

Comportamiento espacial de antracnosis en aguacate en Coatepec Harinas y Tenancingo, Estado de México

Spatial behavior of anthracnose in the avocado crop in Coatepec Harinas and Tenancingo, State of Mexico

Atenas Tapia-Rodríguez¹ ,
 José Francisco Ramírez-Dávila^{1*} ,
 Dulce Karen Figueroa-Figueroa¹ ,
 Francisco Gutiérrez-Rodríguez¹ ,
 Alfredo Ruiz-Orta¹ 

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Campus Universitario "El Cerrillo". CP. 50200. Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: jframirez@uaemex.mx

Artículo científico

Recibido: 18 de noviembre 2021

Aceptado: 06 de junio 2023

Como citar: Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Figueroa-Figueroa DK, Gutiérrez-Rodríguez F, Ruiz-Orta A (2023) Comportamiento espacial de antracnosis en aguacate en Coatepec Harinas y Tenancingo, Estado de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(2): e3199. DOI: 10.19136/era.a10n2.3199

RESUMEN. La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en el cultivo de aguacate que ocasiona pérdidas económicas considerables para el sector productivo del Estado de México. Para focalizar las medidas de control, es necesario conocer el comportamiento espacial y la dinámica de la enfermedad en condiciones de campo. El objetivo del estudio fue determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en aguacate Hass en Coatepec Harinas y Tenancingo, Estado de México utilizando estadística clásica y geoestadística. La estadística clásica no mostró el comportamiento real de la antracnosis debido a que se presentaron ajustes a la Binomial Negativa y distribución de Poisson. Con la geoestadística, se obtuvo la representación del comportamiento espacial de la enfermedad a través de mapas que muestran la presencia de centros de agregación; los semivariogramas para cada fecha de muestreo presentaron distribuciones ajustadas en su mayoría a modelos de tipo gaussiano y exponencial con rangos que fluctuaron entre los 12 y los 56 m, indicando asociación entre los datos; el mayor porcentaje de superficie infectada fue de 99% para el primer muestreo de abril, mientras para el primer muestreo de noviembre, el mayor porcentaje fue de 98% en ambos municipios. La geoestadística permite conocer con precisión cuales son los patrones de distribución que siguen las enfermedades como la antracnosis en las zonas aguacateras en el Estado de México y facilita la implementación de programas de manejo integrado con mayor efectividad, contribuyendo así a disminuir el uso excesivo de productos químicos, favoreciendo la obtención de frutos más inocuos.

Palabras clave: Agregación, geoestadística, kriging ordinario, mapa, semivariograma.

ABSTRACT. Anthracnose is a fungal disease present in the avocado crop that causes considerable economic losses for the productive sector of the State of Mexico. To target control measures, it is important to know the spatial behavior and the dynamics that the disease follows under field conditions. The application of geostatistical methods facilitates this work. For this reason, the objective of this study was to determine the spatial behavior of anthracnose in the Hass avocado crop in Coatepec Harinas and Tenancingo, two producing municipalities in the State of Mexico using classical and geostatistical statistics. The results obtained through classical statistics did not show the real behavior of anthracnose because, in both municipalities, there were adjustments to a Negative Binomial representation as well as to a Poisson distribution. With the use of geostatistics, it was possible to obtain the representation of the spatial behavior of the disease through maps, which show the presence of aggregation centers; the semivariograms for each sampling date presented distributions adjusted mostly to Gaussian and exponential models with ranges that fluctuated between 12 and 56 m, indicating association between the data; likewise, the highest percentage of infected area was 99% for the first sampling in April, while for the first sampling in November, the highest percentage was 98% in both municipalities. Geostatistics makes it possible to know precisely what are the distribution patterns followed by diseases such as anthracnose in avocado-growing areas in the State of Mexico and facilitates the implementation of integrated management programs more effectively, thus contributing to reducing the excessive use of products chemicals, favoring the obtaining of more innocuous fruits.

Key words: Aggregation, geostatistics, kriging, map, semivariogram.

INTRODUCCIÓN

Las actividades agrícolas generan elevados índices de contaminación en el planeta, y México, no es la excepción. Cada año, la superficie cultivada de aguacate (*Persea americana* Mill) incrementa principalmente en los estados donde ya se concentra la mayor parte de la producción nacional. Sin embargo, esta situación ha causado efectos negativos como el cambio de uso de suelo forestal a superficie agrícola, e incrementando problemas como menor captura de carbono, aumento de temperatura global, entre otros (Chávez *et al.* 2012, Borrego y Allende 2021). Durante las últimas décadas, el aguacate (*P. americana* Mill.) se ha convertido en un sistema agrícola eficiente en México, aportando alrededor del 50% del volumen mundial y la producción crece de manera exponencial (FAO 2020). Particularmente, en el Estado de México se registran 12 356 ha sembradas, de las cuales se obtiene una producción de 123 464 toneladas de aguacate, concentrándose la mayor producción en los municipios de Coatepec Harinas, Temascaltepec, Donato Guerra, Valle de Bravo y Tenancingo (Secretaría del Campo 2022). No obstante, enfermedades como la antracnosis y la roña son reportadas para el cultivo de aguacate, las cuales ocasionan pérdidas económicas de hasta el 40% en volumen de producción (Trinidad *et al.* 2017).

