



ORIGINAL

Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México

Atenas Tapia Rodríguez^a, José F. Ramírez Dávila^{b,*}, Martha L. Salgado Siclán^b, Álvaro Castañeda Vildózola^b, Fátima I. Maldonado Zamora^b y Ana V. Lara Díaz^a

^a Ciencias Agropecuarias en Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México
^b Facultad de Ciencias Agrícolas, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México

Recibido el 15 de noviembre de 2017; aceptado el 1 de julio de 2019

Disponible en Internet el 8 de enero de 2020

PALABRAS CLAVE

Aguacate;
Geoestadística;
Krigiado ordinario

Resumen El aguacate (*Persea americana*) es una especie cuyo cultivo es de gran importancia nutricional y económica para México; sin embargo, como cualquier otro cultivo, a menudo se ve afectado por plagas y enfermedades que limitan su comercialización a nivel mundial. El hongo fitopatógeno *Colletotrichum gloeosporioides* es el agente causal de la antracnosis en el aguacate y se manifiesta en las etapas tempranas del desarrollo del fruto, así como en poscosecha y durante el almacenamiento, en condiciones de alta humedad relativa (80%) y temperaturas desde los 20 °C. Las pérdidas económicas a causa de este hongo pueden ser de hasta el 20% de la producción. En el presente estudio se aplicaron métodos geoestadísticos para definir la distribución espacial de antracnosis en frutos de aguacate cultivar Hass en cuatro municipios del Estado de México, durante el periodo de enero a junio de 2017. La distribución de la antracnosis se ajustó a modelos gaussianos y exponenciales en la mayoría de los casos. Los mapas de infestación realizados mediante krigiado muestran más de un centro de agregación de la enfermedad. Este análisis permitió estimar la superficie infestada: se encontró una infestación de más del 50% en los primeros muestreos y de hasta un 98% en los muestreos de junio en todas las zonas estudiadas.

© 2019 Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de Asociación Argentina de Microbiología. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jframirezd@uaemex.mx (J.F. Ramírez Dávila).

KEYWORDS

Avocado;
Geostatistics;
Ordinary kriging

Spatial distribution of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) in avocado in the State of Mexico, Mexico

Abstract *Persea americana* is a species of great nutritional and economic importance for Mexico, however, like any other agricultural crop, it is affected by pests and diseases that limit its worldwide commercialization. The phytopathogenic fungus *Colletotrichum gloeosporioides* is the causative agent of anthracnose in avocado and manifests itself in the early stages of fruit development as well as in post-harvest and storage, under conditions of high relative humidity (80%) and at temperatures from 20 °C, causing losses economic up to 20% of production. Applying geostatistical methods the present study aims to define the spatial distribution of anthracnose in Hass avocado fruits in four municipalities of the State of Mexico during the period from January to June 2017. The results show that the distribution of anthracnose was adjusted to gaussian and exponential models in most, the infestation maps made through the kriging show more than one center of aggregation of the disease, based on it the infested surface was estimated, finding an infestation of more than 50% in the first samples and up to 98% in the samplings belonging to the month of June in all the areas studied.

© 2019 Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of Asociación Argentina de Microbiología. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Persea americana es una especie milenaria que ha prevalecido hasta nuestros días como parte de la dieta en la mayor parte de México y Centroamérica, ya que de ella se obtiene el fruto del aguacate. Su alta demanda en el mercado, no solo nacional, sino internacional, ha incrementado considerablemente el número de hectáreas cultivadas y de toneladas cosechadas en todo el país, principalmente en Michoacán, donde actualmente existen más de 140.000 hectáreas plantadas de aguacate, seguido de Jalisco y el Estado de México³⁷.

Tanto pequeños como grandes productores del Estado de México invierten considerables recursos económicos en este cultivo, principalmente enfocados en el aprovechamiento del cultivar Hass³⁴. Debido a la importancia comercial de este cultivo en el mercado nacional e internacional, el manejo integrado constituye una de las tareas básicas, dentro de la cual, el control de plagas y enfermedades debe ser realizado con prontitud y eficacia¹⁹.

En las plantaciones comerciales del Estado de México se presentan fuertes daños por plagas y enfermedades que limitan su producción y comercialización, situación que se ve claramente reflejada en el rendimiento del cultivo²⁶. La antracnosis representa uno de los problemas fitosanitarios más alarmantes en este cultivo en México, debido a que es una enfermedad de amplia distribución en las huertas y ocasiona daños principalmente en los frutos⁷.

La antracnosis es causada por especies del género *Colletotrichum* (*Colletotrichum gloeosporioides*, *Colletotrichum acutatum*, *Colletotrichum boninense*)³⁸; sin embargo, la especie que ha sido identificada como el principal agente causal de la antracnosis en el cultivo de aguacate en México es *C. gloeosporioides*. Este patógeno se presenta en temporada de lluvias y en condiciones de alta humedad relativa³⁹, causando daños en hojas y frutos en cualquier etapa fenológica, y también en poscosecha⁸. Las pérdidas asociadas a

este patógeno se han estimado en alrededor del 20% de la producción nacional³³.

Se menciona que *C. gloeosporioides* es un organismo que puede permanecer como infección latente en los huertos de aguacate por mucho tiempo¹¹, esperando que surjan condiciones adecuadas de temperatura y humedad para causar daños, principalmente en los frutos, los que a consecuencia de ello presentan síntomas como manchas oscuras, hundidas, circulares o angulares, con presencia de masas de conidios de color rosa o salmón.

Hasta ahora, las investigaciones relacionadas con el arreglo espacial de las enfermedades se han basado principalmente en el análisis de la varianza y la media, además de determinar la incidencia de las enfermedades^{5,17,18}; no obstante, este enfoque analítico no considera información sobre la ubicación de los organismos en el espacio, ni el grado de dependencia entre los datos.

La información sobre la antracnosis en el aguacate y otros cultivos como limón, papaya, guanábana y mango es diversa, sin embargo, la mayor parte de los estudios se enfocan en la caracterización e identificación a nivel molecular de especies del género *Colletotrichum*, como el realizado por Morales²⁵, mientras que solo algunos trabajos analizan la distribución espacial de los organismos fitopatógenos.

