidemiológico de la enfermedad se detiene en el periodo de cosecha, que va de enero a mayo, y es una vez empezado el periodo de lluvias que la incidencia baja significativamente, probablemente por la defoliación de los cafetos y por el lavado y transporte de las esporas en las hojas causado por las precipitaciones. Esto pudo derivar en el inicio de varios ciclos epidemiológicos de la enfermedad, lo que concuerda con Kushalapa & Eskes (1989), quienes mencionan que *Hemileia vastatrix* requiere condiciones específicas para infectar las hojas de la planta de café, como la salpicadura del agua de lluvia con la que se empieza la dispersión entre hojas y entre plantas, además de la presencia de humedad en el envés de la hoja que permite su germinación.

Al respecto, Porras (2000) dice que es importante analizar la incidencia y severidad de la enfermedad según las fluctuaciones del clima durante el ciclo de cultivo. De esta forma se pueden identificar las etapas críticas de la enfermedad, pronosticar su comportamiento epidémico mediante alertas o detección temprana y planear un manejo fitosanitario adecuado para la prevención de daños potenciales y combate de focos de infección.

Los resultados en la estimación de los parámetros del modelo de semivariograma indican que las agregaciones de *Hemileia vastatrix* se presentan en mayor cantidad en ciertas áreas de las parcelas con respecto al resto de puntos considerados en el muestreo. Autores como 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 inóculo que se dispersa al resto de las parcelas aledañas, lo cual también concuerda con lo encontrado por Johnson *et al.* (2007), quienes determinaron patrones ajustados de tipo esféricos en la distribución de *Puccinia melanocephala*, indicando que el inóculo del patógeno se distribuye desde un foco de infección mostrando centros de agregación. Por otro lado, Sánchez *et al.* (2015) encontraron comportamientos agregados asociados a un modelo esférico en carbón de la espiga del maíz, indicando que existen focos de la enfermedad que se dispersa desde un punto nodal.

En otro punto, la aleatoriedad de los focos de infección o centros de agregación de la enfermedad podría deberse a la diseminación o arrastre de las esporas del hongo por factores ambientales como el viento y la lluvia, o por factores humanos como el mismo caficultor, quien puede transportar inóculo en la ropa o herramienta de trabajo de una planta a otra y de una parcela a otra. Esto lo observaron 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 parcela y en otras no indican que las interacciones entre los patógenos, el medio y el huésped forman condiciones micro climáticas, como las horas favorables que completan el triángulo epidemiológico de la enfermedad en ciertas zonas de la parcela (Tannure *et al.*, 2013). Esto concuerda con un estudio realizado por Mora *et al.* (2015), en donde los autores analizan las "consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la fitosanidad de cultivos tropicales" y afirman que los procesos biológicos como patogénesis, sobrevivencia y dispersión son multifactoriales y no dependen solo 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 y el manejo agrícola (entre otras causas probables para la formación de centros de agregación y que forman parte del proceso epidemiológico de la enfermedad).

Con respecto a los parámetros ajustados para verificar los modelos, los valores del efecto pepita y los rangos de valores pequeños, Ramírez & Porcayo (2010) dicen que los valores bajos del efecto pepita afirman que no hubo errores de muestreo y que la escala que se utilizó en el levantamiento de datos de la roya del café fue correcta, y además muestran un alto nivel de agregación de la incidencia del patógeno causante de la enfermedad.

En los resultados encontrados en este estudio se mostró una dependencia espacial alta, con lo cual se supone que las poblaciones de roya dependen entre sí y su nivel de agregación es alto (Cárdenas *et al.*, 2017; Rossi *et al.*, 1992). Esto permite conjeturar que las poblaciones del patógeno tienen una fuerte correlación influenciada directamente por diversos factores, como las condiciones climáticas y micro climáticas presentes en el área de estudio. Así mismo, Espinoza-Zúñiga *et al.* (2019) indican que conocer la dependencia espacial es necesaria para poder determinar los procesos epidemiológicos de las enfermedades en campo.

Los mapas obtenidos en el muestreo por cuadrantes expusieron que las poblaciones de *Hemileia vastatrix* se encuentran en centros de agregación en lugares específicos de la parcela, lo que comprueba la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix*) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio. La menor presencia fue al inicio del muestreo en el mes de septiembre y octubre y la mayor fue al final en el mes de enero y febrero.

Esta técnica ha sido utilizada en diferentes trabajos con otros problemas fitosanitarios, como el estudio de la distribución del gusano soldado en el Estado de México, realizado por Esquivel & Jasso (2014), o el estudio de la distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: *Cicadellidae*) en un viñedo en Andalucía, desarrollado por Ramírez & Porcayo (2008).

La presencia sobre la superficie plantada es heterogénea y se presenta en la mayor parte de la parcela; la acumulación de hojas con roya en los árboles evidencia los centros de agregación que generalmente están ubicados entre el centro y los límites del predio. Según la ficha técnica de la roya del café elaborado por el Senasica (2016) para el programa de vigilancia en el cultivo del café, el periodo de germinación y/o 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 roya (probablemente se iniciaron uno o varios ciclos), y en los siguientes meses la presencia del hongo fue progresiva, siendo los últimos muestreos los de mayor presencia, a excepción de la parcela uno, en donde los focos de infestación se mantuvieron homogéneos en cuanto a severidad en todos los muestreos.

La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en los mapas coincide con 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 de 2020 y mayo a julio de 2021) los centros de agregación en los mapas fueron de poca intensidad debido al transporte del inóculo, esto aunado a la humedad residual, el aumento de temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido nuevo en la planta generan condiciones óptimas que marcan el inicio de nuevos ciclos de la enfermedad, creando focos de infección 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 inóculo de la roya del 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 en los mapas, lo que permitió ver la intensidad de la roya en algunas áreas de la parcela, por lo que 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 inóculo que inician la propagación con el inicio de las lluvias o la cosecha del café. Esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra para la aplicación, así también se disminuiría el impacto ambiental debido a que el químico que se aplique sería menor.

