



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

**COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y CONTROL BIOLÓGICO DE ANTRACNOSIS
EN EL CULTIVO DE AGUACATE EN EL ESTADO DE MÉXICO.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA

M. en C.A. y R. N. ATENAS TAPIA RODRÍGUEZ



Campus El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. Octubre de 2022.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

**COMPORTAMIENTO ESPACIAL Y CONTROL BIOLÓGICO DE ANTRACNOSIS
EN EL CULTIVO DE AGUACATE EN EL ESTADO DE MÉXICO.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA

M. en C.A. y R. N. ATENAS TAPIA RODRÍGUEZ

COMITÉ DE TUTORES

**Dr. José Francisco Ramírez Dávila
Dr. Martín Rubí Arriaga
Dr. Jesús Gaudencio Aquino Martínez**



Campus el Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. Octubre de 2022

ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS	8
INDICE DE CUADROS.....	9
1 RESUMEN.....	10
2 ABSTRACT	13
3 INTRODUCCIÓN	16
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
4.1 Generalidades del Cultivo de Aguacate	18
4.1.1 Origen.....	18
4.2 Descripción botánica del aguacate	19
4.2.1 Morfología del fruto	19
4.2.2 Variedades	20
4.3 Fases fenológicas del cultivo de aguacate	21
4.4 Situación actual del cultivo de aguacate en México y el mundo	21
4.5 Enfermedades del aguacate.....	23
4.6 Generalidades de la Antracnosis.....	24
4.6.1 Características del género <i>Colletotrichum</i>	25
4.6.2 Taxonomía del género <i>Colletotrichum</i>	27
4.6.3 Antracnosis causada por <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> en aguacate.....	27
4.6.4 Características de la antracnosis como enfermedad	28
4.6.5 Síntomas.....	28
4.6.6 Epidemiología	29
4.6.7 Nutrición del patógeno.....	29
4.6.8 Ciclo de biológico de <i>C. gloeosporioides</i>	30
4.6.9 Pérdidas causadas por efectos de la enfermedad	31
4.7 Control	32
4.7.1 El Control Biológico	33
4.7.2 Antagonistas como alternativa de control frente a <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> ..	33
4.7.3 Mecanismos mediante los cuales los antagonistas ejercen su acción	34
4.7.4 Ventajas del Control Biológico.....	35
4.7.5 Actividad antagónica de <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Trichoderma harzianum</i> frente a <i>C. gloeosporioides</i>	35
4.8 <i>Bacillus subtilis</i> como biocontrolador	35
4.9 Estadística espacial	36
4.9.1 Geoestadística	37

4.9.2	Investigación estadística espacial en México	42
4.9.3	Estudios geoestadísticos en el Estado de México	43
4.9.4	Análisis Espacial Por Índices de Distancia (SADIE)	44
5	JUSTIFICACIÓN	48
6	HIPÓTESIS	49
7	OBJETIVOS	49
8	METODOLOGÍA (MATERIALES Y MÉTODOS).....	50
8.1	Zona de estudio	50
8.1.1	Coatepec Harinas.....	50
8.1.2	Tenancingo.....	51
8.1.3	Donato Guerra	51
8.1.4	Temascaltepec.....	52
8.2	Trabajo de gabinete	52
8.3	Trabajo de campo	52
8.4	Análisis de Laboratorio	53
8.4.1	Medio de cultivo PDA.....	53
8.4.2	Aislamiento e identificación de las cepas de <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	54
8.4.3	Evaluación de la capacidad antagónica de <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Trichoderma harzianum</i> 55	
8.5	Análisis estadístico	56
8.6	Análisis Geoestadístico	57
8.6.1	Nivel de dependencia espacial.....	57
8.6.2	Validación	57
8.6.3	Mapas de densidad y superficie infectada.....	58
9	RESULTADOS.....	59
9.1	ACTIVIDAD ANTAGÓNICA IN VITRO DE <i>TRICHODERMA HARZIANUM</i> Y <i>BACILLUS SUBTILIS</i> FRENTE A <i>COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES</i> , CAUSANTE DE LA ANTRACNOSIS EN EL AGUACATE.....	70
9.2	ACTIVIDAD ANTAGÓNICA IN VITRO DE <i>TRICHODERMA HARZIANUM</i> Y <i>BACILLUS SUBTILIS</i> FRENTE A <i>COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES</i> , CAUSANTE DE LA ANTRACNOSIS EN EL AGUACATE.....	72
9.3	Diagrammatic arbitrary scale to evaluate anthracnose in avocado in Mexico	95
	Diagrammatic arbitrary scale to evaluate anthracnose in avocado in Mexico	97
9.4	DETERMINATION OF THE SPATIAL BEHAVIOR OF ANTHRACNOSE USING SPATIAL STATISTICS IN AVOCADO CULTIVATION	109
9.5	ANÁLISIS ESPACIAL DE ANTRACNOSIS DEL AGUACATE EN DONATO GUERRA, MÉXICO	136
9.6	Estabilidad espacial y temporal de la distribución de antracnosis en aguacate en el Estado de México 149	
10	OTROS RESULTADOS.....	171

10.1	Identificación de síntomas de antracnosis.....	171
10.2	Incidencia	171
10.3	Aislamiento e identificación de las cepas de <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	173
10.4	Evaluación de capacidad antagónica de <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Trichoderma harzianum</i> in vitro.....	175
10.5	Análisis geoestadístico	175
11	DISCUSIÓN GENERAL	177
12	CONCLUSIONES.....	181
13	REFERENCIAS	183
14	ANEXOS.....	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de fruto de <i>Persea americana</i> (Tomado y modificado de Barrientos, 2007).	.....20
Figura 2. Fases fenológicas del cultivo de aguacate (tomado y modificado de Cosmoagro, 2018).	.....21
Figura 3. Relación ambiente, huésped, patógeno.	.....24
Figura 4. Ciclo de infección de <i>C. gloeosporioides</i> en aguacate.	.....31
Figura 5. Diagrama del análisis geoestadístico.	.....39
Figura 6. Modelos teóricos del semivariograma.	.....39
Figura 7. Macro localización de la zona de estudio.	.....50
Figura 8. Incidencia de antracnosis en Coatepec Harinas, Tenancingo, Temascaltepec y Donato Guerra.	.....172
Figura 9. <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>: A) Micelio algodonoso; B) Acérvulos; C) Conidios	.....174
Figura 10. Cepas de <i>C. gloeosporioides</i> de los cuatro municipios de estudio	.....174

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Enfermedades del aguacate según el área afectada. 24
--	-----------------

1 RESUMEN

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es uno de los regalos más importantes que México ha aportado al mundo, desde su origen hasta su domesticación, ha representado un eslabón importante en la dieta de la población, y hoy en día, es uno de los cultivos más trascendentales a nivel mundial. Sin embargo, este cultivo es susceptible al ataque de plagas y enfermedades, lo que disminuye considerablemente su valor comercial; en el Estado de México se han implementado estrategias para el manejo y control de las enfermedades fúngicas que se presentan, tal es el caso de la antracnosis, causada por el hongo fitopatógeno *Colletotrichum gloeosporioides*. No obstante, los resultados de dichas estrategias de manejo han sido poco eficaces, por tal motivo, el presente trabajo aborda la problemática con el empleo de herramientas derivadas de la estadística espacial, la Geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia. Con el objetivo de conocer y analizar el comportamiento espacial de esta enfermedad, se llevó a cabo un muestreo quincenal durante los años 2020 y 2021 de 400 árboles en cuatro municipios productores de aguacate cv. Hass en el Estado de México: Donato Guerra, Coatepec Harinas, Temascaltepec y Tenancingo; en dichos árboles se contabilizaron 48 frutos que presentaban síntomas característicos de la enfermedad (manchas necróticas salmonadas), posteriormente se elaboraron los semivariogramas experimentales, mismos que fueron ajustados a modelos teóricos para la obtención de los parámetros del semivariograma, los cuales son la meseta, el efecto pepita y el alcance. Los modelos obtenidos fueron validados a través del proceso de validación cruzada, además de la elaboración de mapas de superficie infectada a través del método de krigeado ordinario. Así mismo, se realizaron una serie de ensayos de laboratorio empleando dos cepas de *Bacillus subtilis* y dos cepas de *Trichoderma harzianum* con el objetivo de medir las respuestas antagónicas frente a *Colletotrichum gloeosporioides*, así como un fungicida comercial. Los resultados arrojan que la antracnosis es una enfermedad fúngica que se presenta en todos los municipios donde se produce aguacate en el Estado de México, es causada por *C. gloeosporioides*, y está catalogada como una de las enfermedades principales que afecta la calidad de los frutos y causa pérdidas

cercanas al 20% en volumen de producción. Se marcaron y georreferenciaron en total 1200 árboles del cultivar Hass en los cuatro municipios muestreados, es importante destacar que pese a la pandemia de covid-19 y el limitado acceso a las huertas de aguacate, el estudio siguió sin inconvenientes importantes, cuidando las medidas de bioseguridad necesarias al momento de realizar los muestreos en campo. Se tomaron muestras de frutos que presentaban síntomas de la enfermedad para la identificación y desarrollo del patógeno en medio de cultivo PDA a un pH de 5.6. Las colonias fúngicas fueron identificadas a través de claves taxonómicas, obteniendo variabilidad en cuanto a coloración y forma de conidios.

En cuanto al análisis geoestadístico, éste arroja que la antracnosis se distribuye de manera general en los cuatro municipios de muestreo en forma de agregados, los cuales, a su vez forman focos de infección, mismos que se mantuvieron constantes a lo largo de los dos años de muestreo; esta distribución se ajustó en su mayoría a modelos de tipo gaussiano, exponencial, y esférico. La distribución espacial de la antracnosis en los municipios de Tenancingo y Coatepec Harinas se ajustó en su mayoría a modelos exponenciales y gaussianos, con un efecto pepita de cero, y rangos que variaron desde los 12 hasta los 48 metros. En los municipios de Temascaltepec y Donato Guerra, los modelos se ajustaron principalmente a exponenciales y esféricos, con valores de pepita cero y alcances de 3 a 59 metros. En todos los muestreos se obtuvo un nivel de dependencia espacial alto. Los mapas realizados a través del krigeado permitieron conocer la superficie infectada y no infectada con la enfermedad, teniendo porcentajes superiores al 89% de infección. Estos resultados también fueron corroborados con el empleo del Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), donde los índices I_a y J_a corroboraron la existencia de agregación de la enfermedad y la presencia de dos o más focos de infección. Los resultados de los ensayos de antagonismo arrojan que *Trichoderma harzianum* T-22 es la cepa que presenta el mayor porcentaje de eficiencia de biocontrol, mientras que el fungicida comercial Promyl presenta el menor porcentaje de eficiencia de biocontrol frente a *C. gloeosporioides*. Por otro lado, *B. subtilis*

presenta porcentajes altos frente al *C. gloeosporioides*, colocándolo como una cepa viable para el control de antracnosis en el cultivo de aguacate.

Es importante seguir realizando ensayos de éste tipo y poder llevarlos a cabo directamente en campo. Este trabajo contribuye ampliamente a dar una alternativa de control frente a la antracnosis sin comprometer de más los recursos naturales y generando un menor impacto ambiental al disminuir el uso de productos químicos.

Esto nos da un panorama para proponer un programa de manejo integrado que evite pérdidas a causa de la antracnosis en el cultivo de aguacate, que, a su vez, permita focalizar las medidas de control de una manera pertinente, oportuna y eficaz.

Finalmente, y como productos principales derivados de este proyecto de investigación doctoral, se generaron un total de seis artículos científicos y una nota científica, los cuales fueron enviados a las revistas “Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas”, “Agrociencia”, “Investigación Agraria” y “Ecosistemas y Recursos Agropecuarios”. Uno de los artículos ya se encuentra publicado en la Revista Investigación Agraria y se encuentra en formato libre para su consulta.

Palabras clave: semivariograma, análisis espacial, aguacate, mapa de infección, antagonistas.

2 ABSTRACT

The avocado (*Persea americana* Mill.) is one of the most important gifts that Mexico has brought to the world, from its origin to its domestication, it has represented an important link in the diet of the population, and today, it is one of the most transcendental crops worldwide. However, this crop is susceptible to attack by pests and diseases, which considerably reduces its commercial value; Strategies have been implemented in the State of Mexico for the management and control of fungal diseases that occur, such is the case of anthracnose, caused by the phytopathogenic fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. However, the results of these management strategies have been ineffective, for this reason, the present work addresses the problem with the use of tools derived from spatial statistics, Geostatistics and Spatial Analysis by Distance Indices. In order to know and analyze the spatial behavior of this disease, a fortnightly sampling was carried out during the years 2020 and 2021 of 400 trees in four municipalities that produce avocado cv. Hass in the State of Mexico: Donato Guerra, Coatepec Harinas, Temascaltepec and Tenancingo; In said trees, 48 fruits were counted that presented characteristic symptoms of the disease (salmon necrotic spots), later the experimental semivariograms were elaborated, which were adjusted to theoretical models to obtain the parameters of the semivariogram, which are the plateau, the nugget effect and scope. The models obtained were validated through the cross-validation process, in addition to the elaboration of infected surface maps through the ordinary kriging method. Likewise, a series of laboratory tests were carried out using two strains of *Bacillus subtilis* and two strains of *Trichoderma harzianum* in order to measure the antagonistic responses against *Colletotrichum gloeosporioides*, as well as a commercial fungicide.

The results show that anthracnose is a fungal disease that occurs in all municipalities where avocado is produced in the State of Mexico, it is caused by *C. gloeosporioides*, and is listed as one of the main diseases that affects the quality of the fruits. and causes losses close to 20% in production volume. A total of 1,200 trees of the Hass cultivar were marked and georeferenced in the four sampled

municipalities. It is important to note that despite the covid-19 pandemic and limited access to avocado orchards, the study continued without significant inconveniences, taking care of safety measures. necessary biosafety at the time of sampling in the field. Samples of fruits showing symptoms of the disease were taken for the identification and development of the pathogen in PDA culture medium at a pH of 5.6. Fungal colonies were identified through taxonomic keys, obtaining variability in coloration and conidia shape.

Regarding the geostatistical analysis, it shows that anthracnose is distributed in a general way in the four sampling municipalities in the form of aggregates, which, in turn, form sources of infection, which remained constant throughout the two years. Of sampling; This distribution was fitted mostly to Gaussian, exponential, and spherical models. The spatial distribution of anthracnose in the municipalities of Tenancingo and Coatepec Harinas was mostly adjusted to exponential and Gaussian models, with a nugget effect of zero, and ranges that varied from 12 to 48 meters. In the municipalities of Temascaltepec and Donato Guerra, the models were fitted mainly to exponential and spherical, with zero nugget values and ranges from 3 to 59 meters. A high level of spatial dependence was obtained in all the samples.

The maps made through kriging allowed to know the surface infected and not infected with the disease, having percentages higher than 89% of infection. These results were also corroborated with the use of the Spatial Analysis by Distance Indices (SADIE), where the I_a and J_a indices corroborated the existence of disease aggregation and the presence of two or more sources of infection. The results of the antagonism tests show that *Trichoderma harzianum* T-22 is the strain that presents the highest percentage of biocontrol efficiency, while the commercial fungicide Promyl presents the lowest percentage of biocontrol efficiency against *C. gloeosporioides*. On the other hand, *B. subtilis* presents high percentages against *C. gloeosporioides*, placing it as a viable strain for the control of anthracnose in avocado cultivation.

It is important to continue carrying out tests of this type and to be able to carry them out directly in the field. This work contributes widely to provide an alternative control against anthracnose without overly compromising natural resources and generating less environmental impact by reducing the use of chemical products.

This gives us an overview to propose an integrated management program that prevents losses due to anthracnose in avocado cultivation, which in turn allows targeting control measures in a pertinent, timely and effective manner.

Finally, and as main products derived from this doctoral research project, a total of five scientific articles and a scientific note were generated, which were sent to the journals "Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas", "Agrociencia", "Investigación Agraria" and "Ecosystems and Agricultural Resources". One of the articles is already published in the Revista Investigación Agraria and is in free format for consultation.

Key words: semivariogram, spatial analysis, avocado, infection map, antagonists.

3 INTRODUCCIÓN

México es el principal productor y a su vez, uno de los consumidores más importantes de aguacate (*Persea americana* Mill.) en el mundo, de acuerdo con datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, hasta mayo de 2021, se tiene un recuento de 231,028 hectáreas sembradas en todo el país, con una producción que rebasa las 800,000 toneladas, presentando un rendimiento de 5.22 ton/ha (SIAP, 2018).

Esto demuestra que la producción nacional de aguacate ha mostrado una tendencia creciente en cuanto a superficie cultivada y volumen de producción durante los últimos años, teniendo un predominio de la variedad Hass, misma que destaca por su demanda a nivel mundial (Naamani, 2007).

Michoacán produce la mayor parte de toneladas de este fruto, sin embargo, el Estado de México ocupa el tercer lugar a nivel nacional incrementando su capacidad productiva principalmente en los municipios de Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec, Valle de Bravo y Tenancingo, siendo el cultivar Hass el de mayor importancia (SIAP, 2018; Secretaria del Campo, 2022).

Lo anterior demuestra que, al ser una especie de importancia no solo agrícola a nivel mundial, sino también económica, *Persea americana* es uno de los cultivos más importantes del país por la demanda de consumo en el mercado nacional e internacional.

Con el fin de aumentar la productividad agrícola a gran escala, surgió también la necesidad de implementar sistemas modernos de agricultura, que dependen en gran parte de monocultivos y agroinsumos químicos, orgánicos y/o biológicos, trayendo como consecuencia nuevos problemas de plagas y enfermedades a los cultivos (Sharma *et al.*, 2000), además de causar daños graves en el ambiente, contaminando agua, suelos, aire y perjudicando a las especies de flora y fauna que

forman parte de esos sistemas ecológicos, por ello, surge la necesidad de conocer los patrones de distribución espacial de los organismos causantes de plagas y enfermedades en los cultivos agrícolas.

El aguacate, al ser precisamente un monocultivo, presenta importantes problemas fitosanitarios que limitan los procesos de producción y exportación, dentro de los cuales se destacan las plagas por insectos como barrenadores de rama y semilla, así como enfermedades causadas por hongos, siendo la antracnosis, la roña y la tristeza del aguacatero las de mayor presencia.

El uso de herramientas derivadas de la Estadística espacial, como la Geoestadística, en la agricultura, facilitan la comprensión de la distribución e incidencia de las plagas y enfermedades que se presentan en los cultivos, bajo este esquema, esta investigación se realizó con la finalidad de conocer y analizar el comportamiento espacial de la antracnosis en los huertos de aguacate cv Hass dentro de cuatro municipios productores del Estado de México, y a su vez, proponer el uso e implementación de organismos antagonistas como agentes biocontroladores de la enfermedad, complementando estrategias de manejo integrado que favorezcan al medio ambiente, y que además faciliten planes de muestreo eficientes.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Generalidades del Cultivo de Aguacate

4.1.1 Origen

Persea americana, es una planta angiosperma descrita por Miller como un árbol de porte frondoso y hojas perennes, originario de Mesoamérica, particularmente del centro y este de México (Williams, 1977).

P. americana forma parte de la familia Lauraceae, cuyo uso principal radica en la alimentación desde la antigüedad; la domesticación de esta especie viene desde la época Precolombina, cuando era muy apreciada por las civilizaciones Maya y Mexica, como lo evidencia su presencia en las representaciones pictóricas de dichas civilizaciones (Storey *et al.*, 1986; Gama-Campillo y Gómez-Pompa, 1992); se tiene conocimiento de que estos pueblos seleccionaban los frutos considerando su tamaño y sabor.

Existen evidencias arqueológicas acerca del uso y la selección de *P. americana* en México comenzó hace 10.000 años, con el hallazgo de semillas de aguacate en Coxcatlán, Valle de Tehuacán, en el estado de Puebla, de un tamaño mayor a las encontradas en otras excavaciones, esto demuestra que, durante ese tiempo se produjo una selección progresiva que favoreció el crecimiento del fruto. El nombre común de este fruto en español es aguacate o ahuacate, que proviene de la palabra de origen náhuatl, ahuacatl que significa “testículos del árbol” (Gran Diccionario Náhuatl, 2018).

De esta forma, *P. americana* es una especie que ha sido eje de innumerables investigaciones acerca de su biología, uso y producción, cuya información está disponible desde hace mucho tiempo en diversas fuentes como libros, artículos científicos, boletines, notas, etc., sin dejar de lado los estudios acerca de su importancia sociocultural y económica.

4.2 Descripción botánica del aguacate

P. americana Mill. es una planta dicotiledónea que pertenece al orden Ranales y a la familia Lauraceae; dentro del género *Persea* se han diferenciado dos subgéneros: *Persea* y *Eriodaphne* (Kopp, 1966); sin embargo, actualmente se consideraran como dos géneros diferentes (Campos *et al.* 2006).

Taxonómicamente, *P. americana* fue clasificada en un inicio por Gaertner como *Persea grattissima*, posteriormente, Miller hizo una reclasificación, dejando a esta especie como *Persea americana* (Rodríguez, 1982). Cruz (2018) menciona que *P. americana* es actualmente la especie más estudiada de la familia Lauraceae porque representa un recurso importante en la alimentación humana.

El aguacate es un árbol perennifolio que varía en cuanto a desarrollo y crecimiento, llegando a presentar una altura de 10 a 12 metros en su hábitat natural; es una especie de tallo leñoso que puede ser erecto, con un diámetro de 30 a 60 centímetros o más grueso en árboles muy viejos; también puede ser bajo y ancho, con ramas que se abren desde muy cerca del suelo (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2009).

La morfología foliar se presenta en láminas pedunculadas, brillantes, lanceoladas, con base aguda, margen entero y ápice agudo. El color de las hojas maduras es verde mate, el peciolo presenta estrías o surcos y el relieve de la venación por el haz es intermedio, usualmente levantado (IICA, 2009).

4.2.1 Morfología del fruto

Es un fruto de una sola semilla, cuya pulpa es carnosa y es conocido como drupa, presenta una amplia variedad de colores, texturas y formas, puede medir de 7.5 a 33 centímetros de largo y hasta 15 centímetros de ancho, dependiendo del cultivar (Scora *et al.*, 2002).

El pericarpio puede ser desde color verde amarillo y alcanzar tonalidades oscuras, púrpuras, rojizas, o tan oscuras que llegan a parecer negras; en ocasiones tiene puntos amarillos cuya textura suele ser lisa o rugosa, lustrosa u opaca; delgada o como cuero y de hasta 6 mm de gruesa; flexible o granulada y quebradiza (Barrientos, 2010).

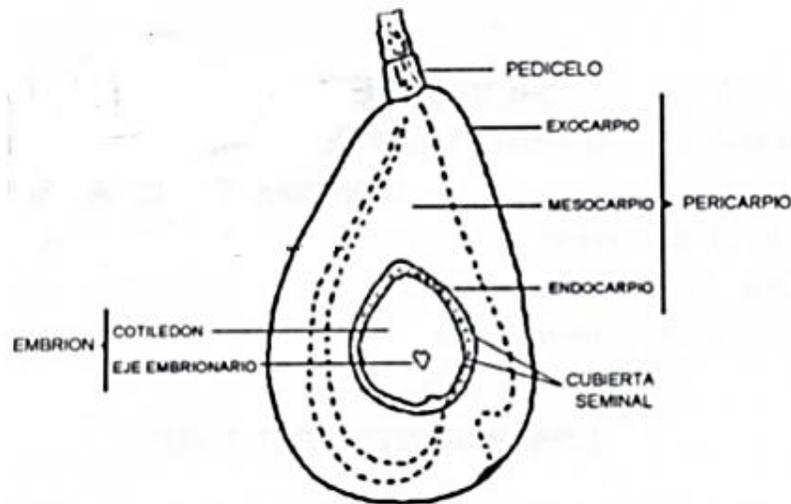


Figura 1. Morfología de fruto de *Persea americana* (Tomado y modificado de Barrientos, 2007).

La semilla, única, puede ser ovoide, redonda o cónica, de 5 a 6.4 centímetros de largo, dura y pesada, de color marfil rosado, envuelta en dos capas como papeles de color café, frecuentemente adheridas a la cavidad pulposa, mientras la semilla sale fácilmente (Tiempo de aguacate, 2017).

4.2.2 Variedades

Rodríguez (1982) menciona que las variedades comerciales de aguacate se clasificaron en tres grupos ecológicos o razas: la mexicana, la guatemalteca y la antillana. Para dicha clasificación se consideró la época de floración, la temporada de recolección, el periodo de floración-recolección, el peso y la corteza del fruto, la

cantidad de aceite y la resistencia a bajas temperaturas; de igual manera, Scora *et al.* (2002) distinguieron 3 especies dentro del género *Persea*: *P. schiedeana*, *P. parviflora* y *P. americana*; de esta última, se han descrito las tres razas o variedades botánicas con base en diferencias morfológicas, ecológicas y moleculares.

4.3 Fases fenológicas del cultivo de aguacate

El árbol de aguacate muestra diversas fases fenológicas conforme se presentan las estaciones del año, debe entenderse entonces, que la fenología es la relación entre el clima y los fenómenos biológicos de las especies a través del tiempo; entre las principales etapas fenológicas del cultivo de aguacate, se encuentra el inicio y la diferenciación de las flores, el crecimiento vegetativo, el amarre y caída de frutos, así como el crecimiento y maduración de los mismos; el crecimiento de raíces y la abscisión de hojas también son etapas fenológicas importantes (Reyes *et al.* 2015).

La floración del aguacate comienza en el otoño y termina a finales de la primavera.



Figura 2. Fases fenológicas del cultivo de aguacate (tomado y modificado de Cosmoagro, 2018).

4.4 Situación actual del cultivo de aguacate en México y el mundo

El principal productor de aguacate a nivel mundial es México; las estadísticas lo colocan en ese lugar debido al número de toneladas que se producen. En el 2017, fueron alrededor de 1,997,629 toneladas cosechadas, una cifra histórica y

considerable que consolida a nuestro país como el principal productor y exportador de este frutal (SAGARPA, 2018); otros países como República Dominicana, Indonesia, Colombia, Estados Unidos, Chile y Perú también producen miles de toneladas de aguacate anualmente, con base en datos consultados en la página web del SIAP (2016).

Rubí *et al.* (2015) mencionan que la producción nacional de aguacate muestra un claro crecimiento en cuanto a superficie cultivada y volumen de producción. Además de la importancia económica de este fruto, cabe resaltar que *P. americana* es una especie que no solo puede ser aprovechada por su alto valor nutricional, equivalente, según expertos, con el de la carne de cerdo o res, sino que posee otras propiedades que la convierten en una especie de importancia para el hombre, ya que sus frutos son utilizados en las industrias cosmética y farmacéutica para la elaboración de productos a base de extractos naturales como cremas, aceites y películas protectoras y de limpieza corporal, debido a la cantidad de aceites, vitaminas y otros nutrientes que contiene, además de ser una planta integral, pues la madera es altamente resistente, siendo usada para la fabricación de papel, muebles, entre otras cosas (Ornela y Yahia, 2002).

Al ser un monocultivo, el aguacate se encuentra propenso a diversos problemas fitosanitarios, entre los que se destacan las plagas y enfermedades; la mayor incidencia documentada asociada a insectos se presenta por algunas especies pertenecientes al orden Thysanoptera, comúnmente conocidos como trips, y también por organismos pertenecientes a la subclase Acari, coloquialmente llamados "araña roja".

Sin embargo, el aguacate también está expuesto al ataque de otros organismos como *Stenomema catenifer*, el gusano arrollador de la hoja (*Platynota* sp.), y los escarabajos *Heilipus* sp. y *Copturomimus perseae*, barrenadores de semilla y rama, respectivamente (Wysoki *et al.*, 2002).

Así mismo, el aguacate también se ve afectado por diversas enfermedades producidas por hongos, bacterias y otros agentes patológicos, entre las cuales se destacan la antracnosis, tristeza del aguacatero, la roña, cercospora etc. En el estado de México, las principales enfermedades que atacan al cultivo del aguacate son la tristeza del aguacatero, la mancha negra o cercospora, la antracnosis, fusariosis y la roña (SAGARPA, 2011).

Se define como plaga agrícola a una población de animales fitófagos (se alimentan de plantas), principalmente artrópodos, que disminuyen la producción de los cultivos, ocasionando la reducción del valor de la cosecha o incrementando sus costos de producción (Cisneros, 2010).

4.5 Enfermedades del aguacate

Al estudiar el proceso de desencadenamiento de una enfermedad vegetal, hay que considerar tres elementos: planta u hospedante, patógeno (hongo, bacterias o virus) y el ambiente; trío inseparable que nunca debe dejarse de lado, pues si bien el patógeno tiene importancia, no podrá actuar en un hospedante inmune o en condiciones medioambientales desfavorables (Figura 3). El hombre tiene un papel importante en el agroecosistema, interviniendo por medio de las prácticas culturales, y tratamientos fitosanitarios, modificando de esta manera el ambiente a través del tiempo.

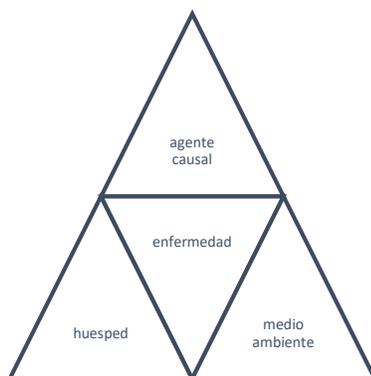
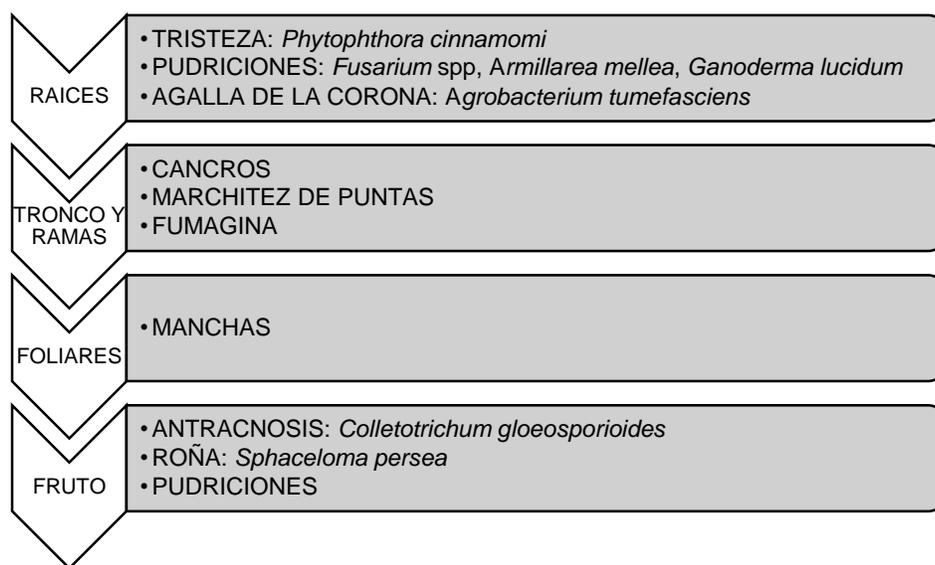


Figura 3. Relación ambiente, huésped, patógeno.

Para el cultivo de aguacate, se pueden agrupar las enfermedades de acuerdo al área afectada (Cuadro 1), siendo *Phytophthora cinnamomi* una de las más agresivas porque produce daños directamente en el sistema radical del árbol, generando secamiento en un lapso de tiempo muy corto; por otro lado, *P. americana* es una especie susceptible a la aparición de canchros en tronco y ramas, así como también los frutos son altamente propensos al ataque de hongos fitopatógenos como *Colletotrichum* y *Sphaceloma*.



Cuadro 1. Enfermedades del aguacate según el área afectada.

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Generalidades de la Antracnosis

La palabra antracnosis derivada del griego anthrax “carbón” significa ennegrecimiento y con ella se denomina al grupo de enfermedades que atacan el follaje, los tallos y los frutos, desencadenando síntomas con manchas oscuras o lesiones sumidas de borde elevado (Agrios, 2005).

Esta enfermedad es considerada de amplio espectro, ya que afecta un sin número de hospederos, cereales, pastos, legumbres, vegetales, ornamentales y cultivos perennes, incluidos los árboles frutales (cítricos), pino y caucho.

Gran parte de los casos reportados de antracnosis en el pasado tienen como agente etiológico a *Colletotrichum* spp. anamorfo de *Glomerella* spp. Éste género fue seleccionado como el octavo grupo más importante de hongos patógenos de plantas en el mundo, basado en la percepción científica de su importancia económica (Dean *et al.*, 2012).

4.6.1 Características del género *Colletotrichum*

El género *Colletotrichum* presenta un número diverso de especies que incluye los patógenos y los saprofitos. Las especies de este género son consideradas como las más exitosas dentro de los hongos patógenos de plantas y se presentan tanto en zonas templadas como tropicales. Este patógeno puede afectar gran parte de los tejidos, órganos de la planta en desarrollo, y frutos. Su capacidad para causar infecciones latentes o quiescentes lo ubican dentro de los patógenos de post cosecha más importantes. Las enfermedades causadas por hongos del género *Colletotrichum* han sido encontradas en casi todos los países del mundo, ocasionando daños en muchas especies de frutales y especies vegetales (Afanador-Kafuri *et al.*, 2003; Furtado y Trindade, 2005; Agrios, 2005; Talhinhos *et al.*, 2005; Damm *et al.*, 2012; Weir *et al.*, 2012).

En sentido amplio, los estilos de vida en las especies de *Colletotrichum* pueden clasificarse como necrótrofos, hemibiótrofos, latentes o quiescentes y endófitos; de los cuales el hemibiótrofo es el más común (De Silva *et al.*, 2017). Las diferencias en el estilo de vida dependen de la especie *Colletotrichum*, la especie hospedero, la madurez fisiológica del hospedero y las condiciones ambientales. Por lo tanto, el género *Colletotrichum* ofrece una oportunidad única para analizar diferentes patrones de vida proporcionando información útil sobre las interacciones planta-patógeno.

La quiescencia se define como un período prolongado de tiempo en el ciclo de vida del hongo en el que el patógeno existe en forma latente (Prusky et al., 2013). Durante la quiescencia, la actividad patogénica parece estar suspendida y casi no se produce crecimiento. En estos casos, los patógenos permanecen latentes dentro del tejido de la planta antes de que se desarrollen los síntomas de la enfermedad (Prusky, 1996, Gomes *et al.*, 2013, Prusky *et al.*, 2013, Shaw *et al.*, 2016). Sin embargo, la etapa quiescente del estilo de vida es difícil de definir ya que cada especie fúngica puede mostrar diferentes transiciones de la quiescencia a la necrotrofia. Los cambios fisiológicos, bioquímicos y ambientales pueden activar diferentes vías de transducción de señales defensivas relacionadas con las respuestas tanto del hospedero como del patógeno, que son importantes para mantener o facilitar la transición del estilo de vida (Prusky *et al.*, 2013).

Colletotrichum presenta un micelio enramado inmerso, septado que toma coloración hialina hasta castaño pálido. Acérvulos separados o confluentes en forma de disco o cojín, seroso subepidermal, epidermal y subcuticular típicamente con setas o espinas negras en los bordes o entre los conidióforos, formado de pseudoparénquima con paredes delgadas o gruesas; conidióforos simples, conidias hialinas, ovoides u oblongadas.

Las setas presentes o ausentes, originadas irregularmente desde el pseudoparénquima, más o menos fuertes, no ramificadas, con un ápice agudo u obtuso, suaves y con una pared gruesa septada en algunos casos. Los conidióforos septados, ramificados sobre la base de color castaño claro o hialino, formados de la parte superior de las células del pseudoparénquima son simples, cortos, erectos. Las conidias también son hialinas, aceptadas en forma cilíndrica, fusiforme, de una sola célula, que durante la germinación se torna de color castaño pálido, se septan y forman el apresorio. A menudo las esporas son tan numerosas que pueden formar masas brillantes de color rosado.

Las formas de *Colletotrichum* tienen diferentes modelos de comportamiento en la naturaleza, variando de saprofito a cepas parasíticas especializadas con un estrecho rango de hospederos. Los conidios son producidos en masas mucilaginosas, a menudo rosadas, bastante conspicuas y típicamente hundidas, con un contorno irregular en las lesiones necróticas (denominadas antracnosis) sobre frutos, hojas y tejidos. Algunas lesiones sobre frutos en desarrollo llegan a presentarse en relieve; como canchales, costras, cicatrices, o con forma de verruga en apariencia.

Algunas especies causan infecciones latentes sobre los frutos, que se desarrollan en lesiones de antracnosis durante la fase de maduración. Pero algunas lesiones surgen sin la presencia de un estado latente, cuando la infección toma lugar a través de una herida en el tejido del hospedero. Las especies generalmente sobreviven por largos periodos de tiempo sobre los desechos vegetales o sobre o dentro del suelo. El género patógeno más común en los trópicos es *Colletotrichum gloeosporioides*.

4.6.2 Taxonomía del género *Colletotrichum*

La taxonomía de *Colletotrichum* es confusa, hay cerca de 900 especies descritas o asignadas a *Colletotrichum*. La identificación ha sido estudiada por sus características morfológicas, culturales, especialmente características conidiales, presencia de setas, esclerocios y forma de los apresorios.

4.6.3 Antracnosis causada por *Colletotrichum gloeosporioides* en aguacate

La antracnosis en el aguacate es causada por el hongo *Colletotrichum gloeosporioides* Penz., es la enfermedad más importante de las que afectan la fruticultura en el ámbito mundial y nacional, debido a la severidad de los daños que ocasiona, a la magnitud de las pérdidas que genera tanto en producción como en calidad, por lo cual, resulta necesario profundizar los estudios sobre la interrelación biológica de algunos microorganismos con énfasis en organismos sinérgicos de los

cuales se tiene indicios que estimulen la germinación y formación de apresorios; así como de organismos antagonistas que pueden ser utilizados en un futuro en el manejo de la enfermedad.