Un ejemplo de estos estudios es el de Ávila Quezada et al.⁴, en el que usando estadística clásica (análisis de correlación), lograron determinar la distribución de roña y antracnosis en una parcela de aguacate Hass en Michoacán. De igual manera, Guzmán et al.¹³ realizaron un estudio para determinar la distribución espacial de la pudrición radical del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) por *Fusarium solani*. Sin embargo, ninguno de estos estudios explica de manera precisa el patrón de distribución de las enfermedades, las cuales son controladas con la aplicación de agroquímicos. Dichos productos contrarrestan los daños, aunque resultan ser escasamente efectivos debido al desconocimiento de la

biología, los hábitos y, principalmente, la distribución espacial de los organismos patógenos³⁰.

Trabajos como los de Alves et al.³, y Sánchez-Pale et al.³⁶ son un antecedente importante para la investigación de las enfermedades ocasionadas por hongos fitopatógenos en el Estado de México. En dichos reportes se destaca la necesidad de contar con metodologías que permitan determinar los patrones de distribución espacial que siguen las enfermedades, entre ellas la antracnosis.

Estudios como el realizado por Maldonado et al.²⁰ concluyen que la Geoestadística es un método efectivo para enriquecer el conocimiento de los problemas fitosanitarios en los cultivos y, de esta forma, facilitar las medidas de control.

Un ejemplo actual de la aplicación de métodos derivados de la Geoestadística es el aporte realizado por Acosta et al.¹ quienes analizaron la distribución espacial de trips y la efectividad del depredador *Amblyseius swirskii*. Además aplicaron una estrategia de control biológico sobre la plaga de trips, también en el cultivo de aguacate, en el Estado de México.

De la misma forma, Quiñones et al.²⁸ analizaron la distribución espacial de la roya transversal del gladiolo y encontraron agregación de la enfermedad en las zonas muestreadas en tres municipios mexiquenses, Tenancingo, Villa Guerrero y Ocuilan.

Por su parte, Ramírez et al.²⁹ mencionan que el uso de estadística clásica indicó inconsistencia en la determinación de la distribución espacial de *Sporisorium reilianum*, causante del carbón de la espiga en el maíz, mientras que con la estadística espacial lograron establecer el tipo de distribución que presentó la enfermedad, detectando agregación de las poblaciones, e identificando focos de infestación gracias a los mapas generados a través del krigado.

Partiendo de la premisa de que se presentan parches específicos de infección y etapas donde las enfermedades como la antracnosis alcanzan picos de infestación, se plantearon los siguientes objetivos: 1) determinar mediante métodos geoestadísticos la distribución espacial de la antracnosis en los huertos de aguacate Hass en los municipios de Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec, en el Estado de México; 2) elaborar mapas de la distribución de la enfermedad; 3) determinar la superficie infestada.

La finalidad de este estudio fue contribuir a la creación de estrategias de manejo integrado que favorezcan al medio ambiente, además de desarrollar planes de muestreo eficientes, que proporcionen los elementos necesarios para la toma de decisiones sobre el control de la antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en los municipios de Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec, ubicados en lo que se conoce como franja aguacatera en el sureste del Estado de México. Estos sitios presentan condiciones edafoclimáticas óptimas para el desarrollo del cultivo de aguacate (Reyes Alemán³¹, comunicación personal). En estos sitios predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano, y las altitudes varían desde los 1.600 hasta los

2.900 msnm¹⁵. En estos municipios se identificó la presencia de antracnosis en aguacate.

Posteriormente, se seleccionaron 200 árboles de aguacate cv. Hass de 8-10 años distribuidos aleatoriamente en el total de la superficie geográfica de cada municipio, tras verificar que en esos sitios no se habían aplicado productos químicos y que el manejo agronómico era similar. Los muestreos fueron realizados cada 14 días, desde enero hasta junio de 2017. Se revisaron 12 frutos por árbol, distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales en los estratos alto, medio y bajo, y se contabilizó el número de frutos con síntomas de la enfermedad para obtener la incidencia de la enfermedad (tomado y modificado de Ávila Quezada et al.⁴).

Los árboles muestreados fueron etiquetados y georreferenciados para obtener la ubicación espacial precisa mediante un sistema de posicionamiento global diferencial dGPS (modelo SPS351, Trimble, EE. UU.). Los datos de incidencia obtenidos en cada muestreo fueron ingresados en una base de datos.

Asimismo, por municipio se seleccionaron 50 árboles que presentaban síntomas graves de la enfermedad y se tomó una muestra de tres frutos enfermos de cada uno de ellos, que fueron llevados al laboratorio de Fitopatología del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEM para la identificación morfológica de *C. gloeosporioides*.

Estos frutos fueron colocados en cámaras húmedas y puestos dentro de una incubadora a 24 °C. Despues de 7 días, esas muestras de frutos fueron revisadas y se realizaron cortes y siembras de tejido enfermo (exocarpio) en medio de cultivo papa-dextrosa-agar (PDA), de acuerdo a la metodología empleada por Morales²³, realizando una caracterización morfológica de cepas monoconidiales, las cuales se resembraron nuevamente en PDA y fueron colocadas en una incubadora a 24 °C.

Las características consideradas para la identificación morfológica de las cepas fueron las siguientes: color, consistencia y tipo de crecimiento del micelio; dirección y longitud de las hifas del borde del cultivo; color y forma del cultivo; coloración del centro del cultivo y la presencia de anillos concéntricos; cabe mencionar que este procedimiento se llevó a cabo únicamente con la finalidad de corroborar que se trataba de la especie fúngica reportada en la literatura como el agente causal de la antracnosis para el aguacate en México.

Análisis geoestadístico

La Geoestadística comprende una serie de métodos y técnicas que permiten analizar y predecir los valores de una variable distribuida de manera continua en el espacio, en el tiempo o en ambos²². Para que un análisis geoestadístico sea considerado como tal, debe llevarse a cabo en tres etapas. La primera es la del análisis exploratorio de datos; a esta le sigue un análisis estructural, es decir, la estimación del semivariograma y de los parámetros del modelo de semivariograma; la tercera etapa es la de la estimación de la superficie infestada a través de mapas, los que surgen del krigado²⁹.