La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en México provocada por hongos filamentosos del complejo *Colletotrichum*, siendo *Colletotrichum gloeosporioides* y su teleomorfo *Glomerella cingulata*, los causantes de esta enfermedad en los municipios del Estado de México donde se cultiva actualmente el aguacate (Tapia *et al.* 2020). De acuerdo con Lemus *et al.* (2017), la incidencia de esta enfermedad oscila entre un 42 y 74%, siendo una de las más importantes reportadas para este cultivo causando daños que dificultan su comercialización en mercados nacionales e internacionales. La enfermedad se presenta en etapas tempranas del desarrollo del fruto, comenzando con la formación y penetración de apesorios en el pericarpo, formando manchas salmonadas que a los pocos días se tornan oscuras, generando necrosis y degradación del tejido celular

(Rojo-Baez *et al.* 2017). Las condiciones ambientales en las que esta enfermedad se presenta es cuando las plantas se encuentran en pleno desarrollo vegetativo, la humedad ambiental alcanza un 95% y la temperatura es superior a 17 °C (Herrera *et al.* 2020). La estructura espacial de una enfermedad como la antracnosis, está determinada por las condiciones ambientales y las características del patosistema (Van-Maanen y Xu 2003). Diversos estudios argumentan que el desarrollo de estrategias para el manejo de posibles enfermedades en los cultivos agrícolas responde en gran medida a la dinámica de las enfermedades en un espacio y tiempo determinado. La correcta aplicación de métodos y modelos adecuados, de acuerdo con Campbell y Madden (1990), depende del aumento y progreso de la enfermedad en el tiempo y espacio, pero también de las interacciones que surgen entre los hospedantes y patógenos, de las variables ambientales como temperatura y humedad, así como de las estrategias de manejo preventivo (Valdés *et al.* 2017).

Considerando lo anterior, diversos estudios como el de Ávila *et al.* (2003) se han enfocado en conocer y analizar la distribución espacial de las enfermedades agrícolas con métodos de la estadística clásica, por medio de distribuciones e índices de dispersión que no consideran la disposición espacial exacta de la variable. Debido a que estos métodos no logran diferenciar modelos espaciales diferentes, y sus representaciones dependen de la relación presente entre la media, la varianza (Sawyer 1989, Hurlbert 1990) y el tamaño de las unidades de muestreo, no logran considerar el patrón espacial, generando efectos inesperados (Van-Maaden y Xu 2003).

Debido a los efectos antes mencionados y al empleo de nuevos programas estadísticos eficientes, el interés por aplicar herramientas de estadística espacial en estudios agrícolas se han incrementado. La geoestadística y el análisis espacial por índices de distancia (SADIE), son actualmente metodologías que han demostrado ser precisas para el manejo de plagas y enfermedades agrícolas debido a que se centran en calcular, interpolar, extrapolar y simular el comportamiento y dependencia espacial entre variables equidistantes. Por lo anterior, el objetivo del

este estudio fue conocer el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo aguacate var. Hass en Coatepec Harinas y Tenancingo, Estado de México, a través del empleo y comparación de la Geoestadística con la estadística clásica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó de julio 2019 a junio de 2020 en los municipios de Coatepec Harinas (18° 54' 00" LN, 99° 43' 00" LO) y Tenancingo (18° 57' 38" LN, 99° 34' 32" LO), Estado de México. Estos fueron seleccionados debido a que son productores de aguacate en la entidad y cuentan con grandes superficies sembradas (SIAP 2021). La temperatura en Coatepec Harinas generalmente varía de 10 a 29 °C, mientras que, para Tenancingo, estos valores oscilan entre 4 y 27 °C (COESPO 2015).

Distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales de cada municipio, se seleccionaron cuatro parcelas de aguacate, con una extensión de cuatro hectáreas, mismas que se dividieron en 100 cuadrantes. Posteriormente, se seleccionaron 40 cuadrantes en cada hectárea, y en cada uno de ellos, 10 árboles de aguacate cultivar Hass de 10 años de edad, teniendo un total de 400 unidades experimentales por parcela. Además, se verificó que el manejo agronómico fuera llevado a cabo de manera similar, considerando el control cultural que los productores dan a sus huertos.

Los árboles fueron marcados con una banda plástica y georreferenciados con un DGPS diferencial Trimble. Los muestreos para medir incidencia de la enfermedad, se hicieron cada catorce días revisando los árboles marcados y verificando la presencia en 30 frutos de aguacate con síntomas como manchas necróticas de tonos marrones, hundidas y con masas de esporas de color rosado, tal como lo mencionan Morales *et al.* (2009). Los datos de incidencia de antracnosis de cada muestreo se ordenaron en una base de datos de Excel. Se empleó la Prueba de Curtosis y el coeficiente de variabilidad para determinar la normalidad de los mismos (Marcano *et al.* 2020).

Estadística clásica

Se determinaron las distribuciones estadísticas (binomial negativa y Poisson) y los índices de dispersión (de dispersión y de Green) de acuerdo con Espinoza *et al.* (2019).

Análisis geoestadístico

Para la estimación del semivariograma, los datos de los muestreos quincenales de incidencia de frutos con síntomas de antracnosis, se ingresaron al programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New Cork, USA).

Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma y su validación

Los semivariogramas experimentales, se ajustaron a un modelo de semivariograma teórico. Ya que estos semivariogramas representan funciones analíticas sencillas que se emplean para mostrar los semivariogramas auténticos (Englund y Sparks 1988).

Los modelos del semivariograma teórico se validaron mediante el procedimiento de validación cruzada (Isaaks y Srivastava 1989), obteniendo los parámetros de efecto pepita (C_0), meseta (C) y rango (a), a través de un análisis de prueba y error continuo hasta la creación de estadísticos de validación convenientes, entre los que destacan la media de los errores de estimación, el error cuadrático medio y error cuadrático medio adimensional, principalmente. Para realizar el ajuste de los semivariogramas experimentales a los modelos teóricos se utilizó la extensión Geoestadística del Software Variowin 2.0.2.

Nivel de dependencia espacial

El nivel de dependencia espacial en este estudio se obtuvo a partir de la división del efecto pepita entre la meseta, expresando el resultado en porcentaje. El nivel de dependencia se evalúa de la siguiente forma: valores debajo de 25%, indican dependencia espacial alta; valores entre 26 y 75%, indican dependencia espacial moderada; y valores superiores o iguales al 76%, indican dependencia espacial baja (Rivera *et al.* 2020).