El hongo que causa la antracnosis también afecta hojas y ramas, pero el daño más notorio se observa en los frutos, los cuales son afectados en todos sus estados de desarrollo. La demanda de alternativas para el manejo de la enfermedad ha creado la necesidad de realizar estudios básicos orientados hacia el diagnóstico y caracterización de las especies.

4.6.4 Características de la antracnosis como enfermedad

Las características que tipifican esta epidemia, evidencian varios aspectos; en primer lugar que la precipitación juega un papel definitivo en la infección y severidad del problema, segundo que los patios de infección en la planta son múltiples (frutos en todas las edades, estructuras reproductivas, hojas, brotes, pedúnculos, etc.), tercero que el inóculo efectivo incrementa rápida y fácilmente todo el tiempo, es altamente eficiente y presenta características de quiescencia, favoreciéndolo de condiciones adversas sin perder viabilidad, por un tiempo aún no determinado, pero de varias semanas; que las condiciones ecológicas y agronómicas del cultivo son ideales para la epidemia.

Esta enfermedad se presenta cuando las plantas se encuentran en pleno desarrollo vegetativo, la humedad ambiental alcanza un 95% y la temperatura es superior a 17 °C.

4.6.5 Síntomas

Se manifiestan con mayor frecuencia en el ápice o en los puntos en que varios frutos de una misma inflorescencia quedan en contacto, debido a que allí se presenta acumulación de agua, por tiempo más largo, lo cual favorece el desarrollo

inicial del hongo. En los frutos de cualquier edad, inicialmente se producen manchas circulares negras, hundidas, de bordes definidos, que aumentan rápidamente de tamaño y se tornan de consistencia seca, para luego cubrir casi todo el fruto y finalmente momificarse en la planta o caer al terreno. En condiciones de ambiente muy húmedo y precipitaciones continuas, se produce en el centro de la mancha una coloración rosada a salmón, que corresponde a las estructuras de reproducción del patógeno.

También pueden aparecer a lo largo de las venas de las hojas unas manchas irregulares de color marrón claro correspondientes a tejido muerto. Las plantas afectadas tendrán el aspecto de haber sido quemadas por el sol.

4.6.6 Epidemiología

El hongo puede ser transportado de planta a planta y de cultivo a cultivo, de varias formas: por el viento, por la lluvia, o por el mismo agricultor, también es diseminado por insectos como los trips, y también por algunas larvas de lepidópteros, que facilitan la entrada del hongo y predisponen el fruto a la infección por el patógeno.

Las esporas son liberadas de los acérvulos solamente cuando hay una abundante humedad, y el salpicado de las gotas de lluvia es un medio común de diseminación. La severidad de la enfermedad está relacionada con las condiciones del medio ambiente, el hongo se inactiva en condiciones de clima seco, luz solar y temperaturas extremas (menor de 18°C o mayor de 28°C).

4.6.7 Nutrición del patógeno

Colletotrichum gloeosporioides es un microorganismo que en la naturaleza vive de la materia orgánica y en ocasiones especiales tiene la capacidad de volverse patógeno, prefiriendo atacar tejidos muy jóvenes o tejidos muy viejos y físicamente débiles. Los ataques más severos a los frutos ocurren cuando coinciden el estado más susceptible del cultivo (floración, fructificación) con un tiempo lluvioso y días de

permanente humedad relativa, mayor del 90%. Las fuentes de inóculo se encuentran en las hojas, ramas, inflorescencias, brácteas de las flores y en los frutos, en términos generales en todo el árbol.

4.6.8 Ciclo de biológico de *C. gloeosporioides*

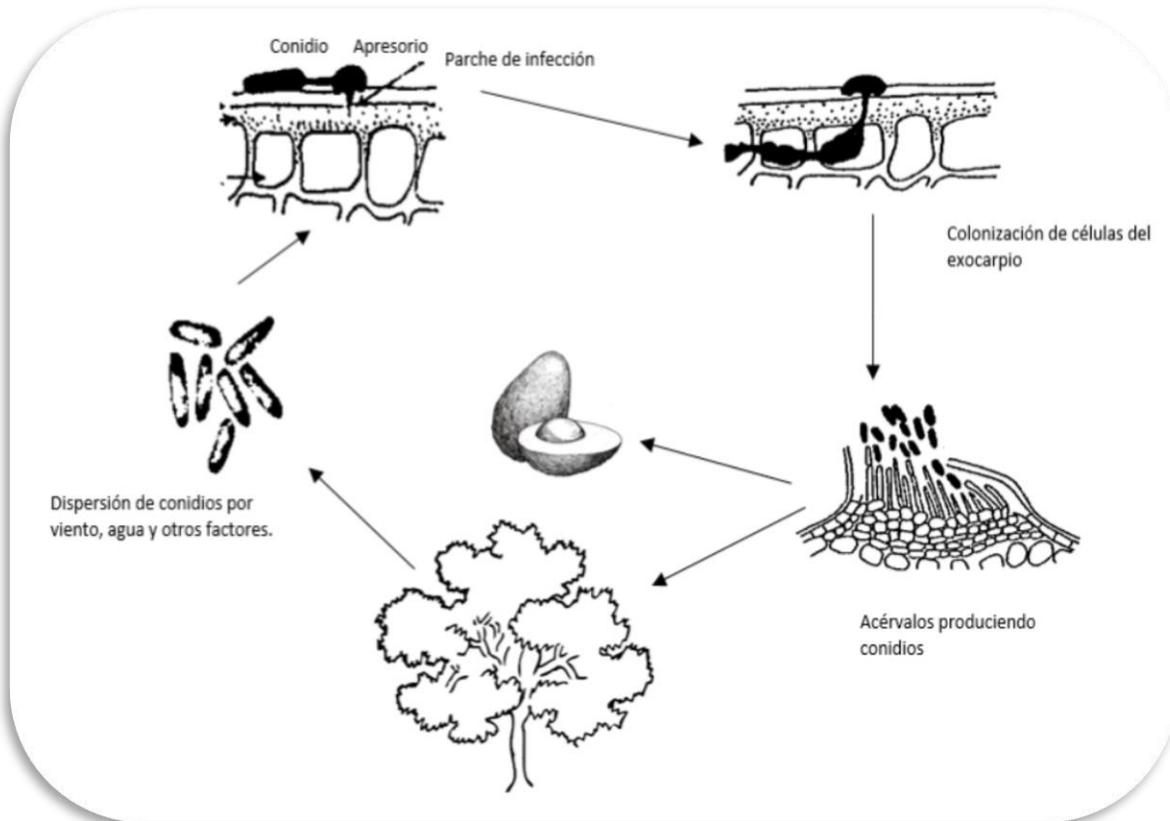


Figura 4. Ciclo de infección de *C. gloeosporioides* en aguacate.

La fase latente puede ser de unos pocos días o de varias semanas, inclusive de meses, originando las infecciones quiescentes, las cuales son activadas por cambios bruscos de temperatura, daños al tejido por insectos, daños mecánicos, senescencia de tejidos o sobre maduración de los frutos, lo que produce lesiones necróticas durante la precosecha o postcosecha, que en condiciones normales no son detectadas.

El periodo de latencia es aquel desde la infección hasta que se convierte en tejido infeccioso (propágulo). La infección quiescente se describe como una relación parasítica latente, que después de un tiempo prolongado cambia a una forma activa. La quiescencia puede ser promovida por condiciones fisiológicas y físicas adversas que pueden ser impuestas temporalmente por el hospedante sobre el patógeno, por modificación de la capacidad patogénica del organismo y por resistencia temporal del hospedante.

4.6.8.1 Hibernación del hongo patógeno

El hongo hiberna en los restos de plantas afectadas, así como en las semillas; produce infecciones leves del follaje y ramas jóvenes que pueden pasar inadvertidas, pero que le permiten sobrevivir y reproducirse hasta que el fruto empieza a madurar y se hace susceptible a la infección. Las altas temperaturas y la gran humedad que prevalecen cuando ocurre la maduración de los frutos, favorecen la infección y propagación del hongo, conduciendo frecuentemente a epidemias destructivas.

4.6.8.2 Asociación del patógeno con otros microorganismos

Este patógeno tiene gran facilidad para asociarse con otros microorganismos, especialmente con bacterias del tipo *Pseudomonas*, que actúan de manera sinérgica y le permiten una mejor germinación y formación de órganos que le facilitan la infección (apresorio), mientras la bacteria se beneficia, obteniendo del lugar donde producen las esporas elementos nutritivos como el hierro para formar metabolitos.

4.6.9 Pérdidas causadas por efectos de la enfermedad

Se dan en diferentes estados de crecimiento vegetativo, sobre todo por la caída prematura de inflorescencias y frutos, ocasionando disfunciones fotosintéticas y fisiológicas y pérdidas postcosecha.

4.7 Control

El control de la antracnosis en el aguacate, y en general, de cualquier enfermedad que se presente en un cultivo agrícola debe estar basado principalmente en el monitoreo y manejo;

como en cualquier otro cultivo, para el control de la antracnosis en el aguacate se recomienda un manejo integrado, es decir, una serie de actividades que parten desde la planeación del cultivo, hasta la comercialización, si es posible. Estas acciones comienzan con medidas preventivas que incluyen la limpieza del terreno, mejora del drenaje etc. (Landerero *et al.*, 2016)

Una vez que el cultivo se encuentra ya establecido, deben incluirse prácticas como podas sanitarias, manejo de cobertura y aireación en el árbol (Hartill *et al.*, 1991); es importante destacar que, para el caso de frutales como el aguacate, se emplean medidas de control químico a base de productos fungicidas basados en oxiclورو e hidróxido de cobre los cuales generalmente se aplican en intervalos de 28 días desde el amarre de fruto hasta la cosecha.

Sin embargo, el uso de productos químicos y orgánicos para el control de las plagas y enfermedades en los cultivos carece de precisión, ya sea a causa del exceso o dosis inadecuadas en la aplicación, la maquinaria utilizada, entre otras cosas, por lo que, si el control no es adecuado, pueden surgir otros problemas, tales como que una plaga secundaria se convierta en primaria o que las enfermedades generen resistencia a los productos utilizados (Southwood, 1995; Manoiloff *et al.*, 1982).

Por otro lado, la buena nutrición en el cultivo es vital para el fortalecimiento del sistema de defensa de las plantas, una vez que esto sucede, la incidencia y

severidad de las plagas y enfermedades se ven disminuidas considerablemente (Ureña-Zumbado, 2009).

4.7.1 El Control Biológico

Se entiende por control biológico la reducción de la densidad o de las actividades productoras de enfermedades de un patógeno o parásito, en su estado activo o durmiente, lograda de manera natural o a través de la manipulación del ambiente, del hospedero o de antagonistas del patógeno o plaga que se quiere controlar. Se trata de una definición muy amplia que abarca prácticamente a todo tipo de control fuera del químico.

En condiciones naturales los microorganismos están en un equilibrio dinámico en la superficie de las plantas. La disminución de la flora de competencia por prácticas agrícolas como lavado de frutos, aplicación de fungicidas, y desinfección de suelos entre otras, favorecen el desarrollo de los patógenos.

Los métodos de control biológico para las enfermedades causadas por *Colletotrichum* tienen ahora gran importancia, ejemplo de ello es el uso de microorganismos de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Trichoderma*, los cuales han sido involucrados en los estudios de control biológico frente a *C. gloeosporioides*.

4.7.2 Antagonistas como alternativa de control frente a *Colletotrichum gloeosporioides*

Una de las alternativas de control biológico es a partir de microorganismos antagonistas, como hongos endófitos, entendiéndose por antagonistas, aquellos organismos que interfieren en la supervivencia o desarrollo de los patógenos.

A veces, los microorganismos antagónicos pueden consistir en cepas avirulentas del mismo patógeno, que destruyen o inhiben su desarrollo, como ocurre en la hipovirulencia y en la protección cruzada (CITA).

4.7.3 Mecanismos mediante los cuales los antagonistas ejercen su acción

En general los antagonistas no tienen un único modo de acción y la multiplicidad de modos de acción es una característica a seleccionar en un antagonista. Se han descrito varios mecanismos de acción de los antagonistas para controlar el desarrollo de patógenos sobre cultivos agrícolas, los cuales se describen a continuación.

4.7.3.1 Antibiosis

Se refiere a la producción por parte de un microorganismo de sustancias tóxicas para otros microorganismos, las cuales actúan en bajas concentraciones (menores a 10 ppm.). La antibiosis es el mecanismo de antagonismo entre microorganismos más estudiado.

4.7.3.2 Competencia

Este mecanismo de acción también es de los más efectivos pues la competencia establecida entre el agente antagónico y el organismo problema, permite el desarrollo del antagónico y no el del problema.

4.7.3.3 Parasitismo

Se refiere al hecho de que un microorganismo parasite a otro. Puede ser definido como una simbiosis antagónica entre organismos. El parasitismo consiste en la utilización del patógeno como alimento por su antagonista. Generalmente se ven implicadas enzimas extra celulares tales como quitinasas, celulasas, b-1-3-glucanasas y proteasas que lisan o digieren las paredes de los hongos.

4.7.3.4 Predación

En el caso de la predación el antagonista se alimenta de materia orgánica entre la cual ocasionalmente se encuentra el patógeno. No ha sido un mecanismo de acción muy importante en el desarrollo de agentes de biocontrol

4.7.3.5 Inducción de Resistencia

Se acostumbra a postular que la resistencia es la regla mientras que la susceptibilidad es la excepción. Las plantas presentan entonces mecanismos bioquímicos y físicos o estructurales de resistencia. Todos ellos gobernados genéticamente.

4.7.4 Ventajas del Control Biológico

La principal ventaja del control biológico sobre el control químico está en la ausencia de residuos químicos sobre las partes comestibles de los cultivos, así mismo aminora el daño al medio ambiente por la falta de químicos persistente.

Es un medio de lucha integrada respetando el medio ambiente, lo que da más seguridad, evitar productos tóxicos para la salud humana al consumir productos libres de químicos y por lo tanto más inocuos.

4.7.5 Actividad antagónica de *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum* frente a *C. gloeosporioides*.

4.8 *Bacillus subtilis* como biocontrolador

Sabemos que la mayoría de los experimentos de control biológico en enfermedades poscosecha se han realizado aplicando los antagonistas en condiciones controladas de humedad y temperatura, por lo que, en este sentido, bioensayos como el propuesto por ^{Maldonado} *et al.* (2019) en el que evaluaron los efectos de los metabolitos

obtenidos mediante extractos hexánicos y de acetato de etilo, producidos en el cultivo individual y en el co-cultivo de *Trichoderma spp.* y *Bacillus subtilis*, sobre el crecimiento de *C. gloeosporioides* y *F. oxysporum*, representan una nueva alternativa para llevar a cabo el biocontrol de hongos fitopatógenos.

Ensayos in vitro han evaluado la capacidad antagónica de microorganismos de los géneros *Trichoderma* y *Bacillus* ante enfermedades como el marchitamiento vascular, la cual es un problema que produce pérdidas en la producción de los cultivos de *Caesalpinia spinosa* (Pérez y García, 2019).

De la misma forma, existen estudios destacan la eficacia biocontroladora principalmente de *Trichoderma* frente a *Penicillium sp.*, causante del marchitamiento en el cultivo de ajo (Astorga et al., 2014) y también como biocontrolador en el desarrollo de *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae* (Moino y Alves, 1999).

4.9 Estadística espacial

La estadística espacial hace referencia a un conjunto de técnicas estadísticas que cuantifican aspectos relacionados con la estructura de las distribuciones espaciales. Ramírez (2012) define a la estadística espacial como todo análisis que utiliza la herramienta estadística y que tiene una dimensión espacial, esto último refiriéndose a la propia dimensión, al objeto de análisis o a las variables que describen el objeto.

La característica distintiva del análisis estadístico de datos espaciales es que el patrón espacial de las localizaciones (objetos espaciales), la asociación espacial entre los valores observados en diferentes localizaciones (dependencia espacial) y la variación sistemática del fenómeno en las distintas localizaciones (heterogeneidad espacial) se convierte en el mayor foco de investigación.

Estas herramientas no son sólo relevantes en Geografía, sino aplicables además a un amplio rango de áreas científicas, entre las que destacan la Biología y la Agronomía.

La distribución de una población describe su ubicación espacial, es decir, el área sobre la cual se encuentra; dicha distribución está influenciada por la existencia de condiciones ambientales adecuadas (Gastón, 1991). La distribución espacial de los organismos ha sido estudiada considerando los índices de dispersión y las distribuciones estadísticas normales (Krebs, 1999).

4.9.1 Geoestadística

La Geoestadística, se reconoce como una rama de la estadística espacial, cuyo principal característica es el reconocimiento “a priori” de que los datos muestreados están correlacionados en el espacio en el que se han tomado; además, parte de la observación de que la variabilidad o continuidad espacial de las variables distribuidas en el espacio tienen una estructura particular, desarrollándose herramientas matemáticas para el estudio de estas variables dependientes entre sí, llamadas variables regionalizadas (Ramírez, 2012).

La estadística clásica permite dar explicación a los fenómenos que ocurren en la naturaleza, sin embargo, la Geoestadística también es una alternativa que permite describir precisamente los patrones de distribución espacial de plagas y enfermedades en los cultivos, empleando información acerca del valor que toma una variable y además de la ubicación espacial de los puntos de muestreo a fin de resumir la correlación entre puntos (Liebhold *et al.*, 1991).

4.9.1.1 Fases de un Estudio Geoestadístico

Para la correcta obtención de un mapa de previsión de datos, se deben cumplir una serie de fases claramente diferenciadas: A. Análisis Exploratorio de los datos B. Análisis Estructural o Variografía C. Interpolación o Estimación Espacial. Krigado D. Validación del Modelo Geoestadístico (Ramírez, 2012)

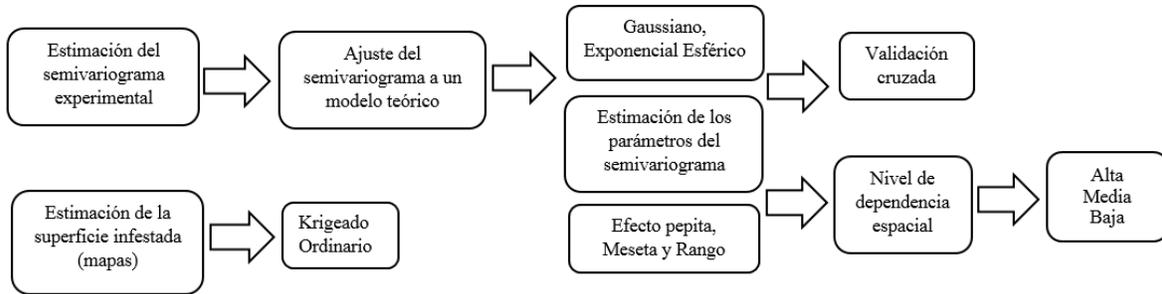


Figura 5. Diagrama del análisis geoestadístico.

La primera fase, *Análisis exploratorio de datos*, incluye el proceso de verificar la normalidad de los datos tomados en campo, y de ser necesario, aplicar pruebas de Curtosis para normalizarlos.

Una vez integradas las bases de datos, se lleva a cabo la fase del Análisis estructural, es decir, la creación del semivariograma experimental y su ajuste a modelos teóricos que permitan explicar la naturaleza del fenómeno estudiado; dichos modelos pueden ser Gaussianos, Exponenciales, Esféricos, Logarítmicos, de efecto agujero, etc.

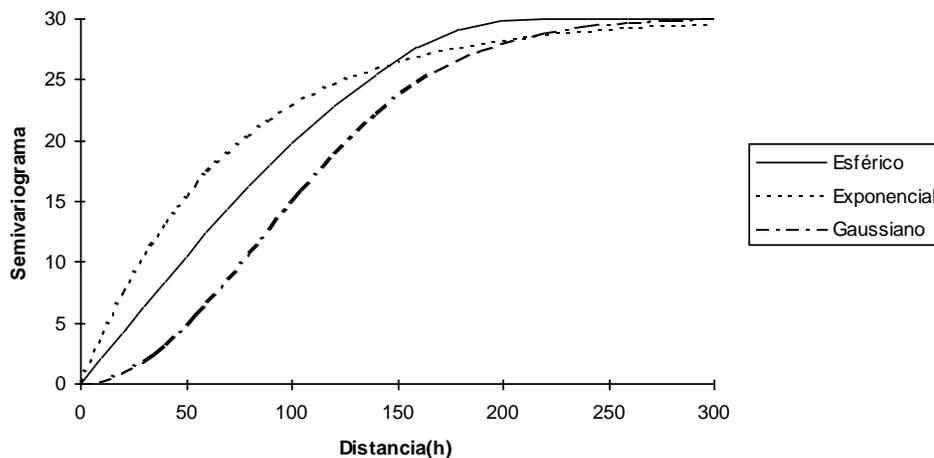


Figura 6. Modelos teóricos del semivariograma.

4.9.1.2 Estimación de los parámetros del modelo del semivariograma

Los semivariogramas teóricos no son más que funciones con una expresión analítica sencilla y que, por ello, se emplean frecuentemente para representar semivariogramas reales. Debe indicarse, sin embargo, que en general sus expresiones no se han deducido a partir de ninguna hipótesis especial, ni pretenden representar procesos específicos. En este sentido, los modelos teóricos de Semivariograma no son realmente teóricos y este apelativo debe entenderse como acuñado por la práctica y no como un calificativo estricto (Englund y Sparks, 1988).

Los modelos de semivariograma deben de cumplir ciertas condiciones:

- 1) De la definición de semivariograma se deduce que $\gamma(h)$ ha de ser idénticamente nulo en el origen.
- 2) $\gamma(h)$ es una función “condicionalmente negativa definida”, o bien, $-\gamma(h)$ es “condicionalmente positiva definida”.
- 3) Como consecuencia de la propiedad anterior, se puede demostrar que el semivariograma debe tener un ritmo de crecimiento inferior a h^2 (Journel y Huijbregts, 1978).

Cuando se habla de modelos de semivariograma, se refiere a una serie de funciones de las que se sabe que satisfacen las condiciones anteriores. Estas funciones son las utilizadas en la práctica para ajustar los semivariogramas experimentales, ya que estos últimos pueden no satisfacerlas y son más incómodos para trabajar con ellos. Los modelos teóricos más comunes son los presentados en la Figura 7.

4.9.1.3 Modelos teóricos del semivariograma

Modelo Gaussiano. También alcanza su meseta asintóticamente. Es utilizado cuando la distribución espacial es en agregados. Este modelo se emplea para representar fenómenos “suaves”, es decir, continuos en todos los puntos y derivables en la mayoría.

Modelo Esférico: Sus características, pues son el alcance y la meseta. Es uno de los más empleados en la práctica, cuando se presenta una distribución espacial en agregados. Se caracteriza porque alcanza la meseta para una distancia finita ($h=a$).

Es indicativo de fenómenos continuos (o con un conjunto a lo sumo numerable de discontinuidades), aunque no derivables. Es decir, fenómenos cuya representación puede presentar quiebros. Es decir, aparecen tanto fluctuaciones de pequeña amplitud, pero gran frecuencia como de amplitud grande y frecuencia baja. Respecto a estas últimas, cabe notar que las amplitudes máximas están relacionadas con el valor de la meseta, o mejor, con su raíz cuadrada. Análogamente el período máximo (inverso de la frecuencia) será tanto mayor cuanto mayor sea el alcance.

Modelo Exponencial: Este modelo es utilizado en casos de una distribución espacial en agregados. También, al igual que el modelo esférico, el semivariograma exponencial es representativo de fenómenos continuos salvo en un conjunto de puntos (en una dimensión), líneas (en dos dimensiones) o planos (en tres dimensiones).

4.9.1.4 Proceso de validación cruzada

Una vez que los semivariogramas experimentales fueron ajustados a alguno de los modelos descritos fue necesario validarlos. La validación de los diferentes modelos ajustados a los semivariogramas experimentales se realizó con el procedimiento denominado validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989).

Este método ha sido ampliamente utilizado para evaluar el grado de bondad de un modelo de semivariograma y reconocido como un método óptimo de estimación de sus parámetros. La operación de validar un semivariograma teórico ajustado a uno experimental siempre toma mucho tiempo, éste se considera como el último de los pasos importantes del análisis de variabilidad, debido a que una vez obtenido este

resultado será utilizado en la estimación por krigado en cualquiera de sus variantes.

Este proceso se efectúa sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumen mediante los denominados estadísticos de validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989; Hevesi *et al.*, 1992). Los parámetros del modelo a validar (C_0 , C y a) se van modificando en un procedimiento de prueba y error hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados.

Estos estadísticos son los siguientes:

- a) Media de los errores de estimación (MEE)
- b) Error cuadrático medio (ECM)
- c) Error cuadrático medio adimensional (ECMA)
- d) Además se debe cumplir que la varianza de los errores de estimación debe ser \leq que la varianza muestral (Samper y Carrera, 1996).

4.9.1.5 Nivel de dependencia espacial

De acuerdo con Cambardella *et al.* (1994), es importante establecer el nivel de dependencia espacial, con la finalidad de conocer el grado de relación entre los datos. Este valor se obtiene al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje el resultado. Si el resultado es menor de 25% el nivel de dependencia espacial es alta, 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.

4.9.1.6 Krigado

Krigado es como se le conoce a un sistema lineal de ecuaciones generado bajo distintas hipótesis. De manera breve, se mencionan dos tipos de krigado, sin

embargo, existen otros tipos que son utilizados de acuerdo a la naturaleza de cada estudio.

Krigeado Simple: Se utiliza cuando la variable es estacionaria con media y covarianza conocidas.

Krigeado Ordinario: Se utiliza cuando la variable es estacionaria con covarianza conocida y media desconocida.

4.9.2 Investigación estadística espacial en México

Se puede considerar que la estadística espacial, y propiamente, la Geoestadística son de uso reciente en México, a continuación, se presentan algunos estudios agronómicos relacionados:

En el año 2002, Ávila y colaboradores realizaron un trabajo sobre dinámica espacial y temporal de roña (*Sphaceloma perseae*), daño asociado a trips y antracnosis del aguacate en el estado de Michoacán, donde reportan que la antracnosis se presentó en las últimas etapas fenológicas del fruto utilizando estadística clásica para determinar la dinámica espacio-temporal; así mismo, en un segundo estudio, Ávila-Quezada et al. (2003) dieron continuidad a la investigación sobre dinámica espacial y temporal de la roña en un huerto de aguacate cv. Hass en este mismo sitio, utilizando índices de dispersión, autocorrelación espacial, y mapas geotopográficos y de isolíneas; sus resultados arrojaron correlación significativa en el segundo mes de evaluación, sin embargo, en los siguientes meses no se presentó autocorrelación significativa.

Por su parte, Guzmán et al. (2004) realizaron un estudio para determinar la distribución espacial de la pudrición Radical del Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) por *Fusarium solani* en la Vega de Metztlán, en el estado de Hidalgo, donde evaluaron la severidad del daño por el patógeno en la raíz principal y la severidad de pudriciones blandas en raíces laterales, crecimiento radical e intensidad de la nodulación.

Tannure y Mazza (2004) caracterizaron la distribución espacial de larvas de *Alabama argillacea* en el Departamento de Lavalle, provincia de Corrientes, usando técnicas geoestadísticas y estimaron la densidad de insectos en puntos del lote no muestreados. Los resultados de esta investigación permitieron efectuar recomendaciones de manejo del cultivo tendientes a minimizar el impacto de esta plaga en la producción agrícola algodonera.

4.9.3 Estudios geoestadísticos en el Estado de México

En el Estado de México se han realizado diversos estudios acerca de la distribución de distintas plagas que se presentan en varios cultivos, entre ellos, el aguacate. Utilizando la Geoestadística como herramienta, Ramírez y Porcayo (2010) llevaron a cabo un trabajo en el que se buscó establecer la existencia de una estabilidad espacial y temporal de las poblaciones del muérdago enano en el nevado de Toluca.

Higuera y Jasso (2011), realizaron un estudio sobre la distribución espacial del gusano soldado *Mythimna unipuncta*, asociado principalmente con el cultivo de maíz; con ayuda de la Geoestadística, se estimaron semivariogramas experimentales los cuales se ajustaron a un modelo teórico en el software Variowin 2.2, con lo que se determinó que los modelos gaussiano y esférico se presentaron en las localidades estudiadas; así mismo, para este estudio, se realizaron los mapas de agregación de la plaga logrando determinar las zonas de mayor incidencia y el patrón espacial, el cual fue agregado de acuerdo con los resultados obtenidos.

Ramírez *et al.* (2011) realizaron un estudio para determinar la estabilidad espacio temporal de la distribución espacial del Carbón de la Espiga del Maíz (*Sporisorium reilianum*) durante los años 2006 a 2009 en el municipio de Metepec, mencionan que el conocimiento de la distribución y estabilidad espacio temporal de una enfermedad es indispensable para la elaboración de programas de manejo integrado; en este estudio, los resultados arrojaron que la estadística clásica que fue aplicada no fue contundente en la determinación de la distribución espacial de

la enfermedad mientras que con la Geoestadística se logró establecer el tipo de la distribución espacial que presentó dicha enfermedad a través de los mapas generados.

Quiñones *et al.* (2016) llevaron a cabo el estudio geoestadístico sobre roya del gladiolo, donde atribuyen que esta enfermedad presentó una distribución espacial de tipo agregada en las diferentes etapas fenológicas, ajustándose a modelos gaussianos y exponenciales.

Recientemente, Maldonado *et al.* (2016) identificaron como se distribuyen las poblaciones de trips en Coatepec harinas utilizando Geoestadística, reportando que dichas poblaciones se distribuyen de manera agregada en las parcelas de aguacate Hass que fueron estudiadas, dichas poblaciones se ajustan a modelos esféricos en su mayoría. Además de esto, determinaron la superficie infestada por el insecto a través de los mapas de densidad.

De igual manera, Lara Díaz *et al.* 2018 publican un estudio cuyo aporte es sumamente significativo, al realizar el proceso geoestadístico de simulación condicionada y no condicionada para predecir el comportamiento espacial de la enfermedad causada por *Claviceps gigantea* (Diente de caballo) a través del tiempo en el cultivo de maíz en el Estado de México.

4.9.4 Análisis Espacial Por Índices de Distancia (SADIE)

Dentro de los nuevos desarrollos de la estadística espacial ha aparecido recientemente una nueva metodología llamada SADIE (Análisis Espacial por Índices de Distancia) que ha sido desarrollada por el Dr. Joe N. Perry del Dpto. de Entomología y Nematología de Rothamsted Experimental Station (Reino Unido). SADIE identifica el modelo espacial para datos bidimensionales, con un índice asociado de la agregación y de una prueba para la desviación de la aleatoriedad basada en un algoritmo de atracción, el cual incorpora un modelo biológico para la

dispersión de individuos de un origen en el que a cada individuo se le asigna un territorio dinámico (Perry, 1995b; Perry et al., 1996). Con este método se hace uso de los datos concernientes a cada muestreo y no hay restricción en la ubicación de las unidades muestrales.

SADIE es una herramienta para el análisis de datos espacialmente explícitos en una o dos dimensiones (ej. transectos y superficies) basada en índices de distancia. Aunque ha sido específicamente diseñada para el análisis de conteos (p. ej. Número de insectos por planta), SADIE puede utilizarse además con datos binarios y variables ordinales y continuas previamente categorizadas.

Entre las principales virtudes de SADIE se encuentran su simplicidad de uso para realizar todos los análisis, su sencilla base matemática, la utilización de pruebas estadísticas para evaluar la significación de los patrones espaciales observados y la posibilidad de representar visualmente los resultados obtenidos con su aplicación, lo que facilita enormemente su interpretación. Otras características de interés de SADIE son el hecho de que tiene en cuenta la localización espacial de los datos, éstos no necesitan seguir ninguna distribución determinada y los resultados obtenidos están condicionados únicamente por la heterogeneidad presente en los datos. Utilizando una serie de índices de distancia, SADIE permite caracterizar el patrón espacial de una variable dada dentro de la zona de estudio (distinguiendo fundamentalmente tres tipos de patrón espacial: agregado, regular o aleatorio) y estimar la contribución de cada punto de muestreo al patrón espacial global. SADIE también permite evaluar estadísticamente los patrones de asociación/disociación espacial de dos variables en la zona de estudio, siempre que los datos de ambas hayan sido tomados en las mismas coordenadas, y generar índices de asociación/disociación local para cada punto de muestreo que pueden ser representados gráficamente mediante mapas (Maestre y Quero, 2008)

Las técnicas del SADIE se desarrollaron específicamente para realizar análisis espaciales de datos de poblaciones ecológicas agregadas, especialmente de datos

recolectados en lugares con referencia espacial, los cuales tienen un patrón dinámico y desigual, donde frecuentemente hay una alta proporción de valores cero en el muestreo y la abundancia puede tener una estructura de covarianza no estacionaria (caso que no contempla la Geoestadística). Perry et al., (1999) han extendido estos métodos para proporcionar un índice de agregación para cada una de las unidades muestrales, para medir el grado en el cual contribuye cada observación por unidad de muestreo a la agregación total. Además, los grupos se identifican separadamente, ya sea como anexos o como apartados. Estas técnicas también han sido utilizadas para proporcionar índices y pruebas de asociación espacial (Perry, 1998).

El objetivo de SADIE es establecer el modelo espacial de una población muestreada midiendo la distancia a la cual pueden desplazarse los individuos de la muestra observada. Perry y Hewitt (1991) desarrollaron un índice que utilizaba los datos colectados dentro de una cuadrícula ya preestablecida antes del muestreo, determinando que era un índice biológicamente más descriptivo e informativo de la distribución espacial de las poblaciones de insectos que el índice de dispersión, el cual depende directamente de la abundancia de la población. Perry (1995a) indicó que para datos recolectados en ubicaciones específicas el uso de la distancia para la regularidad es muy adecuado.

El demostró cómo distinguir no aleatoriedad en la forma de heterogeneidad estadística, de la no aleatoriedad espacial. Perry (1995b) desarrolló y extendió el uso del índice de la distancia para la regularidad (I_a) para el establecimiento de la estructura espacial de las poblaciones de insectos. Además, introdujo dos diagramas de diagnóstico como ayuda a la interpretación y un índice nuevo para estimar el número de focos de agrupamiento de una población, el índice J_a . Además, señaló que la escala de muestreo es un determinante importante del patrón espacial total.

Alston (1996) corroboró que la distancia para la regularidad (D) proporciona bases más adecuadas para elaborar un índice, ya que el índice de agrupamiento desarrollado por Perry y Hewitt (1991) tiene serias limitaciones para detectar múltiples grupos, amontonamientos o parches.

5 JUSTIFICACIÓN

La agricultura en el Estado de México representa la actividad económica más importante, tanto de riego como de temporal siendo los principales cultivos: maíz, chícharo verde, cebada, frijol, papa, alfalfa, trigo y aguacate.

Ante la importancia de un cultivo tan rentable como el aguacate, surge la necesidad de buscar estrategias que faciliten su manejo, y permitan a los productores tomar mejores decisiones. Los problemas fitosanitarios que se presentan en el cultivo de aguacate son cada vez mayores, y por ello es que se necesitan metodologías que permitan controlar dichos problemas de manera eficaz y oportuna, siempre en beneficio del ambiente y del sector productivo.

Actualmente son pocos los estudios en el Estado de México acerca de cómo se distribuyen espacialmente las plagas y enfermedades en el cultivo de aguacate, pero particularmente, no existen estudios que permitan conocer el panorama espacial de la antracnosis, enfermedad causada *C. gloeosporioides* en este cultivo.

Por lo anterior, es importante llevar a cabo estudios que permitan conocer el comportamiento espacial de enfermedades como la antracnosis y, de esta manera, proponer estrategias de manejo integrado y faciliten la toma de decisiones acerca del cultivo, considerando que el focalizar las medidas de control sería una estrategia que disminuiría considerablemente el impacto en el ambiente y, al mismo tiempo, optimizaría el uso de recursos del sector productivo aguacatero en el Estado de México.

6 HIPÓTESIS

La antracnosis es una enfermedad causada por *Colletotrichum gloeosporioides*, que presenta un comportamiento espacial agregado y su incidencia puede controlarse a través de la actividad antagónica de organismos, en las zonas productoras de aguacate Hass en el Estado de México.

7 OBJETIVOS

Objetivo General

- Conocer el comportamiento espacial de la antracnosis y proponer una alternativa de control biológico en cuatro municipios productores de aguacate Hass en el Estado de México.

Objetivos específicos

- Determinar la incidencia de la antracnosis en cuatro municipios productores de aguacate.
- Elaborar mapas de incidencia de la enfermedad de las zonas de estudio.
- Realizar la valoración in vitro de la actividad antagonista con *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum*.

8 METODOLOGÍA (MATERIALES Y MÉTODOS)

8.1 Zona de estudio

Para este trabajo se seleccionaron cuatro zonas de estudio en el Estado de México, el cual se encuentra ubicado geográficamente en el centro del país, formando parte del Eje Neo volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur, además, representa el 1.14% de la superficie total del territorio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

Los municipios seleccionados para este trabajo fueron Coatepec Harinas (021), Temascaltepec, Tenancingo y Donato Guerra (032), sitios donde se concentra la mayor producción aguacatera en el estado.