Una vez integradas las bases de datos obtenidos en los muestreos de frutos de aguacate con antracnosis, se

comenzó con la estimación de los semivariogramas experimentales a través de la metodología propuesta por Isaaks y Srivastava¹⁶. Cualquier función matemática se puede utilizar para un modelo de semivariograma, siempre que sea positiva y definida². En la elaboración de los semivariogramas experimentales para cada muestreo se utilizó el programa Variowin 2.2 (Software para el análisis de datos espaciales en 2 D. Primavara Verlag, Nueva York; EE. UU.).

Para ajustar los modelos experimentales se usaron modelos teóricos, que usualmente son esféricos, gaussianos, exponenciales, de efecto pepita puro, logarítmicos, monómicos o de efecto agujero, en los cuales los parámetros de meseta, rango y efecto pepita se modifican hasta obtener estadísticos de validación cruzada que sean ideales y permitan validar matemáticamente los modelos ajustados, estos estadísticos son: la media de los errores de estimación, el error cuadrático medio y error cuadrático medio adimensional¹⁴.

Nivel de dependencia espacial

La determinación del nivel de dependencia espacial se obtuvo al dividir el efecto pepita por la meseta, este resultado fue expresado en porcentaje. Si el resultado es menor de 25%, el nivel de dependencia espacial se considera alto; si se encuentra entre 26 y 75%, el nivel de dependencia espacial es moderado, y si es mayor del 76%, el nivel de dependencia es bajo^{5,30}.

Mapas de densidad y superficie infestada

Para la elaboración de mapas se realizó la interpolación de valores mediante el krigiado ordinario, que permite la estimación no sesgada de valores asociados a puntos que no fueron muestreados. Las estimaciones obtenidas fueron representadas en forma de mapa para cada muestreo de árboles enfermos mediante el uso del programa Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. Colorado, EE. UU.). A través de los mapas elaborados se obtuvo el porcentaje de superficie infestada para cada muestreo, sobre la base de lo propuesto por Samper y Carrera³⁵.

Resultados y discusión

La antracnosis es una de las principales enfermedades ocasionadas por hongos del género *Colletotrichum* en los cultivos. Gañán et al.¹¹ mencionan que es una de las enfermedades que más afectan la producción de frutales en el mundo; esta causa importantes pérdidas en frutales como limón, papaya, mango, lichi y banano, entre otros, y el aguacate no es la excepción, pues también su producción y comercialización se ven afectadas por la antracnosis. Reyes y Morales³² mencionan que las enfermedades causadas por hongos como *Colletotrichum* ocasionan pérdidas de hasta el 40% de la producción de aguacate en Michoacán.

En este estudio se logró identificar a *C. gloeosporioides* como el agente causal de la antracnosis en aguacate de cuatro municipios del Estado de México que son productores de aguacate cv. Hass, y esto se hizo partiendo de frutos que presentaban síntomas de la enfermedad, es decir, manchas

oscuras en el exocarpio, mediante siembras de conidios en medio de cultivo PDA.

Se observó que este hongo fitopatógeno presenta un micelio cuya coloración varía desde el blanco hasta el grisáceo oscuro, con aglomeraciones salmonadas de conidios cilíndricos o de forma elíptica, redondeados en el extremo terminal; esto coincide con lo reportado por Morales²⁴, quien menciona que las colonias de *C. gloeosporioides* son variables.

En otra publicación²⁵, este autor describe diversos síntomas atribuidos a antracnosis en las zonas de producción de aguacate Hass en el estado de Michoacán, y demuestra que las enfermedades como roña y antracnosis son limitantes y ocasionan daños graves en la capacidad fotosintética del árbol, al atacar hojas, flores y frutos en cualquier etapa fenológica. En coincidencia con dichas apreciaciones, en este trabajo se observó que en los municipios muestreados existían árboles cuyo porte presentaba daños por antracnosis, sobre todo en las etapas de floración y cuajado de los frutos, lo que causaba aborto y marchitez de puntas. Además se observaron lesiones hundidas y oscuras de tamaño variable, que posteriormente se tornaron blanquecinas debido a la presencia de masas de conidios en el pericarpio de los frutos.

Análisis geoestadístico

Es sabido que el daño por antracnosis en el cultivo de aguacate es más grave en la etapa de poscosecha, en la que causa deterioro en la calidad de los frutos, lo cual limita su valor para la exportación y comercialización¹². Por ello, se han implementado diversas medidas de control que combinan la aplicación de productos fungicidas con la práctica cultural como medida preventiva, para evitar la etapa de infeción de *C. gloeosporioides*; sin embargo, tales esfuerzos no han resultado ser del todo efectivos para contrarrestar los efectos de la enfermedad en el cultivo y fue necesario incrementar las inversiones económicas para producir y aplicar controles fitosanitarios para la antracnosis y otras enfermedades presentes en el cultivo de aguacate. Estudios como el realizado por Morales²⁴ en huertos de aguacate en Michoacán dan cuenta de ello y sugieren que controlar la enfermedad implica un alto costo económico para el sector productivo.

Por otro lado, se han llevado a cabo estudios que pretenden dar explicación a la distribución de las enfermedades con el fin de proponer estrategias de manejo utilizando estadística clásica; tal es el caso del estudio de Ávila Quezada et al.⁴, en el que se señala que la roña y la antracnosis siguen un patrón agregado de distribución, aunque no se explica en su totalidad cómo se comportan dichas enfermedades, o si las zonas de infestación fueron las mismas durante todo el estudio. De igual manera, Guzmán et al.¹³ realizaron un estudio para determinar la distribución espacial de la pudrición radical del frijol por *F. solani*, donde evaluaron la severidad del daño por el patógeno en la raíz principal y la gravedad de las pudriciones registradas en raíces laterales, así como el crecimiento radical y la intensidad de la nodulación. Estos autores, sin embargo, no explican de manera precisa el patrón espacial que sigue la enfermedad, ni proponen estrategias de manejo para el control de la pudrición.

La Geoestadística es una herramienta que hoy en día permite identificar específicamente las zonas donde se presentan brotes de plagas y enfermedades en los cultivos, lo cual facilita el manejo y control de estos problemas fitosanitarios de forma puntual y pertinente. Esto se ha demostrado en estudios previos en cultivos como el tomate de cáscara, el maíz, el aguacate y el cacao, entre otros, en huertos ya establecidos en el Estado de México y otros estados mexicanos productores. Los resultados de estas investigaciones basadas en el empleo de métodos geoestadísticos han sido valiosos ya que facilitaron la toma de decisiones. Ejemplo de este tipo de investigaciones son las realizadas recientemente por Quiñones et al.²⁸, quienes llevaron a cabo un estudio sobre la distribución espacial de la roya transversal ocasionada por *Uromyces transversalis* en el cultivo de gladiolo, y encontraron que esta enfermedad se distribuye de forma agregada durante todas las etapas fenológicas del cultivo, y los modelos gaussianos y esféricos por ellos presentados, explicaron mejor la dependencia espacial de dicha enfermedad.