Mapeo por krigado ordinario y superficie infectada

Después del ajuste de los semivariogramas, se llevó a cabo la interpolación de datos mediante krigado ordinario para visualizar los patrones de distribución espacial de la enfermedad a lo largo del tiempo; las estimaciones derivadas se representaron en mapas por muestreo de árboles enfermos mediante el programa Surfer 16 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA). La superficie infectada por la enfermedad en los respectivos muestreos también fue calculada con base en estos mapas.

RESULTADOS

Estadística clásica

Los resultados de la distribución espacial de la antracnosis encontrada en cada sitio experimental, se presentan en el Tabla 1. El índice de dispersión indica que todas las fechas de muestreo en Coatepec Harinas mostraron una distribución agregada de la antracnosis, con excepción de los segundos muestreos quincenales en julio, agosto y septiembre, así como en los primeros muestreos quincenales de diciembre, febrero y junio, cuya distribución fue aleatoria. En el caso de Tenancingo, la mayoría de los muestreos presentaron distribución agregada, a excepción del primer muestreo realizado en noviembre, el segundo muestreo de febrero, el primer muestreo de mayo y el primer muestreo de julio, los cuales se ajustaron a una distribución de tipo aleatorio. Dicha agregación quedó confirmada con los valores del índice de Green, pero en este caso para todos los muestreos en ambos municipios, indicando una agregación ligera con base en los valores tan bajos de este índice (Tabla 1).

Las distribuciones estadísticas, indican que, en los primeros muestreos quincenales de los meses de septiembre, diciembre y abril en Coatepec Harinas, la distribución se ajustó a una representación binomial negativa (agregación) como a una distribución de Poisson (aleatoriedad). Situación similar ocurrió en

Tenancingo para los primeros muestreos de noviembre, enero y julio, por lo que no es posible discernir la distribución espacial real de la antracnosis.

Los datos obtenidos en los muestreos de octubre, febrero, segundo de mayo y primero de junio en Coatepec Harinas, no se ajustaron a ninguna distribución estadística, mientras que, para Tenancingo, esto ocurrió en los muestreos del mes de septiembre, el primer muestreo de mayo y los segundos muestreos de diciembre y marzo, respectivamente.

Análisis geoestadístico

Se obtuvieron 48 mapas quincenales de incidencia y 48 semivariogramas ajustados y validados a modelos teóricos (Tabla 2). Los modelos teóricos más comunes a los que se ajustaron los semivariogramas fueron al Modelo Esférico, Modelo Exponencial y Modelo Gaussiano. Los cuales fueron omnidireccionales, ya que no existía una tendencia predeterminada por la enfermedad para distribuirse hacia ciertas zonas de las parcelas de estudio.

Para el municipio de Coatepec Harinas, los modelos del semivariograma fueron en su mayoría de tipo gaussiano y exponencial, presentándose modelos esféricos solo en los muestreos de julio, agosto, septiembre, enero y marzo. La antracnosis en agregados se presentó sobre todo durante agosto, septiembre, noviembre y diciembre, coincidiendo con cambios de temperatura, humedad y precipitación en las zonas de muestreo, aunque en los muestreos restantes, la enfermedad se comportó estable (Tabla 2). En Tenancingo, la antracnosis tuvo tendencia a ajustarse a modelos de tipo gaussiano, aunque no se descartó el ajuste a modelos de tipo exponencial.

El parámetro rango representa la máxima distancia hasta la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados. Se asume que más allá del valor máximo de la distancia, se presentará una dependencia espacial nula. En este estudio, los valores de rango fluctuaron entre 22.4 como mínimo y 56.7 m como máximo para Coatepec Harinas, este último valor asociado a un modelo gaussiano; mientras que 12 como mínimo y 41.4 m como máximo fueron los valores de rango para Tenancingo. Los valores de meseta más bajos en Coatepec Hari-

Tabla 1. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas de antracnosis en el cultivo de aguacate para los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo periodo julio 2019 a junio 2020.

Coatepec Harinas						Tenancingo					
Muestreo	Índice de Dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial Negativa	K	Fecha	Índice de Dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial Negativa	K
Julio 1	2.42s	0.92	Ns	S	0.94	Jul-01	0.96ns	0	S	S	17.03
Julio 2	0.88ns	0.69	Ns	S	1.07	Jul-02	2.33s	0.57	Ns	S	1.15
Agosto 1	1.52s	0.25	Ns	S	2.05	Ago-01	2.07s	0.58	Ns	S	2.59
Agosto 2	0.65ns	0.09	Ns	S	4.26	Ago-02	2.39s	0	Ns	S	1.26
Septiembre 1	1.66s	0.33	Ns	S	3.71	Sep-01	1.22s	0.48	Na	Na	-
Septiembre 2	0.91ns	0.59	S	S	11.21	Sep-02	1.40s	0.08	Na	Na	-
Octubre	1.57s	0.07	Na	Na	-	Oct-01	1.69s	0.67	Ns	S	2.8
Octubre	1.80s	0.72	Ns	S	2.84	Oct-02	1.53s	0.93	Ns	S	1.66
Noviembre 1	1.44s	0.84	Ns	S	1.65	Nov-01	0.87ns	0.51	S	S	19.11
Noviembre 2	2.05s	0.06	Ns	S	2.29	Nov-02	2.13s	0.09	Ns	S	1.21
Diciembre 1	0.84ns	0	S	S	13.06	Dic-01	1.91s	0.51	Ns	S	3.08
Diciembre 2	1.71s	0.98	Ns	S	3.14	Dic-02	2.25s	0	Na	Na	-
Enero 1	2.16s	0.45	Ns	S	1.83	Ene-01	1.48s	0.82	S	S	13.99
Enero 2	1.95s	0.39	Ns	S	3.4	Ene-02	1.65s	0.99	Ns	S	2.44
Febrero 1	0.72ns	0.55	Na	Na	-	Feb-01	2.03s	0.42	Ns	S	1.95
Febrero 2	1.50s	0.81	Ns	S	0.97	Feb-02	0.70ns	0.97	Ns	S	2.33
Marzo 1	1.62s	0.68	Ns	S	1.35	Mar-01	1.74s	0.73	Ns	S	1.2
Marzo 2	2.14s	0.49	Ns	S	2.68	Mar-02	1.43s	0.06	Na	Na	-
Abril 1	2.26s	0.05	S	S	15.93	Abr-01	1.92s	0.44	Ns	S	2.02
Abril 2	1.98s	0.76	Ns	S	0.82	Abr-02	1.58s	0.76	Ns	S	0.86
Mayo 1	1.49s	0.88	Ns	S	1.39	May-01	0.84ns	0.63	Na	Na	-
Mayo 2	1.84s	0.63	Na	Na	-	May-02	2.28s	0.37	Ns	S	2.49
Junio 1	0.79ns	0	Na	Na	-	Jun-01	1.69s	0.62	Ns	S	3.51
Junio 2	2.23s	0.74	Ns	S	1.42	Jun-02	2.47s	0.87	Ns	S	0.75