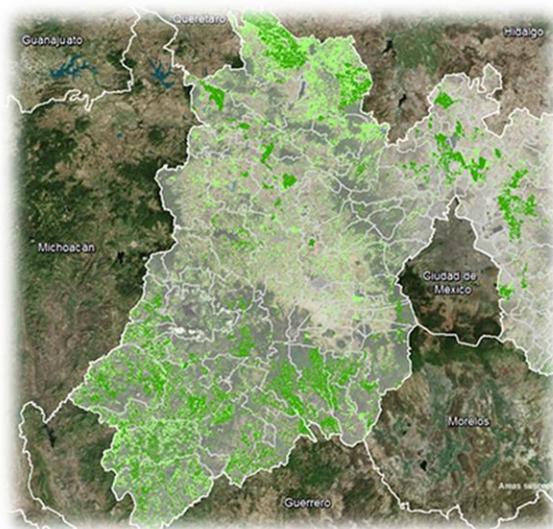


Figura 7. Macro localización de la zona de estudio.

8.1.1 Coatepec Harinas

Coatepec Harinas es un municipio ubicado en la falda sur del volcán Xinantécatl; a 35 kilómetros al sur de la ciudad de Toluca; 27 kilómetros al poniente de la ciudad

de Tenancingo; 18 kilómetros al oriente de Texcaltitlán y 20 kilómetros al norte del municipio de Pilcaya, Gro. Se encuentra ubicado geográficamente entre los paralelos 18° 48' y 19° 05' de latitud norte y los meridianos 99° 43' y 99° 54', encontrando altitudes que varían desde 1,600 hasta 3,900 msnm; en este municipio predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (CW); su temperatura máxima es de 29°C y la mínima de 2°C. El tipo de suelo predominante en esta zona es Andosol, seguido de Luvisol, Phaeozem, Vertisol, y Leptosol (INEGI, 2009)

8.1.2 Tenancingo

La ciudad de Tenancingo de Degollado es la cabecera municipal del municipio de Tenancingo; ésta se encuentra entre los 18° 57' 5" y 19° 02' 25" la latitud norte y entre los 98° 35' 45" y 99° 38' 37" de longitud oeste, con relación al meridiano de Greenwich.

La temperatura en esta zona va desde los 12 hasta los 22 °C, con una precipitación 1 000 – 1 00 mm y un clima templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (94.19%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (4.82%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano de humedad media (0.99%). Los tipos de suelo que se presentan en esta zona son Andosol, Vertisol, Cambisol, Phaeozem y Leptosol (INEGI, 2009).

8.1.3 Donato Guerra

Donato Guerra está ubicado en las siguientes coordenadas del meridiano de Greenwich: máxima 19°24'07" de latitud norte y 100°19'13"de longitud oeste; mínima 19°14'11" de latitud norte y 100°03'17" de longitud oeste. 8 – 20°C, precipitación 1 000 – 1 200 mm, domina clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor

humedad y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (INEGI, 2009).

8.1.4 Temascaltepec

Temascaltepec se localiza al sur del Estado de México, ligeramente hacia el sudeste de Toluca, en las coordenadas geográficas 100°02' longitud oeste y 19°03' de latitud norte. A una altura de 1,740 metros sobre el nivel del mar. Los tipos de suelo predominante en esta zona son Andosol (46.45%), Cambisol, Phaeozem, Luvisol, Vertisol, Leptosol y Regosol.

La temperatura en esta región oscila entre 12 – 16°C, con una precipitación anual 700 – 900 mm y con climas templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad y cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (INEGI, 2009).

8.2 Trabajo de gabinete

Se llevó a cabo una revisión documental sobre el cultivo de aguacate, su origen, distribución, domesticación, fenología, manejo, etc., así como de *C. gloeosporioides*, su ciclo biológico, dispersión y control. Además, también se revisaron artículos científicos relacionados con estadística espacial y particularmente, Geoestadística, con el fin de comprender el concepto teórico de la herramienta y sus alcances.

8.3 Trabajo de campo

El estudio se llevó a cabo en cuatro municipios productores de aguacate en el Estado de México: Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenancingo y Donato Guerra. En cada zona fueron muestreados 200 árboles de aguacate cv. Hass

distribuidos aleatoriamente en el total de la superficie de cada municipio, se verificó que el manejo agronómico del cultivo en las zonas muestreadas fuera llevado de forma similar, en las cuales se identificó la presencia de antracnosis (*C. gloeosporioides*).

Los muestreos se realizaron cada 14 días, revisando los 400 árboles en cada municipio, cuya edad osciló entre los siete y 10 años, a partir de enero hasta diciembre de 2020 y 2021. Dichos arboles fueron etiquetados y georeferenciados espacialmente mediante un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), y se identificaron colocándoles una banda plástica de color verde en la base.

Así mismo, se llevó a cabo identificación visual de la presencia de *C. gloeosporioides* y de síntomas característicos de antracnosis en cada uno de estos árboles; posteriormente se seleccionaron cuatro ramas y cuatro frutos por estrato (alto, medio y bajo, 12 frutos en total por cada árbol), distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales en cada árbol, esto con el objetivo de contabilizar el número de frutos enfermos por árbol (incidencia).

8.4 Análisis de Laboratorio

8.4.1 Medio de cultivo PDA

Las siglas PDA (Potato Dextrose Agar, PDA, por sus siglas en inglés) corresponden a los componentes del medio: papa, dextrosa y agar. Este medio se usa para aislar el patógeno. Los insumos para preparar este medio de cultivo son: PDA deshidratado 39 g/litro, agua destilada estéril 1 litro, frascos Erlenmeyer de 1000 ml y cajas Petri. Se pesaron los ingredientes, se colocaron en un vaso de precipitados, y se les agregó el agua; esta solución se envasó en dos frascos Erlenmeyer (500 ml en cada uno). Los frascos Erlenmeyer con el medio de cultivo PDA se esterilizaron en autoclave.

8.4.2 Aislamiento e identificación de las cepas de *Colletotrichum gloeosporioides*.

Se tomaron muestras de aguacates en 16 colectas durante el periodo de muestreo con los síntomas de antracnosis de cada zona de estudio para aislar a *C. gloeosporioides*, con el fin de corroborar a dicho agente causal a través de la inoculación de la cepa en medio de cultivo PDA (papa dextrosa agar).

Los frutos recolectados se colocaron en cámaras húmedas, y fueron colocadas en una incubadora a una temperatura de 25° C, posteriormente, se realizaron los aislamientos a través de cortes de secciones de tejido sano y enfermo de aproximadamente 0.5 cm; desinfección en etanol al 70% por 1 min y en hipoclorito de sodio al 1% por 2 min; enjuague de 1 min en agua destilada esterilizada; secado en papel toalla estéril; siembra de cinco porciones de tejido por caja Petri con medio PDA (papa 200 gr/l, dextrosa 20gr/l y agar 18 gr/l), e incubación a temperatura ambiente (+/-24°C) y luz continua.

Los cultivos se evaluaron cada dos días hasta observar el desarrollo de las colonias. Estas últimas se identificaron de forma preliminar como pertenecientes al género *Colletotrichum* spp., mediante observación al microscopio de estructuras reproductivas tales como acérvulos, masas de esporas, presencia o ausencia del estado sexual y presencia o no de setas (aumento de 100X).

La caracterización morfológica se realizó por medio de un análisis cualitativo de diferentes variables determinadas para estructuras reproductivas del hongo y características de crecimiento. El reaislamiento en el medio seleccionado se realizó a partir de cultivos de 10 días de edad, crecidos en medio PDA e incubados a 22°C. De cada aislamiento se extrajo un disco de 5 mm de diámetro con agar y micelio que se dispuso en el centro de una caja de Petri con medio PDA.

La identificación morfológica se realizó con ayuda de la clave propuesta por Barnett y Hunter (1998) y por Sutton (1992).

8.4.2.1 Incidencia

Se midió la incidencia en los frutos de árboles de aguacate que presentaron sintomatología de antracnosis, una vez contabilizados el número de frutos enfermos por árbol, se aplicó la siguiente fórmula:

Número de frutos enfermos/total de frutos X 100.

8.4.3 Evaluación de la capacidad antagonica de *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum*

8.4.3.1 Evaluación de crecimiento de la colonia

Se evaluó la curva y tasa de crecimiento de cada una de las colonias de los diferentes cultivos monospóricos de *C. gloeosporioides*, realizando lecturas cada 24 horas durante 8 días. La tasa de crecimiento diario se obtuvo mediante el uso de la fórmula (Maldonado *et al.*, 2019):

$$T S = \frac{\text{Diámetro Final} - \text{Diámetro Inicial}}{\text{Total de Días Evaluados}}$$

8.4.3.2 Renovación del cultivo monospórico

Los cultivos de *C. gloeosporioides* fueron reaislados cada 15 días a un nuevo medio de PDA con el fin de evitar su envejecimiento y reservarlos hasta su uso. Se seleccionaron cuatro aislamientos de cada cepa para realizar los experimentos de antagonismo.

8.4.3.3 Ensayo de antagonismo

El ensayo de antagonismo se realizó en medio de cultivo PDA en placas de Petri utilizando el método de confrontación directa propuesto por Aquino *et al.* (2008). Se obtuvieron discos miceliales (5 mm de diámetro) de cultivos de los antagonistas *T. harzianum* cepas T-22 y T39, *B. subtilis*, cepas 07 biokrone y SP83 y patógenos (*C. gloeosporioides*) después de 5 días de incubación a 25 ° C. C ± 2 ° C en condiciones de oscuridad, los pares de antagonistas y patógenos se colocaron a 6 cm de distancia en la misma placa de Petri. Es importante mencionar que también se evaluó la capacidad controladora del fungicida Promyl.

Posteriormente, se midieron las respuestas de antagonismo: invasión de la colonia del patógeno por el antagonista, antagonismo mutuo, detención del crecimiento de la colonia del patógeno, el crecimiento radial (RG) y finalmente, la eficiencia del biocontrol de los hongos después de 8 a 10 días de incubación a 25 ° C ± 2 ° C en condiciones de oscuridad.

La eficiencia de biocontrol se obtuvo con la fórmula adaptada (Aquino *et al.*, 2008):

$$\text{CRA-CRP/CRA X100}$$

Donde:

CRA= Crecimiento radial del antagonista y CRP= Crecimiento radial del patógeno

Se realizaron pruebas de confrontación dual para cada microorganismo antagonista y para el fungicida químico con cada hongo patógeno. El medio PDA inoculado solo con los patógenos de prueba sirvió como testigo para determinar la capacidad de crecimiento de los hongos patógenos. De ésta manera se tuvieron 24 tratamientos con tres repeticiones.

8.5 Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada uno de los ensayos se sometieron a un análisis factorial con cuatro repeticiones y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), con el paquete estadístico Minitab 19.

8.6 Análisis Geoestadístico

Con los datos obtenidos de la población de antracnosis en los muestreos realizados se estimó el semivariograma experimental (Isaaks y Srivastava, 1989) mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

Donde

Dónde: $\gamma^*(h)$ = valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h ; $N(h)$ = número de pares de puntos muestrales separados por el intervalo de distancia h ; $z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto muestreo x_i , y $z(x_i+h)$ = valor de la variable de interés en el punto muestral x_i+h . Los semivariogramas experimentales se obtendrán con el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New York. USA.). Una vez obtenido el semivariograma experimental, se realizó su ajuste a un semivariograma teórico (Englund y Sparks, 1988) utilizando el programa Variowin 2.2 para determinar los valores de la meseta, rango o alcance y el efecto pepita.

8.6.1 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 (Cambardella *et al.*, 1994; Rivera, 2016).

8.6.2 Validación

La validación de los diferentes modelos ajustados a los semivariogramas experimentales se realizó con el procedimiento denominado “validación cruzada”

(Isaaks y Srivastava, 1989). Con este procedimiento no paramétrico, se elimina un valor muestral y se emplea el método de interpolación geoestadístico denominado krigado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral, a partir de los restantes valores muestrales. Los parámetros del modelo a validar (C_0 , C y a), se van modificando en un procedimiento de prueba y error hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados.

8.6.3 Mapas de densidad y superficie infectada

Para la elaboración de mapas se realizó la interpolación de valores mediante el krigado 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 infectada para cada muestreo, sobre la base de lo propuesto por Samper y Carrera.

9 RESULTADOS

Como resultados importantes de esta investigación se elaboraron cinco artículos científicos y una nota científica, los cuales fueron enviados a revistas indexadas nacionales e internacionales que se encuentran dentro del catálogo de Journal Citation Reports y CONACyT. El primer artículo fue enviado a la revista Investigación Agraria, mismo que ya se encuentra publicado, el segundo artículo fue enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas al igual que la Nota científica. Finalmente, se envió un tercer artículo a la revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios y un cuarto artículo a la revista Investigación Agropecuaria. A continuación, se anexan los artículos correspondientes y sus evidencias de envío correspondientes.

Determinación del comportamiento espacial de antracnosis en el cultivo de aguacate utilizando estadística espacial

Determination of the spatial behavior of anthracnose in avocado cultivation using spatial statistics

Atenas Tapia Rodríguez¹ , José Francisco Ramírez Dávila^{2*} , Jesús Gaudencio Aquino Martínez², Martín Rubí Arriaga²  y Alfredo Ruíz Orta³ 

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Toluca, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Campus el Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México.

³ Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Tlaxiaco, Carretera Tlaxiaco-Villa Guerrero, km 1.5 Tlaxiaco, Estado de México, México.

*Autor para correspondencia:

jframirez@uaem.mx

Conflicto de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Contribución de autoría:

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales en la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de datos, a la revisión del manuscrito y la aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Historial:

Recibido: 08/12/2020

Aceptado: 09/08/2021

Período de Publicación:

Julio-Diciembre de 2021

RESUMEN

La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en el cultivo de aguacate de manera recurrente, generando pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México. Para focalizar las medidas de control, resulta importante conocer la distribución espacial y la dinámica que siguen las enfermedades como la antracnosis a través de métodos geostatísticos. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate Hass en Coatepec Harinas y Tenancingo, dos municipios productores del Estado de México. Se muestrearon cuatro hectáreas, estableciendo 40 cuadrantes en cada una, y en cada una de ellas, 10 árboles de aguacate cultivar Hass de 10 años fueron georeferenciados con un DGPS y utilizados para medir la incidencia de síntomas de antracnosis en 12 frutos. Los datos fueron analizados con el software Variowin 2.2 y los mapas generados con el programa Surfer 16. Los mapas elaborados muestran centros de agregación, y los semivariogramas sugieren una distribución ajustada en su mayoría a modelos de tipo gaussiano y exponencial; con rangos que fluctúan entre los 12 y los 56 metros, 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. El índice de distancia para la regularidad la corroboró la existencia de focos de agregación en todos los muestreos, al igual que los valores obtenidos del índice de agrupamiento Ja.

Palabras clave: *Colletotrichum gloeosporioides*, kriging ordinario, agregación, aguacate

ABSTRACT

Anthracnose is a fungal disease that is present in avocado crops on a recurring basis, generating significant economic losses for the productive sector of the State of Mexico. To focus control measures, it is important to know the spatial distribution and dynamics that diseases such as anthracnose follow through geostatistical methods. 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. Four hectares were sampled, establishing 40 quadrants in each one, and in each one of them, 10 10-year-old Hass avocado trees were georeferenced with a DGPS and used to measure the incidence of anthracnose symptoms in 12 fruits. The data were analyzed with the Variowin 2.2 software and the maps generated with the Surfer 16 program. The maps produced show aggregation centers, and the semivariograms suggest a distribution fitted mostly to Gaussian and exponential models; with ranges fluctuate between 12 and 56 meters, indicating an association between the data; the highest percentage of infected surface was 99% for the first sampling in April, while for the first sampling in November, the highest percentage was 98% in both municipalities. The distance index for the regularity Ia corroborated the existence of aggregation foci in all samplings, as well as the values obtained from the clustering index Ja.

Key words: *Colletotrichum gloeosporioides*, Kriging, aggregation, avocado

INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* L.) se ha convertido en un sistema agrícola eficiente en México durante los últimos años, aportando alrededor del 50% de la producción mundial (Food and Agriculture

Organization [FAO], 2020); no obstante, enfermedades como la antracnosis y la roña son reportadas por Trinidad Angel et al. (2017) y Alfaro Espino, Morales García y Pedraza-Santos (2017), argumentando que los daños ocasionados por éstas, generan pérdidas económicas de hasta el 40%.

La antracnosis es una enfermedad fúngica provocada por hongos del complejo *Colletotrichum*, siendo *Colletotrichum gloeosporioides* el responsable de ésta enfermedad en todos los municipios del Estado de México donde se cultiva aguacate. De acuerdo con Morales-García (1996) y Lemus-Soriano y Pérez Aguilar (2017), la incidencia de esta enfermedad oscila entre 42 a 74%, siendo una de las más importantes reportadas para este cultivo causando daños que dificultan su comercialización en mercados internacionales.

Considerando lo anterior, diversos estudios se han enfocado en conocer y analizar la distribución espacial de los organismos fitopatógenos a través de índices de dispersión y distribuciones estadísticas normales como los realizados por Vivas y Notz (2011) quienes determinaron la distribución espacial de *Oribalus insularis* en campos de arroz empleando el índice de Morisita la ley de potencia de Taylor, el índice de Iwao y el modelo matemático de la binomial negativa.

Sin embargo, la geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE, por sus siglas en inglés, Spatial Analysis by Distance Indices) son metodologías que han demostrado ser de gran ayuda para el manejo de las plagas y enfermedades agrícolas, sobre todo en cultivos como el aguacate, cacao, mango, maíz, gladiolo, papa, entre otros (Rivera Martínez, Ramírez Dávila y Acosta Guadarrama, 2018). Además de ser también métodos utilizados en estudios ecológicos como el de Martínez-Martínez, N., Ramírez-Dávila, Lara-Vázquez & Figueroa-Figueroa (2021) quienes utilizaron el Análisis Espacial por Índices de Distancia para determinar la distribución espacial del muérdago enano en *Pinus pseudostrubus* de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.

Es importante destacar que las metodologías empleadas para el análisis espacial de las enfermedades agrícolas, han ganado relevancia durante los últimos años, debido a la exactitud de éstas para la obtención de datos espaciales que facilitan la toma de decisiones eficientes y oportunas, brindando certeza acerca de la exacta distribución de una enfermedad en los cultivos (Valbuena-García y Rodríguez-Villamizar, 2018).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio consistió en analizar el comportamiento espacial de la enfermedad conocida como antracnosis del aguacate en los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo, en el Estado de México, México, a través del empleo de la geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en el Estado de México, propiamente en los municipios de, Coatepec Harinas (18°54'00"N 99°43'00"O) y Tenancingo (18°57'38"N 99°34'32"O) durante los meses de julio de 2019 a junio de 2020; estos municipios fueron seleccionados debido a que son productores de aguacate en la entidad y porque cuentan con grandes superficies sembradas con este cultivo, por su parte, Coatepec Harinas alberga un total de 2,155 ha, mientras que Tenancingo cuenta con un total de 884 ha sembradas con aguacate (Figueroa-Figueroa, Dávila, Antonio-Némiga y Huerta (2020).

Trabajo de campo

Distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales de cada municipio, se seleccionaron, georreferenciaron, a través de un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), 400 árboles de aguacate cultivar Hass para medir la incidencia de antracnosis en los frutos, tomando en cuenta síntomas como manchas necróticas de tonos marrones, hundidas y con masas de esporas de color rosado. Cada árbol fue dividido en tres estratos, alto, medio y bajo, considerando cuatro ramas en cada estrato distribuidas nuevamente hacia los cuatro puntos cardinales; de cada rama se observaron cuatro frutos, teniendo un total de 48 frutos por árbol para análisis de incidencia, haciendo uso de la escala propuesta por Morales et al. (2009).

Análisis geoestadístico

Para el procesamiento geoestadístico de los datos obtenidos en cada muestreo se utilizó el software Variowin 2.0 (Software para el análisis de datos espaciales en 2D. Primavera Verlag, New York; EEUU), a través de éste se estimaron semivariogramas experimentales, mismos que fueron ajustados a modelos teóricos, los cuales comúnmente suelen ser esféricos, gaussianos y exponenciales. Así mismo, se determinaron los parámetros de meseta, rango y efecto pepita, mismos que se van modificando hasta obtener estadísticos de validación cruzada idóneos para aprobar matemáticamente los modelos ajustados. Los indicadores fueron los siguientes:

- Media de los errores: este valor no debe ser significativamente distinto de 0 (Prueba de t), en cuyo caso, indicaría que el modelo de semivariograma permite un cálculo de estimación no sesgada.
- Error cuadrático medio (ECM): un modelo de semivariograma se considera adecuado si el valor del estadístico es cercano a cero.
- Error cuadrático medio adimensional (ECMA): la validez del modelo se satisface si ECMA está comprendido entre los valores $1 \pm 2(2/N)$ 0,5.

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE)

El Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), es una metodología complementaria que se empleó en este trabajo para determinar el modelo de distribución espacial de la antracnosis, y se basa principalmente en determinar la distancia para la regularidad (índice I_a), así como la distancia del agrupamiento (índice J_a).

La estimación de los índices I_a y J_a se desarrolló con los datos recolectados en una cuadrícula prediseñada, los cuales se asumen como un sistema de conteo de individuos, donde $n_i = 1, \dots, n$ unidades de muestreo. Se asume además por ser conocida la posición bidimensional (x, y) de cada unidad de muestreo y su conteo asociado, N_i .

La distancia para la regularidad, D , representa el valor mínimo de la distancia total que los individuos en la muestra se pudieron desplazar de una unidad de muestreo a otra, de modo que todas las unidades de muestreo contuvieran un número idéntico de individuos (Sánchez-Pale, Ramírez-Dávila, González-Huerta y de León, 2015).

En la metodología de SADIE se asume que una muestra será agregada si $I_a > 1$, en cambio, la



muestra es espacialmente aleatoria si $I_a = 1$, y finalmente, una muestra regular si $I_a < 1$. El término C denota la distancia para el agrupamiento, que es el valor mínimo de la distancia total que los individuos de la muestra deben moverse para congregarse en una unidad (Sánchez-Pale et al., 2015).

Permutaciones aleatorias de los conteos observados conducen a una proporción denominada Q_a (probabilidad de agrupamiento), con una distancia para el agrupamiento tan pequeña, o más pequeña que el valor observado, C . Como en el caso del índice I_a , valores de $J_a > 1$ usualmente indican una muestra agregada, $J_a = 1$ representan datos espacialmente aleatorios, y $J_a < 1$ muestras regulares (Perry y Klukowsky, 1997).

Nivel de dependencia espacial

La determinación del nivel de dependencia espacial se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta, cuyo resultado es 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 (Rivera Martínez, Ramírez Dávila, Martínez Quiroz y González Huerta, 2020).

Mapeo por kriging y Superficie infectada

Después del ajuste de los semivariogramas, se llevó a cabo la interpolación de datos mediante kriging ordinario para permitir la visualización de los patrones de distribución espacial de la enfermedad a lo largo del tiempo; las estimaciones derivadas se representaron en forma de mapas para cada muestreo de árboles enfermos mediante el uso del programa Surfer 16 (Surface Mapping System Golden Software Inc. 809, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para brindar una mayor claridad de los resultados obtenidos con cada uno de los métodos, se presentan de manera separada y a continuación se detallan con precisión:

Análisis geoestadístico

En este trabajo se realizaron un total de 48 muestreos en los municipios de Tenancingo y Coatepec Harinas, en el Estado de México, por lo tanto, se obtuvieron 48 mapas de incidencia y 48 semivariogramas ajustados a modelos teóricos. Los modelos y parámetros de los semivariogramas ajustados para cada zona experimental donde se muestreo antracnosis se detallan en la Tablas 1.

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.

De igual manera, en el municipio de Tenancingo se presentó una tendencia de la enfermedad representada a través de modelos de tipo gaussiano nuevamente, aunque no se descartó el ajuste a modelos de tipo exponencial, por lo que se atribuye que un comportamiento esférico no es frecuente para esta enfermedad dentro de las zonas de muestreo. El ajuste al modelo gaussiano indica que el comportamiento de agregación de la antracnosis

se expresa de forma continua dentro de la zona estudiada (Rivera et al. 2020).

Por otro lado, los valores de rango fluctuaron entre 1,02 como mínimo y 56,7 como máximo para Coatepec Harinas, este último valor asociado a un modelo gaussiano; mientras que, 12 como mínimo y 41 como máximo fueron los valores de rango para Tenancingo. Esta distancia señala hasta donde existía dependencia espacial de los datos muestreados, más allá del valor máximo de la distancia, la dependencia espacial era nula.

Resulta importante señalar que la distancia máxima encontrada de 56,7 es considerable, debido al tamaño del área de estudio. Lo anterior establece entonces que, presentar rangos mayores indica una mayor aplicación del modelo establecido; por lo tanto, más allá del valor en distancia del rango obtenido, la dependencia espacial es nula (Zamora, Dávila, Arriaga, Némiga y Díaz, 2016).

Los valores de meseta, más bajos en Coatepec Harinas estuvieron asociados en su mayoría a modelos de tipo exponencial y esférico, mientras que los más altos, los presentaron modelos gaussianos y dos modelos esféricos. En el caso de Tenancingo, ocurrió que el valor más alto para este parámetro se asocia más a modelos exponenciales, los cuales presentaron los valores más altos.

En la misma Tabla 1 se observa que en lo que concierne al efecto pepita, para todas las fechas de muestreo fue de cero, lo que indica que la escala de muestreo fue la apropiada para el monitoreo de la antracnosis, coincidiendo ampliamente con lo que mencionan Oliver y Webster (1998) quienes sugieren que una pepita de cero no solo demuestra que el error de muestreo fue mínimo, también indica que los modelos ajustados tienen un 98% de confiabilidad.

Análisis Espacial por Índices de Distancia

Por otro lado, el Análisis Espacial por Índices de Distancia muestra que I_a fue mayor para todos los muestreos en Coatepec Harinas, siendo 1,66 el valor mayor asociado al segundo muestreo del mes de agosto (Tabla 2).

Para Tenancingo, el mayor valor fue de 1,65 asociado al primer muestreo de abril (Tabla 2). Con esto, se indica que existe agregación de la antracnosis en las zonas de muestreo. Los valores asociados al índice J_a confirman esta agregación detectada por el índice I_a , ya que indica también la cantidad de centros de agregación en las superficies de muestreo de la antracnosis. Rivera et al. (2018) mencionan que cuando se obtienen los valores que no son significativamente diferentes a la unidad, los resultados de las poblaciones de la variable se distribuyen en la zona de muestreo en más de un centro de agregación. Se puede observar que en todos los casos el índice I_a fue significativamente mayor a 1, lo que nos indica una agregación. El índice J_a en todas las zonas donde se muestreo antracnosis no fue significativamente mayor a 1, lo que nos indica que hay más de un foco de agregación.

Tabla 1. 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.

COATEPEC HARINAS								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.
AGO 1	10,89	53,80	EXPO	0	30,45	35,1	0	ALTA
AGOSTO 2	12,36	61,88	ESERICO	0	59,94	43,2	0	ALTA
SEPT 1	12,89	66,42	ESPER	0	3,29	45,9	0	ALTA
SEPT2	9,89	36,95	EXPO	0	54,27	56,7	0	ALTA
OCTUBRE 1	11,05	55,59	EXPO	0	1,67	23	0	ALTA
OCTUBRE 2	10,70	45,65	EXPO	0	2,82	43,2	0	ALTA
NOV1	3,81	9,69	EXPO	0	1,02	27	0	ALTA
NOV 2	10,73	36,77	EXPO	0	3,01	37,8	0	ALTA
DIC1	10,60	31,71	GAUSS	0	2,13	29,9	0	ALTA
DIC2	9,97	34,75	GAUSS	0	3,39	35,1	0	ALTA
ENERO 1	1,50	2,27	ESPER	0	48,18	40,5	0	ALTA
ENERO 2	1,68	1,41	GAUSS	0	34,78	45,9	0	ALTA
FEBRERO 1	2,50	2,04	GAUSS	0	6,79	45,9	0	ALTA
FEBRERO 2	2,08	4,00	GAUSS	0	34,76	29,7	0	ALTA
MARZO 1	1,61	1,13	GAUSS	0	2,088	22,4	0	ALTA
MARZO 2	2,80	2,14	ESPER	0	1,14	52,2	0	ALTA
ABRIL 1	2,77	2,21	GAUSS	0	59,11	41,4	0	ALTA
ABRIL 2	4,73	21,09	GAUSS	0	55,44	43,2	0	ALTA
MAYO 2	3,93	3,49	GAUSS	0	64,02	43,7	0	ALTA
MAYO 2	6,68	31,00	EXPO	0	35,22	23	0	ALTA
JUNO 1	9,42	43,54	GAUSS	0	2,139	32,2	0	ALTA
JUNO 2	12,85	80,73	GAUSS	0	48,06	39,1	0	ALTA
JULIO 1	12,53	65,72	ESPER	0	44,02	34,5	0	ALTA
JULIO 2	12,52	65,72	EXPO	0	29,12	27	0	ALTA
TENANCINGO								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.
AGOSTO 1	19,86	119,15	GAUSS	0	96,4	26,4	0	ALTA
AGOSTO 2	20,29	116,16	GAUSS	0	100,8	18	0	ALTA
SEPT 1	22,39	154,47	ESPER	0	173	37,79	0	ALTA
SEPT 2	22,25	180,62	EXPO	0	171	32,4	0	ALTA
OCTUBRE 1	20,10	136,36	GAUSS	0	131,6	20	0	ALTA
OCTUBRE 2	18,85	109,73	EXPO	0	106,7	24	0	ALTA
NOV 1	14,43	80,93	EXPO	0	72,9	14	0	ALTA
NOV 2	14,19	59,04	EXPO	0	54	18	0	ALTA
DIC 1	10,11	36,32	GAUSS	0	53,4	16	0	ALTA
DIC 2	8,89	31,05	EXPO	0	109,2	39,6	0	ALTA
ENERO 1	2,23	1,88	ESPER	0	1,76	35,99	0	ALTA
ENERO 2	1,82	1,49	GAUSS	0	1,455	33,6	0	ALTA
FEBRERO 1	2,56	1,92	EXPO	0	1,78	28,8	0	ALTA
FEBRERO 2	2,22	1,61	EXPO	0	1,41	28,8	0	ALTA
MARZO 1	2,97	3,55	GAUSS	0	3,24	41,4	0	ALTA
MARZO 2	3,02	2,36	GAUSS	0	1,23	32,4	0	ALTA
ABRIL 1	2,81	2,06	ESPER	0	1,32	39,6	0	ALTA
ABRIL 2	2,86	3,63	GAUSS	0	1,2	32	0	ALTA
MAYO	3,42	1,54	EXPO	0	1,2	37,8	0	ALTA
MAYO 1	5,85	28,40	EXPO	0	23,78	30,6	0	ALTA
JUNO 1	13,34	69,68	EXPO	0	63,7	34,2	0	ALTA
JUNO 2	15,52	85,96	GAUSS	0	63,7	32,4	0	ALTA
JULIO 1	15,31	96,45	EXPO	0	85,56	12	0	ALTA
JULIO 2	17,84	91,74	GAUSS	0	86,48	16	0	ALTA

Tabla 2. Valor de los índices Ia y Ja y sus respectivas probabilidades Pa y Qa en la incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1,39	0,009s	1,16	0,266
	2	1,48	0,016s	1,11	0,150
AGOSTO	1	1,29	0,011s	1,06	0,158
	2	1,66	0,012s	1,26	0,252
SEPTIEMBRE	1	1,43	0,006s	1,18	0,166
	2	1,37	0,012s	1,15	0,144
OCTUBRE	1	1,51	0,010s	1,13	0,184
	2	1,47	0,013s	1,22	0,550
NOVIEMBRE	1	1,40	0,008s	1,07	0,206
	2	1,57	0,011s	1,25	0,142
DICIEMBRE	1	1,30	0,015s	1,20	0,219
	2	1,60	0,007s	1,17	0,178
ENERO	1	1,34	0,007s	1,14	0,197
	2	1,63	0,016s	1,24	0,153
FEBRERO	1	1,49	0,015s	1,09	0,241
	2	1,52	0,013s	1,11	0,222
MARZO	1	1,62	0,011s	1,21	0,213
	2	1,28	0,014s	1,10	0,160
ABRIL	1	1,46	0,011s	1,14	0,252
	2	1,41	0,012s	1,12	0,173
MAYO	1	1,54	0,014s	1,15	0,149
	2	1,32	0,010s	1,19	0,247
JUNIO	1	1,58	0,014s	1,23	0,235
	2	1,44	0,011s	1,08	0,192
TENANCINGO					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1,46	0,010s	1,17	0,256ms
	2	1,56	0,013s	1,10	0,167ms
AGOSTO	1	1,44	0,015s	1,25	0,159ms
	2	1,52	0,010s	1,11	0,135ms
SEPTIEMBRE	1	1,30	0,017s	1,19	0,215ms
	2	1,37	0,014s	1,16	0,144ms
OCTUBRE	1	1,60	0,006s	1,06	0,201ms
	2	1,49	0,007s	1,21	0,154ms
NOVIEMBRE	1	1,50	0,011s	1,13	0,235ms
	2	1,39	0,013s	1,15	0,170ms
DICIEMBRE	1	1,41	0,010s	1,18	0,189ms
	2	1,38	0,014s	1,09	0,149ms
ENERO	1	1,63	0,012s	1,11	0,241ms
	2	1,35	0,011s	1,12	0,162ms
FEBRERO	1	1,40	0,009s	1,20	0,183ms
	2	1,51	0,010s	1,13	0,222ms
MARZO	1	1,49	0,011s	1,15	0,239ms
	2	1,62	0,016	1,20	0,151ms
ABRIL	1	1,65	0,008s	1,07	0,228ms
	2	1,58	0,007s	1,14	0,195ms
MAYO	1	1,54	0,012s	1,08	0,173ms
	2	1,42	0,013s	1,14	0,244ms
JUNIO	1	1,31	0,008s	1,23	0,166ms
	2	1,64	0,010s	1,08	0,248ms
JULIO	1	1,46	0,010s	1,17	0,256ms
	2	1,56	0,013s	1,10	0,167ms

Donde: s, significativo; ms, no significativo

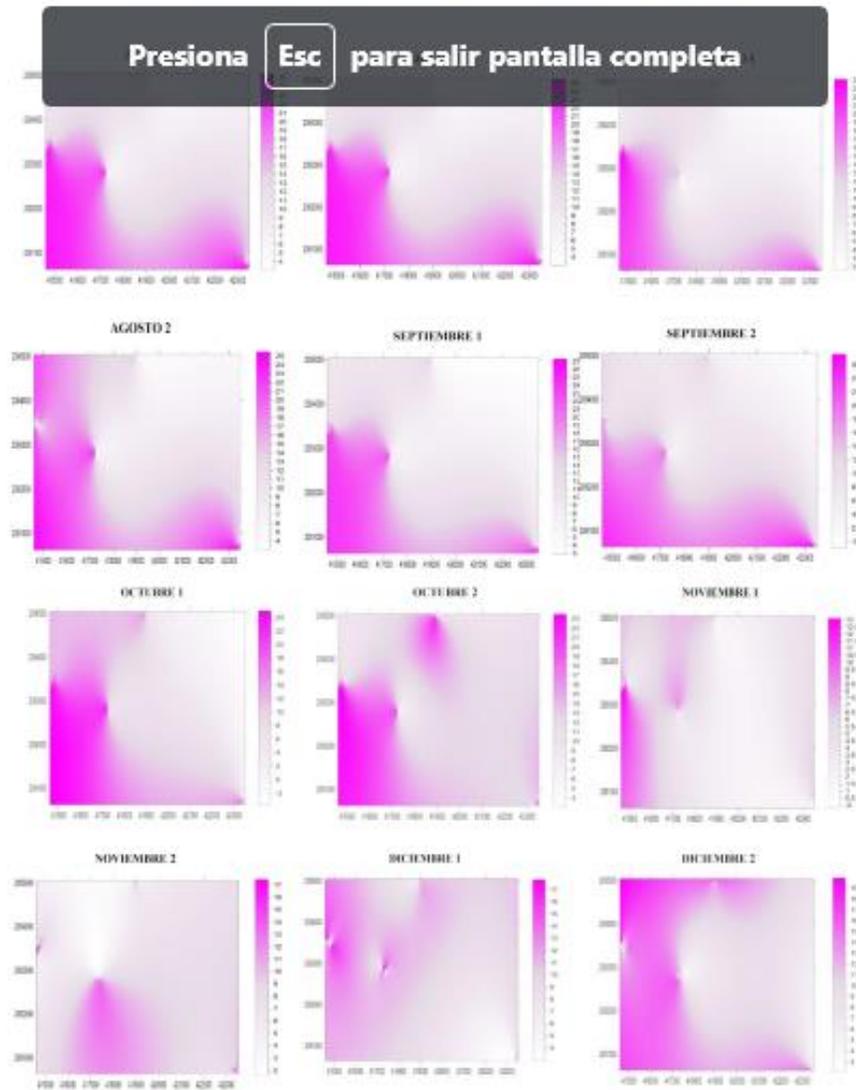


Figura 1A. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas en el Estado de México, México de julio a diciembre de 2019.