También en el estudio de Ramírez et al.²⁹ se describe una estructura espacial agregada de la enfermedad causada por *Sporisorium reilianum* en maíz, de modo que ambos estudios concuerdan con los resultados obtenidos en este trabajo.

En este estudio se realizaron 12 muestreos en cada uno de los siguientes municipios: Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec, de modo que se obtuvieron en cada uno de ellos un total de 12 semivariogramas y 12 mapas de infestación, abarcando los meses de enero a junio de 2017.

Con base en los semivariogramas obtenidos, en el municipio de Coatepec Harinas, la antracnosis en el aguacate se ajustó a modelos de distribución de tipo gaussiano en la mayoría de los muestreos. Esta enfermedad se distribuyó de forma continua: 5 muestreos –los dos de enero, el primero tomado en marzo, el primero realizado en abril y el segundo de junio– siguieron un patrón de estructura exponencial, donde la antracnosis presentó tendencia a incrementarse; el muestreo realizado en la segunda quincena de febrero respondió a un modelo de tipo esférico, y presentó claramente focos de infestación (tabla 1). Para todos los modelos obtenidos en esta zona de estudio, el valor del efecto pepita fue cero, lo que denota un error de muestreo mínimo y una escala de muestreo adecuada¹.

Los niveles de rango fluctuaron entre 19,2 y 41 metros, mientras que los valores de meseta se encontraron entre 0,9 y 5,14; para todos los modelos se encontró alto nivel de dependencia espacial, lo que permite afirmar que existe una alta correlación espacial entre los datos muestreados y una estabilidad importante de los centros de agregación⁶.

En Tenancingo, la distribución espacial de la antracnosis se ajustó mayormente a modelos de tipo gaussiano (tabla 1), lo cual demuestra que la enfermedad se encuentra dispersa de manera continua dentro de la zona muestreada; sin embargo, en el primer muestreo de febrero y el segundo de junio, la enfermedad presentó un comportamiento de tipo esférico, lo que señala una distribución más focalizada, con sitios donde existe mayor incidencia.

Esto coincide con lo reportado por Ramírez y Sánchez²⁹, quienes identificaron zonas de mayor infestación de *S. reilianum*; sin embargo, no fue del 100% del área muestreada en ese estudio. Asimismo, en el primer muestreo

de antracnosis para el mes de junio el semivariograma mostró un comportamiento de tipo exponencial, es decir, un incremento acelerado de la enfermedad; el rango para estos modelos osciló entre 17,6 y 27,2 m, con un efecto pepita de cero para todos los casos, lo que indica mínimo error de muestreo, y valores de 0,96 hasta para la meseta.

En todos los muestreos de este municipio, el nivel de dependencia espacial fue alto, resultado que permite determinar qué tan robusta es la relación entre los datos obtenidos en los muestreos, y se concluye los datos están estrechamente relacionados entre sí.

En el municipio de Donato Guerra, los modelos a los que se ajustaron las poblaciones de antracnosis fueron en su mayoría de tipo esférico (tabla 1), ello indica un comportamiento más estable de la enfermedad, con focos de infestación bien establecidos; el rango de estos modelos se mantuvo entre 24 y 41,8 m; solo en los muestreos de febrero, el segundo de abril y el segundo de junio, se presentaron modelos gaussianos que hacen referencia a la continuidad de la enfermedad, el rango para estos modelos osciló entre 20,8 y 30,6 m. En todos los muestreos de este municipio el efecto pepita fue cero, se infiere que la variación dada a través de los semivariogramas sigue una estructura espacial establecida, donde el error de muestreo fue mínimo, como en los municipios anteriores, y el nivel de dependencia espacial fue alto, con una relación muy estrecha entre los datos²⁹.

En el caso de Temascaltepec, los estadísticos de validación cruzada indicaron que los semivariogramas obtenidos se ajustaron a modelos de tipo gaussiano principalmente (tabla 1), es decir, que la enfermedad se presentó de manera continua, en coincidencia con lo informado por Quiñones et al.²⁸, quienes reportan que las enfermedades como la roya del gladiolo siguen un comportamiento espacial agregado que se ajusta a modelos de tipo gaussiano. En este municipio también se presentaron modelos exponenciales y solo en tres muestreos fueron esféricos, con parámetros de rango de 17,6 a 34,5 m, el valor mínimo de meseta fue de 1,14 y el mayor de 4,42; para todos los modelos, el efecto pepita también fue cero, lo que corrobora que el muestreo fue adecuado y, de igual manera, que hubo alto nivel de dependencia espacial en todos los muestreos²⁸.

Mapas de densidad y superficie infestada

Con los modelos obtenidos se elaboraron los mapas de la incidencia de la antracnosis por muestreo en cada municipio a través del krigado ordinario, los cuales mostraron focos de infestación más graves, principalmente en los meses de abril, mayo y junio en Coatepec Harinas (fig. 1a), donde el mayor porcentaje de superficie infestada fue de 95% en el segundo muestreo de junio, y el menor de 58% en el primer muestreo de marzo, ambos enmarcados en un modelo de tipo exponencial. Ramírez et al.²⁹ también hallaron que los valores máximo y mínimo de superficie infestada por *S. reilianum* en maíz se presentaron en modelos de tipo exponencial; en este municipio se pueden observar los centros de agregación, sobre todo en los extremos izquierdo y superior del mapa, los que se vuelven más definidos a partir del mes de abril y se conservan hasta el final de los muestreos, aunque en el último muestreo de junio se presentó otro

Tabla 1 Parámetros (efecto pepita, rango, media, varianza, pepita/meseta y nivel de dependencia espacial) de los modelos ajustados a los semivariogramas de antracnosis en aguacate en Coatepec Harinas de enero a junio 2017

Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Rango	Meseta	PEP/Meseta	Dependencia espacial
<i>Coatepec H.</i>								
ene-01	1,63	1,486	Exponencial	0	41	1,088	0	Alta
ene-02	1,50	2,282	Exponencial	0	40	2,573	0	Alta
feb-01	2,50	2,051	Gaussiano	0	19,2	1,659	0	Alta
feb-02	2,08	4,024	Esférico	0	35	2,624	0	Alta
mar-01	1,61	1,143	Exponencial	0	25,6	1,08	0	Alta
mar-02	2,816	2,160	Gaussiano	0	22,4	2,068	0	Alta
abr-01	2,77	2,227	Gaussiano	0	20,8	1,886	0	Alta
abr-02	2,32	1,469	Exponencial	0	40	1,122	0	Alta
may-01	4,73	21,204	Gaussiano	0	22,394	0,95996	0	Alta
may-02	3,92	3,567	Gaussiano	0	24	3,312	0	Alta
jun-01	4,57	9,888	Gaussiano	0	20,8	514,767	0	Alta
jun-02	5,24	9,291	Exponencial	0	20,8	4,464	0	Alta
<i>Tenancingo</i>								
ene-01	2,205	1,882	Gaussiano	0	24	1,691	0	Alta
ene-02	1,82	1,505	Gaussiano	0	24,7	1,425	0	Alta
feb-01	2,565	1,935	Esférico	0	27,2	1,377	0	Alta
feb-02	2,22	1,619	Gaussiano	0	25,6	1,513	0	Alta
mar-01	2,975	3,572	Gaussiano	0	24	3,123	0	Alta
mar-02	3,02	2,381	Gaussiano	0	17,6	2,232	0	Alta
abr-01	2,81	2,074	Gaussiano	0	19,2	1,407	0	Alta
abr-02	2,86	3,648	Gaussiano	0	27,2	2,183	0	Alta
may-01	3,68	1,051	Gaussiano	0	20,8	0,946	0	Alta
may-02	4,18	2,771	Gaussiano	0	24	2,1	0	Alta
jun-01	3,91	3,238	Exponencial	0	24	2,871	0	Alta
jun-02	5,12	7,667	Esférico	0	27,2	6,16	0	Alta
<i>Donato Guerra</i>								
ene-01	2,185	2,724	Esférico	0	36,1	4,355	0	Alta
ene-02	2,165	2,761	Esférico	0	38	2,24	0	Alta
feb-01	2,055	1,971	Gaussiano	0	30,6	4,55	0	Alta
feb-02	2,405	1,629	Gaussiano	0	25,6	1,411	0	Alta
mar-01	2,66	3,027	Esférico	0	38,4	2,263	0	Alta
mar-02	2,19	2,566	Esférico	0	24	2,002	0	Alta
abr-01	3,14	1,859	Esférico	0	33,6	1,558	0	Alta
abr-02	3,095	2,408	Gaussiano	0	20,8	2,538	0	Alta
may-01	4,3	6,442	Esférico	0	41,8	3,575	0	Alta
may-02	5,445	5,584	Esférico	0	27,474	386,381	0	Alta
jun-01	5,25	6,057	Gaussiano	0	24	4,88	0	Alta
jun-02	5,45	8,831	Esférico	0	30,4	8,36	0	Alta
<i>Temascaltepec</i>								
ene-01	1,46	2,008	Esférico	0	34,5	1,46	0	Alta
ene-02	2,22	2,929	Gaussiano	0	26,6	3,752	0	Alta
feb-01	2,025	1,662	Gaussiano	0	22,4	1,377	0	Alta
feb-02	1,94	1,463	Esférico	0	22,4	1,44	0	Alta
mar-01	1,47	1,205	Gaussiano	0	17,6	1,14	0	Alta
mar-02	2,92	1,641	Exponencial	0	22,4	1,428	0	Alta
abr-01	3,5	3,336	Esférico	0	28,8	2,108	0	Alta
abr-02	3,47	2,411	Gaussiano	0	20,8	2,28	0	Alta
may-01	3,91	2,785	Exponencial	0	20,8	252,215	0	Alta
may-02	4,27	6,592	Gaussiano	0	20,8	4,422	0	Alta
jun-01	4,23	3,997	Gaussiano	0	25,6	231,987	0	Alta
jun-02	4,97	5,150	Exponencial	0	22,8	3,64	0	Alta