S = Significativa; NS = No Significativa; nivel de significación al 5%; Na = No Ajustada.

Tabla 2. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas y Tenancingo. Periodo julio 2019 a junio 2020.

Coatepec Harinas							Tenancingo										
Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/Mes	Dep. Esp.	Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/Mes	Dep. Esp.
Julio 1	12.53	65.72	Esférico	0	44.02	34.5	0	Alta	Jul-01	15.31	96.45	Expo.	0	85.56	12	0	Alta
Julio 2	12.52	65.72	Expo.	0	29.12	27	0	Alta	Jul-02	17.84	91.74	Gauss.	0	86.48	16	0	Alta
Agosto 1	10.89	53.8	Expo.	0	30.45	35.1	0	Alta	Ago-01	19.86	119.15	Gauss.	0	98.4	26.4	0	Alta
Agosto 2	12.36	61.88	Esférico	0	59.94	43.2	0	Alta	Ago-02	20.29	116.16	Gauss.	0	100.8	18	0	Alta
Sep. 1	12.89	66.42	Esférico	0	3.29	45.9	0	Alta	Sep-01	22.39	154.47	Esférico	0	173	37.79	0	Alta
Sep. 2	9.89	36.95	Expo.	0	54.27	56.7	0	Alta	Sep-02	22.25	180.62	Expo.	0	171	32.4	0	Alta
Octubre 1	11.05	55.59	Expo.	0	1.67	23	0	Alta	Oct-01	20.1	136.36	Gauss.	0	131.6	20	0	Alta
Octubre 2	10.7	45.65	Expo.	0	2.82	43.2	0	Alta	Oct-02	18.85	109.73	Expo.	0	106.7	24	0	Alta
Nov. 1	3.81	9.69	Expo.	0	1.02	27	0	Alta	Nov-01	14.43	80.93	Expo.	0	72.9	14	0	Alta
Nov. 2	10.73	36.77	Expo.	0	3.01	37.8	0	Alta	Nov-02	14.19	59.04	Expo.	0	54	18	0	Alta
Dic. 1	10.6	31.71	Gauss.	0	2.13	29.9	0	Alta	Dic-01	10.11	36.32	Gauss.	0	53.4	16	0	Alta
Dic. 2	9.97	34.75	Gaussiano	0	3.39	35.1	0	Alta	Dic-02	8.89	31.05	Expo.	0	109.2	39.6	0	Alta
Enero 1	1.5	2.27	Esférico	0	48.18	40.5	0	Alta	Ene-01	2.23	1.88	Esférico	0	1.76	35.99	0	Alta
Enero 2	1.68	1.41	Gauss.	0	34.78	45.9	0	Alta	Ene-02	1.82	1.49	Gauss.	0	1.455	33.6	0	Alta
Febrero 1	2.5	2.04	Gauss.	0	6.79	45.9	0	Alta	Feb-01	2.56	1.92	Expo.	0	1.78	28.8	0	Alta
Febrero 2	2.08	4	Gauss.	0	34.76	29.7	0	Alta	Feb-02	2.22	1.61	Expo.	0	1.41	28.8	0	Alta
Marzo 1	1.61	1.13	Gauss.	0	2.068	22.4	0	Alta	Mar-01	2.97	3.55	Gauss.	0	3.24	41.4	0	Alta
Marzo 2	2.8	2.14	Esférico	0	1.14	52.2	0	Alta	Mar-02	3.02	2.36	Gauss.	0	1.23	32.4	0	Alta
Abril 1	2.77	2.21	Gauss.	0	59.11	41.4	0	Alta	Abr-01	2.81	2.06	Esférico	0	1.32	39.6	0	Alta
Abril 2	4.73	21.09	Gauss.	0	55.44	43.2	0	Alta	Abr-02	2.86	3.63	Gauss.	0	1.2	32	0	Alta
Mayo 1	3.93	3.49	Gauss.	0	64.02	43.7	0	Alta	MAYO	3.42	1.54	Expo.	0	1.2	37.8	0	Alta
Mayo 2	6.68	31	Expo.	0	35.22	23	0	Alta	May-01	5.85	28.4	Expo.	0	23.78	30.6	0	Alta
Junio 1	9.42	43.54	Gauss.	0	2.139	32.2	0	Alta	Jun-01	13.34	69.68	Expo.	0	63.7	34.2	0	Alta
Junio 2	12.85	80.73	Gauss.	0	48.06	39.1	0	Alta	Jun-02	15.52	85.96	Gauss.	0	63.7	32.4	0	Alta

Pep/Mes = Efecto pepita entre meseta, Dep. Esp.= Dependencia espacial, Gauss = Modelo Gaussiano, Expo = Modelo Exponencial, Esférico = Modelo Esférico.

nas estuvieron asociados a modelos exponenciales y esféricos, mientras que los más altos, a modelos gaussianos. En Tenancingo, el valor más alto para este parámetro se asocia principalmente a modelos

exponenciales con valores elevados. En Tabla 2 se indica el valor de cero obtenido en el efecto pepita y alta dependencia espacial para todos los modelos ajustados.