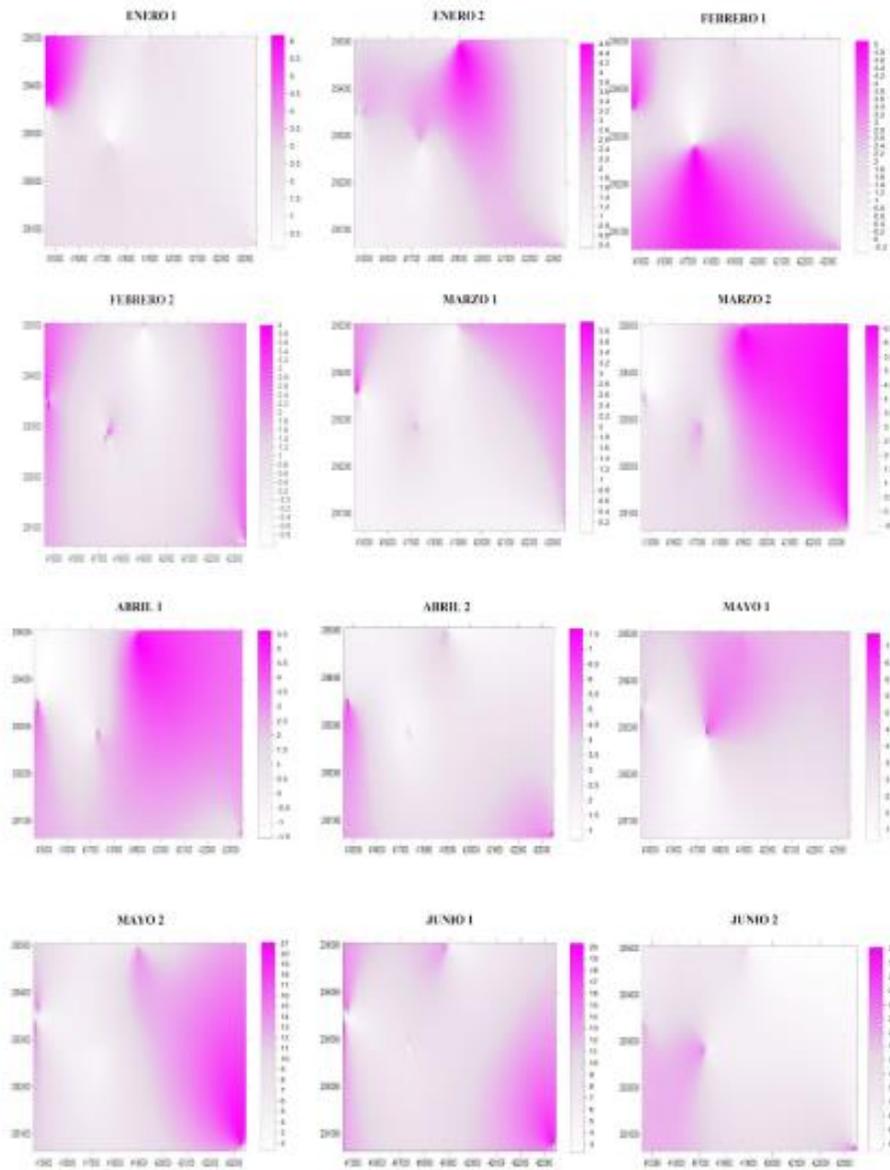


Figura 1B. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas en el Estado de México, México de enero a junio de 2020.

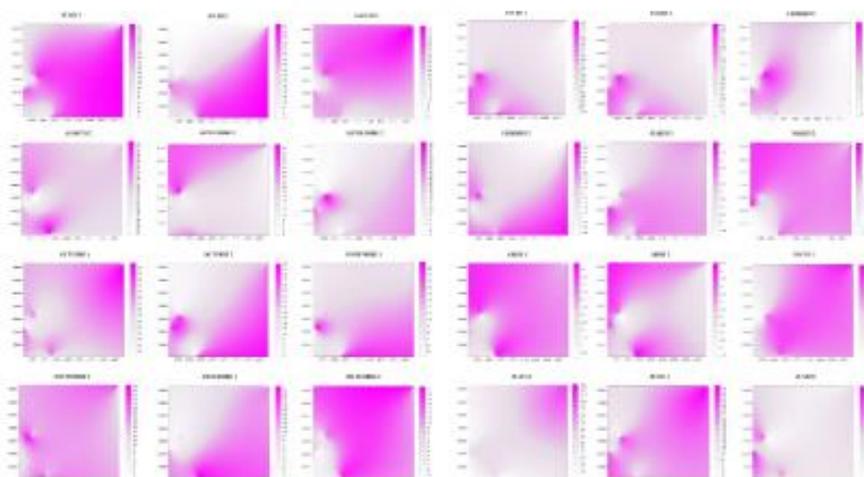


Figura 2. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Tenancingo, Estado de México, México.

Mapeo y superficie infectada

Se realizaron mapas para determinar la superficie infectada con antracnosis, basándonos en las estimaciones realizadas con la técnica del krigeado ordinario. Los mapas elaborados se detallan en las Figuras 1 y 2 respectivamente. La distribución agregada de la antracnosis en las parcelas de aguacate queda de manifiesto en cada uno de ellos.

En los mapas (Figuras 1 A, B y 2) realizados, se alcanzan a apreciar los diferentes focos de agregación o de agrupamiento de la antracnosis en las dos zonas de estudio (Coatepec Harinas y Tenancingo). Se logra incluso distinguir de forma general, cierta relación entre el número de centros de agregación y el promedio de frutos enfermos detectados en cada caso. Es decir, mayor cantidad de centros de agregación relacionados con mayor densidad de la enfermedad. En todos los casos, los centros de agregación de la antracnosis se hallaron repartidos más o menos en toda la superficie de las zonas de estudio. Estos mapas reflejan lo obtenido con el análisis de SADIE, indicando la presencia de más de un centro de agregación. Por otro lado, resultó interesante conocer si la infección de la enfermedad era general en las dos zonas, por lo tanto, se determinó el porcentaje de superficie infectada para cada uno de los municipios.

De manera general, se observó en los mapas que la superficie libre de infección disminuyó conforme la densidad de la antracnosis era mayor. De esta manera se detectó que, durante los muestreos en los meses de octubre, noviembre, parte de diciembre y febrero en Tenancingo el porcentaje de superficie infectada fue mayor, mientras que, durante el primer muestreo de agosto, el segundo muestreo de septiembre y el primero de octubre, la superficie

infectada fue menor (Tabla 3).

Estos datos coinciden con lo observado en campo, ya que, durante las fechas de muestreo, los porcentajes de humedad relativa oscilaron por arriba del 80%, y el último sexenio del año 2019 no fue tan lluvioso en comparación con otros años, donde el volumen de precipitación y el porcentaje de humedad suele ser mayor.

En el caso de Coatepec Harinas, en la Tabla 3 se muestra que los porcentajes más altos (por arriba del 90%) de superficie infectada con antracnosis se presentaron durante la mayoría de las fechas de muestreo, a excepción de los muestreos de agosto, el primer muestreo de septiembre, el segundo muestreo de marzo, el primero de abril y el primer muestreo de mayo; es importante mencionar que Coatepec Harinas es uno de los municipios con mayor producción de aguacate en el Estado de México, por lo que en los muestreos anteriormente mencionados, se presentaron condiciones de cosecha de frutos, limpieza de las huertas y otras actividades relacionadas al manejo del cultivo en sí, factores que propiciaron esta baja en el porcentaje de infección encontrado en los mapas.

Pese a que la antracnosis se encontraba en condiciones óptimas para su desarrollo, el porcentaje de infección alcanzado en todos los muestreos para ambas zonas de estudio, jamás llegó al 100%. Esto puede explicarse debido a factores anteriormente mencionados como las condiciones edafoclimáticas, la cosecha de los frutos, las medidas de control aplicadas en las zonas de estudio sobretodo en la temporada de floración en otoño y al inicio de la primavera. Ante esto, Reina-Noreña, Mayorga-Cobos, Caldas-Herrera, Rodríguez-Valenzuela y Varón-Devia (2015) señalan que la disminución del rendimiento,

Tabla 3. Porcentajes de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS			TENANCINGO		
MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %	MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %
JULIO 1	97	3	JULIO 1	93	7
JULIO 2	99	9	JULIO 2	92	8
AGOSTO 1	81	19	AGOSTO 1	86	14
AGOSTO 2	89	11	AGOSTO 2	92	8
SEP 1	83	17	SEP 1	94	6
SEPT 2	91	9	SEPT 2	88	12
OCT 1	90	10	OCT 1	89	11
OCT 2	97	3	OCT2	97	3
NOV 1	98	2	NOV 1	98	2
NOV 2	90	10	NOV 2	91	9
DIC 1	95	5	DIC 1	93	7
DIC 2	97	3	DIC 2	97	3
ENERO 1	96	4	ENERO 1	93	7
ENERO 2	97	3	ENERO 2	92	8
FEB 1	91	9	FEB 1	91	9
FEB 2	90	10	FEB 2	96	4
MARZO 1	90	10	MARZO 1	92	8
MARZO 2	88	12	MARZO 2	91	9
ABRIL 1	86	14	ABRIL 1	90	10
ABRIL 2	99	1	ABRIL 2	88	12
MAYO 1	88	12	MAYO 1	85	15
MAYO 2	96	4	MAYO 2	91	9
JUNIO 1	95	5	JUNIO 1	93	7
JUNIO 2	97	3	JUNIO 2	82	18

debido al incremento de la incidencia y severidad de enfermedades causadas por hongos y a la proliferación de focos de infección, puede ocurrir debido a olas invernales, generando un crecimiento especial de la precipitación y aumentar considerablemente la humedad en el suelo en las áreas de producción de aguacate.

Este estudio propone que con ayuda de la estadística espacial, es posible dirigir el control fitosanitario de manera eficaz, ya que resulta importante enfatizar que al detectar áreas libres de infección, las medidas de control que se pudiesen tomar para detener el avance de las enfermedades como la antracnosis, no implicarían un control general de las zonas afectadas, sino que las que ya están establecidas, se aplicarían únicamente en las áreas realmente dañadas, es decir, el control sería dirigido, lo cual evitaría un gasto innecesario en productos químicos para el productor y por lo tanto, favorecería un ahorro económico y la disminución del impacto ambiental.

El manejo fitosanitario que el productor quiera darle a su cultivo, dependerá en gran medida de él, sin embargo, se sugiere como alternativa de control las podas fitosanitarias, el retiro de hojas y ramas que representan la fuente del inóculo, la aplicación en dosis adecuadas de fungicidas a base de cobre, entre otras.

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 del Estado de México.

CONCLUSIONES

La geoestadística y el análisis espacial por índices de distancia demostraron ser métodos eficaces y precisos para determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate en los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo, en el Estado de México. La distribución espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate se ajustó principalmente a modelos de tipo gaussiano y exponencial en la mayoría de los muestreos realizados. Los mapas de superficie infectada muestran la presencia de centros de agregación que se mantuvieron a lo largo de todo el periodo de muestreo en las zonas de estudio. El porcentaje de infección por antracnosis no alcanzó el 100%, aunque si se presentaron porcentajes por arriba del 90%. Los valores de los índices I_a y J_a confirmaron la distribución agregada y la presencia de más de un foco de infección.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro Espino, E., Morales García, J. L. & Pedraza-Santos, M. E. (2017). Hongos asociados al síndrome de la roña del aguacate en el estado de Michoacán, México. En *Memorias del IV Congreso Latinoamericano del Aguacate*, 04-07 de setiembre 2017, pp. 1-9. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Figueroa-Figueroa, D. K., Dávila, J. F. R., Antonio-Némiga, X. & Huerta, A. G. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 865-879.
- FAO. (2020). *Análisis del mercado de las principales frutas tropicales*. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Lemus-Soriano, B. A. & Pérez-Aguilar, D. A. (2017) Manejo de la antracnosis del aguacate con biofungicidas. En *Memorias del IV Congreso Latinoamericano del Aguacate*, 04-07 de setiembre 2017, pp. 1-5. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martínez-Martínez, N., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F. & Figueroa-Figueroa, D. K. (2021). Spatial distribution of dwarf mistletoe in Monarch Butterfly Biosphere Reserve. *Colombia Forestal*, 24(2), 65-81.
- Morales-García, J. L. (1996). *Caracterización cultural, morfológica, patogénica y molecular de Colletotrichum gloeosporioides Penz. Causante de la antracnosis del aguacate en Michoacán*. (Tesis de Maestría). Montecillo, Estado de México, México : Colegio de Postgraduados, 96 p.
- Morales G. J. L., Guzmán, M. D. P. R., Rivero, H. S. A. & Santos, M. E. P. (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(2), 421-424.
- Oliver, M. & Webster, R. (1998). How geostatistics can help you. *Soil Use Manag.*, 7, 206-217.
- Perry, N. & Klukowsky, Z. (1997). Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. En *VI Conferencia de la Sociedad de Biometría*. Córdoba, España.
- Reina-Noreña J., Mayorga-Cobos M. J., Caldas-Herrera S. J., Rodríguez-Valenzuela J. & Varón-Devía E. H. (2015). El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu.*, 16(2), 265-278
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F. & Acosta Guadarrama, A. (2018). Distribución espacial de las poblaciones de huevos de *Bactericera cockerelli* Sulc. en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Acta Universitaria.*, 28, 24-33. 10.15174/au.2018.1944.
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F., Martínez Quiroz, M. & González Huerta, A. (2020). Spatial modeling of *Bactericera cockerelli* Sulc. nymphs on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) using of geostatistical techniques. *Biotecnia*, 22 (1), 142-152. Disponible en: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809. (2002). 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA.
- Sánchez-Pale, J. R., Ramírez-Dávila, J. F., González-Huerta, A. & de León, C. (2015). Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (7), 1467-1480.
- Trinidad Ángel, E., Ascencio Valle, F., Ulloa, J., Ramírez Ramírez, J., Ragazzo Sánchez, J., Calderón Santoyo, M. & Bautista Rosales, P. (2017). Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (19), 3953-64.
- Valbuena-García, A. M. & Rodríguez-Villamizar, L. A. (2018). Análisis espacial en epidemiología: revisión de métodos. *Rev Uni Ind Santander Salud*, 50 (4), 358-365. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v50n4-2018009>
- Vivas, L. E. & 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 (1), 109-125.
- Zamora, F. I. M., Dávila, J. F. R., Arriaga, M. R., Némiga, X. A. & Díaz, A. V. L. (2016). Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 845-856.



9.1 ACTIVIDAD ANTAGÓNICA IN VITRO DE *TRICHODERMA HARZIANUM* Y *BACILLUS SUBTILIS* FRENTE A *COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES*, CAUSANTE DE LA ANTRACNOSIS EN EL AGUACATE.

ANTAGONISTIC ACTIVITY OF *TRICHODERMA HARZIANUM* AND *BACILLUS SUBTILIS* AGAINST *COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES*, CAUSING ANTHRACNOSE IN AVOCADO.

Texcoco, Estado de México, 09 de noviembre de 2021
Núm. Ref.: 3043-21

Dr. José Francisco Ramírez Dávila
Universidad Autónoma del Estado de México
Presente

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su manuscrito intitulado: "**Actividad antagonica in vitro de *trichoderma harzianum* y *bacillus subtilis* frente a *colletotrichum gloeosporioides*, causante de la antracnosis en el aguacate.** Cuyos autores (as) **Atenas Tapia Rodríguez, José Francisco Ramírez Dávila, Jesús Gaudencio Aquino Martínez, Martín Rubí Arriaga, Dulce Karen Figueroa Figueroa y Claudia Saavedra Guevara** que fue propuesto para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el texto inicial del manuscrito, autores (as) principal y los coautores(as), autor(a) para correspondencia no podrán alterarse y quedarán como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será enviada a revisión técnica por los árbitros que se designen en la REMEXCA, en caso de ser aceptado se le notificará sobre las observaciones correspondientes.

Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente

JSAPihPWpRZ6tXw+VhUyyg==EN0Xfy6BnNRYwvITqOd3FD5IFPo=

Dra. Dora Ma. Sangerman-Jarquín
Editora en Jefa de la Revista
Mexicana de Ciencias Agrícolas

osp* archivo
DMS:ifgap

Carretera Los Reyes- Texcoco, km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 85353

9.2 ACTIVIDAD ANTAGÓNICA IN VITRO DE *TRICHODERMA HARZIANUM* Y *BACILLUS SUBTILIS* FRENTE A *COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES*, CAUSANTE DE LA ANTRACNOSIS EN EL AGUACATE.

ANTAGONISTIC ACTIVITY OF *TRICHODERMA HARZIANUM* AND *BACILLUS SUBTILIS* AGAINST *COLLETOTRICHUM GLOEOSPORIOIDES*, CAUSING ANTHRACNOSE IN AVOCADO.

Atenas Tapia Rodríguez¹, José Francisco Ramírez Dávila², Jesús Gaudencio Aquino Martínez², Martín Rubí Arriaga², Dulce Karen Figueroa Figueroa² y Claudia Saavedra Guevara¹.

¹Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México. C. P. 5020.

²Profesor –Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Campus el Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 5020.

Autor de correspondencia: jframirez@uaemex.mx

Resumen

Para evaluar la capacidad biocontroladora de tres cepas de *Trichoderma harzianum* (Queule) y tres cepas de *Bacillus subtilis* sobre la antracnosis, causada por el hongo

Colletotrichum gloeosporioides, se llevaron a cabo dos ensayos en laboratorio con muestras de frutos de aguacate hass enfermos provenientes de cuatro municipios productores del Estado de México. Los ensayos se realizaron bajo un diseño experimental completamente al azar, utilizándose 24 tratamientos con tres repeticiones cada uno. El hongo *C. gloeosporioides* fue aislado por medio de siembra de cortes de tejido infectado y sano en medio agar papa-dextrosa (PDA) e incubados a 28 ° C, obteniendo cuatro cepas, cada una proveniente de un municipio diferente. El patógeno se resembró y se mantuvo en PDA hasta su uso. Las cepas de *B. subtilis* empleadas como biocontroladores fueron la 07 y la SP83, mientras que las cepas antagonistas correspondientes a *T. harzianum* fueron la T-22 y la T-39. También se analizó la actividad controladora del fungicida comercial Promyl. Las respuestas de antagonismo medidas fueron el crecimiento radial del antagonista, el crecimiento radial del patógeno, la diferencia de crecimiento y la eficiencia de biocontrol expresada en porcentaje. Los resultados mostraron que las cepas de *Trichoderma harzianum* funcionan como excelente agente biocontrolador, con factor de eficiencia de biocontrol por encima del 50%

Palabras clave. Biocontrol, inhibición, eficiencia

Abstract

To evaluate the biocontrolling capacity of three strains of *Trichoderma harzianum* (Queule) and three strains of *Bacillus subtilis* on anthracnose, caused by the fungus *Colletotrichum gloeosporioides*, two laboratory tests were carried out with samples

of diseased hass avocado fruits from four Producing municipalities of the State of Mexico. The trials were carried out under a completely randomized experimental design, using 24 treatments with three repetitions each. The fungus *C. gloeosporioides* was isolated by sowing sections of infected and healthy tissue on potato-dextrose agar (PDA) and incubated at 28°C, obtaining four strains, each from a different municipality. The pathogen was reseeded and kept on PDA until use. The *B. subtilis* strains used as biocontrollers were 07 and SP83, while the antagonist strains corresponding to *T. harzianum* were T-22 and T-39. The controlling activity of the commercial fungicide Promyl was also analyzed. The antagonism responses measured were the radial growth of the antagonist, the radial growth of the pathogen, the growth difference, and the biocontrol efficiency expressed as a percentage. The results showed that *Trichoderma harzianum* is a very effective biocontroller, favoring biocontrol efficiency above 50%.

Keywords. Biocontrol, inhibition, efficiency

Introducción

Una de las actividades primordiales para el hombre en términos económicos y de alimentación, es la agricultura, sin embargo, también es considerada como uno de los procesos causantes de contaminación, cambio de uso de uso de suelo y pérdida de biodiversidad en países de Latinoamérica (Álvarez y Monsalve, 2019).

En México, uno de los cultivos agrícolas más destacados es el aguacate, debido a la alta demanda del fruto en el mercado internacional y, por ende, a la gran cantidad

de divisas que genera para el país (Álvarez y Monsalve, 2019). Sin embargo, la mayor parte de la producción se centra únicamente en el cultivar comercial Hass, por lo que esto conlleva a que se presenten problemas fitosanitarios asociados al monocultivo (Ospina, 1999).

Dentro de estos problemas, se destacan las plagas y enfermedades ocasionadas por hongos, éstas últimas, atacando desde las raíces, tallo, ramas, hojas y frutos (Hilario Román, 2019). En el Estado de México, la antracnosis, causada por *Colletotrichum gloeosporioides*, genera alrededor de 20% de pérdidas económicas en producción y hasta el 60% de afectación en la calidad del fruto en las huertas, sin embargo, a nivel nacional, se reportan pérdidas asociadas a la enfermedad que alcanzan porcentajes de entre el 60-100 % en pre cosecha y poscosecha (Landerero *et al.*, 2016).

Ante tal situación, los productores aguacateros se ven en la necesidad de usar grandes cantidades de productos químicos fabricados a base de cobre para controlar la enfermedad (Álvarez y Monsalve, 2019) y de ésta manera, reducir los daños que provoca, generando, por un lado, desembolsos económicos muy fuertes para el mismo productor y, por otro, contaminación ambiental (Soto y Sepúlveda, 2020).

De ésta manera, el uso indiscriminado de éstos agroquímicos, ha tenido como consecuencia la resistencia de los microorganismos patógenos (Izquierdo García, 2019), por lo que actualmente existen investigaciones que sugieren la limitada

eficacia de estos métodos, lo cual ha generado la necesidad de desarrollar métodos de control alternativos (Hilario Román, 2019).

Las alternativas de control que se han utilizado, además de la aplicación química, incluyen también el manejo cultural y el control biológico (Agrios y Ortiz, 2006); existen diversos estudios que promueven el uso de microorganismos antagonistas para controlar enfermedades como la antracnosis e incluso investigaciones que sugieren la aplicación de microorganismos antagonistas como método de control preventivo contra las enfermedades en los cultivos (Badel y Kelemu, 1994).

El control biológico de antracnosis ha sido reportado en cultivos como el aguacate, café, mango, papaya, guanábana (Herrera, et al., 2011), entre otros, aunque en realidad son escasos los estudios que han aplicado microorganismos directamente en el campo y en donde la efectividad de los antagonistas se vería determinada no sólo por su mecanismo de acción, sino también por condiciones como el porcentaje de humedad, la temperatura, luz e incluso, por la interacción con otros microorganismos presentes en el patosistema.

Por otro, lado, uno de los obstáculos para el desarrollo del control biológico en poscosecha es la inhabilidad para controlar las infecciones establecidas en las etapas de pre cosecha, siendo la antracnosis una de ellas (Ruiz *et al.*, 2017). Aunque, como se mencionó anteriormente, la aplicación preventiva de los antagonistas en el campo puede propiciar la colonización de la superficie del fruto y

prevenir el establecimiento de infecciones latentes en los frutos de la huerta productora (Hilario Román, 2019).

Sabemos que la mayoría de los experimentos de control biológico en enfermedades poscosecha se han realizado aplicando los antagonistas en condiciones controladas de humedad y temperatura, por lo que, en este sentido, bioensayos como el propuesto por Maldonado *et al.* (2019) en el que evaluaron los efectos de los metabolitos obtenidos mediante extractos hexánicos y de acetato de etilo, producidos en el cultivo individual y en el co-cultivo de *Trichoderma spp.* y *Bacillus subtilis*, sobre el crecimiento de *C. gloeosporioides* y *F. oxysporum*, representan una nueva alternativa para llevar a cabo el biocontrol de hongos fitopatógenos.

Ensayos *in vitro* han evaluado la capacidad antagónica de microorganismos de los géneros *Trichoderma* y *Bacillus* ante enfermedades como el marchitamiento vascular, la cual es un problema que produce pérdidas en la producción de los cultivos de *Caesalpinia spinosa* (Pérez y García, 2019).

De la misma forma, existen estudios que destacan la eficacia biocontroladora principalmente de *Trichoderma* frente a *Penicillium sp.*, causante del marchitamiento en el cultivo de ajo (Astorga *et al.*, 2014) y también como biocontrolador en el desarrollo de *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae* (Moino y Alves, 1999).

Esta serie de estudios han dado como resultado la implementación de nuevas estrategias de control, mismas que son favorables con el ambiente, y, por lo tanto,

también con el productor, al reducir los costos de producción de sus cultivos y evitando el abandono de los mismos, generando empleo y propiciando la disminución los índices de contaminación al evitar el uso de productos químicos de manera masiva.

En ésta investigación, el objetivo fundamental fue evaluar la actividad antagónica in vitro de dos cepas de *Trichoderma harzianum* y dos de *Bacillus subtilis* ante *Colletotrichum gloeosporioides*, causante de la antracnosis en frutos de aguacate cv. hass. provenientes de cuatro municipios productores de aguacate en el Estado de México.

Materiales y Métodos

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Fitopatología de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Los frutos de aguacate se obtuvieron de cuatro cultivares Hass pertenecientes a los municipios mexiquenses Donato Guerra, Coatepec Harinas, Temascaltepec y Tenancingo, pertenecientes al Estado de México, México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020), los cuales fueron seleccionados debido a que son los principales municipios productores de ésta entidad y porque se identificó previamente en los huertos de los mismos, la presencia de antracnosis.

Obtención de las cepas de *C. gloeosporioides*

Los aislamientos de *C. gloeosporioides* se obtuvieron de frutos de Aguacate que se encontraban aún sin alcanzar su madurez comercial, éstos fueron sometidos a un proceso de desinfección con Hipoclorito de Sodio al 5% durante 5 minutos y posteriormente se colocaron en cámara húmeda con el fin de favorecer la esporulación del hongo, la cual se presentó a los 30 días.

Obtención del cultivo monospórico de *C. gloeosporioides*

Una vez que los frutos presentaron la esporulación característica, se procedió a realizar el cultivo monospórico, siguiendo la metodología planteada por Farías *et al.* (2019) la cual consistió en obtener una suspensión de conidial de 1×10^6 esporas/ml. Previamente con un marcador se realizaron 6 estrías en el reverso de las placas de Petri estériles (121°C durante 15 minutos a 15 libras de presión), con el fin de facilitar la lectura al microscopio. Luego de servir una delgada capa de Agar Agua en las placas de Petri, se tomaron 0.1 ml de la suspensión de esporas y se depositaron en la parte superior de las estrías. Con un asa de argolla se esparció el inóculo.

La incubación se realizó a $26 \pm 1^\circ \text{C}$, durante 24 horas; al cabo del cual se procedió a determinar las esporas germinadas con el microscopio óptico Leica Microsystems DM300 usando el objetivo de 10X. Con un bisturí N°4 y cuchilla N°22, previamente desinfectados se cortó el trozo de agar demarcado por la estría y se colocó sobre un portaobjeto estéril. Nuevamente se observó al microscopio con el objetivo de 40X y se seleccionó la espора germinada, se marcó con un marcador y se realizó

el corte del bloque de agar, usando el bisturí. El bloque de agar que contenía la espora se observó nuevamente al microscopio para determinar la presencia de ésta, luego se colocó en una caja Petri que contenía 25 ml de PDA (Potato Dextrose Agar, Oxoid Laboratories)

La identificación de aislados se realizó mediante reconocimiento de crecimiento de estructuras microscópicas (acérvulos y conidios) y macroscópicas (color de micelio, forma de micelio y crecimiento). Las características macro y microscópicas fueron cotejadas con las claves de identificación del género *Colletotrichum* (Sutton, 1992).

Posteriormente, se recolectaron frutos libres de síntomas de la enfermedad, los cuales se inocularon con los conidios del patógeno y fueron colocados dentro de una incubadora a 25°C.

Evaluación de crecimiento de la colonia

Se evaluó la curva y tasa de crecimiento de cada una de las colonias de los diferentes cultivos monospóricos de *C. gloeosporioides*, realizando lecturas cada 24 horas durante 8 días. La tasa de crecimiento diario se obtuvo mediante el uso de la fórmula (Maldonado *et al.*, 2019):

$$T S = \frac{\text{Diámetro Final} - \text{Diámetro Inicial}}{\text{Total de Días Evaluados}}$$

Renovación del cultivo monospórico

Los cultivos de *C. gloeosporioides* fueron reaislados cada 15 días a un nuevo medio de PDA con el fin de evitar su envejecimiento y reservarlos hasta su uso. Se seleccionaron cuatro aislamientos de cada cepa para realizar los experimentos de antagonismo.

Ensayo de antagonismo

El ensayo de antagonismo se realizó en medio de cultivo PDA en placas de Petri utilizando el método de confrontación directa propuesto por Aquino *et al.* (2008). Se obtuvieron discos miceliales (5 mm de diámetro) de cultivos de los antagonistas *T. harzianum* cepas T-22 y T39, *B. subtilis*, cepas 07 biokrone y SP83 y patógenos (*C. gloeosporioides*) después de 5 días de incubación a $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en condiciones de oscuridad, los pares de antagonistas y patógenos se colocaron a 6 cm de distancia en la misma placa de Petri. Es importante mencionar que también se evaluó la capacidad controladora del fungicida Promyl.

Posteriormente, se midieron las respuestas de antagonismo: invasión de la colonia del patógeno por el antagonista, antagonismo mutuo, detención del crecimiento de la colonia del patógeno, el crecimiento radial (RG) y finalmente, la eficiencia del biocontrol de los hongos después de 8 a 10 días de incubación a $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en condiciones de oscuridad.

La eficiencia de biocontrol se obtuvo con la fórmula adaptada (Aquino *et al.*, 2008):

CRA-CRP/CRA X100

Donde:

CRA= Crecimiento radial del antagonista y CRP= Crecimiento radial del patógeno

Se realizaron pruebas de confrontación dual para cada microorganismo antagonista y para el fungicida químico con cada hongo patógeno. El medio PDA inoculado solo con los patógenos de prueba sirvió como testigo para determinar la capacidad de crecimiento de los hongos patógenos. De ésta manera se tuvieron 24 tratamientos con tres repeticiones.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos para cada uno de los ensayos se sometieron a un análisis factorial con cuatro repeticiones y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), con el paquete estadístico Minitab 19.

Resultados y Discusión

De los cuatro aislamientos monospóricos del patógeno *C. gloeosporioides* obtenidos de los frutos de aguacate, se observó la similitud en sus características morfológicas al crecer en el medio PDA. Los aislamientos inicialmente presentaron germinación de los conidios a las 5 horas, posteriormente desarrollaron una hifa hialina, a las 12 horas. Luego, se observó sobre el medio el desarrollo de micelio color blanco y ligeramente aéreo.

La expansión del micelio continuó hasta el quinto día, cuando inició la formación de un anillo color salmón correspondiente a los conidios del hongo, las cuales presentaron forma elíptica, hialinas y con la granulosis característica de estas células (Agrios y Ortiz, 2006).

Posteriormente el crecimiento micelial continuó, hasta la observación de los primeros acérvulos, los cuales se formaron a partir del sexto día.

La tasa de crecimiento de los aislamientos de *C. gloeosporioides* fue de 1,045 cm/día, 1,065 cm/día, 1,015 cm/día y 1,035 cm/día.

Por lo tanto, los aislamientos seleccionados para los ensayos de antagonismo fueron los que presentaron mejor desarrollo en el medio de cultivo, de acuerdo a los valores en la tasa de crecimiento anteriormente mencionada.

El crecimiento del hongo se detuvo completamente al sexto día de establecido el ensayo, lo anterior, concuerda con lo reportado en las investigaciones donde se probaron filtrados de *B. subtilis* para inhibición in vitro de *C. gloeosporioides* y arrojaron resultados que indicaron la detención del desarrollo del hongo al sexto día de exposición al medio (Aquino *et al.*, 2008).

Los resultados para el crecimiento radial del antagonista, crecimiento radial del patógeno, diferencia de crecimiento y eficiencia de biocontrol se presentan en el Cuadro 1, donde se aprecia claramente que *B. subtilis* 07 presenta altos porcentajes de eficiencia de biocontrol, en comparación con el fungicida comercial, por lo que

existen estudios que corroboran la efectividad biocontroladora de *B. subtilis*, atribuyendo entre 60 y 80% de inhibición al crecimiento de *C. gloeosporioides* (Ruiz *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Variables de antagonismo evaluadas

TRATAMIENTO	ANTAGONISTA	Crecimiento radial del antagonista (cm)	Crecimiento radial del patógeno (cm)	Diferencia de crecimiento (cm)	Eficiencia de biocontrol (%)
A1	<i>B. subtilis</i> 07	1.9	0.62	1.28	53.59
A2	<i>B. subtilis</i> SP83	2.1	0.45	1.65	59.4
A3	<i>T. harzianum</i> T-22	5.4	1.3	4.1	75.62
A4	<i>T. harzianum</i> T-39	4.9	2.3	2.6	61.56
A5	Promyl	4	3.7	0.3	25.8
A6	Testigo	-	6.9	-	-
B1	<i>B. subtilis</i> 07	2.3	0.4	1.7	39.52
B2	<i>B. subtilis</i> SP83	2.2	1.2	1	32.9
B3	<i>T. harzianum</i> T-22	3.4	1.4	2	58.8
B4	<i>T. harzianum</i> T-39	5.2	1.9	3.3	41.7
B5	Promyl	3.6	3.4	0.2	18.08
B6	Testigo	-	6.3	-	-
C1	<i>B. subtilis</i> 07	1.7	1.2	0.5	16.87
C2	<i>B. subtilis</i> SP83	2.3	1.1	1.2	43.19
C3	<i>T. harzianum</i> T-22	4.9	3.3	1.6	49.11
C4	<i>T. harzianum</i> T-39	5.2	2.7	2.5	52.86
C5	Promyl	4	1.1	2.9	29.52
C6	Testigo	-	5	-	-
D1	<i>B. subtilis</i> 07	1.9	0.8	1.1	34.84
D2	<i>B. subtilis</i> SP83	2.4	1.6	0.8	36.32
D3	<i>T. harzianum</i> T-22	5.4	2.8	2.6	51.65
D4	<i>T. harzianum</i> T-39	4.9	3.2	1.7	51.55

D5	Promyl		4.2	3.9	0.3	21.21
D6	Testigo	-		5.2	-	-

Por otro lado, *T. harzianum* presenta los porcentajes de inhibición más elevados del crecimiento del antagonista, siendo la cepa T-22 la que presentó eficiencias de biocontrol de entre 49 hasta casi 75% en todo el experimento. Esto puede explicarse debido a que precisamente *T. harzianum* cepa T-22 presentó también altos valores en crecimiento radial en el medio de cultivo.

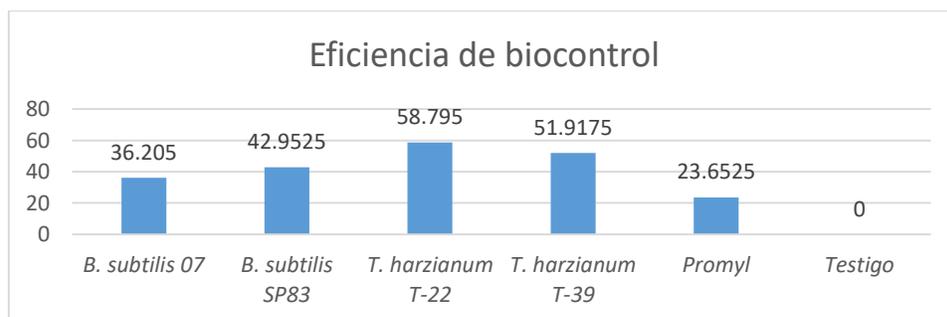
Así mismo, en el Cuadro 1 se puede observar que el mayor porcentaje de eficiencia de biocontrol lo presentaron *Trichoderma harzianum* T-22 y T-39, con una media de 58.79 y 51.91 respectivamente, por lo que se asume, de acuerdo con éstos resultados, que ambas cepas antagonicas son eficientes biocontroladores frente a *C. gloeosporioides* (Ruiz *et al.*, 2014).

En investigaciones recientes se ha detectado la efectividad de especies de *Trichoderma* como antagonistas frente a enfermedades en los cultivos agrícolas, y precisamente, en éste trabajo, se comprobó que éste antagonista funciona bien como controlador, inhibiendo en poco tiempo el crecimiento del patógeno *C. gloeosporioides*, aunque, por otro lado, también se destaca los altos porcentajes de efectividad antagonica de *B. subtilis* como agente de control, debido a que se ha demostrado la capacidad de éstas cepas del género *Bacillus* para evitar el establecimiento y desarrollo de organismos fitopatógenos, desarrollando mecanismos tales como la excreción de antibióticos, la generación de enzimas

líticas, liberación de toxinas o bien, induciendo a la planta a generar resistencia (Pérez y García, 2019).

El análisis de comparación de medias (Figura 1) mostró que existen diferencias entre los tratamientos evaluados contra *C. gloeosporioides* (Cuadro 2), cuyos valores de F mostraron claramente la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre éstos. *B. subtilis* SP83 presentó una media de 42.95, mientras que el fungicida Promyl obtuvo una media de 23.65.

Figura 1. Comparación de medias de eficiencia de biocontrol por tratamiento frente a *C. gloeosporioides*.



Cuadro 2. Analisis factorial para determinar la eficiencia de biocontrol contra *C. gloeosporioides*.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	23	43534	1892.8	8.57	0.000
Lineal	8	39783	4972.8	22.51	0.000
CEPAS	3	3473	1157.6	5.24	0.003
TRATAMIENTOS	5	36310	7262.0	32.87	0.000
Interacciones de 2 términos	15	3751	250.1	1.13	0.345
CEPAS*TRATAMIENTOS	15	3751	250.1	1.13	0.345
Error	72	15906	220.9		
Total	95	59440			

Lo anterior demuestra que las cepas de *B. subtilis*, tuvieron porcentajes aceptables de antagonismo in vitro, a pesar de que el patógeno en algunos tratamientos, se resistió al antagonismo; esto es importante, ya que no necesariamente debería llegar al 100% de efectividad para hablar de control de la enfermedad (Moino y Alves, 1999). Por otro lado, estos resultados pudieron deberse también a la incidencia de factores como la adaptabilidad de la cepa al medio de cultivo para la evaluación y a las condiciones ambientales de la zona donde fueron colectadas las muestras del hongo fitopatógeno, pues no siempre las observaciones realizadas en laboratorio coinciden con lo que sucede en condiciones de campo, donde interactúan otros factores importantes (Pérez Torrez et al., 2018).