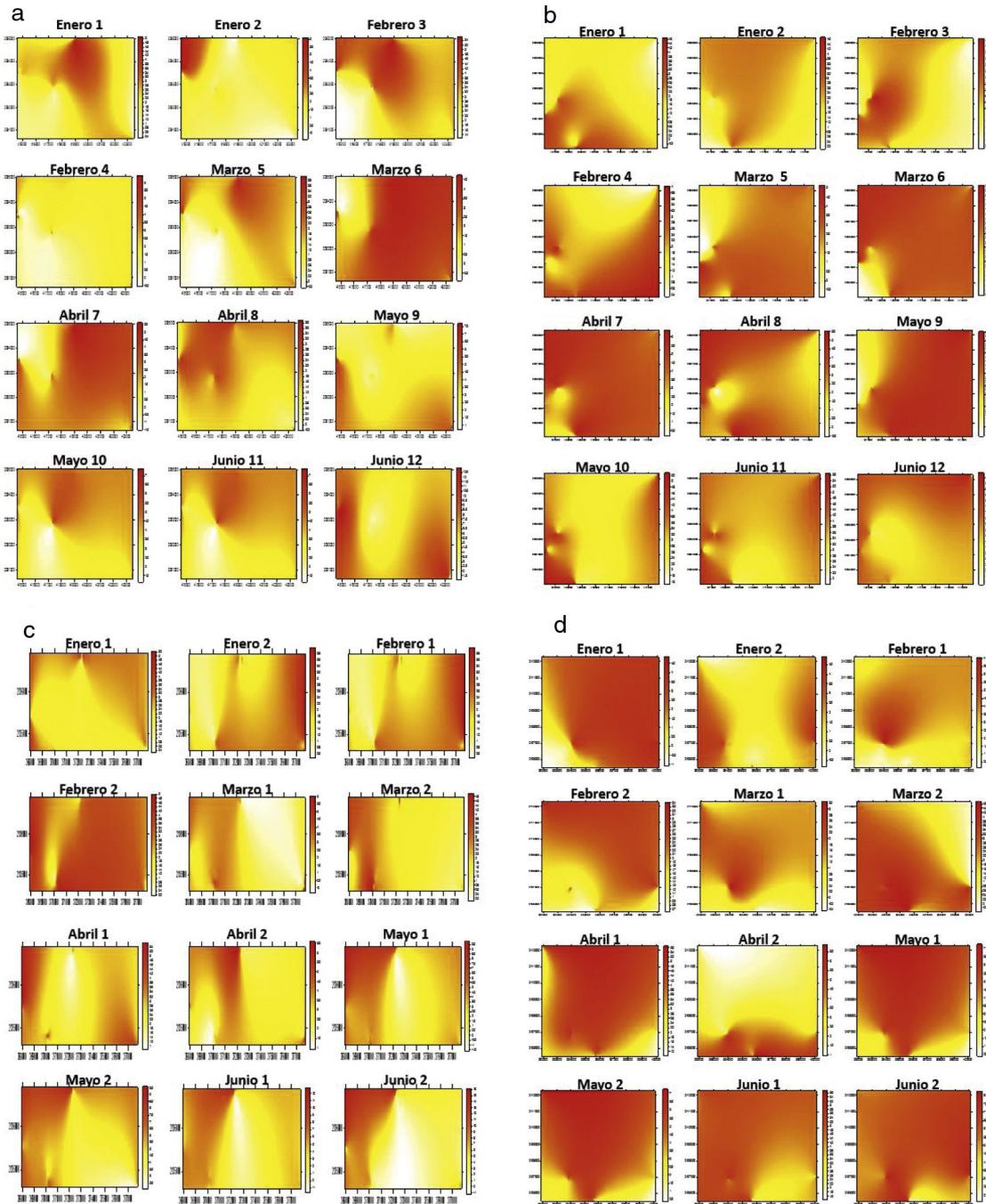


Figura 1 Mapas de superficie infestada por antracnosis en Coatepec Harinas a), Tenancingo b), Donato Guerra c) y Temascaltepec d).

centro de agregación, que puede observarse bien definido en el extremo inferior derecho del mapa. Lo anterior permitirá focalizar las medidas de control, sobre todo en los meses previos al comienzo de la temporada de lluvias y a la floración del aguacate.

En el municipio de Tenancingo, la distribución espacial de la antracnosis se presentó en centros de agregación cuyo comportamiento fue constante a lo largo de los seis meses de muestreo, estos se concentraron principalmente del lado izquierdo del mapa, aunque la mayor incidencia de la

enfermedad se presentó en la segunda quincena de marzo, en abril y en la primera quincena de mayo (fig. 1b), donde el menor porcentaje de superficie infestada fue del 86% en febrero y marzo y se ajustó a modelos de tipo esférico y gaussiano, mientras que para el mes de abril se incrementó hasta el 98%. Este es el porcentaje más alto de infestación asociado a un modelo gaussiano.

Los porcentajes de infestación en este municipio de Tenancingo se mantuvieron por arriba del 90% en los meses de mayo y junio, cabe mencionar que a lo largo de los

seis meses de muestreo, este porcentaje de infestación fue alto con respecto al que se presentó en Coatepec Harinas y en los otros dos municipios muestreados. Por otro lado, el porcentaje de infestación menor en este municipio fue mayor con respecto a los porcentajes de menor infestación en los otros municipios muestreados, lo que indica que la enfermedad se presentó de manera más constante en esta zona. Lo anterior sugiere que los productores deben aplicar algún método de control en los árboles de aguacate de toda la zona de estudio, esto difiere con lo mencionado por Carvalho et al.⁷, pues, al existir porcentajes tan altos de infestación en este caso, el manejo de la enfermedad no puede hacerse de manera tan focalizada como en los otros sitios donde se llevó a cabo el muestreo. Sin embargo, se deben seguir realizando monitoreos para conocer el comportamiento espacio-temporal de la antracnosis en esta zona.

En el municipio de Donato Guerra, el mayor porcentaje de superficie infestada se presentó en el mes de enero (97%), mientras que el más bajo se presentó en el primer muestreo de febrero (57%). En este municipio se pueden observar tres centros de agregación bien definidos que se mantuvieron a lo largo de los seis meses de muestreo, en la parte superior, central e inferior derecha de cada mapa (*fig. 1c*).

El haber encontrado este arreglo de los centros de agregación indica que la enfermedad se comportó de manera más estable, con un avance desde la parte superior e inferior y con otro foco en el centro, lo cual se asemeja a lo informado por Alves et al.³. En dicho trabajo se menciona que las enfermedades como la antracnosis presentan un foco inicial y posteriormente se generan focos secundarios, que permiten la dispersión de la enfermedad a toda la zona muestreada. Otros autores sugieren que las medidas de control de las enfermedades como la antracnosis deben dirigirse hacia sitios específicos^{26,28}.

La superficie de infestación por antracnosis en Temascaltepec osciló entre el 76% y el 98%, este último dato corresponde a los muestreos de junio. Aunque no se presentó un gran número de centros de infestación, estos se mantuvieron claramente definidos; los focos de infestación se pueden observar en la parte inferior de los mapas en la mayoría de los muestreos (*fig. 1d*), con cierta tendencia a ubicarse hacia el extremo izquierdo, lo cual indica alta probabilidad de que el brote de la enfermedad se encontrara en esa zona del municipio. Esto es importante porque las medidas de control deben dirigirse hacia sitios específicos donde existe alta probabilidad de encontrar el origen de la enfermedad⁷.

La variación existente en el porcentaje de superficie infestada, así como la distribución espacial de la antracnosis en los municipios de muestreo, se deben a varias circunstancias que dependen, en gran parte, de la biología de la especie. También influyen factores agroecológicos y edafoclimáticos, entre los que se incluyen temperatura, humedad, precipitación, tipo de suelo, etcétera.