Mapeo y superficie infectada

La evidencia del avance de la enfermedad se mostró con la aparición y mantenimiento de parches de infección en los mapas de cada fecha de muestreo en ambos sitios. Los mapas permitieron determinar la superficie infectada con base en estimaciones a través del krigeado ordinario (Figuras 1 y 2).

Se observan áreas libres de infección reducidas, contrastando con una densidad mayor de la enfermedad. Durante los muestreos de octubre, noviembre, parte de diciembre y febrero en Tenancingo, el porcentaje de superficie infectada fue mayor al 90%, mientras que, durante el primer muestreo de agosto, el segundo muestreo de septiembre y el primero de octubre, la superficie infectada fue de 82%. En Coatepec Harinas, los porcentajes más altos superaron el 90% de superficie infectada, presentándose en todos los muestreos, con excepción de algunos muestreos.

DISCUSIÓN

Estadística clásica

Al comparar los resultados obtenidos mediante la estadística clásica se corroboró la limitante existente en éstos métodos para detectar de manera precisa la distribución espacial de la antracnosis presente en la zona aguacatera de ambos municipios. El doble ajuste de las distribuciones utilizadas, asume que no son adecuados para determinar correctamente la distribución de la antracnosis en las zonas de muestreo. Lo anterior coincide con lo reportado por Ramírez *et al.* (2011), argumentando este doble ajuste a la tendencia de la Binomial Negativa hacia una distribución de Poisson, ya que presenta altos valores en el parámetro k , y al ajustar estadísticamente por máxima verosimilitud, los dos modelos de distribución concuerdan con los datos muestreados. Esta situación ejemplifica una restricción al pretender ajustar distribuciones estadísticas, lo que indica un posible método de evaluación no adecuado y muestra la imposibilidad del método empleado para estimar una distribución real, resultando necesario incrementar el número de muestras (Vivas y Notz 2011, Santos

et al. 2016).

Análisis geoestadístico

Un semivariograma puede ajustarse a diferentes modelos, siendo los más frecuentes los gaussianos, exponenciales y esféricos. Cuando un modelo de semivariograma se ajusta al tipo gaussiano, muestra agregación continua de la enfermedad dentro del área muestreada (Rivera *et al.* 2020), mientras que un modelo exponencial comienza con un crecimiento acelerado de la enfermedad. En este estudio, los mayores niveles de incidencia de antracnosis estuvieron asociados a una distribución exponencial, por lo que se asume la posibilidad de conocer anticipadamente si se presenta o no agregación de la enfermedad, y a su vez, focalizar las acciones de monitoreo y control hacia puntos específicos (Ramírez y Porcayo 2009). Al analizar los resultados, la mayoría de los modelos del semivariograma fueron exponenciales y gaussianos, por lo que se atribuye que un comportamiento esférico no es frecuente para esta enfermedad dentro de las zonas de muestreo. Los parámetros del semivariograma permitieron establecer el tipo de modelo de la distribución. El hecho de encontrar rangos y mesetas con valores altos, indica que el respectivo modelo establecido explica en un sentido de distancia más amplio el comportamiento espacial de la variable de estudio (Maldonado *et al.* 2016). Por otro lado, el valor de cero del efecto pepita y la alta dependencia espacial indican errores inexistentes y el adecuado empleo de una escala de muestreo, coincidiendo ampliamente con lo que mencionan Oliver y Webster (1991) quienes sugieren que valores de cero en la pepita denotan un mínimo error en el muestreo y también la confiabilidad los modelos ajustados, que en este caso fue de un 98%.

Mapeo y superficie infectada

Cuando se lleva a cabo un muestreo de una enfermedad en campo, es necesario considerar la influencia que tiene el tamaño del área de estudio en los patrones de distribución que seguirá éste fenómeno, al igual que otros factores como temperatura, humedad relativa, precipitación, manejo del cultivo,