Por otro lado, los resultados del análisis factorial también arrojan que existieron interacciones entre las cepas y los tratamientos, pero éstas no son estadísticamente significativas (cuadro 2)

En la Cuadro 3, según la prueba de Tukey al 0.5%, se obtuvieron resultados heterogéneos y la mejor cepa que inhibió a *C. gloeosporioides* fue *T. harzianum* T-22, ubicándose en el rango A con el 59.55% de inhibición, seguida por *T. harzianum* T-39 la cual se encuentra en el rango A con el 53.47% de inhibición; así mismo, la cepa SP83 de *B. subtilis* presentó el 41.76% de inhibición. Resultados inferiores los presentaron la cepa 07 de *B. subtilis* y el fungicida Promyl, localizándose en el rango B. Es importante mencionar que éstos resultados pueden deberse a los mismos factores propuestos anteriormente (Pérez Torrez et al., 2018).

Cuadro 3. Prueba de Tukey al 0,5% para la eficiencia de biocontrol contra *C. gloeosporioides*.

ANTAGONISTA	N	Media	Agrupación	
T. harzianum T-22	4	59.55	A	
T. harzianum T-39	4	53.47	A	
B. subtilis SP83	4	41.76	A	B
B. subtilis 07	4	35.68	A	B
Promyl	4	24.82		B C
Testigo	4	0.000000		C

Las Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Por lo tanto, se asume que, aunque la cepa de *B. subtilis* 07 presentó alto porcentaje de eficiencia de biocontrol frente a *C. gloeosporioides* (Cuadro 1), la cepa de *B. subtilis* SP83 presenta una media mayor, por lo que estadísticamente, ésta cepa se considera mejor para controlar a *C. gloeosporioides*. Las mejores cepas para controlar a *C.* en este trabajo fueron las correspondientes a *T. harzianum*. Estos resultados coinciden con investigaciones recientes donde evalúan a *T. harzianum* como el antagonista para enfermedades fúngicas en el cultivo de arroz, obteniendo porcentajes de eficiencia de entre el 70 al 90% (Pérez Torrez et al., 2018).

En éste y otros estudios (Moino y Alvez, 1999; Pérez Torrez et al., 2018; Pérez y García 2019), queda comprobado que el uso de organismos antagonistas es una estrategia eficaz que permite controlar a las enfermedades en las plantas, minimizando las pérdidas económicas asociadas a éstas a través de la prevención, permitiendo que la planta genere o mejore su resistencia a los microorganismos patógenos que se presentan (Villarreal et al., 2018).

Por otro lado, las estrategias de control cultural tales como el retiro o reducción del inóculo causante de las enfermedades, así como la eliminación de cultivos u hospedantes alternos, funcionan como una medida de control correctiva que debe seguirse implementando en el campo agrícola (Agrios y Ortiz, 2006; Villarreal *et al.*, 2018).

Resulta atractivo pensar en métodos alternos que beneficien a diversos sectores económicos, sin embargo, las malas prácticas de manejo han dado como resultado altos índices de contaminación en el planeta (Castro Vélez, 2018), y particularmente, el Estado de México es uno de los sitios con los mayores niveles de contaminación y desgaste de suelo, agua y aire de México y el mundo; éste panorama sin duda, resulta alarmante, por lo que es urgente implementar estrategias que vayan a corde a los objetivos del desarrollo sostenible, en los cuales se busca, entre otras cosas, producir alimentos inocuos y energía de manera limpia, para consecuentemente, mejorar las condiciones económicas (Soto y Sepúlveda, 2020), sociales y ambientales en las que vive la población mundial actualmente; entre estos objetivos se destaca la disminución de la pobreza, hambre cero, creación de comunidades sostenibles, conservación de los ecosistemas terrestres y marinos, implementación de acciones que beneficien la disminución del calentamiento global, entre otros (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Finalmente, se deben seguir realizando investigaciones en torno a la evaluación de la efectividad biocontroladora de organismos antagonistas frente a las enfermedades en las plantas, con la finalidad no solo de beneficiar a los

ecosistemas y sistemas agrícolas disminuyendo la contaminación por el uso de agroquímicos, sino también con la intención de mejorar los medios de subsistencia y fomentar el crecimiento económico sostenible, a fin de favorecer a los productores agrícolas para que puedan aprovechar de la mejor manera sus cultivos, aumenten la productividad, el empleo y el valor añadido en los sistemas de alimentación y obtener mayores oportunidades de comercialización en mercados nacionales e internacionales para mejorar su calidad de vida (ONU 2015; FAO 2016).

Conclusiones

Trichoderma harzianum T-22 y T-39 presentan los mayores valores de eficiencia para controlar a *Colletotrichum gloeosporioides*, causante de la antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México.

Es necesario seguir llevando a cabo investigaciones acerca de la eficacia y acción de los microorganismos antagonistas para contrarrestar a los fitopatógenos causantes de enfermedades como la antracnosis en los cultivos agrícolas de importancia económica para México y el mundo.

Literatura citada

1. Agrios G, Ortíz G. Fitopatología. (no. sb731. a3718 2006.).
2. Álvarez Vélez C, Monsalve Tobón AP. Impactos sociales, ambientales y económicos a través de la producción, comercialización y exportación de aguacate Hass. 2019.

3. Aquino-Martínez, Jesús Gaudencio, & Vázquez-García, Luis Miguel, & Reyes-Reyes, Basilio Gabriel (2008). Biocontrol in vitro e in vivo de *Fusarium oxysporum* Schlecht. f. sp. dianthi (Prill. y Delacr.) Snyder y Hans. Con hongos antagonistas nativos de la zona florícola de Villa Guerrero, Estado de México. Revista Mexicana de Fitopatología, 26(2),127-137. [fecha de Consulta 7 de abril de 2021]. ISSN: Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61226205>
4. Astorga Quirós K, Meneses Montero K, Zúñiga Vega C, Brenes Madriz J, Rivera-Méndez W. Evaluación del antagonismo de *Trichoderma* sp. y *Bacillus subtilis* contra tres patógenos del ajo. 2014.
5. Badel JL y Kelemu S. In vitro inhibition of *Colletotrichum gloeosporioides* and other phytopathogenic fungi by an Amazonian isolate of *Bacillus subtilis* and its cell-free culture filtrate. Australasian Plant Pathology, 1994, 23(2), 41-45.
6. Castro Vélez YO. La deforestación y su incidencia ambiental en el cambio climático (Bachelor's thesis, JIPIJAPA-UNESUM). 2018.
7. Farías ORD, Nascimento LCD, Cruz JMFDL, Silva HAO, Oliveira MDDM, Bruno RDLA, Arriel MNHC. Biocontrol potential of *Trichoderma* and *Bacillus* species on *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. 2019.
8. Herrera PE, Pérez IMB, Alejo JC, Suárez JMT, Sánchez ER. Patogenicidad de *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. y *Alternaria alternata* (Fries) Keissler en *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum. y su control in vitro. Fitosanidad, 2011, vol. 15, no 4, p. 231-236.

9. Hilario Román YY. Control biológico de antracnosis (*Colletotrichum* spp.) en tres ecotipos de guanábana (*Annona muricata* L.) en condiciones de vivero en el distrito de Chanchamayo. 2019.
10. Izquierdo García LF. Interacciones microbianas en un consorcio de *Trichoderma virens* y *Bacillus velezensis* con actividad biocontroladora en el patosistema *Fusarium oxysporum* f. sp. *physali* - uchuva. 2019.
11. Landero Valenzuela N, Lara Viveros FM, Andrade-Hoyos P, Aguilar Pérez LA, Aguado Rodríguez GJ. Alternativas para el control de *Colletotrichum* spp. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2016, 7(5), 1189-1198. Recuperado en 23 de marzo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000501189&lng=es&tlng=es.
12. Maldonado EZ, Merlos JB, Sánchez BC, Pérez Pérez R, Avilés MC. Capítulo 2 Evaluación de metabolitos antifúngicos obtenidos en medio PD mediante el cultivo y co-cultivo de *Bacillus subtilis* y *Trichoderma* spp. sobre el crecimiento de *Colletotrichum gloeosporioides* y *Fusarium oxysporum*. *Seguridad alimentaria*, 2019, 7-15.
13. Moino JR A, Alves SB. Efeito antagônico de *Trichoderma* sp. no desenvolvimento de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. e *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok. 1999.
14. Ospina BMJ. Estudios de la interacción biológica de microorganismos relacionados con *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. Sacc, agente

- causal de la antracnosis en tomate de árbol (*Solanum betaceae* (Cav.) Sendt.). 1999.
15. Pérez Torres E, Bernal Cabrera A, Milanés Virelles P, Sierra Reyes Y, Leiva Mora, M, Marín Guerra S, Monteagudo Hernández O. Eficiencia de *Trichoderma harzianum* (cepa a-34) y sus filtrados en el control de tres enfermedades fúngicas foliares en arroz. *Bioagro*, 2018, 30(1), 17-26.
 16. Pérez DL, García Godos PL. Identificación del agente causal del marchitamiento en *Caesalpinia spinosa* "tara" y el efecto antagónico de aislados de *Bacillus spp.* y *Trichoderma sp.* 2019.
 17. Ruiz Sánchez E, Mejía Bautista MA, Cristóbal Alejo J, Valencia Botín A, Reyes Ramírez A. Actividad antagónica de filtrados de *Bacillus subtilis* contra *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2014, 5(7), 1325-1332. Recuperado en 07 de abril de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000700015&lng=es&tlng=es.
 18. Soto Arango E, Sepúlveda Cortés LM. Estudio de pre factibilidad para la producción y comercialización de aguacate tipo hass en el municipio de Sonsón (Antioquia). 2020.
 19. Sutton BC. The genus *Glomerella* and its anamorph *Colletotrichum*. In: Bailey, J. A. and Jeger, M. J. (Eds.). *Colletotrichum. Biology, pathology and control*. Wallingford, UK: CAB International. 1992, pág. 1-26.
 20. Villarreal Delgado MF, Villa Rodríguez ED, Cira Chávez LA, Estrada Alvarado MI, Parra Cota FI, Santos Villalobos S. El género *Bacillus* como agente de

- control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista mexicana de fitopatología*, 2018, 36(1), 95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>
21. ONU: “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático”, 2015. (edición electrónica) <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.
22. FAO: Agricultura sostenible. 2016, (edición electrónica) <http://www.fao.org/3/a-i5754s.pdf>
23. INEGI. Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2020. 2021.(edición electrónica) <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825197506>

9.3 Diagrammatic arbitrary scale to evaluate anthracnose in avocado in Mexico

Escala diagramática arbitraria para evaluar la antracnosis en aguacate en México

Enviado a: Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

Texcoco, Estado de México, 07 de enero de 2022
Núm. Ref.: 3075-22

Dr. José Francisco Ramírez-Dávila
Universidad Autónoma
del Estado de México
Presente

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su manuscrito intitulado: **“Escala arbitraria diagramática para evaluar antracnosis en el cultivo de aguacate en México.** Cuyos autores (as) **Atenas Tapia-Rodríguez, José Francisco Ramírez-Dávila, Martín Rubí-Arriaga, Jorge Valdez-Carrasco, Dulce Karen Figueroa-Figueroa y Alfredo Ruiz-Orta** que fue propuesto para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el texto inicial del manuscrito, autores (as) principal y los coautores(as), autor(a) para correspondencia no podrán alterarse y quedarán como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será enviada a revisión técnica por los árbitros que se designen en la REMEXCA, en caso de ser aceptado se le notificará sobre las observaciones correspondientes.

Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente

JSAPihPWpRZ6IXw+VhUyyg==EN0Xfy6BnNRYwviTqOd3FD8iFFPo=

Dra. Dora Ma. Sangerman-Jarquín
Editora en Jefa de la Revista
Mexicana de Ciencias Agrícolas

ocp* archivo
DMSJlgap

Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5. Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 85353

Diagrammatic arbitrary scale to evaluate anthracnose in avocado in Mexico

Escala diagramática arbitraria para evaluar la antracnosis en aguacate en México

Resumen. La antracnosis en hojas y frutos de aguacate (*Persea americana*) es una enfermedad inducida por *Colletotrichum gloeosporioides*, misma que actualmente ha cobrado importancia económica en regiones aguacateras del Estado de México. Debido a la importancia que representa es necesario tener un sistema estandarizado que permita cuantificar la severidad de esta enfermedad. El objetivo del presente estudio fue desarrollar y validar una escala diagramática para evaluar la severidad de antracnosis en el cultivo de aguacate cv. "Hass". Se colectaron hojas infectadas de manera natural por el hongo en plantaciones comerciales del municipio de Tenancingo, Estado de México; se seleccionaron 100 imágenes para estimar la severidad real con el programa Image J® y para calcular la precisión (r^2) se utilizó el programa estadístico Minitab 19®, las cuales representaron el daño de la enfermedad. La evaluación consideró a 10 evaluadores observando niveles aceptables de precisión de entre 0.75 hasta 0.92 empleando la escala.

Palabras clave: *Colletotrichum gloeosporioides*, severidad, precisión.

Abstract. Anthracnose in avocado leaves and fruits (*Persea americana*) is a disease induced by *Colletotrichum gloeosporioides*, which currently has gained economic importance in avocado regions of the State of Mexico. Due to the importance it represents, it is necessary to have a standardized system that allows quantifying the severity of this disease. The objective of the present study was to develop and validate a diagrammatic scale to evaluate the severity of anthracnose in the cv. "Hass" avocado crop. Leaves naturally infected by the fungus were collected in commercial plantations in the municipality of Tenancingo, State of Mexico; selecting 70 images to calculate the real severity with the Image J®, program

and to calculate the precision (r^2) the statistical program Minitab 19[®], was used, which represented the damage of the disease. The evaluation considered 10 evaluators observing acceptable levels of precision.

Key words: *Colletotrichum gloeosporioides*, severity, precision.

La búsqueda de métodos que permitan estimar la incidencia y severidad de las enfermedades en las plantas, es una de las áreas de la fitopatología que ha cobrado importancia en los últimos años por su constante evolución gracias al desarrollo de programas de cómputo para procesar y digitalizar imágenes que facilitan la identificación de síntomas en las plantas (Del Ponte, 2017).

Es importante cuantificar la intensidad de las enfermedades en los cultivos porque se pueden establecer estrategias de manejo con tácticas de control menos agresivas al ambiente (Hernández y Montoya, 1987).

En Fitopatología estas técnicas de medición de las enfermedades ofrecen considerables ventajas ante las necesidades que surgen, por ejemplo, al medir la intensidad de una enfermedad, al evaluar diferentes métodos de control e inclusive para generar modelos de alertas tempranas (Tovar-Soto *et al.*, 2002).

Los métodos indirectos incluyen procesos de adquisición de la información de un objeto a la distancia, sin contacto físico con el objeto, por ejemplo, por medio de sensores remotos (Valcarce-Diñeiro, 2020). Los métodos directos incluyen las escalas de severidad, las cuales se basan en valoraciones de intensidad de enfermedades tomando como referencia patrones de daño estandarizados (Acevedo, 2021).

Un ejemplo son las escalas arbitrarias y logarítmicas para evaluar la severidad de muchas enfermedades (Tovar-Soto *et al.*, 2002; Zavala-León y Cristóbal-Alejo, 2012; Hernández y Sandoval, 2015; Palomares-Pérez *et al.*, 2016; Gabriel *et al.*, 2017), las cuales consideran la toma de muestras o de imágenes como primer paso

para estimar la severidad real y posteriormente, dar seguimiento a la evaluación y validación de la escala antes de aplicarla en campo (Tovar-Soto *et al.*, 2002; Bock *et al.*, 2008).

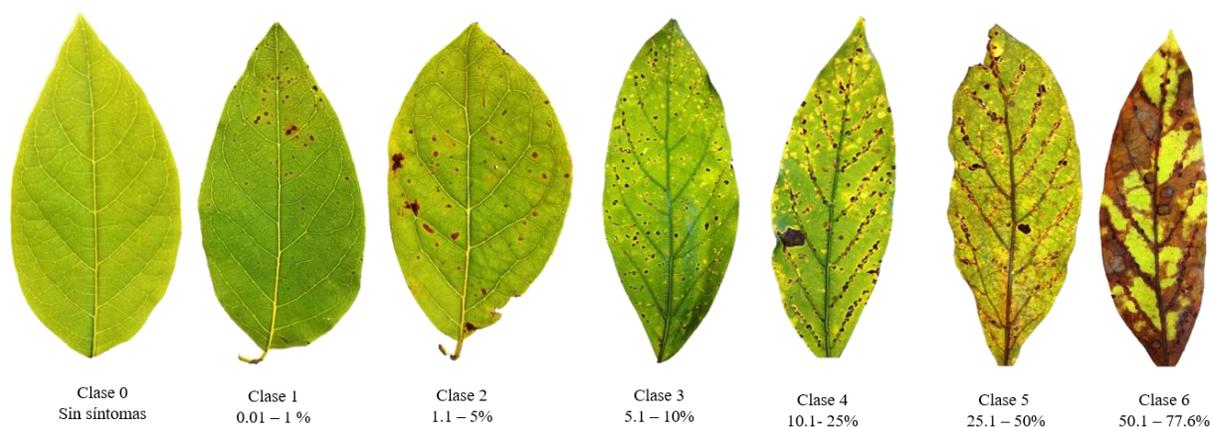
Se han propuesto escalas para medir la severidad de enfermedades en aguacate (*Persea americana*); Reina-Noreña y colaboradores (2015) proponen una escala de severidad de seis niveles para evaluar la “peca” causada por *Colletotrichum* sp. en frutos de aguacate (*P. americana*) basándose en consultas con agricultores y comercializadores, expertos en la enfermedad y con estimaciones visuales del daño.

Por otra parte, Ramírez-Gil y Morales-Osorio (2020), propusieron y validaron una escala de severidad para un complejo que causa marchitez del aguacate (*Phytophthora cinnamomi* y *Verticillium dahliae*), en donde destacan que las escalas pueden ser una herramienta valiosa para caracterizar enfermedades en apoyo al muestreo y, a su vez, para facilitar su manejo. Ortega-Acosta y colaboradores (2016) desarrollaron una escala logarítmica en la cual evaluaron la severidad de *C. cassicola* en jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) considerando 50 hojas y 50 cálices de jamaica con diferentes grados de severidad, estableciendo seis niveles para las hojas y seis niveles para los cálices. El primer grado para ambos fue 0, sin daño y el máximo 5 con un daño de 57 a 100 % para las hojas y 77-100% para los cálices.

La antracnosis del aguacate, causada por *C. gloeosporioides* es una problemática recurrente y de fuerte impacto productivo, por lo que el empleo de escalas permite monitorear la severidad y proponer estrategias para su manejo (Ferreira *et al.*, 2021). En este sentido, el objetivo de esta investigación consistió en desarrollar y validar una escala arbitraria para estimar la severidad de la antracnosis en las hojas de aguacate cv. “Hass” en la región aguacatera de Tenancingo, Estado de México.

Diseño de la escala diagramática. Las muestras foliares se recolectaron de árboles de aguacate cv. "Hass" con síntomas de antracnosis en cuatro parcelas comerciales en el municipio de Tenancingo, Estado de México durante los meses de noviembre-diciembre de 2020, y febrero-marzo de 2021. En total se recolectaron 100 hojas con diferentes niveles de daño por antracnosis, además de hojas sanas. Los síntomas asociados a la enfermedad se identificaron en un estudio previo a través de siembras de tejido infectado en medio Papa-Dextrosa-Agar (PDA) (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020).

Con ayuda de un equipo multifuncional Marca Brother DCP T310 se escanearon las láminas foliares a 300 dpi, con la finalidad de obtener la mejor resolución y conservar la calidad de las imágenes, para así facilitar su análisis. Cada hoja se evaluó de acuerdo a la relación de área enferma y la severidad real en porcentaje con ayuda del software Gimp 2.0 (The GIMP Development Team. USA)



y del programa ImageJ® (Rasband, 2016) donde se cuantificó el área total de cada hoja, el área de la hoja afectada por la enfermedad y la severidad.

Figura 1. Escala diagramática arbitraria para estimar la severidad de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en aguacate (*Persea americana*) de 0 a 6.

Una vez obtenidos los porcentajes de severidad de cada una de las muestras, se procedió a establecer arbitrariamente siete clases de la escala y su descripción con base en las fotografías analizadas, éstas clases van desde 0 o bien, hoja sin síntomas visibles, hasta la clase 6 indicando daño en la lámina foliar por arriba del 50.1% (Figura 1).

Validación de la escala. La escala propuesta fue evaluada en dos ocasiones: la primera evaluación consistió en la observación de muestras foliares por parte de diez evaluadores sin usar la escala, anotando únicamente porcentajes aproximados de severidad. Para la segunda evaluación, los diez evaluadores emplearon la escala propuesta impresa en una hoja tamaño carta y nuevamente anotaron los porcentajes considerando éstos valores. Cabe mencionar que los evaluadores fueron estudiantes de Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable sin experiencia ni conocimientos profundos acerca de la enfermedad.

La precisión de las estimaciones se determinó mediante un análisis de regresión lineal simple, es decir, por el coeficiente de determinación de la regresión (r^2) y el margen de error ($1-r^2$), considerando la severidad real como variable independiente y la severidad estimada como variable dependiente; también se determinó la reproducibilidad de las estimaciones de cada evaluador y del conjunto de evaluadores a través del análisis de concordancia de atributos, estos análisis se realizaron con el paquete estadístico Minitab19.

El área total de la hoja, el área enferma de la hoja y el porcentaje de severidad de las hojas de aguacate analizadas para la elaboración de la escala se muestra en el Cuadro 1. El valor mínimo de severidad fue de 0.45% y el máximo fue de 77.6% para las muestras que presentaron síntomas de antracnosis, por lo que estos rangos fueron considerados para establecer los niveles de daño para la escala (Figura 1). De acuerdo con Tovar-Soto y colaboradores (2002), la toma de muestras y/o de imágenes facilita la cuantificación del porcentaje de severidad y permite establecer

las categorías en una escala basadas en ese porcentaje antes de ser aplicadas en el campo experimental.

Cuadro 1. Porcentajes de severidad de antracnosis en hojas de aguacate cv. “Hass” de Tenancingo, Estado de México.

Número de Hoja	Área Total de la Hoja	Área Enferma de la Hoja	Porcentaje de Severidad
1	373680	0	0
2	430445	1937	.45%
3	418129	20739	4.96
4	376468	32640	8.67
5	398543	92103	23.11
6	423798	187192	44.17
7	439106	340922	77.64

El establecimiento de clases para la escala se facilitó además porque se colectaron suficientes muestras foliares con diferentes grados de severidad, lo cual permitió establecer una escala de medición a través de imágenes en las que se pudiera identificar la mayor cantidad de manchas necróticas asociadas a la enfermedad. El programa ImageJ resultó ser adecuado para la obtención de los porcentajes de severidad, ya que la coloración de las manchas en contraste con la de las hojas, facilitó la segmentación e identificación del daño. Ortega-Acosta y colaboradores (2016) mencionan el uso de las escalas diagramáticas como una herramienta que permite estimar con precisión y exactitud la severidad de las enfermedades, esto coincide con los resultados alcanzados en esta investigación porque la escala propuesta para evaluar la severidad de la antracnosis en frutos de aguacate cv “Hass” mejoró la exactitud y la precisión.

Los resultados obtenidos a través del análisis de regresión lineal simple para determinar la precisión se presentan en el Cuadro 2. Los valores de r^2 para la severidad de antracnosis en las hojas de aguacate sin el uso de la escala variaron

de 0.68 hasta 0.86 con una media de 0.804, mientras que con el uso de la escala, éstos valores fluctuaron de 0.75 hasta 0.92 con una media de .84, éstos valores indican que la precisión fue adecuada, y coinciden con lo reportado por Ortega-Acosta *et al.* (2016) quienes indican que las escalas diagramáticas son reproducibles al presentarse porcentajes de precisión mayores al 80% cuando se combina el 100% de dos evaluaciones.

En estos resultados también se aprecia que la precisión de los evaluadores mejoró considerablemente con el uso de la escala, mientras que para otros, prácticamente se mantuvo el mismo rango en ambas evaluaciones, ante esto, Hernández y Sandoval (2015) hacen referencia a que las escalas diagramáticas suelen confundir a los evaluadores porque la poca o nula experiencia suele generar una sobreestimación de la severidad de las enfermedades, situación que no ocurrió en éste estudio, ya que la falta de experiencia no influyó para sobreestimar la severidad de la antracnosis, aunque no se descarta la posibilidad de mejorar y obtener resultados más precisos en otros estudios de éste tipo si se brinda capacitación previa en los evaluadores.

Cuadro 2. Análisis de regresión lineal simple que relaciona las estimaciones visuales de hojas de aguacate con síntomas de antracnosis hechas por diez evaluadores con y sin el uso de la escala diagramática.

Evaluador	Sin escala			Con escala		
	b	r ²	1- r ²	b	r ²	1- r ²
1	0.86	0.82	0.18	0.92	0.83	0.17
2	0.92	0.81	0.19	0.80	0.78	0.22
3	1.039	0.86	0.14	0.76	0.87	0.13
4	0.89	0.70	0.30	0.82	0.82	0.18
5	0.92	0.84	0.16	0.95	0.85	0.15
6	0.90	0.84	0.16	0.87	0.91	0.09
7	0.80	0.68	0.32	0.70	0.75	0.25

8	0.96	0.80	0.20	0.70	0.80	0.20
9	1.10	0.84	0.16	0.87	0.90	0.10
10	1.16	0.85	0.15	0.98	0.92	0.08
Media	0.95	0.804	0.196	0.83	0.84	0.156

Donde b representa coeficiente de la pendiente, r^2 = coeficiente de determinación de la regresión y $1 - r^2$ representa el margen de error.

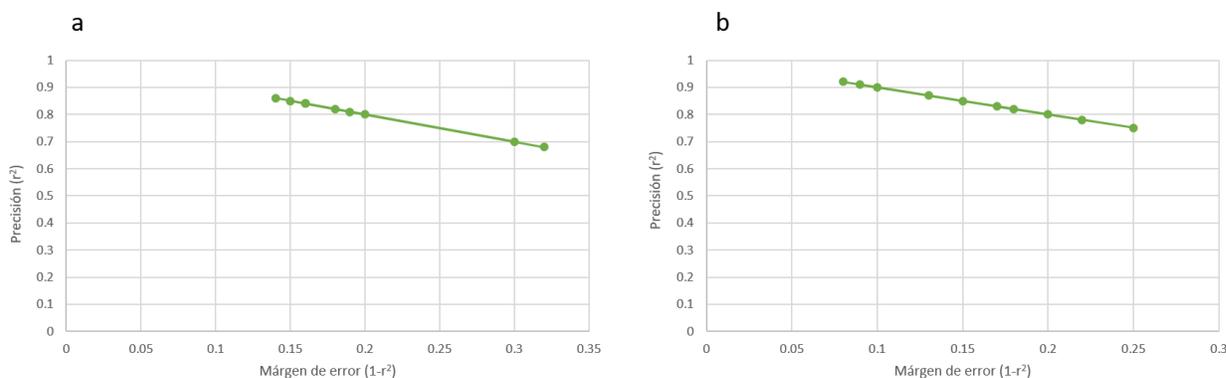


Figura 2. Dispersión de los valores de precisión (r^2) y del margen de error del análisis de regresión lineal simple de la severidad de antracnosis realizada por 10 evaluadores. A) sin el uso de la escala propuesta y sin experiencia en identificación de enfermedades y b) Con el uso de la escala y sin experiencia en enfermedades.

El margen de error de cada uno de los valores de precisión sin emplear la escala se mantuvo entre 0.14 como mínimo y 0.32 como máximo, con una media de 0.196, mientras que éste margen de error en los valores de precisión con el uso de la escala osciló entre .8 y 0.25, con una media de 0.156. Estos resultados indican que la escala ayudó a mejorar la precisión de las estimaciones y, por otro lado, también se considera que el margen de error se presentó dentro del rango aceptable y significativo, como se representa en las gráficas de dispersión para ambas evaluaciones (Figura 2).

Los resultados en los análisis de concordancia mostraron una consistencia aceptable en las estimaciones de los evaluadores al utilizar la escala, puesto que el intervalo de confianza en la medición con ésta llegó hasta un 82%, mientras que en la primera evaluación sin escala únicamente alcanzó el 72%, aseveración que coincide con las estimaciones del coeficiente de determinación, aunque se sugiere para estudios posteriores, elevar el número de evaluadores o en su caso, brindarles capacitación previa para mejorar los porcentajes de reproducibilidad de las estimaciones.

La observación de las muestras de hojas con síntomas de antracnosis les permitió a los evaluadores familiarizarse con la enfermedad y así mejorar la exactitud y precisión al usar la escala, coincidiendo con Michereff *et al.* (2006), pues al realizar una estimación visual de severidad sin un instrumento y posteriormente, emplear una escala, los resultados obtenidos son más precisos en contraste con estudios donde no se utilizan éste tipo de herramientas.

Por lo tanto, el uso de la escala diagramática para la evaluación de la antracnosis en las hojas de aguacate produce una alta correlación con los valores reales de severidad, reflejado en una alta precisión por parte de los evaluadores. Lo antes mencionado, es de relevancia sobre todo para los productores de aguacate, ya que podrán utilizar ésta escala para cuantificar y conocer el porcentaje de daño en sus huertas debido no sólo a que proporciona mejoras significativas en los niveles de exactitud, precisión y reproducibilidad de las estimaciones, sino que también puede ser utilizada en estudios epidemiológicos y de comparación de medidas de control de la antracnosis en la zona aguacatera del Estado de México.

Conclusiones

Se diseñó y validó una escala diagramática arbitraria de siete clases para estimar la severidad de la antracnosis en hojas de aguacate cv. "Hass" para la región aguacatera de Tenancingo, Estado de México, misma que representa un

método estandarizado para obtener resultados factibles, proporcionando niveles de precisión y reproducibilidad adecuados, y podrá ser utilizada como herramienta de apoyo para estudios relacionados con la antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México.

Agradecimientos

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

LITERATURA CITADA

Acevedo JCG. 2021. Diseño de una escala diagramática para evaluar la severidad del mildiú *Pseudoperonospora cubensis* en pepino en Morelos, México. Tesis de Posgrado. Universidad Autónoma de Morelos. Indicar número de páginas.

Bock CH, Parker PE, Cook AZ and Gottwald TR. 2008. Characteristics of the perception of different severity measures of citrus canker and the relations between the various symptom types. *Plant Disease* 92:927-939.

Del Ponte EM, Pethybridge SJ, Bock CH, Michereff SJ, Machado FJ and Spolti P. 2017. Standard area diagrams for aiding severity estimation: scientometrics, pathosystems and methodological trends in the last 25 years. *Phytopathology* 107:1161-1174. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-17-0069-FI>.

Ferreira AC, Citadin I, Scariotto S, Pertille RH, Sachet MR, Guerrezi MT, and Donazzolo J. 2021. Escala diagramática para avaliação da severidade de Antracnose em frutos de feijoa. *Ciencia rural*, 51:3-1.

Gabriel J y Castro C. 2017. Manual para evaluación de daños de enfermedades en cultivos agrícolas. Grupo COMPAS, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. 53 p.

- Hernández RL, y Sandoval IJS. 2015. Escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz. Revista Mexicana de Fitopatología, 33:1, 95-103. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018533092015000100095&lng=es&tlng=es.
- Hernández, TA y Montoya R. 1987. Epidemiología cuantitativa aplicada al análisis de algunas enfermedades de cultivos tropicales. (No. IICA PM-A3/PE 86-008). IICA, Lima (Perú) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Agronomía.
- Michereff SJ, Noronha MA, Andrade DEGT, Oliveira EP, Filha MS and Moreira PAA. 2006. Development and validation of a diagrammatic key for *Cercospora* leaf spot of sweet pepper. Summa Phytopathologica 32:260-266.
- Ortega-Acosta SA, Velasco-Cruz C, Hernández-Morales J, Ochoa-Martinez D y Hernández-Ruíz, J. 2016. Diagrammatic logarithmic scales for assess the severity of spotted leaves and calyces of roselle. Revista Mexicana de Fitopatología 34: 270-285.
- Palomares-Pérez M, Rodríguez-Leyva E, Ortega-Arenas LD, Santillán-Galicia M, Valdovinos-Ponce G y Ramírez-Alarcón S. 2016. El Cacarizo del nopal en *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, Milpa Alta, Ciudad de México. Agrociencia, 50:7, 877-887.
- Ramírez-Gil JG and Morales-Osorio JG. 2020. Desarrollo y validación de escalas de severidad del complejo marchitez del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi*, *Verticillium dahliae* y el desorden hipoxia-anoxia y sus respuestas fisiológicas en plantas de aguacate. Agronomía Colombiana, 38:1. DOI: 10.15446/agron.colomb.v38n1.78527

Rasband WS. 2016. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij>.

Reina-Noreña J, Mayorga-Cobos MJ, Caldas-Herrera SJ, Rodríguez-Valenzuela J y Varón-Devia EH. 2015. El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 16:2, 265-278. https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num2_art:372

Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Salgado-Siclán, ML, Castañeda-Vildózola Á, Maldonado-Zamora FI y Lara-Díaz AV. 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.org/10.1016/j.ram.2019.07.004

Tovar-Soto A, Hernández-Martínez MH, Cristóbal-Alejo J, Romero-Hijo R y Mora AG. 2002. Escala logarítmica diagramática de severidad de la mancha negra (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) en chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.). Revista Mexicana de Fitopatología, 20:1,103109. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61220117>

Valcarce-Diñeiro R. 2020. Seguimiento y clasificación de parámetros biofísicos de superficies agrícolas a partir de sensores remotos radar.

Zavala-León MJ y Cristóbal-Alejo J. 2012. Escala logarítmica diagramática de severidad de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en papaya (*Carica papaya*). Fitosanidad, 16:2,83-86. ISSN: 1562-3009. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209126216004>

9.4 DETERMINATION OF THE SPATIAL BEHAVIOR OF ANTHRACNOSE USING SPATIAL STATISTICS IN AVOCADO CULTIVATION

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE ANTRACNOSIS UTILIZANDO ESTADÍSTICA ESPACIAL EN EL CULTIVO DE AGUACATE

Atenas Tapia-Rodríguez¹, José Francisco Ramírez-Dávila^{2*}, Jesús Gaudencio Aquino-Martínez², Martín Rubí-Arriaga² y Alfredo Ruiz-Orta¹.

1. Universidad Autónoma del Estado de México. Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.
2. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas.

*Autor de correspondencia (jframirezd@uaemex.mx)

RESUMEN

La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en el cultivo de aguacate, la cual ocasiona pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México. El conocimiento de la distribución espacial de las enfermedades agrícolas en campo puede considerarse como estrategia para focalizar las medidas de control, por lo que la aplicación de métodos geoestadísticos facilita ésta labor. El objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate Hass en Coatepec Harinas y Tenancingo, Estado de México, a partir de la comparación de la estadística clásica y la geoestadística. Los resultados obtenidos a través de mapas y semivariogramas, muestran la presencia

de centros de agregación, y una distribución espacial ajustada en su mayoría a modelos de tipo gaussiano y exponencial; con rangos que fluctúan entre los 12 y los 56 metros, indicando asociación entre los datos; así mismo, 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.

Palabras clave: krigeado ordinario, agregación, aguacate

SUMMARY

Anthracoze is one of the fungal diseases that occurs in avocado crops on a recurring basis, causing significant economic losses for the productive sector of the State of Mexico. In order to focus control measures, it is important to know the spatial distribution and dynamics that diseases such as anthracnose follow in the field. 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 elaborated maps show the presence of aggregation centers, and a distribution adjusted mostly to Gaussian and exponential type models; with ranges that fluctuate between 12 and 56 meters, indicating an association between the data; Likewise, the highest percentage of infected surface was 99% for the first sampling in April,

while for the first sampling in November, the highest percentage was 98% in both municipalities. Geostatistics allows to know precisely what are the distribution patterns that diseases such as anthracnose follow in avocado areas in the State of Mexico and facilitates the implementation of integrated management programs with greater effectiveness.

Key words: Kriging, aggregation, avocado

INTRODUCCIÓN

Actualmente las actividades agrícolas son las que hoy en día generan grandes índices de contaminación en todo el planeta, y México, no ha sido la excepción. Cada año, la superficie cultivada de aguacate se incrementa en los estados donde se concentra la mayor parte de la producción nacional, situación que favorece el cambio de uso de suelo forestal a superficie agrícola, generando grandes problemas como menor captura de carbono, incremento de temperatura global, entre otros (Chávez *et al.*, 2012).

El aguacate (*Persea americana* L.) se ha convertido en un sistema agrícola eficiente en México durante los últimos años, aportando alrededor del 50% de la producción mundial (Food and Agriculture Organization, 2020); no obstante, enfermedades como la antracnosis y la roña son reportadas por Trinidad *et al.* (2017) y Alfaro *et al.* (2017), argumentando que los daños ocasionados por éstas, generan pérdidas económicas de hasta el 40% en volumen de producción, situación que afecta considerablemente a los productores.