Autores como Maanen y Xu²¹ mencionan que las condiciones ambientales y las características del patosistema determinan la estructura de las enfermedades y, por ende, el arreglo espacial. Esto permite dar explicación a los resultados encontrados en este trabajo, pues de acuerdo con Reyes y Morales³², la temperatura favorable para el desarrollo de la antracnosis varía dentro del rango de 12 °C a 36 °C en campo, en presencia de porcentajes de humedad

relativa cercanos al 80%. En este estudio se pudo corroborar que tanto la temperatura como la precipitación y la humedad relativa mensual fueron factores de gran importancia en la incidencia de la antracnosis, con un rango de temperaturas promedio que fue desde los 11,7 °C al inicio del muestreo (enero) hasta llegar a una temperatura media de 17,8 °C en mayo⁹, en los cuatro municipios de muestreo, en coincidencia con las zonas donde se presentaron los focos de infestación.

Por otro lado, los datos asentados de precipitación muestran un incremento considerable, con valores de 17 mm en marzo, de 86,6 mm en mayo y de 119,7 mm en junio⁹. De esta manera, se comprueba que el inicio de la temporada de lluvias y el incremento de aquellas (en abril y mayo) favorecen las condiciones para dar comienzo al ciclo de la enfermedad, con la dispersión de los conidios del hongo a través del agua. De igual manera, los porcentajes de humedad relativa se encontraron entre el 60% y el 80%, con aumentos en los meses de abril a junio.

Bajo esas condiciones podrían resultar favorecidos otros mecanismos de dispersión de los conidios de *C. gloeosporioides*, incluidos el viento y la acción de insectos vectores como los trips⁴, y la formación de estructuras de reproducción (tubo germinativo y apresorios) que facilitan el proceso infeccioso, al permitir la entrada del patógeno al tejido susceptible, principalmente representado por las hojas y los frutos²⁷. En estos últimos, el hongo penetra en el pericarpio y causa pudrición en la pulpa, lo que reduce la calidad del fruto de aguacate y ocasiona problemas de comercialización. Rodríguez et al.³³ mencionan que el pericarpio de los frutos de aguacate contiene compuestos antifúngicos que limitan el desarrollo de los síntomas de la antracnosis; sin embargo, conforme el fruto madura, dichos compuestos son menos abundantes y el proceso infeccioso se vuelve más grave. Por su parte, Fisher et al.¹⁰ mencionan que las altas incidencias de las enfermedades como la antracnosis están estrechamente relacionadas con la capacidad de resistencia que poseen los fitopatógenos, como *C. gloeosporioides*.

Los resultados de este trabajo contribuyen ampliamente al conocimiento de la distribución espacial de la antracnosis en el aguacate, porque hasta ahora los estudios sobre la distribución espacial de esta enfermedad son escasos y no existen trabajos que utilicen a la Geoestadística para determinar la distribución de la antracnosis en este cultivo. Los semivariogramas experimentales obtenidos y el ajuste de estos a modelos teóricos, así como su validación, demostraron que existe relación espacial entre los datos de incidencia de antracnosis obtenidos en los muestreos.

Estos hallazgos coinciden con los de Cárdenas⁶, quien menciona que los semivariogramas y los mapas generados a través del krigado permiten identificar focos de infección de las enfermedades. Este investigador también sugiere que la Geoestadística es una herramienta que permite dar explicación al arreglo espacial que siguen las enfermedades en los cultivos, y, de esta manera, puede contribuir a la toma de decisiones precisas y oportunas y a la generación de estrategias de manejo integrado. Además, es posible reducir los costos de control y focalizar las medidas, identificando los sitios específicos donde hay mayor incidencia de las enfermedades, como es el caso de la antracnosis en este trabajo. Sin embargo, se deben seguir realizando estudios acerca de los patrones espaciales y la estabilidad

espacio-temporal que sigue la antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México.

Conclusiones

En este estudio, la aplicación de la Geoestadística permitió conocer la distribución espacial de la antracnosis en el aguacate cv. Hass en los municipios de Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec, en el Estado de México. La antracnosis mostró un comportamiento de tipo agregado en todas las zonas de muestreo, ajustándose principalmente a modelos de tipo gaussiano y esférico. Además se obtuvo la superficie infestada gracias a la elaboración de mapas a través del krigiado ordinario. Es importante conocer los patrones de distribución espacial que siguen las enfermedades en los cultivos de importancia económica, como lo es el aguacate en el Estado de México, a fin de proponer estrategias de manejo integrado que permitan optimizar los recursos y favorecer a los productores, y que a su vez permitan reducir los daños ecológicos y ambientales por el uso excesivo de productos químicos.

Financiación

Este proyecto fue realizado sin financiamiento público o privado, sin embargo, se sugiere añadir agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la Beca otorgada para realizar los estudios de Posgrado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Al CONACyT por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, el cual se encuentra consolidado en el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad.