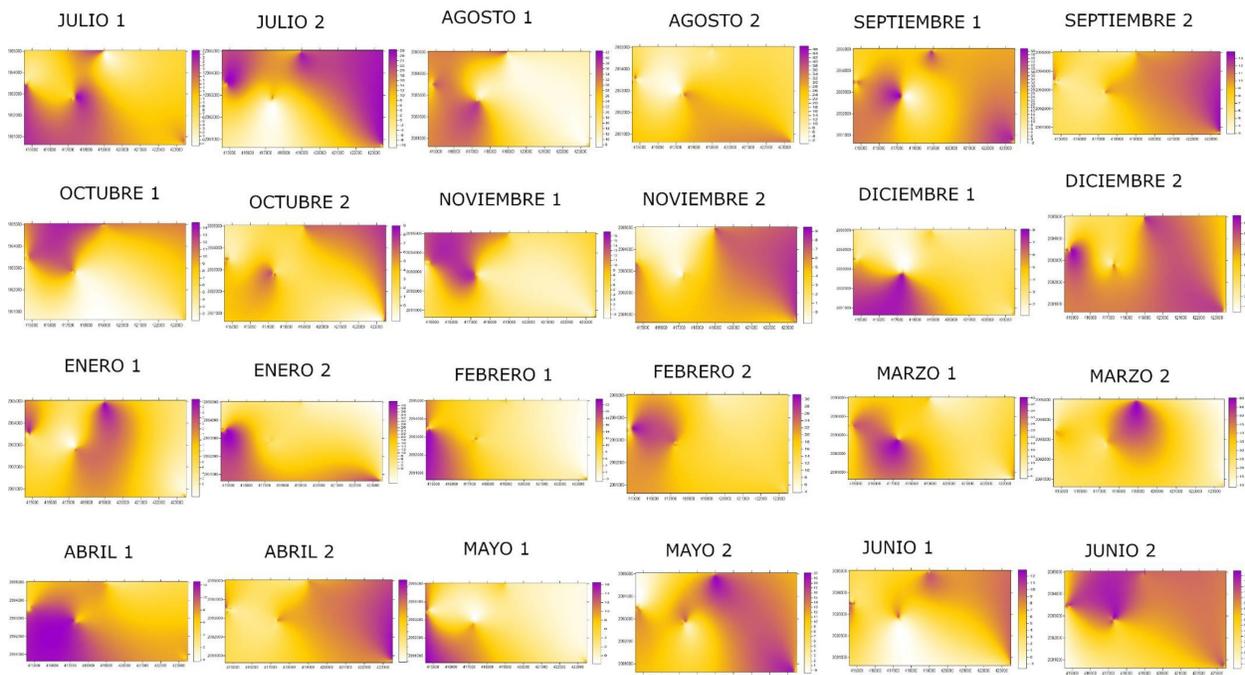


Figura 1. Mapas quincenales de la incidencia de la antracnosis en frutos de aguacate en parcelas comerciales de Coatepec Harinas, Estado de México. Periodo julio a diciembre de 2019.

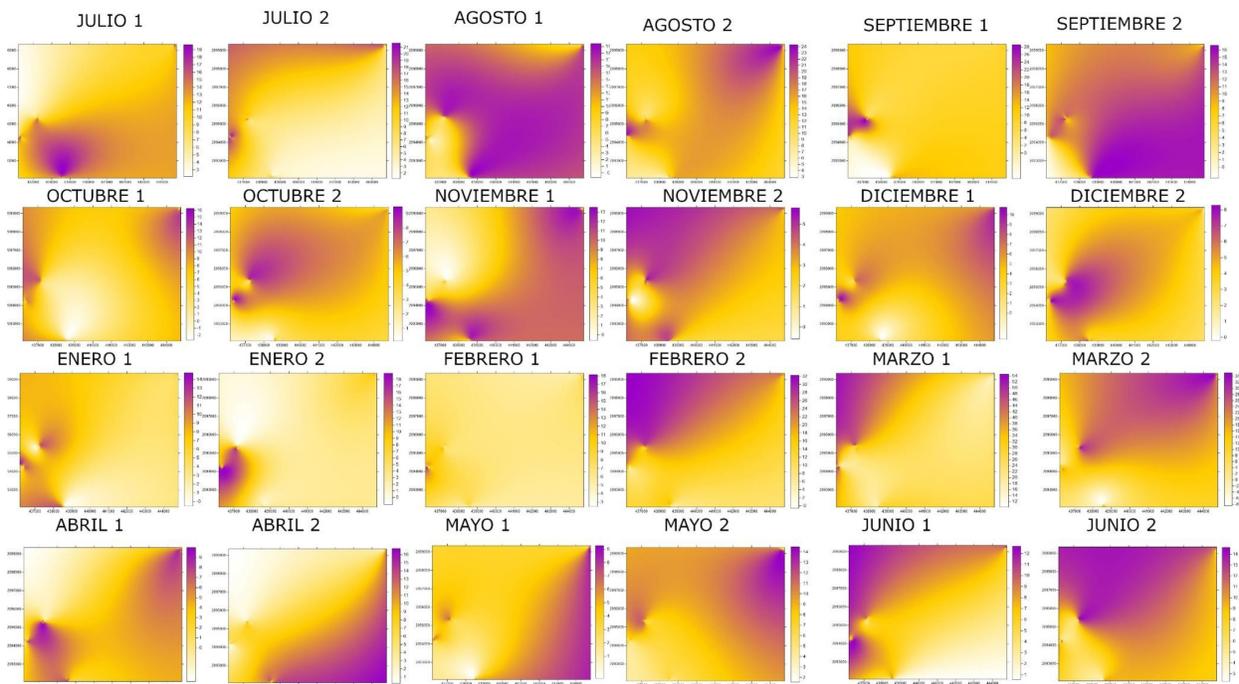


Figura 2. Mapas quincenales de la incidencia de la antracnosis en frutos de aguacate en parcelas comerciales de Tenancingo, Estado de México. Periodo julio 2019 a junio de 2020.

aplicación de productos para el control, entre otros. Al respecto, Tannure *et al.* (2013) mencionan que la presenciade patrones agregados puede indicar interacciones entre los patógenos, o entre los patógenos y el medio, pero diversas causas pueden influir de manera significativa en la formación de agregados, tales como el ciclo de vida del patógeno, las características fisiográficas del medio, la naturaleza del hospedero, entre otras, por lo que es necesario considerar los factores anteriormente comentados.

Se observó que la antracnosis siguió el mismo patrón de agregación en la mayoría de los muestreos, por lo que las relaciones interespecíficas permanecieron constantes, con condiciones de humedad relativa por encima del 80% dentro de las zonas aguacateras y temperaturas ideales para la inoculación de *C. gloeosporioides* (Harris *et al.* 2020). En Coatepec Harinas se presentaron temperaturas constantes entre los 23 y los 27° Celsius; para Tenancingo, las temperaturas permanecieron entre los 20 y 25°C.