La antracnosis es una enfermedad fúngica provocada por hongos del complejo *Colletotrichum*, siendo *Colletotrichum gloeosporioides* el responsable de ésta

enfermedad en todos los municipios del Estado de México donde se cultiva actualmente el aguacate. De acuerdo con Morales (1996) y Lemus *et al.* (2017), la incidencia de esta enfermedad oscila entre un 42 a un 74%, siendo una de las más importantes reportadas para este cultivo causando daños que dificultan su comercialización en mercados nacionales e internacionales. El ciclo de la enfermedad comienza cuando los apesorios expulsan los conidios hacia el suelo y partes del árbol, a su vez, éstos son dispersados a través de salpicaduras de agua de lluvia, por insectos vectores y también por el propio manejo cultural de los productores (McMahon y Purwantara, 2004). Por otro lado, también se destaca que la presencia y mecanismos de dispersión de las enfermedades dependerá en gran parte de qué tan susceptible sea la planta hospedera al ataque de hongos como *C. gloeosporioides*.

Van Maanen y Xu (2003) mencionan que la estructura espacial de una enfermedad como la antracnosis, está determinada también por las condiciones ambientales y las características del patosistema; por lo que diversos estudios argumentan que el desarrollo de destrezas para el manejo de posibles enfermedades en los cultivos agrícolas responde en gran medida a la dinámica que siguen las enfermedades en un espacio y tiempo determinado (Agrios, 2004).

Sin embargo, la correcta aplicación de métodos y modelos adecuados, de acuerdo con Campbell y Madden, (1990), sí depende en gran parte del aumento y progreso de la enfermedad en el tiempo y espacio, pero también de las interacciones entre las plantas hospederas y patógenos, las variables ambientales como temperatura y humedad, y finalmente, también influye el manejo del cultivo.

Considerando lo anterior, diversos estudios también se han enfocado en conocer y analizar la distribución espacial de las enfermedades agrícolas empleando los métodos comúnmente utilizados en la estadística “clásica”, los cuales se fundamentan en el empleo de distribuciones e índices de dispersión, por lo que no consideran la disposición espacial exacta de la variable, generando efectos inesperados, debido a que éstos métodos no logran diferenciar modelos espaciales diferentes, y sus representaciones dependen principalmente de la relación presente entre la media y la varianza (Sawyer, 1989; Hurlbert, 1990) y también del tamaño de las unidades de muestreo, por lo que no toman en cuenta todo el patrón espacial (van Maaden y Xu, 2003).

Debido a éstos efectos anteriormente mencionados y al empleo de nuevos programas estadísticos eficientes, el interés por aplicar herramientas de la estadística espacial en la agronomía se ha incrementado considerablemente, es por eso que la Geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), son actualmente metodologías que han demostrado ser de gran ayuda para el manejo de las plagas y enfermedades agrícolas, debido a que se centran en calcular, interpolar, extrapolar y simular el comportamiento y dependencia espacial entre variables equidistantes (Ramírez-Dávila y Porcayo, 2009a).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio consistió en analizar el comportamiento espacial de la enfermedad fúngica antracnosis del aguacate en Coatepec Harinas y Tenancingo, en el Estado de México, México, a través del empleo de la Geoestadística y la estadística clásica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó durante el año 2020 en el Estado de México, propiamente en los municipios productores de aguacate, Coatepec Harinas ($18^{\circ}54'00''\text{N}$ $99^{\circ}43'00''\text{O}$) y Tenancingo ($18^{\circ}57'38''\text{N}$ $99^{\circ}34'32''\text{O}$) durante los meses de julio de 2019 a junio de 2020 (INEGI, 2021).

Distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales de cada municipio, se seleccionaron cuatro parcelas de aguacate, cada una 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 fueron georreferenciados con un DGPS y utilizados para medir la incidencia de antracnosis en 12 frutos de cada árbol, considerando síntomas como manchas necróticas de tonos marrones, hundidas y con masas de esporas de color rosado. En total se muestrearon 400 árboles por parcela.

Los datos de incidencia de antracnosis correspondientes a cada uno de los muestreos se ordenaron exploratoriamente en una base de datos, así mismo, se empleó la Prueba de Curtosis y el coeficiente de variabilidad para determinar la normalidad en los mismos (Marcano *et al.* 2020). Cabe mencionar, que la identificación de *C. gloeosporioides* se hizo en el Laboratorio de Fitopatología de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx.

ESTADÍSTICA CLÁSICA

Las distribuciones estadísticas (binomial negativa y Poisson) y los índices de dispersión (de dispersión y de Green) fueron los métodos utilizados en este estudio para compararlos con la estadística espacial (Espinoza *et al.*, 2019).

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

Para la estimación del semivariograma experimental, se emplearon los datos de incidencia de frutos con síntomas de antracnosis recolectados en los distintos muestreos de cada parcela experimental, utilizando el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New York, USA) y el WinGslib 2002.

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE SEMIVARIOGRAMA Y SU VALIDACIÓN

Una vez obtenidos los semivariogramas experimentales, éstos se ajustaron a un modelo de semivariograma teórico, los cuales representan funciones analíticas sencillas que se emplean para mostrar los semivariogramas auténticos (Englund y Sparks, 1988). Los modelos teóricos más comunes y a los cuales se ajustaron los semivariogramas experimentales realizados fueron el Modelo Esférico y el Modelo Exponencial (Samper y Carrera, 1996; Rivera-Martínez *et al.*, 2018). En este estudio los semivariogramas ajustados fueron omnidireccionales ya que no existía una tendencia predeterminada por la enfermedad para distribuirse hacia ciertas zonas de las parcelas de estudio. Para realizar el ajuste de los semivariogramas experimentales a los modelos teóricos se utilizó la extensión Geoestadística del Software Variowin 2.0.2.

Los modelos del semivariograma teórico fueron validados 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.

NIVEL DE DEPENDENCIA ESPACIAL

El nivel de dependencia espacial en éste estudio se logró obtener a partir de la división del efecto pepita entre la meseta, expresando el resultado en porcentaje; por lo que si el resultado de ésta división se encuentra por debajo de 25%, se considera que el nivel de dependencia espacial es alto, aunque si éste porcentaje oscila entre 26 y 75% el nivel de dependencia espacial será considerado como moderado, pero sí dicho porcentaje es superior o igual al 76%, indica que el nivel de dependencia espacial es bajo (Rivera-Martínez *et al.*, 2020).

MAPEO POR KRIGING Y SUPERFICIE INFECTADA

Después del ajuste de los semivariogramas, se llevó a cabo la interpolación de datos mediante Kriging ordinario para permitir la visualización de 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 obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo principal en este estudio fue analizar el comportamiento espacial y generar mapas de la distribución de la antracnosis en el cultivo de aguacate en dos

municipios productores del Estado de México. Para ello, se utilizaron métodos de estadística clásica y de estadística espacial.

ESTADÍSTICA CLÁSICA

Los resultados acerca de la distribución espacial de la antracnosis encontrada en cada sitio experimental, se encuentran ordenados en el Cuadro 1. El índice de dispersión para todas las fechas de muestreo en Coatepec Harinas mostró una distribución agregada de la antracnosis, con excepción del segundo muestreo de agosto, el segundo muestreo de septiembre, el primer muestreo de diciembre, el primer muestreo de febrero, el primer muestreo de junio y el segundo de julio, donde existe una distribución aleatoria.

En Tenancingo, la mayoría de los muestreos presentaron una 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 nuevamente a una distribución de tipo aleatorio. La agregación quedó confirmada con los valores del índice de Green, aunque en este caso, para todos los muestreos en ambos municipios, ya que los valores tan bajos de éste índice indican una ligera agregación (Cuadro 1). Ramírez *et al.* (2009) argumentan que éste doble ajuste puede deberse a que la Binomial Negativa tiende a la distribución de Poisson porque presenta altos valores en el parámetro k , y al ajustar estadísticamente por máxima verosimilitud, los dos modelos de distribución concuerdan con los datos.

Los datos obtenidos en los muestreos de octubre, febrero, segundo de mayo y primero de junio en Coatepec Harinas, no fueron ajustados a alguna distribución

estadística, mientras que, para Tenancingo, esto ocurrió en los muestreos de septiembre, segundo muestreo de diciembre, segundo de marzo y primer muestreo de mayo, donde no se obtuvo coincidencia en los estadísticos de ajuste por máxima verosimilitud. Esto ejemplifica una de las restricciones que se presentan al pretender ajustar distribuciones estadísticas a los datos obtenidos; ésta situación indica posiblemente que el método de evaluación no resultó adecuado; de acuerdo con Taylor, citado por Clavijo (1993) y por Vivas y Notz (2011), se muestra la imposibilidad del método empleado para estimar una distribución real, por lo que resulta necesario incrementar la cantidad de muestras (Kogan y Herzog, 1980; Taylor, 1984; Gómez e Higuera, 1986). Estos resultados, manifiestan una limitante en éstos métodos de la estadística clásica para detectar de manera precisa la distribución espacial de la antracnosis en éste estudio.

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

En este trabajo se realizaron un total de 48 muestreos en los municipios estudiados, obteniendo 48 mapas de incidencia y 48 semivariogramas ajustados a modelos teóricos. Para cada zona experimental donde se muestreó antracnosis, se presentan los modelos y parámetros de los semivariogramas ajustados, los cuales se encuentran detallados en el Cuadro 3.

Para el municipio de Coatepec Harinas, los modelos del semivariograma se ajustaron en su mayoría a modelos de tipo gaussiano, exponencial y esférico, éste último solo en los muestreos de julio, agosto, septiembre, enero y marzo. En este estudio, se hizo evidente la relación entre los mayores niveles de incidencia de antracnosis con 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).

La antracnosis en agregados se presentó sobre todo durante agosto, septiembre, noviembre y diciembre, coincidiendo con considerables cambios de temperatura, humedad y precipitación en las zonas de muestreo, aunque en el resto de los muestreos, la enfermedad se comportó estable, estos resultados pueden apreciarse detalladamente en el Cuadro 2.

De igual manera, en el municipio de Tenancingo se presentó una tendencia de la enfermedad representada a través de modelos de tipo gaussiano nuevamente, aunque no se descartó el ajuste a modelos de tipo exponencial, por lo que se atribuye que un comportamiento esférico no es frecuente para ésta enfermedad dentro de las zonas de muestreo. Cuando un modelo de semivariograma se ajusta al tipo gaussiano, muestra agregación continua de la enfermedad dentro del área muestreada (Rivera-Martínez *et al.* 2020).

Por otro lado, los valores de rango fluctuaron entre 22,4 como mínimo y 56,7 metros como máximo para Coatepec Harinas, este último valor asociado a un modelo gaussiano; mientras que 12 como mínimo y 41,4 metros como máximo fueron los valores de rango para Tenancingo. El parámetro rango representa la máxima distancia hasta la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, por lo tanto, se asume que más allá del valor máximo de la distancia, se presentará una dependencia espacial nula. Resulta importante señalar que la distancia máxima encontrada de 56.7 es considerable, debido al tamaño del

área de estudio. Lo anterior establece entonces que, presentar rangos altos indica que el respectivo modelo establecido explica en un sentido de distancia más amplio el comportamiento espacial de la variable (Maldonado-Zamora *et al.* 2016).

Tannure *et al.* (2013) mencionan que la presencia de patrones agregados indica interacciones entre los patógenos, o entre los patógenos y el medio, sin embargo, se sabe que 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.

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

Los valores de meseta, más bajos en Coatepec Harinas estuvieron asociados en su mayoría a modelos de tipo exponencial y esférico, mientras que los más altos, los presentaron modelos gaussianos y dos modelos esféricos. En el caso de Tenancingo, ocurrió que el valor más alto para este parámetro se asocia más a modelos exponenciales, los cuales presentaron los valores más altos.

En el Cuadro 2 se observa además que, en lo que concierne al efecto pepita, para todas las fechas de muestreo fue de cero, indicando inexistentes errores de muestreo y el adecuado empleo de una escala de muestreo para el monitoreo de la

antracnosis, coincidiendo ampliamente con lo que mencionan Oliver y Webster (1998) 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 éste caso fue de un 98%.

MAPEO Y SUPERFICIE INFECTADA

Resultó muy evidente el avance de la enfermedad con la aparición y mantenimiento de los parches de infección con el paso de los meses de muestreo, esto se pudo observar gracias a los mapas realizados para determinar la superficie infectada, basándonos en las estimaciones realizadas con la técnica del krigado ordinario, método también empleado por Cárdenas *et al.* (2017), quienes evidenciaron con ayuda de los mapas generados, el progreso espacio-temporal de la enfermedad pudrición negra del fruto en cacao, probando la importancia del análisis espacial para la innovación y creación de diversas estrategias de manejo de infecciones frecuentes en las plantas económicamente importantes. Los mapas de la antracnosis en Coatepec Harinas y Tenancingo, elaborados a través del método de krigado ordinario se muestran en las Figuras 1 y 2 respectivamente.

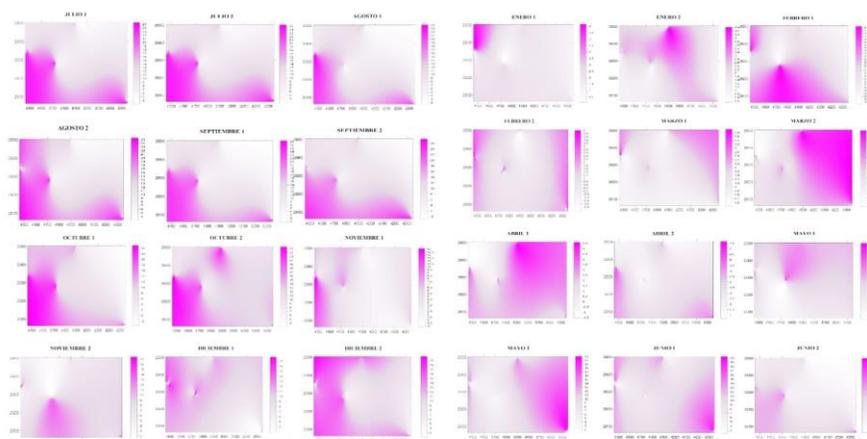


Figura 1. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas en el Estado de México, México.

En los mapas mostrados, se aprecian parches de agregación de la antracnosis en las dos zonas de estudio (Coatepec Harinas y Tenancingo). Se logra incluso distinguir cierta relación entre el promedio de frutos enfermos detectados en cada caso con el número de centros de agregación presentes. Por lo tanto, se infiere que cuando se presenta un alto número de centros de agregación, la densidad de la enfermedad también será elevada (Quiñones *et al.*, 2016).

En todos los muestreos, los centros de agregación de la antracnosis se encontraron distribuidos en la totalidad de las zonas de estudio. Así mismo, resultó interesante conocer si la infección de la enfermedad era general en las dos zonas, por lo tanto, se determinó el porcentaje de superficie infectada para cada uno de los municipios. 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 que se refleja en los modelos obtenidos que denotan la agregación de la antracnosis.

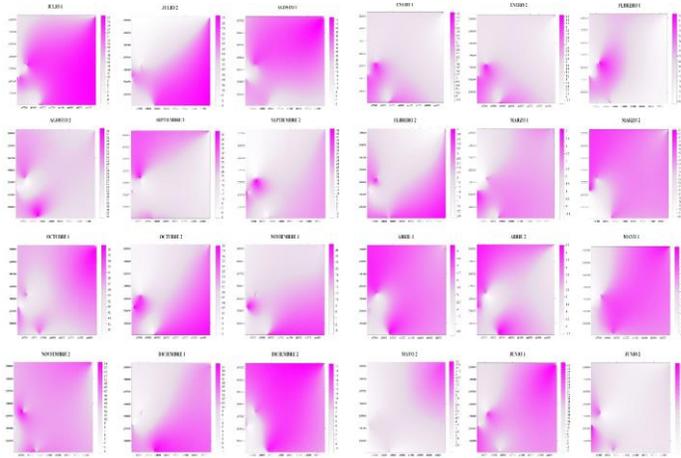


Figura 2. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Tenancingo, Estado de México, México.

De manera general, se observó en los mapas que el área libre de infección se redujo en contraste con una densidad mayor de la enfermedad. Detectando así que, durante los muestreos en los meses de octubre, noviembre, parte de diciembre y febrero en Tenancingo el porcentaje de superficie infectada fue mayor del 90%, mientras que, durante el primer muestreo de agosto, el segundo muestreo de septiembre y el primero de octubre, la superficie infectada fue menor, alcanzando únicamente un 82%.

En el caso de Coatepec Harinas, los porcentajes más altos oscilaron por arriba del 90% de superficie infectada con antracnosis se presentaron casi en la totalidad de las fechas de muestreo, con excepción de los muestreos de agosto, el primer muestreo de septiembre, el segundo muestreo de marzo, el primero de abril y el primer muestreo de mayo.

Pese a que la antracnosis se encontraba en condiciones óptimas para su desarrollo, debido a la presencia de alta humedad relativa, temperaturas elevadas

por encima de los 20°C y a precipitaciones constantes, el porcentaje de infección alcanzado para ambas zonas de estudio, jamás llegó al 100%. Esto también puede explicarse debido a factores como la edad del cultivo, la cantidad de frutos, la cosecha de los mismos, por supuesto, a las medidas de control que se aplicaron en las zonas de estudio (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 geoestadísticos como éste, porque al detectar áreas libres de infección, las medidas de control que se pudiesen tomar para detener el avance de la enfermedad, no implicarían un control general de las zonas afectadas, sino que las que ya están establecidas, se aplicarían únicamente en las áreas realmente dañadas, es decir, el control sería dirigido, lo cual evitaría un gasto innecesario en productos químicos para el productor y por lo tanto, favorecería un ahorro económico para el productor y la disminución del impacto en los recursos naturales y medio ambiente en lo general.

Para contrastar, éste estudio propone controlar a la antracnosis de manera eficaz, ya sea a través de control cultural preventivo que incluya podas fitosanitarias y el retiro de hojas y ramas que representan la fuente del inóculo en los huertos de aguacate; por otro lado, también 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. Sabemos que el comportamiento espacial de los organismos como *C. gloeosporioides* es variable,

por lo que nunca encontraremos un patrón de distribución igual año con año en las parcelas, pero si se logran identificar los sitios específicos donde se presenta con mayor frecuencia o los nichos ecológicos utilizados por la enfermedad, se pueden focalizar las medidas y evitar su diseminación a todas las plantas. El empleo de cualquier método de control, ya es decisión, en éste caso, del productor, aunque lo ideal es que éste control fuera el menos agresivo hacia el ambiente.

En comparación con la estadística clásica, la geoestadística permite obtener una descripción de la distribución espacial de las enfermedades como la antracnosis con mayor precisión en contraste con la obtenida a través de los índices de dispersión, por lo tanto, el método de muestreo de la enfermedad y las medidas de control pueden optimizarse de manera adecuada, e incluso determinar cuando el umbral económico de daños asociados a ésta enfermedad se rebasa (Farías *et al.*, 2004).

Por lo tanto, si se diera un manejo más adecuado a las huertas de aguacate que ya están establecidas, no habría necesidad de seguir incrementando la superficie cultivada ni de reducir el intercambio genético al producir solo una variedad (monocultivo), ya que esto, es precisamente una de las causas de mayor contaminación por el uso de agroquímicos para controlar los problemas fitosanitarios.

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 y también al medio ambiente, aprovechando de manera más eficiente los recursos naturales de los que los ecosistemas nos proveen.

CONCLUSIONES

Los índices de dispersión y las distribuciones estadísticas mostraron de manera general 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 Geoestadística presentaron un comportamiento espacial en agregados, con la enfermedad distribuida en forma de parches y con un nivel de dependencia espacial alto.

Los mapas de interpolación obtenidos a partir de método de krigeado 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.

AGRADECIMIENTOS

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

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro E.E., G.J.L. Morales y S.M.E. Pedraza (2017) Hongos asociados al síndrome de la roña del aguacate en el estado de Michoacán, México.

Bassanezi R.B. and F.F. Laranjeira (2007) Spatial patterns of leprosis and its mite vector in commercial citrus groves in Brazil. *Plant Pathology* 56:97-106.

Campbell C.L. and LV. Madden (1990) Introduction to plant disease epidemiology. New York: Wiley Editorial; p. 53-90.

Cárdenas-Pardo N.J., A. Darghan, MD Sosa-Rico, A. Rodríguez (2017) Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. Acta biol. Colomb. 2017;22(2):209-220. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>

Clavijo, S. A (1993) Fundamentos de manejo de plagas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas, Venezuela. 205 p.

Chávez-León G., L. Tapia, M. Bravo, J. Reyes, H. Flores, I. Fernández, M.C. Guzmán, J. Ánima, F. Ramírez, J. Pérez, J. Rocillo, M. Mendoza (2012) Impacto del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate (impact of forest land use change to avocado orchards).

Espinoza-Zúñiga, P., J.F Ramírez-Dávila, D. Cibrián-Tovar, A. Villanueva-Morales, V.D. Cibrián-Llenderal, D.K. Figueroa-Figueroa y R. Rivera-Martínez (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. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100017>

Farias, P.R.S., S.R. Roberto, J.R.S. Lopes and D. Perecin (2004) Geostatistical characterization of the spatial distribution of *Xylella fastidiosa* sharpshooter vectors on citrus. Neotropical Entomology, 33:13-20.

Ferguson, A., Z. Klukowski, B. Walczak, J. Perry, M. Mugglestone, S. Clark and I. Williams (2000) The spatio-temporal distribution of adult *Ceutorhynchus assimilis*

in a crop of winter oilseed rape in relation to the distribution of their larvae and that of the parasitoid *Trichomalus perfectus*. Entomologia Experimentalis et Applicata, 95: 161-171. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2000.00654.x>

Food and Agriculture Organization (FAO) (2020) Análisis del mercado de las principales frutas tropicales. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>

Gómez A. D. y A. M. Higuera (1986) Bases para el manejo integrado de plagas. Revisión crítica de la investigación entomológica. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Estación Experimental Zulia. Serie D N° 1-21. Maracaibo, Venezuela. 92 p

Harris I., T.J., Osborn, P. Jones and D.H. Lister (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. Sci Data 7, 109 <https://rdcu.be/b3nUI>

Kogan M. and D. C. Herzog (1980) Sampling methods in soybean entomology. Springer-Verlag. New York. USA. 587 p.

Maldonado-Zamora F.I 2016. Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 7: 845-856. 2016.

Marcano G. R., R. S. Acuña and R. B Maestre (2020) Procedimientos estadísticos utilizados en las tesis de maestría en Agricultura Tropical Universidad de Oriente Periodo 1998-2016. Comunicaciones en Estadística, 13(1), 45-66.

McMahon P. and A. Purwantara (2004) Phytophthora on cocoa. In: Drenth A, Guest D, editors. Diversity and Management of Phytophthora in Southeast Asia, 1ra. Ed. Australian Centre for International Agricultural Research. 114:104- 115

Mekuria W., A. Amare and C. Alemayehu (2016) Evaluación de la marchitez bacteriana (*Xanthomonas campestris* pv. *Musacearum*) del enset en el sur de Etiopía. *African Journal Agriculture Research* 11 (19): 1724-1733.

Morales G. J. (1996) Caracterización cultural, morfológica, patogénica y molecular de *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. Causante de la antracnosis del aguacate en Michoacán. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 96 p.

Oliver M. and R. Webster (1997) How geostatistics can help you. *Soil Use Manag.* 7: 206-217.1998.

Quiñones-Valdez R., J.R. Sánchez-Pale, A.K. Pedraza-Esquivel, A. Castañeda-Vildózola y O. Franco-Mora (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(2), 209-220.

Ramírez-Dávila J.F. y C.E. Porcayo (2009^a) Comportamiento espacial de las larvas del mosquito verde *Jacobiasca lybica*, en un viñedo de secano en Andalucía España. *Ciencia ErgoSum* 16:116-127.

Ramírez-Dávila J.F. y C.E. Porcayo (2009^b) Estudio de la distribución espacial del muérdago enano (*Arcetobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México utilizando el método del SADIE. *Madera y Bosques*. 15:147-160.

Ramírez-Dávila J.F., J.R. Sánchez Pale y C. De León (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), 1-14.

Reina-Noreña J., M.J Mayorga-Cobos., S.J. Caldas-Herrera, J. Rodríguez-Valenzuela, E.H. y Varón-Devia (2015) El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. Corpoica Cienc Tecnol Agropecu. 16(2):265-278

Rivera-Martínez R., J.F. Ramírez-Dávila y A.D. Acosta-Guadarrama (2018) Distribución espacial de las poblaciones de huevos de *Bactericera cockerelli* Sulc. en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Acta Universitaria. 28. 24-33. 10.15174/au.2018.1944.

Santos J.V. and R. Noronha (2019) Análise geoestatística do patossistema da folha curta em plantação de coco na Amazônia Oriental. Orientador: Paulo Roberto Silva Farias 45 f.

Sánchez-Pale J. R., J.F Ramírez-Dávila, A. González-Huerta y C. De León (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.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021)

Taliei F., N. Safaie and M.A. Aghajani (2013) Spatial distribution of *Macrophomina phaseolina* and soybean charcoal rot incidence using geographic information system

(A case study in Northern Iran). Journal of Agricultural Science and Technology 15: 1523- 1536

Tannure C.L., S.M. Mazza y L.I. Giménez () Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*).

Taylor L.R. (1971) Aggregation as a species characteristic. Spatial patterns and statistical distributions. The Pennsylvania State University Press. University Park. London, UK. p. 357-377.

Torres E.J. y L.A. Tovar (2019) Tres procedimientos de análisis epidemiológico en palma de aceite e incorporación de atributos del paisaje. Revista Palmas, 31(especial), 403-415. 2010

Trinidad, A. E. et al 2017. Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate de Nayarit, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas [Internet]. [citado 30jul.2020];(19):3953-64.

van Maanen A. and X.M. Xu (2003) Modeling plant disease epidemics. Europ J Plant Pathol.;109(7):669-682. Doi:10.1023/A:1026018005613.

Vivas L.E. and A. Notz (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(1), 109-125.

Winder L., J. Perry, J. Holland (1999) The spatial and temporal distribution of the grain aphid *Sitobion avenae* in winter wheat. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 93:227- 290. 1999.

Cuadro 1. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas de la antracnosis en el cultivo de aguacate para los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo.

Coatepec Harinas						Tenancingo					
FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	k	FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	k
ago-01	1.52s	0.25	NS	S	2.05	ago-01	2.07s	0.58	NS	S	2.59
ago-02	0.65ns	0.09	NS	S	4.26	ago-02	2.39s	0	NS	S	1.26
sep-01	1.66s	0.33	NS	S	3.71	sep-01	1.22s	0.48	NA	NA	-
sep-02	0.91ns	0.59	S	S	11.21	sep-02	1.40s	0.08	NA	NA	-
oct-01	1.57s	0.07	NA	NA	-	oct-01	1.69s	0.67	NS	S	2.8
oct-02	1.80s	0.72	NS	S	2.84	oct-02	1.53s	0.93			1.66
nov-01	1.44s	0.84	NS	S	1.65	nov-01	0.87ns	0.51	S	S	19.11
nov-02	2.05s	0.06	NS	S	2.29	nov-02	2.13s	0.09	NS	S	1.21
dic-01	0.84ns	0	S	S	13.06	dic-01	1.91s	0.51	NS	S	3.08
dic-02	1.71s	0.98	NS	S	3.14	dic-02	2.25s	0	NA	NA	-
ene-01	2.16s	0.45	NS	S	1.83	ene-01	1.48s	0.82	S	S	13.99
ene-02	1.95s	0.39	NS	S	3.4	ene-02	1.65s	0.99	NS	S	2.44
feb-01	0.72ns	0.55	NA	NA	-	feb-01	2.03s	0.42	NS	S	1.95
feb-02	1.50s	0.81	NS	S	0.97	feb-02	0.70ns	0.97	NS	S	2.33

mar-01	1.62s	0.68	NS	S	1.35	mar-01	1.74s	0.73	NS	S	1.2
mar-02	2.14s	0.49	NS	S	2.68	mar-02	1.43s	0.06	NA	NA	-
abr-01	2.26s	0.05	S	S	15.9 3	abr-01	1.92s	0.44	NS	S	2.02
abr-02	1.98s	0.76	NS	S	0.82	abr-02	1.58s	0.76	NS	S	0.86
may-01	1.49s	0.88	NS	S	1.39	may-01	0.84ns	0.63	NA	NA	-
may-02	1.84s	0.63	NA	NA	-	may-02	2.28s	0.37	NS	S	2.49
jun-01	0.79ns	0	NA	NA	-	jun-01	1.69s	0.62	NS	S	3.51
jun-02	2.23s	0.74	NS	S	1.42	jun-02	2.47s	0.87	NS	S	0.75
jul-01	2.42s	0.92	NS	S	0.94	jul-01	0.96ns	0	S	S	17.0 3
jul-02	0.88ns	0.69	NS	S	1.07	jul-02	2.33s	0.57	NS	S	1.15

S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No

Ajustada

Cuadro 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.

COATEPEC HARINAS								TENANCINGO				
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.	MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO
ago-01	10.89	53.8	EXPO	0	30.45	35.1	0	ALTA	ago-01	19.86	119.15	GAUSS
ago-02	12.36	61.88	ESERICO	0	59.94	43.2	0	ALTA	ago-02	20.29	116.16	GAUSS
sep-01	12.89	66.42	ESFER	0	3.29	45.9	0	ALTA	sep-01	22.39	154.47	ESFER
sep-02	9.89	36.95	EXPO	0	54.27	56.7	0	ALTA	sep-02	22.25	180.62	EXPO
oct-01	11.05	55.59	EXPO	0	1.67	23	0	ALTA	oct-01	20.1	136.36	GAUSS
oct-02	10.7	45.65	EXPO	0	2.82	43.2	0	ALTA	oct-02	18.85	109.73	EXPO
nov-01	3.81	9.69	EXPO	0	1.02	27	0	ALTA	nov-01	14.43	80.93	EXPO

nov-02	10.73	36.77	EXPO	0	3.01	37.8	0	ALTA	nov-02	14.19	59.04	EXPO
dic-01	10.6	31.71	GAUSS	0	2.13	29.9	0	ALTA	dic-01	10.11	36.32	GAUSS
dic-02	9.97	34.75	GAUSS	0	3.39	35.1	0	ALTA	dic-02	8.89	31.05	EXPO
ene-01	1.5	2.27	ESFER	0	48.18	40.5	0	ALTA	ene-01	2.23	1.88	ESFER
ene-02	1.68	1.41	GAUSS	0	34.78	45.9	0	ALTA	ene-02	1.82	1.49	GAUSS
feb-01	2.5	2.04	GAUSS	0	6.79	45.9	0	ALTA	feb-01	2.56	1.92	EXPO
feb-02	2.08	4	GAUSS	0	34.76	29.7	0	ALTA	feb-02	2.22	1.61	EXPO
mar-01	1.61	1.13	GAUSS	0	2.068	22.4	0	ALTA	mar-01	2.97	3.55	GAUSS
mar-02	2.8	2.14	ESFER	0	1.14	52.2	0	ALTA	mar-02	3.02	2.36	GAUSS
abr-01	2.77	2.21	GAUSS	0	59.11	41.4	0	ALTA	abr-01	2.81	2.06	ESFER
abr-02	4.73	21.09	GAUSS	0	55.44	43.2	0	ALTA	abr-02	2.86	3.63	GAUSS
may-02	3.93	3.49	GAUSS	0	64.02	43.7	0	ALTA	MAYO	3.42	1.54	EXPO
may-02	6.68	31	EXPO	0	35.22	23	0	ALTA	may-01	5.85	28.4	EXPO
jun-01	9.42	43.54	GAUSS	0	2.139	32.2	0	ALTA	jun-01	13.34	69.68	EXPO
jun-02	12.85	80.73	GAUSS	0	48.06	39.1	0	ALTA	jun-02	15.52	85.96	GAUSS
jul-01	12.53	65.72	ESFER	0	44.02	34.5	0	ALTA	jul-01	15.31	96.45	EXPO
jul-02	12.52	65.72	EXPO	0	29.12	27	0	ALTA	jul-02	17.84	91.74	GAUSS

9.5 ANÁLISIS ESPACIAL DE ANTRACNOSIS DEL AGUACATE EN DONATO GUERRA, MÉXICO

Atenas **Tapia-Rodríguez**¹, José Francisco **Ramírez-Dávila**², Alfredo **Ruiz-Orta**¹, Dulce Karen **Figuroa-Figuroa**², María Teresa **Lugo-Coyote**¹

¹Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad Autónoma del Estado de México.

²Laboratorio de Entomología y Tecnologías Aplicadas a la Agricultura de Precisión, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Campus Universitario “El Cerrillo” Piedras Blancas, Toluca, Edo. de México, C.P. 50200.

***Autor para correspondencia:** jframirezd@uaemex.mx

RESUMEN

La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en el cultivo de aguacate, la cual ocasiona pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México y de todos los huertos en el México donde se cultiva aguacate. Para focalizar las medidas de control, resulta importante conocer la distribución espacial y la dinámica que sigue la enfermedad en condiciones de campo. La aplicación de métodos derivados de estadística espacial facilita ésta labor. El objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate Hass en Donato Guerra, municipio del Estado de México a través de un Análisis geoestadístico y Espacial por Índices de Distancia. Se seleccionaron y georreferenciaron 400 árboles en la superficie del municipio, para medir incidencia, se seleccionaron 48 frutos por árbol. A partir de estos datos, se procedió a estimar el semivariograma experimental y su posterior ajuste a modelos que expliquen el arreglo espacial. Se elaboraron mapas a través del krigado ordinario y se estimó la superficie de infección. Los mapas elaborados muestran la presencia de centros de agregación, y una distribución espacial ajustada en su mayoría a modelos de tipo gaussiano y exponencial; con rangos que fluctúan entre los 12 y los 56 metros, indicando asociación espacial entre los datos; así mismo, el mayor porcentaje de superficie infectada fue de 98 %, mientras que el menor fue de 45 %. La geoestadística permite conocer con precisión cuales son los patrones de distribución que siguen las enfermedades como la antracnosis en las zonas aguacateras del Estado de México y facilita la implementación de programas de manejo integrado con mayor efectividad.

Palabras clave: agregación, geoestadística; krigado ordinario; mapa; semivariograma.

INTRODUCCIÓN

Entre los sesenta países productores comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.) en el mundo, México ocupa el primer lugar, aportando el 34.4% de volumen de producción, de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022). Al ser un cultivo de importancia económica y nutricional, también se ve afectado por agentes fitopatógenos que limitan su comercialización en el mercado internacional, obligando a los productores a incrementar costos de producción e inversión de insumos químicos, provocando daños ambientales considerables (Rodríguez *et al.*, 2017)

Donato Guerra es un municipio productor del Estado de México que cuenta con una superficie de 1,531 ha sembradas de aguacate (Figuroa *et al.*, 2020), aportando alrededor del 13.47 % del volumen estatal. En este municipio uno de los problemas fitosanitarios que perjudica al cultivo es la enfermedad fúngica conocida como antracnosis, el género más común de los hongos que la causan es *Colletotrichum* (estado sexual *Glomerella*; Ascomycota, Sordariomycetes, Glomerellaceae), causando la aparición de manchas redondas color marrón que causan pudrición en la pulpa del fruto, situación que genera pérdidas económicas para el sector aguacatero del estado, ya que su comercialización se ve limitada a mercado nacional.

Ante tal contexto, la implementación de metodologías como los Análisis geoestadísticos y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE por sus siglas en inglés) representan una alternativa viable hacia la toma de decisiones precisa y oportuna acerca del manejo del cultivo, ya que permiten analizar e interpretar la relación espacial de un fenómeno determinado, como en este caso, de la antracnosis. A diferencia de otros métodos estadísticos que caracterizan el modelo espacial basándose en distribuciones o en índices de dispersión, la geoestadística y el SADIE consideran la naturaleza bidimensional de la distribución de las enfermedades a través de su exacta localización espacial. Además, la geoestadística, a través del krigeado, permite representar la distribución en forma de mapas (Ramírez *et al.*, 2002; Rivera *et al.*, 2022).

El objetivo de esta investigación fue conocer cómo se distribuye espacialmente la antracnosis en el cultivo de aguacate en el municipio de Donato Guerra a través del Análisis Geoestadístico y el Análisis Espacial por Índices de Distancia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio.

Este estudio se llevó a cabo durante los meses de enero a diciembre del año 2020 en el municipio de Donato Guerra, ubicado en la zona central del Estado de México a 9.3083 de latitud norte y -100.142 de longitud (INEGI, 2022), con una altitud promedio de 2200 metros sobre el nivel del mar, una temperatura media anual de 19.2 °C y una precipitación media de 1000 mm, la zona de estudio es de las principales productoras de aguacate en el estado (Lara *et al.*, 2019)

Método de muestreo.

Se seleccionaron, georreferenciaron y marcaron 400 árboles de aguacate (un árbol se consideró unidad de muestreo, todos ellos sin aplicación de fungicidas) abarcando la totalidad de la superficie productora del municipio a través del método de cuadrantes. Se verificó que los árboles tuvieran aproximadamente 10 años de edad y que el manejo agronómico fuera semejante. Cada árbol muestreado fue georreferenciado utilizando un DGPS (marca Trimble modelo PRO-XR) para establecer sus coordenadas geográficas. En cada uno de estos árboles, se seleccionaron 48 frutos que presentaban síntomas asociados a la antracnosis, de los cuales se tomaron muestras para un estudio simultáneo donde se identificó y corroboró que se trataba de *Colletotrichum gloeosporioides*.

Así mismo, se recabaron datos de humedad, precipitación y temperatura provenientes de la estación climatológica Donato Guerra (CONAGUA, 2022).

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE).