Incorporar la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad es útil para identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales como podas de café, podas de sombra, deshierbe o abonado, con la finalidad de reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento del hongo de la roya (Santana *et al.*, 2015), justificando así 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 (Tapia *et al.*, 2020).

Conclusiones

La distribución espacial se ajustó al modelo esférico, aseverando que la enfermedad de la roya del café se comportó en forma de agregados o en focos de infección. Los focos fueron específicos en las parcelas desde donde crecen o disminuyen parcialmente debido a las condiciones climáticas que se presentan en las unidades experimentales. Este análisis geoestadístico demostró ser un método eficiente para determinar el comportamiento espacial agregado de las poblaciones de roya, indicando que existe una alta dependencia espacial entre las poblaciones de la enfermedad.

De esta forma, la estadística espacial permite identificar zonas de incidencia de plagas y enfermedades en zonas de cultivo. Esto hace más sencillo la creación de planes de manejo y control de fenómenos fitosanitarios con enfoque focalizado y dirigido de actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de precisión, la cual recomienda al productor el control a través del manejo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infestación y puede reducir significativamente la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y el daño ambiental. De esta forma se puede 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 pesticidas 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.

Conflicto de interés

No se cuenta con conflicto de interés.

Referencias

- American Phytopathological Society (APS). (2011). *Coffee rust*.
<https://www.apsnet.org/edcenter/disandpath/fungalbasidio/pdlessons/Pages/CoffeeRust.aspx>
- Cardoso, S. A. (1999). *Amatepec. Monografía Municipal* (1ª ed.). Instituto Mexiquense de la Cultura.
https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=406
- Cárdenas, N. J., Darghan, A., Sosa, M. D., & 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(2), 209-220. doi: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Chilés, J. P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118136188>
- 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. <https://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento322014.html>
- Espinoza-Zúñiga, P., Ramírez-Dávila, J. F., Cibrián-Tovar, D., Villanueva-Morales, A., Cibrián-Llenderal, V. D., Figueroa-Figueroa, D. K., & 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(1), 17-28. doi: <https://doi.org/10.4067/s0717-92002019000100017>

- Esquivel, V., & Jasso, Y. (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(6), 923-935. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n6/v5n6a2.pdf>
- Gallardo, A. (2006). Geostatística. *Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 3, 1-11. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://fjferreer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Geoestadistica.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://fjferreer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Geoestadistica.pdf)
- Hevesi, J. A., Istok, J. D., & Flint, A. L. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 31(7), 661-676. doi: [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, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.
- Johnson, R. M., Grisham, M. P., & Richard, E. P. (2007). Relationship between sugarcane rust severity and soil properties in Louisiana. *Phytopathology*, 97, 748-755. doi: <https://doi.org/10.1094/PHTO-97-6-0748>
- López, J. M., Marín-Ramírez, G., Gaitán, A., & Ángel, C. A. (2018). *Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya del café* [Avance técnico No. 498]. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4244>
- Maldonado, F. I., Lara, A. V., Ramírez, J. F., Acosta, A. D., Rivera, R., & Tapia, A. (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(2), 52-60. doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Mora, G., Acevedo, G., Calderón, G., Flores, J., Domínguez, S., Baker, P., & González, R. (2014). Epidemiological considerations of climate change on tropical crops health. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32(2), 147-167. https://rmf.smf.org.mx/Vol_32_2_2014.html
- Mora, G., Acevedo, G., Contreras, J., González, R., López, A., & Javier, M. A. (2015). Alertas tempranas para el manejo de focos de roya del café en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 62-70. https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html
- Mora, G., Acevedo, G., Guzmán, E., Flores, O. E., Coria, J. J., Mendoza, C., Martínez, V. I., López, A., González, R., & Javier, M. A. (2021). Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en roya del café. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(3), 452-492. doi: <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). [Datos de seguridad alimentaria]. [Fao.org. https://www.fao.org/faostat/es/#data](https://www.fao.org/faostat/es/#data)
- 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]. Cartago.
- Ramírez, J. F., & Porcayo, E. (2008). Distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología*, 34(2), 169-175. www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-04882008000200006&script=sci_arttext
- Ramírez, J. F., & Porcayo, 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(1), 28-38. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000100004>
- Rossi, R. E., Mulla, D. J., Journel, A. G., & Franz, E. H., (1992). Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 62(2), 277-314. doi: <https://doi.org/10.2307/2937096>
- Santana, B., Acevedo, G., Coria, J. J., Mora, G., González, R., & López, 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, 119. https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.012>
- Sánchez, J. R., Ramírez, J. F., González, 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(7), 1467-1480. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000700004

- Scamilla-Prado, S. (2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*, 11(4), 80-86.
<https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/274>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica). (2016). *Roya del café Hemileia vastatrix Berkeley & Broome* [Ficha Técnica No. 40].
<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20café/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20café.pdf>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica). (2018). *Manual Técnico Operativo 2018 para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en el Cultivo del Café*.
<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20café/Estrategia%20operativa/ManualOperativoRoyaCafeto.pdf>
- Sistema de Información Agrícola y Pecuario (SIAP). (2020). *Anuario estadístico de la producción agrícola*.
www.siap.gob.mx
- Tapia, A., Ramírez, J. F., Salgado, M. L., Castañeda, Á., Maldonado, F. I., & Lara, A. V. (2020). Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(1), 72-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>
- Tannure, C. L., Mazza, S. M., & Giménez, L. I. (2013). Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*). *Revista Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE*, 1(4).