Es posible distinguir cierta relación entre el promedio de frutos enfermos detectados en cada caso con el número de centros de agregación presentes. Por lo que, se infiere que cuando se presenta un alto número de centros de agregación, la densidad de la enfermedad también es elevada, dato que coincide con la afirmación de Quiñones *et al.* (2016) donde se menciona que la agregación obtenida indica la existencia de zonas o puntos dentro de la parcela donde la enfermedad se manifiesta con mayor intensidad respecto del resto de puntos muestreados.

En todos los muestreos, los centros de agregación de la antracnosis se encontraron distribuidos en la totalidad de las zonas de estudio, por lo que resultó interesante conocer que la infección de la enfermedad era general en ambos sitios. Al respecto, este estudio concuerda con lo sugerido por Sánchez *et al.* (2015) quienes argumentan la importancia que tienen las incidencias de las enfermedades en los cultivos, ya que posiblemente éste sea el origen principal de comportamiento espacial heterogéneo reflejado en los modelos obtenidos denotando la agregación de la antracnosis.

El empleo del método del krigeado permitió

identificar parches de infección en los mapas de densidad de la enfermedad, lo cual coincide con lo mencionado por Cárdenas *et al.* (2017), que emplearon este método y a su vez representaron, a través de mapas, el progreso espacio-temporal de la pudrición negra del cacao, probando la importancia del análisis espacial para la innovación y creación de diversas estrategias de manejo de infecciones frecuentes en plantas de importancia económica.

Pese a que la antracnosis se encontraba en condiciones óptimas para su desarrollo, debido a la presencia de alta humedad relativa, temperaturas elevadas y a precipitaciones constantes, el porcentaje de infección alcanzado para ambas zonas de estudio fue de más de 90%. Esto puede explicarse debido a factores como la edad del cultivo, la cantidad de frutos, labores de cosecha y medidas de control que se aplicaron (control cultural, retiro de ramas y hojas que son la fuente del inóculo), sobretodo en la temporada de floración en otoño y al inicio de la primavera (Reina *et al.* 2015). Resulta importante enfatizar la importancia que tienen los estudios geostadísticos como éste, porque al detectar áreas libres de infección y áreas de agregación de la enfermedad, posibilita direccionar las medidas de control para mitigar el avance de la enfermedad en áreas específicas de infestación y/o fuentes de inóculo que originan su posterior propagación (Quiñones *et al.* 2016, Pino *et al.* 2022).

La importancia del estudio radica en plantear propuestas para dirigir las medidas de control de la antracnosis de manera eficaz, oportuna y pertinente, ya sea a través de medidas preventivas como podas fitosanitarias y el retiro de hojas y ramas que representan la fuente del inóculo en los huertos de aguacate, esto coincide con lo mencionado por Martínez *et al.* (2021) además de que esto reducirá sustancialmente la resistencia natural y cruzada que se presenta en el manejo de plagas y enfermedades en el cultivo de aguacate. Se sugiere utilizar un control químico de manera responsable con la aplicación en dosis adecuadas de fungicidas a base de cobre únicamente en las zonas que se vean afectadas con la enfermedad. Se sabe que el comportamiento espacial de los organismos como *C. gloeosporioides* es

variable, por lo que difícilmente seguirán un patrón de distribución igual año con año en las parcelas, pero sí es posible identificar los sitios específicos donde se presenta con mayor frecuencia. El conocimiento del comportamiento y distribución espacial de las enfermedades en los cultivos agrícolas constituye un área que requiere ser explorada, de tal manera, que las investigaciones favorezcan no solo a la comunidad científica, sino principalmente, a los productores de aguacate y de otros cultivos a nivel regional y nacional.

CONCLUSIONES

Los índices de dispersión y las distribuciones estadísticas mostraron un comportamiento agregado de la antracnosis en los dos municipios de muestreo. Los métodos de estadística clásica presentaron deficiencias y limitaciones con respecto a las herramientas de estadística espacial. Los análisis con métodos geoestadísticos presentaron un comportamiento espacial en agregados, con la enfermedad distribuida

en forma de parches y nivel de dependencia espacial alto. Los mapas de interpolación obtenidos a partir de método de krigado ordinario, permitieron no solo conocer la distribución, sino también los parámetros de incidencia de la antracnosis en Coatepec Harinas y Tenancingo. Fueron identificadas áreas libres de infección por antracnosis, sugiriendo dirigir las medidas de control sobre las zonas específicamente afectadas. El empleo de métodos geoestadísticos para determinar el comportamiento espacial de enfermedades como la antracnosis servirá como apoyo a la toma de decisiones acerca del manejo fitosanitario que se da al cultivo de aguacate en municipios productores del Estado de México donde se presente la enfermedad.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado.

LITERATURA CITADA

- Ávila QGD, Ortiz DT, Aguilera GM, Huerta HV, Chávez LT (2003) Spatial and temporal dynamic of scab (*Sphaceloma perseae* Jenk.) on avocado (*Persea americana* Mill). Revista Mexicana de Fitopatología 21: 152-160.
- Borrego A, Allende TC (2021) Principales detonantes y efectos socioambientales del boom del aguacate en México. Journal of Latin American Geography 20: 154-184.
- Campbell CL, Madden LV (1990) Introduction to plant disease epidemiology. John Wiley & Sons. New York. 532p.
- Cárdenas PNJ, Darghan A, Sosa RMD, 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
- Chávez-León G, Tapia VLM, Bravo EM, Sáenz RJT, Muñoz FHJ, Vidales FI (2012) Impacto del Cambio de Uso del Suelo Forestal a Huertos de Aguacate. INIFAP. México. 102p.
- COESPO (2015) Cuaderno Estadístico Encuesta Intercensal 2015 Estado de México. Gobierno del Estado de México. México. 120p.
- Englund E, Sparks A (1988) GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) User's guide. U.S. Environmental Protection Agency. Document EPA/600/4-88/033. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Las Vegas, NV. USA. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100NV31.PDF?Dockey=9100NV31.PDF>. Fecha de consulta: 21 de abril de 2022.