A través del Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), se determinaron los índices basados en las distancias para la regularidad (I_a) y el agrupamiento (J_a). La estimación de los índices se efectuó con los datos recolectados en una cuadrícula prediseñada (conformada por unidades de muestreo), los cuales se asumen como un sistema de conteo de individuos, donde $= 1, \dots, n$ unidades de muestreo. Se asume además por ser conocida la posición bidimensional (x, y) de cada unidad de muestreo y su conteo asociado, N_i . Usualmente, se dice que una muestra es (1) agregada si $I_a > 1$, (2) espacialmente aleatoria si $I_a = 1$, y (3) regular si $I_a < 1$. Un número total de 2000 aleatorizaciones son suficientes para derivar los valores de los índices correspondientes. El término C denota la distancia para el agrupamiento, que es el valor mínimo de la distancia total que los individuos de la muestra deben moverse para congregarse en una unidad.

Este valor se encuentra más pronto que D , usando una búsqueda directa simple sobre todas las unidades de muestreo; a la unidad de muestreo con el valor mínimo se la denomina como el “foco” del agrupamiento. Permutaciones aleatorias de los conteos observados conducen a una proporción denominada Q_a (probabilidad de agrupamiento), con una distancia para el agrupamiento tan pequeña, o más pequeña que el valor observado, C . Como en el caso del índice I_a , valores de $J_a > 1$ usualmente indican una muestra agregada, $J_a = 1$ representan datos espacialmente aleatorios, y $J_a < 1$ muestras regulares. De esta manera, los valores del índice J_a son útiles para corroborar los resultados obtenidos con el índice I_a . Además, este índice se utiliza para discriminar entre patrones espaciales donde hay (1) un único agrupamiento importante para el cual sus valores son significativamente mayores que la unidad, y en donde hay (2) dos o más agrupamientos para los cuales su valor no es significativamente diferente de la unidad o incluso menor que ella.

Para determinar la significación con respecto a la unidad se utiliza su probabilidad respectiva (Q_a) (Perry, 1997). Los valores de I_a y J_a para conteos aleatorios no están correlacionados, por lo que se pueden utilizar también 2000 aleatorizaciones en el software empleado para obtener sus respectivos valores. El programa utilizado

en este trabajo para determinar los valores y las probabilidades de ambos índices fue el AEID 1.22 (programa proporcionado por el Dr. Perry).

Análisis geoestadístico.

A partir de los datos de incidencia, se realizó la estimación estadística para determinar normalidad de los datos. Posteriormente, para la realización del semivariograma experimental correspondiente a cada muestreo de las parcelas experimentales se empleó el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New York; USA).

Una vez que se estimaron los semivariogramas experimentales correspondientes a cada muestreo, se ajustaron a algún semivariograma teórico. Para determinar qué tan fuerte es la relación entre los datos obtenidos en los muestreos se calculó el nivel de dependencia espacial. Este valor se obtiene al dividir el efecto pepita y la meseta, expresado en porcentaje: con menos de 25 % se considera alto; entre 26 y 75 % es moderado y mayor a 76 % se considera bajo (Cambardella *et al.*, 1994; López *et al.*, 2002). Se realizó la validación de los modelos ajustados a los semivariogramas experimentales a través del procedimiento de validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989), con el cual se elimina un valor muestral y se usa el método de interpolación geoestadística denominado krigeado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restantes valores muestrales. Los parámetros del modelo a validar son el efecto pepita, la meseta y el rango, los cuales se van modificando en un procedimiento a prueba y error hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados.

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 (Cambardella *et al.*, 1994; López *et al.*, 2002; Lara *et al.*, 2020)

Elaboración de Mapas.

El krigeado ordinario permitió estimar valores asociados a puntos que no fueron muestreados reduciendo el error (Samper y Carrera, 1996), con éstas estimaciones se generaron mapas para cada fecha de muestreo empleando el programa Surfer 16 (Surface Mapping System, Golden Software Inc., Golden, CO).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Espacial por Índices de Distancia

Se puede observar que para el índice I_a el valor se situó entre 1.40 y 1.78. En todos los casos el índice I_a fue significativamente superior a 1 (Cuadro 1) lo que indica una distribución espacial agregada de la antracnosis dentro de la zona de muestreo.

En lo que se refiere al índice J_a el valor mínimo fue de 1.11 a 1.26 el más alto. En todos los casos las fechas de muestreo el índice J_a fue superior a 1 pero en ningún caso de forma significativa, sin embargo, remarca la agregación detectada por el índice I_a , además el índice J_a indica la cantidad de centros de agregación presentes en cada muestreo, como estos valores no fueron significativamente diferentes a la unidad el resultado fue que la antracnosis se distribuye en la zona de muestreo en más de un centro de agregación.

Cuadro 1. Valor de los índices I_a y J_a y sus respectivas probabilidades P_a y Q_a en la incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate en Donato Guerra

MES	MUESTREO	I_a	P_a	J_a	Q_a
ENERO	1	1.41	0.011s	1.15	0.246ns
	2	1.65	0.014s	1.11	0.230ns
FEBRERO	1	1.47	0.008s	1.20	0.282ns
	2	1.44	0.010s	1.22	0.269ns
MARZO	1	1.78	0.012s	1.17	0.301ns
	2	1.61	0.009s	1.26	0.325ns
ABRIL	1	1.57	0.014s	1.16	0.328ns
	2	1.50	0.009s	1.19	0.255ns
MAYO	1	1.68	0.008s	1.24	0.239ns
	2	1.63	0.016s	1.25	0.279ns
JUNIO	1	1.56	0.012s	1.22	0.244ns
	2	1.71	0.015s	1.21	0.299ns
JULIO	1	1.43	0.013s	1.13	0.275ns
	2	1.52	0.010s	1.24	0.307ns
AGOSTO	1	1.66	0.012s	1.20	0.315ns
	2	1.74	0.013s	1.16	0.266ns
SEPTIEMBRE	1	1.70	0.007s	1.27	0.263ns
	2	1.40	0.012s	1.17	0.320ns
OCTUBRE	1	1.76	0.011s	1.19	0.262ns
	2	1.55	0.008s	1.12	0.322ns
NOVIEMBRE	1	1.64	0.015s	1.13	0.251ns
	2	1.48	0.015s	1.18	0.286ns
DICIEMBRE	1	1.59	0.013s	1.23	0.311ns
	2	1.72	0.011s	1.14	0.290ns

Este tipo de distribución ha sido detectada en trabajos como los realizados por Perry *et al.*, (1997) sobre huevos de pulgones, el trabajo de Winder *et al.*, (1999) realizado sobre las poblaciones de huevos de *Sitobion avenae* y el de Fernández *et al.*, (2000) en los huevos de *Nemognatha brevicollis*.

Con respecto al índice J_a se observó que no fue significativamente superior a la unidad lo cual indica que la antracnosis se encuentra distribuida en varios focos de agregación, coincidiendo con lo reportado por Korie *et al.*, (2000) quienes trabajaron con escarabajos en avena de invierno en el Reino Unido y Ramírez *et al.*, (2014) quienes estudiaron la distribución espacial de *Sporisorium reilianum* en el cultivo de maíz. Ramírez *et al.*, (2010), realizaron un estudio de la distribución espacial de las larvas del mosquito verde (*Jacobiasca lybica*), donde los valores J_a , establecieron la cantidad de centros de agregación. En cuanto a este dato, el valor J_a no fue significativamente mayor a uno, lo que permitió determinar que la distribución espacial de la enfermedad se concentró en diferentes centros de agregación, coincidiendo así con lo reportado por Solares *et al.*, (2011) quienes en estudios realizados en plantaciones de aguacate encontraron que las poblaciones de insectos se encontraban distribuidas en varios centros de agregación.

Análisis geoestadístico

Se estimaron 24 semivariogramas para la incidencia de antracnosis en frutos de aguacate, seis de ellos se ajustaron a modelos esféricos, nueve a modelos gaussianos y nueve a modelos exponenciales, lo cual permite caracterizar adecuadamente la continuidad espacial, coincidiendo así con lo reportado por Lara *et al.* (2020).

Una vez obtenidos los modelos del semivariograma, éstos fueron sometidos al proceso de validación cruzada, donde los valores reflejan rangos óptimos para continuar el proceso geoestadístico. El proceso de validación cruzada ha sido aplicado en diversos estudios geoestadísticos en el Estado de México, con la finalidad de corroborar la exactitud del modelo al que se ha ajustado la distribución, como lo son el de Lara *et al.* (2018), Tapia Rodríguez *et al.* 2020, entre otros.

. El efecto pepita fue igual a cero en todas las fechas de muestreo por lo que el error de muestreo fue mínimo y la escala que se utilizó fue la adecuada (Cuadro 1), por lo que 100% de la variación de la distribución de *la antracnosis* se debe propiamente a la estructura espacial establecida en los semivariogramas correspondientes para cada muestreo realizado, situación que coincide con los estudios realizados por Rossi *et al.* (1992) y por Lara *et al.* (2020). Se puede observar que en todas las fechas de muestreo se encontró un nivel de dependencia espacial alta que indica la existencia de una relación espacial elevada entre cada punto de muestreo.

Cuadro 2. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los semivariogramas de *Antracnosis* por fecha de muestreo en Donato Guerra, Estado de México.

Fecha	Muestro	Media Muestral	Varianza Muestral	Modelo	Pepita	Rango	Meseta	Pepita/Meseta (%)	Nivel De Dependencia Espacial
Enero	1	6.05	12.46	Esférico	0	20.8	10.01	0	Alta
	2	2.22	2.92	Gaussiano	0	26.6	3.75	0	Alta
Febrero	1	2.025	1.66	Gaussiano	0	22.4	1.37	0	Alta
	2	1.94	1.46	Esférico	0	22.4	1.44	0	Alta
Marzo	1	1.47	1.25	Gaussiano	0	17.6	1.14	0	Alta
	2	2.92	1.64	Exponencial	0	22.4	1.42	0	Alta
Abril	1	13.65	31.78	Esférico	0	28.16	16.79	0	Alta
	2	3.47	2.41	Gaussiano	0	20.3	2.28	0	Alta
Mayo	1	3.91	2.78	Exponencial	0	21.8	2.52	0	Alta
	2	4.27	6.59	Gaussiano	0	19.6	4.42	0	Alta
Junio	1	4.23	3.97	Gaussiano	0	24.6	2.31	0	Alta
	2	4.97	5.15	Exponencial	0	22.8	3.64	0	Alta
Julio	1	6.55	8.14	Exponencial	0	26.2	6.63	0	Alta
	2	7.65	7.18	Gaussiano	0	22.2	4.63	0	Alta
Agosto	1	9.04	5.08	Gaussiano	0	16.6	5.26	0	Alta
	2	6.05	12.46	Esférico	0	21.8	10.6	0	Alta
Septiembre	1	5.57	9.94	Exponencial	0	20.8	8.1	0	Alta
	2	5.94	11.96	Exponencial	0	21.9	9.12	0	Alta
Octubre	1	5.86	12.36	Exponencial	0	28	12.30	0	Alta
	2	5.89	11.55	Gaussiano	0	17.6	10.8	0	Alta
Noviembre	1	5.51	11.98	Esférico	0	20.8	9.56	0	Alta
	2	6.02	11.39	Exponencial	0	22.3	8.86	0	Alta
Diciembre	1	6.49	10.97	Exponencial	0	19.2	10.27	0	Alta
	2	5.85	13.51	Esférico	0	22.4	11.6	0	Alta

El alcance de asociación espacial se mantuvo entre 17.6 y 28.16, lo cual indica la distancia a la que los datos se encuentran relacionados espacialmente. Los valores de rango encontrados expresan que la validez de los modelos ajustados se extiende a distancias cercanas en cuanto a la explicación del fenómeno de agregación de la antracnosis.

El número máximo de frutos enfermos encontrados fue de 12 frutos enfermos por árbol durante los muestreos realizados, principalmente durante los meses de abril, junio, julio y agosto, esto, debido a la presencia de constantes y abundantes lluvias en la zona de producción, mientras que la disminución de la temperatura tuvo injerencia en los meses de enero y febrero, octubre, noviembre y diciembre.

Los valores de meseta se ubicaron entre 1.37 y 12.30, explicando el tipo de agregación presente. La incidencia de la enfermedad se logró representar a través de mapas de distribución lo que permitió su visualización gráfica y la ubicación espacial de los centros de agregación.

Mapas de superficie infectada.

Se calculó la superficie infectada para las 24 fechas de muestreo, en la superficie infectada de la zona de estudio sobrepasa el 40%, incluso en dos de ellos, la superficie infectada alcanza 98 %, siendo del 45 % el muestreo con el valor más bajo.

Así mismo, se realizaron 24 mapas de incidencia (Figuras 1 y 2) correspondientes para los 24 muestreos, éstos muestran los centros de infección de manera gráfica y permiten interpretar cómo se comporta la enfermedad dentro de la zona de estudio, en todos los mapas de infección se observó por lo menos un centro de agregación y un promedio de tres centros de agregación bien definidos, los cuales se mantuvieron a lo largo de los doce meses de muestreo, en la parte superior, central e inferior derecha de cada mapa (Figuras 1 y 2). La técnica de interpolación a través del krigeado ordinario ha sido empleada en estudios relacionados a enfermedades y plagas, como los realizados por Quiñones *et al.* (2015) en cultivo de gladiolo, Sánchez *et al.* en cultivo de maíz y Solares *et al.* (2012) en aguacate en el Estado de Michoacán, entre otros.

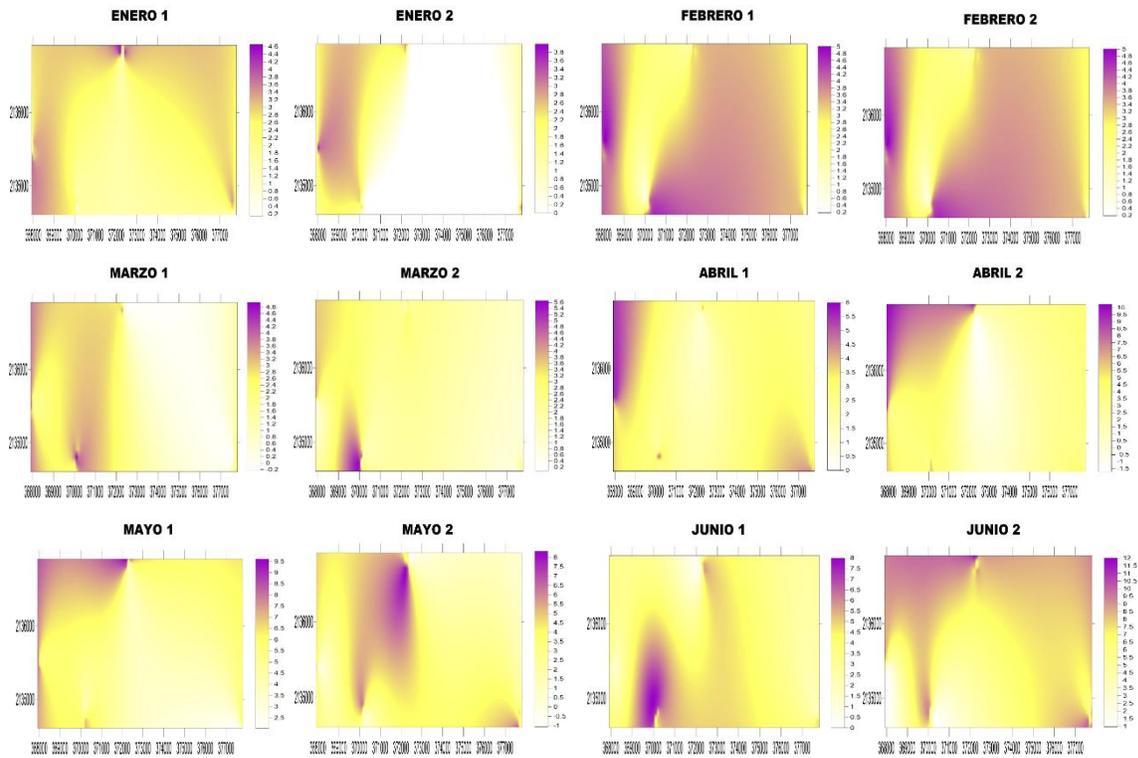


Figura 1. Mapas de superficie infectada por antracnosis en el cultivo de aguacate de enero a junio de 2020 en Donato Guerra, Estado de México.

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.* 2000. 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, en este sentido, autores como Nava *et al.* (2008) y Quiñones *et al.* (2015) sugieren que las medidas de control de las enfermedades como la antracnosis deben dirigirse hacia sitios específicos donde la enfermedad presenta porcentajes de infección elevados.

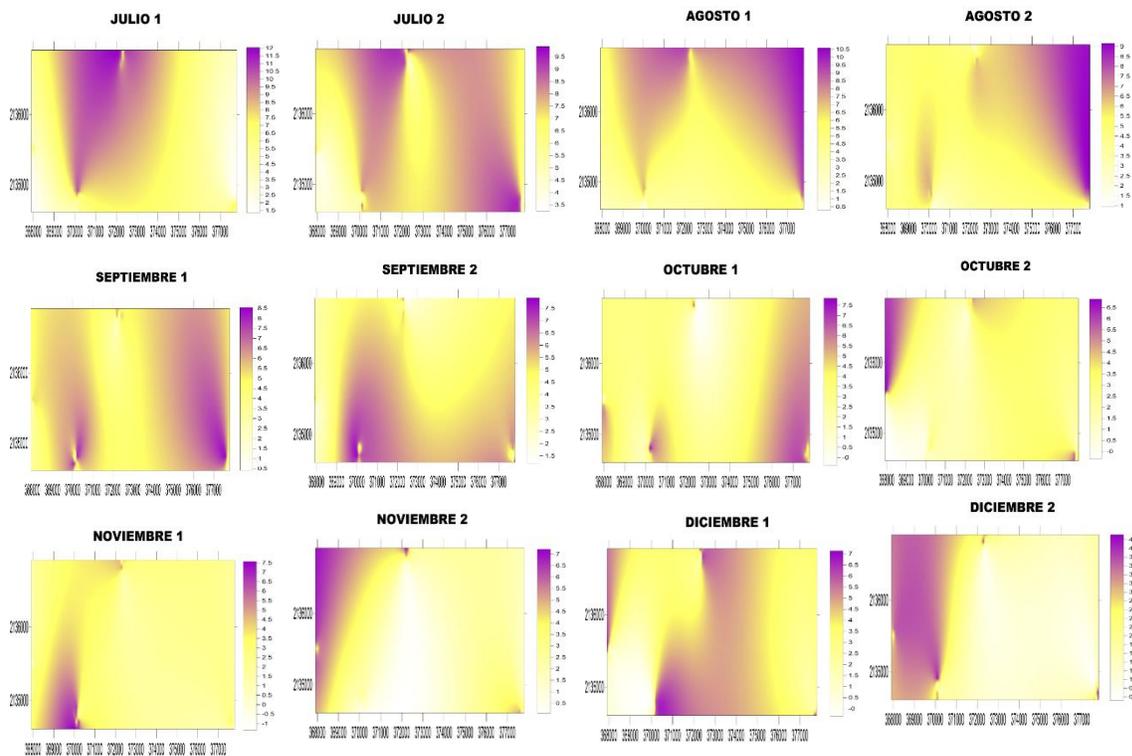


Figura 2. Mapas de superficie infectada por antracnosis en el cultivo de aguacate de julio a diciembre de 2020 en Donato Guerra, Estado de México.

En este sentido, resulta evidente que la aplicación de las técnicas geoestadísticas permitió establecer la distribución e intensidad de los agentes nocivos sobre la base de toda la información espacial disponible con la que se elaboraron los mapas y obtener estimaciones no sesgadas de los puntos no muestreados. Dichos mapas son de gran utilidad porque permitieron establecer tácticas de control más efectivas.

CONCLUSIONES

La distribución espacial agregada de *antracnosis* en el cultivo de aguacate obtenida a través del empleo del SADIE fue corroborada con el análisis geoestadístico y los mapas realizados con el krigeado. La elaboración de mapas de incidencia y distribución de la enfermedad facilitó la detección de zonas con alto porcentaje infección y permitió llevar un manejo oportuno y eficaz del cultivo. El uso de técnicas como el análisis espacial por índices de distancia y la geoestadística contribuyeron ampliamente para la toma de decisiones en el manejo fitosanitario dentro de los huertos aguacateros en Donato Guerra.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado. A los productores de aguacate del municipio de Donato Guerra.

REFERENCIAS

Cambardella C, Moorman T, Novak J, Parkin T, Karlen D, Turco R and Konopka, A. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58(5):1501-1511.

Figuroa F D K, Ramírez-Dávila, José Francisco, Antonio-Némiga, Xanat, & González Huerta, Andrés. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 865-879. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2173>

Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford Univ. Press, 1ª (Ed.). New York, United States of America. 35-38 pp.

Lara DAV, Ramírez DJF, Maldonado ZFI, Figuroa FDK, Acosta GAD, Rivera MR y Antonio NX. 2018. Simulación espacial de *Claviceps gigantea* (Fuentes, de la Isla, Ullstrup y Rodríguez) en el Estado de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1), 95-109. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.850>

Lara DAV, Ramírez DJF, Rubí Arriaga, Martin, Campos Alanis, Juan, Maldonado Zamora, Fátima Iraís, & Rivera Martínez, Roberto. (2019). Modelización espacial de *Oligonychus perseae* (Tuttle, Baker y Abbatiello) mediante técnicas geoestadísticas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(6), 1405-1416. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1951>

López GF, Jurado EM, Atenciano S, García FA, Sánchez M and García TL. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant Soil*. 246(1):97-105.

Perry N and Klukowsky Z. 1997. Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. In: VI Conferencia de la Sociedad de Biometría. Córdoba, España. 103-108 pp.

Quiñones, V. R.; Sánchez, J. R.; Pedraza, A. K.; Castañeda, V. A.; Gutiérrez, A.T. y Ramírez, J. F. 2015. Análisis espacial de *Thrips* spp. (Thysanoptera) en el cultivo de gladiolo en la región sureste del Estado de México, México. *Southwestern Entomologist*. 40(2):397-408.

Ramírez DJF, Sánchez PJR, Figuroa FDK y De León C. 2014. Asociación espacial de largo plazo de *Sporisorium reilianum* en el cultivo de maíz. *Revista mexicana de micología*, 40, 37-45. Recuperado en 11 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802014000200007&lng=es&tlng=es

Rivera MR, Ramírez DJF, Tapia RA, Figuroa FDK, Acosta GAD y Serrato CR. 2022. Comportamiento espacial del barrenador de la rama en aguacate utilizando el método del SADIE en el Estado de México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 13(2), 247–259. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2728>

Samper FJ y Carrera J. 1996. Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea. 2ª (Ed.). Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. Barcelona. 484 p.

Solares VM, Ramírez DJF y Sánchez PJR. 2012. Distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en el cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.). Bol. Mus. Entomol. Univ. Valle. 12(2):1-12.

Soto A., Silvana (2021-09) *La antracnosis y la pudrición peduncular acechan a la palta* [en línea]. Santiago, Chile: Revista Redagícola. N° 122. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68250> (Consultado: 18 febrero 2022).

Rossi R, Mulla J, Journel G and Franz H. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecol. Monographs. 62(2):277-314.

Tipo de Artículo: Artículos de investigación científica y tecnológica

Área Temática: Sanidad vegetal y protección de cultivos

9.6 Estabilidad espacial y temporal de la distribución de antracnosis en aguacate en el Estado de México

Spatial and temporal stability of the distribution of anthracnose in avocado in the State of Mexico

Resumen

El incorrecto y extensivo uso de agroquímicos en las prácticas agrícolas ha causado graves daños ambientales y de salud pública durante varias décadas, por lo que la utilización de métodos y herramientas que contribuyan a disminuir el impacto y faciliten la obtención de alimentos inocuos es de suma importancia. El aguacate es uno de los cultivos importantes a nivel económico y alimenticio en México, por lo tanto, su manejo fitosanitario también ha cobrado importancia dentro de la investigación agrícola a nivel nacional.

La antracnosis es una enfermedad fúngica que causa graves daños en las huertas del cultivo de aguacate en el Estado de México, y otros estados productores de este fruto, por ello, el estudio se realizó con el objetivo de analizar la estabilidad espacio temporal de la antracnosis. El análisis logró establecer patrones espaciales de los focos de infección de antracnosis y determinar su estabilidad espacio-temporal. En los mapas de cada muestreo pueden ser visualizados diversos centros de agregación, lo que puede poner en marcha acciones preventivas hacia

determinados puntos de incidencia de antracnosis como la aplicación de fungicidas a árboles o áreas de parcelas con infecciones mayores.

Palabras clave: antracnosis, geoestadística, Coatepec Harinas, Donato Guerra, Tenancingo.

Abstract

The incorrect and extensive use of agrochemicals in agricultural practices has caused serious environmental and public health damage for several decades, so the use of methods and tools that help reduce the impact and facilitate obtaining safe food is of the utmost importance. Avocado is one of the important crops at an economic and nutritional level in Mexico, therefore, its phytosanitary management has also gained importance within agricultural research at the national level.

Anthrachnose is a fungal disease that causes serious damage to avocado orchards in the State of Mexico, and other producing states of this fruit, therefore, the study was carried out with the objective of analyzing the space-time stability of anthracnose. The analysis was able to establish spatial patterns of the anthracnose infection foci and determine their spatio-temporal stability. Various aggregation centers can be visualized on the maps of each sampling, which can initiate preventive actions towards certain points of incidence of anthracnose, such as the application of fungicides to trees or areas of plots with major infections.

Key words: anthracnose, geostatistics, Coatepec Harinas, Donato Guerra, Tenancingo

Introducción

México ocupa el primer lugar en producción de aguacate, y lo exporta a países como China, Japón, Chile, Australia, Canadá, Estados Unidos, entre otros, alcanzado un valor anual de 2.900 millones de dólares en el 2021 (Statista, 2022). Sin embargo, las enfermedades que se presentan en el cultivo, representan un problema importante, sobre todo en postcosecha, lo que demerita la calidad del fruto para las exportaciones.

La antracnosis es una de las principales enfermedades que atacan al fruto de aguacate, con una amplia distribución y alto impacto económico en todas las zonas donde se produce, llega a causar pérdidas del 20 al 30 % en volumen de producción (Whitelaw *et al.*, 2007).

Diversos estudios han atribuido la causa de la antracnosis a la presencia de *Colletotrichum acutatum* y principalmente, *Colletotrichum gloeosporioides*, cuyos conidios son producidos en hojas y ramas muertas en el interior de la copa de los árboles y son dispersados por el agua durante la temporada de lluvias (Talhinhas *et al.*, 2005). *C. gloeosporioides* ataca principalmente brotes tiernos, cogollos, ramas, flores y frutos, cuyos daños necróticos y de pudrición son más notorios (Freeman *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2013). Por lo anterior y debido a la escasa información acerca del comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate, el objetivo de este estudio se centró en determinar la estabilidad espacial y temporal

de la antracnosis en tres municipios productores en el Estado de México a través del análisis geoestadístico.

Materiales y métodos

Los muestreos se realizaron en los municipios de Donato Guerra, Tenancingo y Coatepec Harinas durante el año 2021 y 2022.

Se seleccionaron, georreferenciaron y marcaron 400 árboles de aguacate (un árbol se consideró unidad de muestreo, todos ellos sin aplicación de fungicidas) abarcando la totalidad de la superficie productora de los tres municipios a través del método de cuadrantes. Se verificó que los árboles tuvieran aproximadamente 10 años de edad y que el manejo agronómico fuera semejante. Cada árbol muestreado fue georreferenciado utilizando un DGPS (marca Trimble modelo PRO-XR) para establecer sus coordenadas geográficas. En cada uno de estos árboles, se seleccionaron 48 frutos que presentaban síntomas asociados a la antracnosis, de los cuales se tomaron muestras para un estudio simultáneo donde se identificó y corroboró que se trataba de *Colletotrichum gloeosporioides*.

Así mismo, se recabaron datos de humedad, precipitación y temperatura provenientes de las estaciones climatológicas cercanas a los municipios muestreados (CONAGUA, 2022).

El semivariograma experimental se estimó con base en los datos obtenidos en los muestreos de frutos con antracnosis. Los semivariogramas experimentales se obtuvieron con el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D.

Spring Verlag, New York. USA). El valor experimental del semivariograma se calculó con la siguiente expresión

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(H)} [Z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

Donde:

$\gamma^*(h)$ = valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h

$N(h)$ = número de pares de puntos muestrales separados por el intervalo de distancia h

$z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto muestral x_i

$z(x_i+h)$ = valor de la variable de interés en el punto muestral x_i+h

Una vez obtenido el semivariograma experimental, se analizó su ajuste a distintos semivariogramas teóricos (esférico, exponencial, gaussiano) utilizando el programa Variowin 2.2.

Para determinar el nivel de dependencia espacial se dividió el efecto pepita entre la meseta y el resultado se expresó en porcentaje. Se considera una dependencia espacial alta si el porcentaje es menor de 25%, se considera moderada si dicho porcentaje se encuentra entre 26 y 75% y se considerará una baja dependencia espacial si éste porcentaje es igual o mayor de 76%.

Se realizó la interpolación de valores empleando el krigado ordinario, método que permite la estimación no sesgada de datos en puntos no muestreados. Las

estimaciones obtenidas se representaron en forma de mapa para cada fecha de muestreo de antracnosis a través del programa Surfer 16 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA).

Se compararon los mapas elaborados con el método del krigeado ordinario con la finalidad de establecer si existía o no una estabilidad espacio-temporal de las poblaciones antracnosis mediante la utilización de la prueba estadística no paramétrica de Cramér-von Mises (Ψ) modificada por Syrjala, tal y como lo aconsejan Liebhold et al, así como el índice I_m (índice de asociación) del SADIE (Perry Klukowsky, 1997; Rivera *et al.*, 2022). Esta comparación de fechas de muestreo puede dar indicaciones de la dinámica espacio temporal de la enfermedad y de la posibilidad de encontrar una estabilidad numérica en el espacio y el tiempo. Si el valor de $I_m > 0$, indica la existencia de una asociación o una estabilidad espacio temporal entre los mapas. La determinación de la estabilidad se realizó con el software SADIE 1.22.

Resultados y discusión

Diversos estudios realizados alrededor del mundo acerca de la distribución espacial de enfermedades y plagas fitosanitarias, ha sentado las bases para la toma de decisiones precisa y oportuna acerca del manejo en diversos cultivos de importancia alimentaria y económica, en este sentido, destacan los trabajos de Rossi *et al.* (1992), Ramírez et al. (2011), Lara *et al.* (2018), Rivera *et al.* (2022).

Entre los resultados principales de este estudio destaca la elaboración de 24 muestreos de frutos con síntomas de antracnosis por municipio, teniendo un total de 72 muestreos, de los cuales se obtuvieron 72 semivariogramas y 72 mapas de superficie infectada.

La mayoría de los modelos de semivariograma se ajustaron a modelos de tipo gaussiano y exponencial, principalmente en Coatepec Harinas y Tenancingo, mientras que, para Donato Guerra, la distribución espacial de la antracnosis se ajustó a modelos esféricos en la mayoría de las fechas de muestreo (Tabla 1).

Tabla 2. Parámetros de los modelos teóricos ajustados a los semivariogramas de *Antracnosis* por fecha de muestreo en Coatepec Harinas, Tenancingo y Donato Guerra, Estado de México.

Coatepec Harinas								
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
julio 2	12.52	65.72	Exponencial	0	29.12	27	0	alta
agosto 1	10.89	53.80	Exponencial	0	30.45	35.1	0	alta
agosto 2	12.36	61.88	Esférico	0	59.94	43.2	0	alta
septiembre 1	12.89	66.42	Esférico	0	3.29	45.9	0	alta
septiembre 2	9.89	36.95	Exponencial	0	54.27	56.7	0	alta
octubre 1	11.05	55.59	Exponencial	0	1.67	23	0	alta
octubre 2	10.70	45.65	Exponencial	0	2.82	43.2	0	alta
noviembre 1	3.81	9.69	Exponencial	0	1.02	27	0	alta
noviembre 2	10.73	36.77	Exponencial	0	3.01	37.8	0	alta
diciembre 1	10.60	31.71	Gaussiano	0	2.13	29.9	0	alta
diciembre 2	9.97	34.75	Gaussiano	0	3.39	35.1	0	alta
enero 1	1.50	2.27	Esférico	0	48.18	40.5	0	alta
enero 2	1.68	1.41	Gaussiano	0	34.78	45.9	0	alta
febrero 1	2.50	2.04	Gaussiano	0	6.79	45.9	0	alta
febrero 2	2.08	4.00	Gaussiano	0	34.76	29.7	0	alta
marzo 1	1.61	1.13	Gaussiano	0	2.068	22.4	0	alta
marzo 2	2.80	2.14	Esférico	0	1.14	52.2	0	alta
abril 1	2.77	2.21	Gaussiano	0	59.11	41.4	0	alta
abril 2	4.73	21.09	Gaussiano	0	55.44	43.2	0	alta
mayo 2	3.93	3.49	Gaussiano	0	64.02	43.7	0	alta
mayo 2	6.68	31.00	Exponencial	0	35.22	23	0	alta
junio 1	9.42	43.54	Gaussiano	0	2.139	32.2	0	alta
junio 2	12.85	80.73	Gaussiano	0	48.06	39.1	0	alta
Tenancingo								
Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/Mes	Dep. esp
julio 1	15.31	96.45	Exponencial	0	85.56	12	0	alta
julio 2	17.84	91.74	Gaussiano	0	86.48	16	0	alta
agosto 1	19.86	119.15	Gaussiano	0	98.4	26.4	0	alta
agosto 2	20.29	116.16	Gaussiano	0	100.8	18	0	alta
septiembre 1	22.39	154.47	Esférico	0	173	37.79	0	alta
septiembre 2	22.25	180.62	Exponencial	0	171	32.4	0	alta
octubre 1	20.10	136.36	Gaussiano	0	131.6	20	0	alta
octubre 2	18.85	109.73	Exponencial	0	106.7	24	0	alta
noviembre 1	14.43	80.93	Exponencial	0	72.9	14	0	alta
noviembre 2	14.19	59.04	Exponencial	0	54	18	0	alta
diciembre 1	10.11	36.32	Gaussiano	0	53.4	16	0	alta
diciembre 2	8.89	31.05	Exponencial	0	109.2	39.6	0	alta
enero 1	2.23	1.88	Esférico	0	1.76	35.99	0	alta
enero 2	1.82	1.49	Gaussiano	0	1.455	33.6	0	alta
febrero 1	2.56	1.92	Exponencial	0	1.78	28.8	0	alta
febrero 2	2.22	1.61	Exponencial	0	1.41	28.8	0	alta
marzo 1	2.97	3.55	Gaussiano	0	3.24	41.4	0	alta
marzo 2	3.02	2.36	Gaussiano	0	1.23	32.4	0	alta

abril 1	2.81	2.06	Esférico	0	1.32	39.6	0	alta
abril 2	2.86	3.63	Gaussiano	0	1.2	32	0	alta
mayo 1	3.42	1.54	Exponencial	0	1.2	37.8	0	alta
mayo 2	5.85	28.40	Exponencial	0	23.78	30.6	0	alta
junio 1	13.34	69.68	Exponencial	0	63.7	34.2	0	alta
junio 2	15.52	85.96	Gaussiano	0	63.7	32.4	0	alta
Donato Guerra								
Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/Mes	Dep. espacial
julio 1	6.05	12.46	Esférico	0	20.8	10.01	0	alta
julio 2	2.22	2.92	Gaussiano	0	26.6	3.75	0	alta
agosto 1	2.025	1.66	Gaussiano	0	22.4	1.37	0	alta
agosto 2	1.94	1.46	Esférico	0	22.4	1.44	0	alta
septiembre 1	1.47	1.25	Gaussiano	0	17.6	1.14	0	alta
septiembre 2	2.92	1.64	Exponencial	0	22.4	1.42	0	alta
octubre 1	13.65	31.78	Esférico	0	28.16	16.79	0	alta
octubre 2	3.47	2.41	Gaussiano	0	20.3	2.28	0	alta
noviembre 1	3.91	2.78	Exponencial	0	21.8	2.52	0	alta
noviembre 2	4.27	6.59	Gaussiano	0	19.6	4.42	0	alta
diciembre 1	4.23	3.97	Gaussiano	0	24.6	2.31	0	alta
diciembre 2	4.97	5.15	Exponencial	0	22.8	3.64	0	alta
enero 1	6.55	8.14	Exponencial	0	26.2	6.63	0	alta
enero 2	7.65	7.18	Gaussiano	0	22.2	4.63	0	alta
febrero 1	9.04	5.08	Gaussiano	0	16.6	5.26	0	alta
febrero 2	6.05	12.46	Esférico	0	21.8	10.6	0	alta
marzo 1	5.57	9.94	Exponencial	0	20.8	8.1	0	alta
marzo 2	5.94	11.96	Exponencial	0	21.9	9.12	0	alta
abril 1	5.86	12.36	Exponencial	0	28	12.30	0	alta
abril 2	5.89	11.55	Gaussiano	0	17.6	10.8	0	alta
mayo 1	5.51	11.98	Esférico	0	20.8	9.56	0	alta
mayo 2	6.02	11.39	Exponencial	0	22.3	8.86	0	alta
junio 1	6.49	10.97	Exponencial	0	19.2	10.27	0	alta
junio 2	5.85	13.51	Esférico	0	22.4	11.6	0	alta

Dichos resultados denotan una estructura espacial agregada de la antracnosis en los tres municipios de estudio. En todos los semivariogramas de los modelos obtenidos se determinó un efecto pepita igual a cero, lo que significa que el 100% de la variación de la distribución de la enfermedad se explica debido a la estructura espacial establecida en los semivariogramas.