Bibliografía

1. Acosta AD, Ramírez JF, Rivera R, Figueroa DK, Lara AV, Maldonado FI, Tapia A. Spatial distribution of Thrips spp. (*Thysanoptera*) and evaluation of their control with the predator *Amblyseius swirskii* in Avocado Orchards in Mexico Southwest. *Entomol.* 2017;42:435–46.
2. Armstrong M, Jabin R. Variogram models must be positive definite. *Mathem Geol.* 1981;13:455–9.
3. Alves MC, Pozza EA, Machado JC, Araujo DV, Talamini V, Oliveira MS. Geoestadística como metodología para estudiar a dinâmica espaço-temporal de doenças associadas a *Colletotrichum* spp. transmitidos por sementes. *Fitopat Bras.* 2006;31:557–63.
4. Ávila Quezada G, Téliz D. Dinámica espacio-temporal de roña, daño asociado a trips y antracnosis del aguacate en Michoacán, México. *Rev Mex Fito.* 2002;20:77–87.
5. Cambardella C, Moorman T, Novak J, Parkin T, Karlen D, Turco R, Konopka A. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J.* 1994;58:1501–11.
6. Cárdenas NJ. Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao L.*) en El Yopal (Casanare) Colombia. *Act Biol Col.* 2017;22:209–20.
7. Carvalho AM, Moreira SF, Ampelio PE, Silva OM. Modeling spatial variability and pattern of rust and brown eye spot in coffee agroecosystem. *J Pest Sci.* 2009;82:137–48.
8. Ceja LF, Téliz D, Osada S, Morales JL. Etiología, distribución e incidencia del cáncer del aguacate *Persea americana* Mill. en cuatro municipios del Estado de Michoacán, México. *Rev Méx Fito.* 2000;18:79–86.
9. Comisión Nacional del Agua. Servicio meteorológico nacional. 2017 [consultado 17 Sep 2017]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua>.
10. Fisher MC, Henk DA, Briggs CH, Brownstein JS, Madoff L, McCraw L, Gurr S. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature.* 2012;484:73–93, <http://dx.doi.org/10.1038/nature10947>.
11. Gañán L, Álvarez E, Castaño ZJ. Identificación genética de aislamientos de *Colletotrichum* spp. causantes de antracnosis en frutos de aguacate, banano, mango y tomate de árbol. *Rev Acad Colomb Cienc Ex Fis Nat.* 2015;39:339–47.
12. Gutiérrez-Alonso JG, Gutiérrez-Alonso O, Nieto-Ángel D, Téliz-Ortiz D, Zavaleta-Mejía E, Delgadillo-Sánchez F. Manejo integrado de la antracnosis [*Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc.] del mango (*Mangifera indica* L.) durante la poscosecha. *Rev Mex Fito.* 2004;22:395–402.
13. Guzmán RA, Gómez R, García R, Gavi F. Distribución espacial de la pudrición radical del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) por *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. f. sp. *phaseoli* (Burk.) Snyd. y Hans. en la Vega de Metztitlán, Hidalgo, México. *Rev Mex Fito.* 2004;22:246–58.
14. Hevesi J, Istok J, Flint A. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics, part I, structural analysis. *J Appl Meteorol.* 1991;31:661–76.
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2009 [consultado 17 Sep 2017]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>.
16. Isaaks EH, Srivastava RM. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press; 1989.
17. Madden LV, Hughes G. Plant disease incidence: distributions, heterogeneity, and temporal analysis. *Annu Rev Phytopathol.* 1995;33:529–64.
18. Madden LV, Hughes G. Sampling for plant disease incidence. *Phytopathol.* 1999;89:1088–103.
19. Maldonado FI, Ramírez JF, Rubí M, Némiga X, Lara AV. Distribución espacial de tripos en aguacate en Coatepec Harinas Estado de México. *Rev Mex Cienc Agric.* 2016;7:845–56.
20. Maldonado FI, Ramírez JF, Lara AV, Rivera R, Acosta AD, Figueroa DK, Tapia A. Stability of the spatio-temporal distribution of Trips in Avocado Orchards in the State of Mexico, Mexico. *Southwest Entomol.* 2017;42:447–62.
21. Van Maanen A, Xu XM. Modelling plant disease epidemics. *Eur J Plant Pathol.* 2003;109:669–82.
22. Moral G. Aplicación de la Geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosist.* 2004;13:78–86.
23. Morales JL. Caracterización cultural, morfológica, patogénica y molecular de *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. causante de la antracnosis del aguacate de Michoacán (tesis de maestría). Montecillo, Texcoco, Estado de México: Colegio de Postgraduados.; 1996. p. 96.
24. Morales GJ. La antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) y la roña (*Sphaceloma perseae* Jenk.) del aguacate en Michoacán, México: Epidemiología, predicción y caracterización (Tesis de Doctor en Ciencias). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. México: Instituto de Fitosanidad.; 2000. p. 137.
25. Morales GJL. Caracterización cultural, morfológica, patogénica e isoenzimática de aislamientos de *Colletotrichum gloeosporioides* Penz., causante de la antracnosis del aguacate (*Persea*

- americana* Mill.) en Michoacán México. Revista UDO Agrícola. 2009;9:848–56.
26. Navas CJA, Landa BB, Mercado J, Trapero-Casas JL, Rodríguez D, Jiménez RM. Spatiotemporal analysis of spread of infections by *Verticillium dahliae* pathotypes within a high tree density olive orchard in southern Spain. *Phytopathol.* 2008;98:167–80.
27. Ploetz R. *Fusarium* wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp Cubense. *Symposium Fusarium-Induced Diseases of Tropical Perennial Crops.* 2006;96:653–6.
28. Quiñones R, Sánchez JR, Pedraza-Esquível AK, Castañeda A, Franco O. Distribución espacial de la roya transversal (*Uromyces transversalis*) del gladiolo durante el ciclo primavera-verano en la región sureste del estado de México. *Rev FCA UNCUYO.* 2016;48:209–20.
29. Ramírez JF, Sánchez JR, de León C. Estabilidad espacio temporal de la distribución del carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*) en el Estado de México, México. *Rev Méx Fito.* 2011;29:1–14.
30. Ramírez JF, Solares VM, Figueroa DK, Sánchez JR. Comportamiento espacial de trips (Insecta: Thysanoptera), en plantaciones comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.) en Zitácuaro Michoacán, México. *Act Zool Mex.* 2013;93:545–63.
31. Reyes Alemán JC. Comunicación persona. 14 de Dic de 2016, Tenancingo Estado de México. 2016.
32. Reyes A, Morales JL. Determinación de la temperatura óptima de desarrollo in vitro de *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. en aguacate “Hass”, en la zona aguacatera de Michoacán, México. VI World Avocado Congress (Actas VI Congreso Mundial del Aguacate) 2007.
33. Rodríguez ES, González JM, Mayek N. La infección de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc. en aguacatero (*Persea americana* Mill.): aspectos bioquímicos y genéticos. *Rev Méx Fitopatol.* 2009;27:53–63.
34. Rubí M, Franco AL, Rebollar S, Bobadilla E, Martínez I, Siles Y. Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) en el Estado de México, México. *Trop Subtrop Agroecos.* 2013;16:93–101.
35. Samper FJ, Carrera J. *Geoestadística: Aplicaciones a la hidrología subterránea.* 2. a Ed. Barcelona: Centro Internacional de Métodos en Ingeniería; 1996. p. 484.
36. Sánchez-Pale JR, Ramírez JF, González A, de León C. Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Rev Méx Cien Agri.* 2015;6:1467–80.
37. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2017; México [consultado 23 Sep 2017]. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap>
38. Silva HV, Ávila GD. Phylogenetic and morphological identification of *Colletotrichum boninense*: a novel causal agent of anthracnose in avocado. *J Plant Pathol.* 2011;60:899–908.
39. Yakoby N, Beno D, Keen N, Dinoor A, Pines A, Prusky D. *Colletotrichum gloeosporioides* PelB is an important virulence factor in avocado fruit-fungus interaction. *Mol Plant-Microbe Int.* 2001;14:988–95.