- Espinoza-Zúñiga P, Ramírez-Dávila JF, Cibrián-Tovar D, Villanueva-Morales A, Cibrián-Llenderal VD, Figueroa-Figueroa DK y Rivera-Martínez R (2019) Modelación de la distribución espacial del muérdago (*Santalales: Loranthaceae*) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan, México. *Bosque* 40: 17-28.
- FAO (2020) Análisis del mercado de las principales frutas tropicales 2019. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Rome, Italy. 19p.
- Harris I, Osborn TJ, Jones P, Lister D (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Science Data* 7: 109. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
- Herrera GJA, Bautista BS, Salazar GS, Gutierrez MP (2020) Situación actual del manejo poscosecha y de enfermedades fungosas del aguacate 'Hass' para exportación en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 1647-1660.
- Hulbert S (1990) Spatial distribution of the montane unicorn. *Oikos* 58: 257-271.
- Isaaks EH and Srivastava RM (1989) Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology* 20: 313-341.
- Lemus SBA, Venegas GE; Zamora LÁI y Alexandre AT (2017) Fungicidas cúpricos en el cultivo de aguacate. *Memorias del IV Congreso Latinoamericano del Aguacate* 1: 310-315.
- Maldonado ZFI, Ramírez DJF, Rubí AM, Antonio NX, Lara DAV (2016) Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 845-856.
- Marcano GR, Acuña RS, Maestre RB (2020) Procedimientos estadísticos utilizados en las tesis de maestría en Agricultura Tropical Universidad de Oriente Periodo 1998-2016. *Comunicaciones en Estadística* 13: 45-66.
- Martínez MN, Ramírez DJF, Mejía CJ, Vera NS (2021) Spatial behaviour of *Hemiberlesia lataniae* (Signoret) on "Hass" avocado in Estado de México. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 13: 33-52.
- Morales GJL, Guzmán MDP, Rivero HSA, Santos MEP (2009) Modelo para la estimación del área del fruto en la evaluación de la antracnosis en aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Hass. *Revista Científica UDO Agrícola* 9: 421-424.
- Oliver MA, Webster R (1991) How geostatistics can help you. *Soil Use and Management* 7: 206-217.
- Pino ME, Ramírez DJF, Serrato CR, Mejía CJ, Tapia RA (2022) Spatial and temporal distribution of ojo de gallo (*Mycena citricolor*) in coffee plantations of the State of Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología* 40: 433-446.
- Quiñones VR, Sánchez PJR, Pedraza EAK, Castañeda VA, Franco MO (2016) Distribución espacial de la roya transversal (*Uromyces transversalis*) del gladiolo durante el ciclo primavera-verano en la región sureste del estado de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo* 48: 209-220.
- Ramírez DJF, Porcayo CE (2009) Comportamiento espacial de las larvas del mosquito verde *Jacobiasca lybica*, en un viñedo de secano en Andalucía, España. *Ciencia Ergo-Sum* 16: 164-170.
- Ramírez DJF, Sánchez PJR, De León C (2011) Estabilidad espacio temporal de la distribución del carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*) en el Estado de México, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 29: 1-14.
- Reina NJ, Mayorga CMJ, Caldas-Herrera SJ, Rodríguez VJ, Varón DEH (2015) El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 16: 265-278.

- Rivera MR, Ramírez DJF, Martínez QM, González HA (2020) Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnia* 22: 142-152.
- Rojó-Baez I, García-Estrada RS, Sañudo-Barajas JA, León-Félix J, Allende-Molar R (2017) Proceso de infección de Antracnosis por *Colletotrichum truncatum* en papaya Maradol. *Revista Brasileira de Fruticultura* 39. DOI: 10.1590/0100-29452017379.
- Sánchez PJR, Ramírez DJF, González HA, 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.
- Santos FE, Montesinos LO, Andrade AM (2016) Tamaños de muestra que aseguran exactitud para estimar prevalencia de plantas bajo muestreo inverso. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7: 1499-1512.
- Secretaría del Campo (2022) Subsector Agrícola. Gobierno del Estado de México. <https://secampo.edomex.gob.mx/>. Fecha de consulta: 21 de abril de 2022.
- SIAP (2021) Anuario estadístico de la producción agrícola. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta 20 de abril de 2022.
- Sawyer J (1989) Inconstancy of Taylor's b: simulated sampling with different quadrat sizes and spatial distributions. *Research on Population Ecology* 31: 11-24.
- 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 RA, Ramírez DJF, Salgado SML, Castañeda VA, Maldonado ZFI y Lara DAV (2020) Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología* 52: 72-81.
- Trinidad AE, Ascencio VFJ, Ulloa JA, Ramírez-Ramírez JC, Ragazzo SJA, Calderón SM, Bautista PUR (2017) Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Esp.* 19: 3953-3964
- Valdés L A, Calero CD, Carballo ME, Capote M, González I, Álvarez JM, Rohde W (2017) caracterización morfológica, cultural y patogénica de aislados de *Colletotrichum* sp. produciendo antracnosis en mango (*Mangifera indica* L.). *La granja. Revista de Ciencias de la Vida* 26: 38-51.
- Van-Maanen A, Xu XM (2003) Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology* 109: 669-682
- Vivas LE, Notz A (2011) Distribución espacial en poblaciones de *Oebalus insularis* Stal (Hemiptera: Pentatomidae) en el cultivo de arroz en Calabozo, estado Guárico, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola* 11: 109-125.