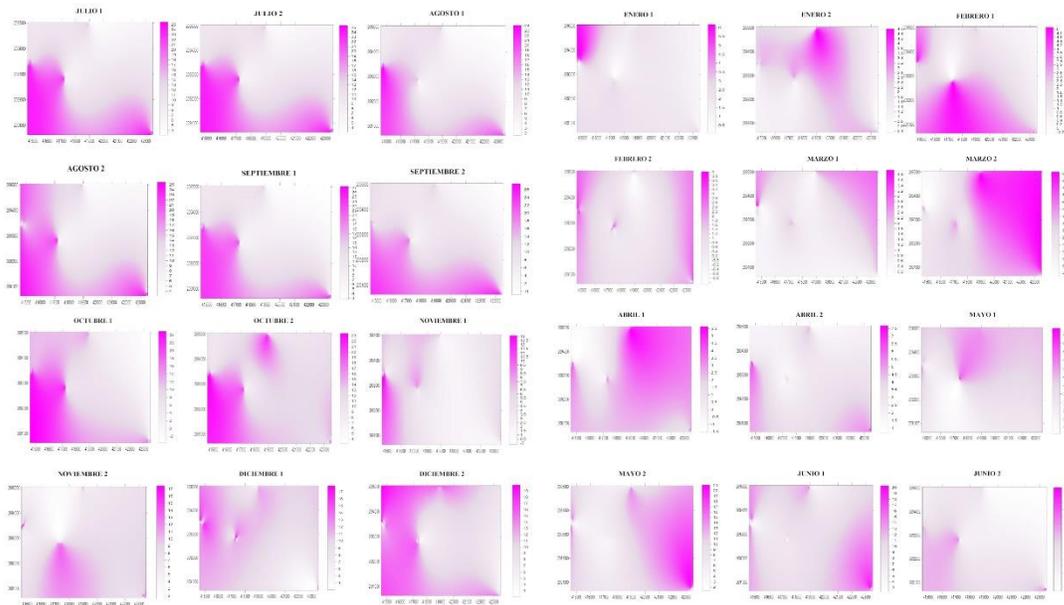
El valor de cero en el efecto pepita es indicativo que el error de muestreo fue mínimo y que la escala de muestreo utilizada fue adecuada (Rossi et al., 1992). En cuanto a meseta, los valores variaron entre 1.02 y 171 para el modelo exponencial, de 1.14

hasta 173 para el modelo esférico y de 1.2 a 131 para el modelo gaussiano, lo que posiblemente ocasionó los tipos de agregación en el año de muestreo.

De acuerdo con Maldonado et al. (2017) el parámetro rango indica la distancia máxima hasta la cual existe una relación espacial entre los datos. Los modelos de la distribución espacial de antracnosis en los tres municipios se lograron validar con los parámetros estadísticos al ubicarse dentro del rango permisible, los valores fluctuaron entre 12 y 56.7 m para el modelo exponencial y 3.9 a 59.8 m para el modelo esférico, para el modelo gaussiano éstos valores se ubicaron entre 18 y 41.4 m. El nivel de dependencia espacial encontrado para todos los casos fue alto. En los mapas obtenidos a través del krigeado, se puede observar la presencia de más de un foco de infección, mismos que se mantuvieron presentes a lo largo de todo el estudio en los tres municipios, éstos mapas, fueron cruciales para el análisis de estabilidad espacio temporal de la antracnosis.

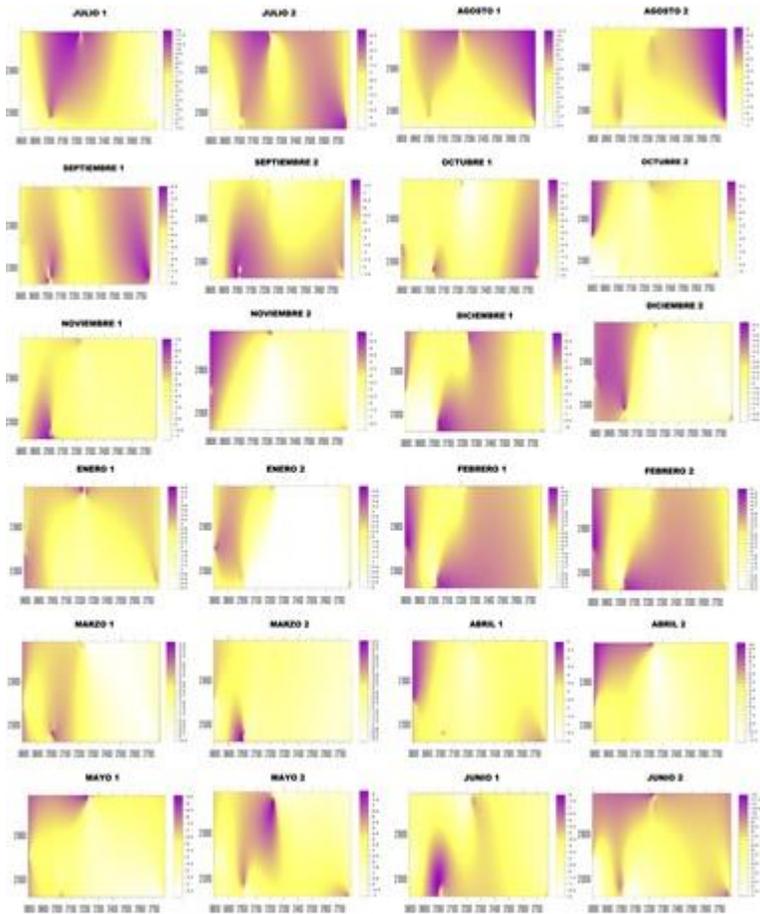
En Coatepec Harinas (Figura 1) se observa la presencia de dos centros, y en algunos casos, de un tercer foco de agregación, mismos que se ubican en la parte central e inferior de cada mapa, principalmente.

Figura 1. Mapas de densidad y superficie infectada con antracnosis en Coatepec Harinas.



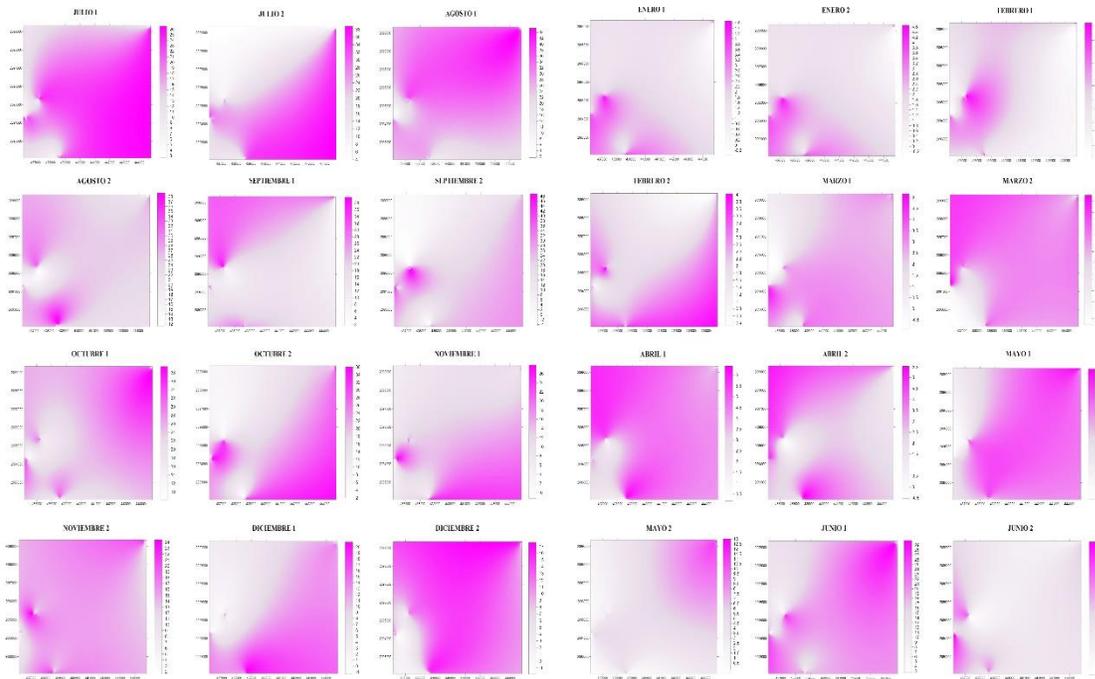
En el municipio de Donato Guerra, también se detectó la presencia de más de un centro de agregación, los cuales se mantuvieron presentes en la mayoría de las fechas de muestreo (Figura 2), pudiendo apreciarlos en la parte superior e inferior de cada mapa, respectivamente, sugiriendo la dirección de dispersión de la enfermedad durante todo el muestreo.

Figura 2. Mapas de densidad y superficie infectada por antracnosis en Donato Guerra.



Para el caso de Tenancingo, los mapas de superficie infectada muestran principalmente dos centros de agregación claramente definidos, mismos que se ubican en la parte inferior izquierda de cada mapa. Por lo que la infección tiene su origen en la zona noroeste del municipio, por lo que las medidas de control deben aplicarse con mayor atención.

Figura 3. Mapas de densidad y superficie infectada por antracosis en Tenancingo



Utilizando la prueba bivariable de Crámer-von Mises (\emptyset) para comparar las diferentes estimaciones de la distribución espacial de antracnosis realizadas con el krigado, se determinó que las comparaciones de los tres municipios, de manera general no son estadísticamente diferentes, lo que indica estabilidad espacial y temporal de la antracnosis, sin embargo la comparación del segundo con el tercer muestreo en Donato Guerra, con respecto a los otros dos municipios, si es diferente estadísticamente, por lo que carece de estabilidad espacial y temporal, posiblemente ocasionado por tener una fuerte diferencia en la ubicación geográfica e incidencia de la superficie infectada (Tabla 2). Algo similar ocurrió al comparar el segundo muestreo de septiembre con el primer muestreo de octubre, donde se observa que existen valores de diferencias estadísticamente significativas.

Resultados similares se encontraron con el índice de asociación de distribución espacial (Im) del análisis AEID, donde la mayoría de las fechas de muestreo comparadas presentaron resultados mayores a 0, lo que corrobora la existencia de estabilidad espacio-temporal a corto plazo de la antracnosis en ambos municipios. Estos resultados reflejan principalmente que los mapas son estadísticamente iguales entre la dispersión de las poblaciones de la enfermedad. Autores como Ramírez et al. (2011) Rivera et al. (2022) utilizaron el índice de asociación espacial Im para comparar mapas de distribución espacial determinar la estabilidad espacial y temporal en insectos principalmente, reflejando que no existe una estabilidad a largo plazo, situación que se explica debido al ciclo de vida de los insectos y al manejo del propio cultivo, sin embargo, en este estudio, la estabilidad espacial y temporal se debe a que la presencia del inoculo causante de la enfermedad se encuentra en los huertos incluso en estado de latencia, esperando las condiciones favorables para su desarrollo, como lo son humedad relativa superior al 80% y temperaturas medias de entre 25° C

Tabla 2. Comparación de mapas con la prueba bivariable de Cramer-von Mises modificada por Syrjala (1996) e índices de asociación de distribución espacial (Im) de SADIE obtenidos mediante el muestreo de antracnosis en Coatepec Harinas, Donato Guerra y Tenancingo, Estado de México.

	COATEPEC HARINAS	DONATO GUERRA	TENANCINGO
--	------------------	---------------	------------

FECHAS COMPARA DAS	ψ	VALO R DE P	DIFEREN CIA (5%)	Im	ψ	VALO R DE P	DIFEREN CIA (5%)	Im	ψ	VAL OR DE P	DIFEREN CIA (5%)	Im
1 vs. 2	1.2 2	0.07	Significativ a	- 0.3 4	1.1 7	0.04	Significativ a	- 1.2 5	1.5 2	0.09	Significativ a	- 1.2 9
2 vs. 3	0.3 0	0.62	No Significativ a	1.1 6	1.3 3	0.02	Significativ a	- 1.6 9	0.2 6	0.49	No Significativ a	1.2 8
3 vs. 4	0.2 6	0.54	No Significativ a	1.9 2	0.3 5	0.50	No Significativ a	0.3 8	0.3 5	0.59	No Significativ a	1.6 2
4 vs. 5	0.2 4	0.65	No Significativ a	0.5 8	1.2 3	0.07	Significativ a	0.8 4	0.4 0	0.78	No Significativ a	0.7 1
5 vs. 6	0.2 8	0.71	No Significativ a	1.2 4	0.2 5	0.42	No Significativ a	0.6 2	1.2 3	0.05	Significativ a	- 0.5 8
6 vs. 7	0.2 2	0.49	No Significativ a	0.6 5	0.3 1	0.56	No Significativ a	1.1 4	0.2 2	0.70	No Significativ a	1.1 2
7 vs. 8	1.4 1	0.03	Significativ a	- 0.5 6	0.2 0	0.71	No Significativ a	0.9 7	1.7 1	0.03	Significativ a	- 1.3 6
8 vs. 9	1.3 7	0.05	Significativ a	- 0.1 9	0.2 9	0.44	No Significativ a	1.5 3	1.6 4	0.06	Significativ a	- 0.9 2
9 vs. 10	0.2 7	0.51	No Significativ a	1.8 5	0.3 5	0.63	No Significativ a	1.0 8	0.2 5	0.75	No Significativ a	0.4 1
10 vs. 11	0.2 3	0.82	No Significativ a	0.7 0	0.2 3	0.59	No Significativ a	0.7 7	0.2 9	0.81	No Significativ a	1.5 5

11 vs. 12	0.2 5	0.64	No Significativ a	0.5 2	0.3 3	0.48	No Significativ a	0.9 5	0.3 4	0.51	No Significativ a	0.3 2
12 vs. 13	0.2 9	0.58	No Significativ a	0.9 1	0.3 0	0.61	No Significativ a	1.6 9	0.3 1	0.62	No Significativ a	0.8 5
13 vs. 14	0.2 5	0.78	No Significativ a	1.1 4	0.2 1	0.73	No Significativ a	0.2 6	0.3 9	0.50	No Significativ a	1.6 2
14 vs. 15	0.2 9	0.70	No Significativ a	1.7 3	0.2 5	0.49	No Significativ a	0.5 7	0.3 2	0.83	No Significativ a	1.0 3
15 vs. 16	0.2 6	0.74	No Significativ a	1.0 9	0.3 9	0.67	No Significativ a	0.4 4	0.2 1	0.71	No Significativ a	0.9 7
16 vs. 17	0.3 1	0.66	No Significativ a	0.6 6	0.2 7	0.79	No Significativ a	1.7 1	0.3 3	0.59	No Significativ a	1.2 2
17 vs. 18	0.2 4	0.80	No Significativ a	0.8 1	0.3 5	0.43	No Significativ a	1.0 3	1.3 7	0.02	Significativ a	- 0.8 4
18 vs. 19	1.2 9	0.02	Significativ a	- 0.3 8	1.3 5	0.06	Significativ a	- 0.7 9	1.6 1	0.08	Significativ a	- 1.2 3
19 vs. 20	1.3 5	0.06	Significativ a	- 0.7 1	1.5 7	0.03	Significativ a	- 0.5 1	0.3 6	0.54	No Significativ a	0.7 9
20 vs. 21	0.2 9	0.66	No Significativ a	1.2 7	1.4 2	0.08	Significativ a	- 0.6 8	0.2 0	0.65	No Significativ a	0.5 7
21 vs. 22	0.2 6	0.75	No Significativ a	1.5 4	1.3 9	0.05	Significativ a	- 0.2 5	1.2 9	0.05	Significativ a	- 1.4 6

22 vs. 23	0.30	0.59	No Significativa	1.33	1.53	0.07	Significativa	-1.52	1.68	0.07	Significativa	-1.21
23 vs. 24	0.23	0.69	No Significativa	0.74	1.71	0.09	Significativa	-1.83	0.26	0.73	No Significativa	0.38

Los análisis realizados en este estudio fueron apropiados para la modelización y determinación de la estabilidad espacio-temporal de la antracnosis en el cultivo de aguacate. Pudieron determinarse los patrones de agregación de la enfermedad a través del análisis geoestadístico y el krigeado, tal como lo menciona Ramírez et al. (2014), quienes mencionan la utilidad del krigeado para identificar focos de infección de las enfermedades en los cultivos. La prueba bivariable de Cramér-von Mises y el análisis geoestadístico, permitieron determinar la estabilidad espacio temporal de antracnosis. Con el uso de mapas de densidad es posible determinar áreas infectadas y no infectadas por la enfermedad.

Con base a todos los resultados, podemos deducir que ninguna de las actividades que realiza el productor en las parcelas de aguacate aminoran la presencia de la antracnosis en sus huertas o al menos no de una manera significativa, ya que no se logra romper el ciclo biológico de la enfermedad. Esta situación es preocupante, ya que manifiesta el control deficiente y la falla en las actividades básicas como la poda y retiro de inculo del suelo, situación que es crucial para evitar un medio óptimo para que las enfermedades se dispersen, tal como lo reporta Jiménez (1987).

Conclusiones

El análisis geoestadístico fue apropiado para la modelización y generación de mapas de la distribución espacial de la antracnosis, con el cual, pudieron identificarse los focos de infección a lo largo de las fechas de muestreo.

El índice de asociación de distribución espacial (Im) del análisis AEID y la prueba bivariable de Crámer-von Mises permitieron determinar que existe estabilidad espacio temporal de la antracnosis en el cultivo de aguacate para los municipios de Donato Guerra, Coatepec y Tenancingo en el Estado de México. Con la información obtenida en el estudio fue posible establecer áreas específicas de infección, lo cual puede ser de gran utilidad para dirigir las medidas de control hacia esas zonas en concreto y reducir con ello los costos económicos y medioambientales que ocasiona el uso excesivo de productos químicos para controlar ésta enfermedad. La responsabilidad ambiental involucra a todos los sectores, y la agricultura no es la excepción. Debido a los altos índices de contaminación que generan los residuos de las actividades agrícolas, resulta evidentemente necesario innovar e implementar métodos que permitan hacer más eficientes, limpios y sustentables los procesos de cultivo, producción, cosecha y abasto de alimentos en México y el mundo.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y quienes están de acuerdo son su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias

- Bressan, A., J. F. Moral, O. Semetey, and P. E. Boudon. 2010. Spatio-temporal pattern of *Pentastiridius leporinus* migration in an ephemeral cropping system. *Agric. For. Entomol.* 59-68.
- Cambardella, C., T. Moorman, J. Novak, T. Parkin, D. Karlen, R. Turco, and A. Konopka. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
- Freeman, S.; Minz, D.; Jurkevitch, E.; Maymon, M.; Shabi, E. Molecular analyses of *Colletotrichum* species from almond and other fruits. *Phytopathology*, Saint Paul, v.90, n.6, p.608-614, 2000.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a ed. UNAM. México, DF. 461
- González, H. H., C. R. Johansen, C. A. Gazca, M. A. Equihua, C. E. Salinas, V. F. Estrada, A. Durán, y P. A. R. Valle. 2007. El aguacate y su manejo integrado. Mundi-prensa. 2a ed. México.
- Henríquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., & Sancho, F. (2005). La geoestadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging. *Agronomía Costarricense*, 29 (002) pp. 73-81.

Isaaks, E. H., and R. M. Srivastava. 1988. Spatial distribution of the montane unicorn. *Oikos* 58: 257-271.

Isaaks, E.H., and R. M. Srivastava. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.

Jimenez, P. A., L. Maistrello, M. Lopez, M. A. Ocete, y R. M. Soria. 2011. Distribution of *Cydia fagiglandana* (Zeller) in an exploited holm oak (*Quercus ilex* L.) forest. *Span. J. Agric. Res.* 9: 570-579.

Jiménez, R. A., J. F. Ramírez, J. R. Sánchez, M. L. Salgado, y A. Laguna. 2013. Modelización espacial de *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) en tomate de cáscara por medio de técnicas geoestadísticas. *Rev. Colomb. Entomol.* 39: 183-192.

López, F., M. Jurado., S. Atenciano, A. García, M. Sánchez, and L. García. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant. Soil* 97-105.

Oliver, M., and R. Webster. 1991. How geostatics can help you. *Soil Use Manage.* 7: 206-217.

Perry, J., E. Bell, R. Smith, and I. Woiwod. 1996. SADIE. Software to measure and model spatial pattern. *Aspects of Applied Biology* 46: 95-102.

Perry, N., and Z. Klukowsky. 1997. Spatial distributions of counts at the edges of sample areas, pp. 103-108. In VI Conferencia de la Sociedad de Biometría, Córdoba, España.

Ramírez, J. F., R. Sánchez, A. González, and C. De León. 2011. Modelización y generación de mapas del comportamiento espacial de *Sporisorium reilianum*

((Kuhn) Langdon y Fullerton) en Estado de México, México. Rev. Fac. Cienc. Agrar. 43: 157-173.

Ramírez, J. F., V. M. Solares, D. K. Figueroa, y J. R. Sánchez. 2013. Comportamiento espacial de trips (Insecta:THYSANOPTERA), en plantaciones comerciales de aguacate (*Persea americana* mill.) en Zitácuaro, Michoacán, México. Acta. Zool. Mex. 3: 550-556.

Ramírez, J. F., R. A. Jimenez, J. R. Sánchez, M. Rubí, y D. K. Figueroa. 2014. Distribución espacial de *Asclepias curassavica* L. en el Estado de México, México. Phytion Buenos Aires 83: 193-202. 462

Rivera Martínez, R, J F Ramírez Dávila, A Tapia Rodríguez, D K Figueroa Figueroa, A D Acosta Guadarrama, y R Serrato Cuevas. 2022. Comportamiento Espacial Del Barrenador De La Rama En Aguacate Utilizando El método Del SADIE En El Estado De México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 13 (2). México, ME:247-59. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2728>.

Rossi, R., J. Mulla, G. Journel, and H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecol. Monogr. 62: 277-314.

Samper, F. J., y J. Carrera. 1996. Geoestadística: Aplicaciones a la Hidrología subterránea. 2ª ed. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. Barcelona.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2013. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. SAGARPA. URL: www.siap.gob.mx (Consulta: 25 Octubre 2014).

Syrjala, E. 1996. A statistical test for a difference between the spatial distributions of two populations. *Ecology* 77: 75-80.

Talhinhas, P.; Sreenivasaprasad, S.; Neves, J.; Olivera, H. Molecular and phenotypic analyses reveal association of diverse *Colletotrichum acutatum* groups and a low level of *C. gloeosporioides* with olive anthracnose. *Applied and Environmental Microbiology*, Washington, v.71, n.6, p.2.987-2.998, 2005

Waite, G. K. and B. Martínez. 2002. Insect and mite pest, pp. 339-360. Disponible en A. W. Whiley, B. Schaffer, and B. N. Wolstenholme [eds.], *The Avocado. Botany, Productions and Uses*. CAB International, Wallingford, UK.

Whitelaw, W.M.A.; Curtis, S.J.; Huang, R.; Steel, C.C.; Blandchard, C.L.; Roffey, P.E. Phylogenetic relationships and pathogenicity of *Colletotrichum acutatum* isolates from grape in subtropical Australia. *Plant Pathology*, Chichester, v.56, n.3, p.448-463, 2007

Winder, L., J. Perry, and J. Holland. 1999. The spatial and temporal distribution of the grain aphid *Citobion avenae* in winter wheat. *Entomol. Exp. Appl.* 93: 227-290.

Williams, L. O. 1977. The avocados, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Econ. Bot.* 31: 315-320.

10 OTROS RESULTADOS

En esta investigación se realizaron muestreos quincenales para conocer la distribución espacial de la antracnosis durante dos años. A continuación, se presentan resultados detallados obtenidos durante la investigación que no se encuentran dentro de alguno de los artículos anteriormente presentados, los cuales corresponden a la identificación de la presencia y aislamiento del fitopatógeno, a la determinación de la incidencia de la antracnosis, y principalmente, se incluyen los resultados del análisis geoestadístico general (semivariogramas, mapas, tablas de validación cruzada y de superficie infectada).

10.1 Identificación de síntomas de antracnosis

Al inicio del muestreo, se realizó un recorrido por la zona de estudio con la finalidad de identificar la presencia y/o ausencia de antracnosis en los arboles de aguacate. Se logró identificar síntomas de antracnosis en arboles de los cuatro municipios muestreados, corroborando así la hipótesis de que la enfermedad presenta una distribución amplia y cuyos agentes de dispersión son pieza fundamental para entender su comportamiento espacial; los síntomas encontrados en estos árboles variaron desde pequeñas manchas oscuras sobre el pericarpio de los frutos, hojas y ramas; también se encontró la presencia de lesiones mayores de tonos marrones y oscuros, donde se observaron pequeños apresorios con facilidad, hasta encontrar la presencia de lesiones necróticas irregulares de mayor tamaño.

10.2 Incidencia

Para determinar los porcentajes de incidencia, se contabilizaron el número de frutos enfermos, tomando como muestra 24 frutos de cada árbol, teniendo un total de 9,600 frutos en cada municipio.

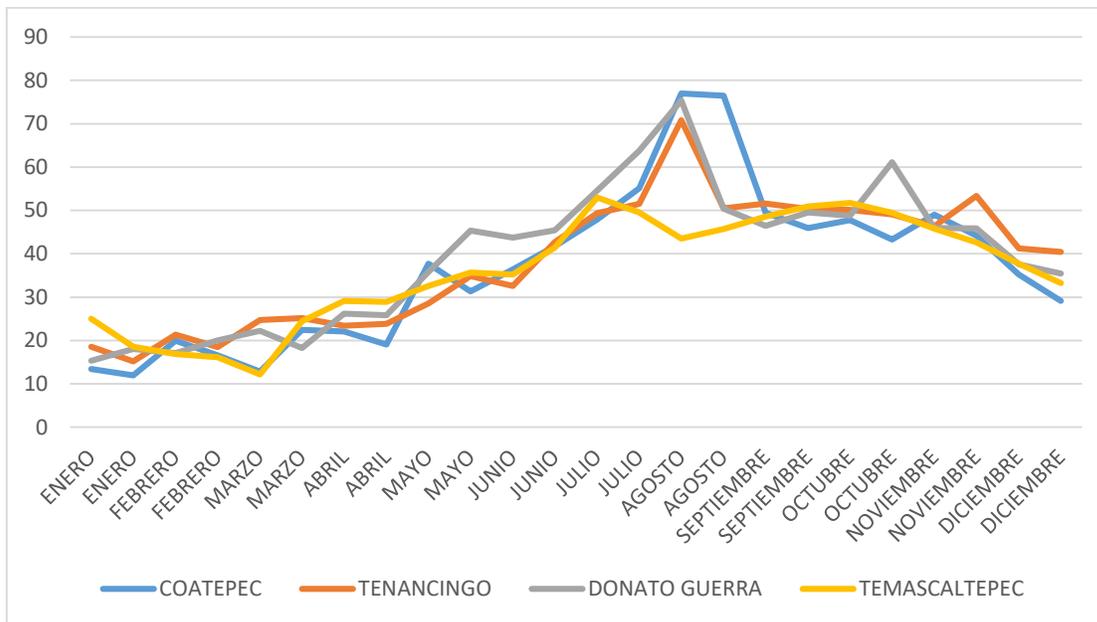


Figura 8. Incidencia de antracnosis en Coatepec Harinas, Tenancingo, Temascaltepec y Donato Guerra.

En el caso de Coatepec Harinas, el mayor porcentaje de incidencia de antracnosis se presentó en el mes de agosto (ambos muestreos), con un 76%(figura 9), mientras que el menor porcentaje de incidencia fue de casi 12% en el mes de enero, esto se traduce a un total de 287 frutos con síntomas de antracnosis (Figura 10).

Los porcentajes de incidencia en Tenancingo, coinciden con los encontrados en Coatepec Harinas, pues también en agosto se encontró el mayor número de frutos enfermos, sin embargo, los menores porcentajes correspondieron a los meses de enero y febrero, es decir, al comienzo del periodo muestreo.

Un porcentaje de 75% de frutos enfermos en el mes de agosto fue encontrado en Donato Guerra, coincidiendo con los mayores porcentajes encontrados en Coatepec Harinas y Tenancingo, por otro lado, el valor menor encontrado para este municipio fue en el primer muestreo, con un valor del 15.29%.

Finalmente, en Temascaltepec, los mayores porcentajes de incidencia fueron de 50.9 y 51.7, durante los muestreos de septiembre y octubre, mientras que el menor porcentaje de frutos enfermos fue de 12.16 en el mes de marzo (Cuadro 6).

Escala de severidad de antracnosis

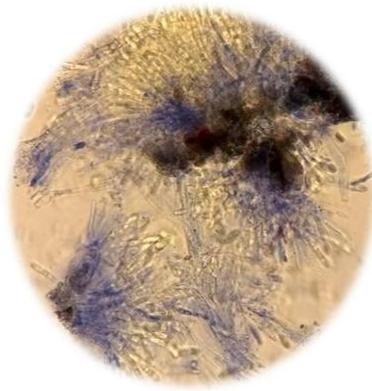
en los estudios de enfermedades en las plantas, es frecuente la aplicación y obtención

10.3 Aislamiento e identificación de las cepas de *Colletotrichum gloeosporioides*

Se lograron aislar muestras de *C. gloeosporioides* de los frutos obtenidos en las colectas realizadas en los cuatro municipios. Dichas muestras fueron identificadas a través de claves especializadas y En la figura 11 C se puede apreciar la presencia de acérvulos de aspectos claviformes, triangulares e irregulares, cuyos conidios son rectos, cilíndricos, hialinos y obtusos en el ápice, y micelio algodonoso con tonalidades grisáceas; esto concuerda con el reporté realizado por Morales *et al.* (2000; 2009) y Cano (2004), quienes mencionan que las colonias encontradas en los aislamientos de *C. gloeosporioides* provenientes de muestras de aguacate, son variables, por lo que los resultados encontrados en este trabajo concluyen que corresponden a la misma especie.



A) Micelio algodonoso de tonalidad gris a café con algunas colonias de color rosado.



B) Acérvulos de aspecto claviforme, triangular o irregular



C) Conidios rectos, cilíndricos, hialinos y obtusos en el ápice

Figura 9. *Colletotrichum gloeosporioides*: A) Micelio algodonoso; B) Acérvulos); C) Conidios



A) Tenancingo



B) Coatepec Harinas



C) Donato Guerra



D) Temascaltepec

Figura 10. Cepas de *C. gloeosporioides* de los cuatro municipios de estudio

10.4 Evaluación de capacidad antagónica de *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum* in vitro

Para el establecimiento del experimento de biocontrol se obtuvieron y evaluaron dos cepas de *Trichoderma harzianum* (T-22) y dos cepas de *Bacillus subtilis*, así como el empleo de un fungicida comercial contra las cepas de *C. gloeosporioides* aisladas a

10.5 Análisis geoestadístico

En este trabajo de investigación se elaboraron un total de 192 semivariogramas con el software Variowin 2.2, cuya confiabilidad y exactitud fue determinante para el ajuste a modelos teóricos. Investigadores como Ramírez, Martínez, Maldonado y Acosta, han utilizado este programa para la obtención de modelos geoestadísticos precisos en diversos estudios de plagas y enfermedades agrícolas.

Con el empleo de los datos de incidencia de frutos infectados o que presentaban síntomas de la enfermedad obtenidos en campo, se elaboraron los semivariogramas y los mapas de comportamiento espacial mostrados en los artículos del apartado anterior (ver 9 RESULTADOS), los cuales son la parte más relevante del trabajo de investigación realizado.

La mayor parte de los semivariogramas obtenidos se ajustaron a modelos exponenciales, gaussianos y esféricos, sin embargo, el modelo que más destacó para explicar la enfermedad fue de tipo exponencial en los cuatro municipios.

Así mismo, el software Surfer 16 facilitó la obtención de mapas de superficie infectada con antracnosis, mismos en los que se observan parches o centros de agregación, indicando posible punto de origen del agente causal.

Cabe destacar que estos semivariogramas y mapas se encuentran integrados en los artículos anteriormente presentados, y en los cuales se comprueba que la antracnosis es una enfermedad que se presenta en el cultivo de aguacate formando parches de infección, por lo que se asume un comportamiento espacial agregado.

11 DISCUSIÓN GENERAL

La agricultura representa una de las actividades humanas y económicas más importantes en el mundo. La mayor parte de las civilizaciones deben su éxito no solo a las adaptaciones a un ambiente determinado, sino también a la generación de estrategias de producción agrícola que les han permitido asegurar su alimentación durante miles de años.

Aunado a esto, desde la época prehispánica, en México se han cultivado especies como el maíz y el aguacate, las cuales, no solo eran importantes para los indígenas como parte de su alimentación o del cuidado de la salud, sino como ofrenda para sus dioses. El Códice Florentino es uno de los documentos en los que se mencionan tres tipos de aguacates cuya descripción botánica hace referencia a las tres variedades principales de la planta: antillana, mexicana y guatemalteca.

Con el tiempo, el aguacate se convirtió en un especie domesticada no sólo de alto valor alimenticio, sino también económico para nuestro país, asociado al creciente interés que se ha mostrado por parte de la comunidad científica, pues es una de las especies más estudiadas a nivel nacional por investigadores de renombre como Morales, Ávila y Téliz, solo por mencionar algunos, aunque también por muchos otros investigadores a nivel mundial, realizando estudios que varían desde el origen y domesticación del cultivo, rescate de especies nativas, zonas ideales de producción del cultivo, manejo y control de plagas, importancia de enfermedades, hasta la identificación de especies asociadas al cultivo a través de técnicas moleculares.

Es así que, desde hace muchos años, México es punta de lanza en la producción y exportación de este frutal, siendo Japón, Estados Unidos y varios países de la Unión Europea los principales importadores de los aguacates que se producen. Diversas fuentes (SIAP, INEGI, entre otras) destacan que dos de cada tres aguacates que se

consumen en el mundo, son mexicanos, enfatizando en los aspectos de la calidad y el cuidado que se tiene en durante la cadena de suministro y hasta que llega al consumidor final.

Países como Republica Dominicana, Colombia, Perú e Indonesia son la principal competencia para México, sin embargo, nuestro país se destaca como el principal productor de aguacate a nivel internacional ya que abastece casi una tercera parte del consumo mundial de este fruto, a pesar de que existen 60 países más que lo producen.

De acuerdo con información de la SAGARPA, nuestro país es el abastecedor de tres de las variedades más importantes de aguacate: Hass, Criollo y Fuerte. A nivel mundial existen 500 variedades diferentes.

Al cierre de 2015, la producción de aguacates en México alcanzó el millón 644 mil toneladas y exportó un millón 468 mil, cifra que superó en 3.8 veces a las ventas al exterior registradas por República Dominicana, su más cercano competidor y segundo productor de aguacate a nivel internacional.

Esto nos permite tener una visión más certera y analizar el panorama, por lo que, tomando en cuenta la importancia del cultivo, es que surge la necesidad de implementar estrategias para su manejo adecuado, y es también donde nace la relevancia de este trabajo de investigación, en el cual se destaca el valor del cultivo y también la relevancia de la antracosis como enfermedad, cuyos daños provocan pérdidas económicas considerables para los productores.

Estas pérdidas en la producción surgen debido a que el agente causal (*Colletotrichum gloeosporioides*) permanece latente durante todo el año en los huertos de aguacate, y esperando las condiciones ambientales ideales para comenzar el proceso infeccioso.

Al respecto, Mercado (2015) menciona que uno de los factores determinantes en la aparición de la antracnosis en los cultivos es el clima; lo anterior se asume de manera lógica si consideramos lo propuesto por Leavell y Clark en 1953, quienes hablan acerca del concepto de “triada ecológica”, en donde se considera la historia natural de la enfermedad y los tres aspectos importantes para que ésta surja: El agente causal, un hospedero susceptible y el ambiente.

En este trabajo, se identificó claramente la presencia del agente causal de la antracnosis, el hospedero susceptible, que fueron los arboles de aguacate cv. Hass y las condiciones edafoclimaticas que se presentaron en los cuatro municipios muestreados.

Gracias a los semivariogramas generados y a los mapas elaborados a partir del análisis geoestadístico, fue posible conocer el comportamiento espacial de la enfermedad, donde la presencia de más de un centro de agregación a lo largo de los dos años de estudio, fue determinante y sugerente para asumir que la enfermedad se encontraba presente en toda la zona muestreada; si bien, no alcanzó un porcentaje de infección del 100%, si se mantuvo constante durante todo el periodo de muestreo en los cuatro municipios.

A su vez, el cambio en estos centros de agregación se atribuye a las épocas de cosecha, pues al ser un cultivo perenne y cuyas edades eran diferentes, los frutos estaban presentes en las huertas todo el año, sin embargo, eran cortados por los productores para su comercialización.

Como ya se ha mencionado a lo largo de este estudio, se considera importante el seguir aplicando estrategias que permitan tomar decisiones adecuadas en el momento justo, pues esto, permitirá disminuir costos y facilitara el control de la enfermedad en el cultivo.

La geoestadística aplicada a la investigación agrícola ha cobrado gran relevancia en los últimos años, generando una nueva línea de generación de conocimiento en nuestro país, como lo es la agricultura de precisión, y ciertamente, en este trabajo se comprobó que las geotecnologías funcionan como una herramienta que permite complementar las labores de cultivo y optimizar el tiempo que se invierte en ellas.

Este trabajo es uno de los primeros estudios geoestadísticos realizados con el objetivo de conocer la distribución espacial de las enfermedades en el cultivo de aguacate en el Estado de México, por lo que se inicia un campo nuevo para seguir realizando estudios que contribuyan al manejo del cultivo y de otras enfermedades que se presenten.

12 CONCLUSIONES

En este trabajo se logró analizar el comportamiento espacial de *Colletotrichum gloeosporioides* en cuatro municipios productores de aguacate hass en el Estado de México.

Así mismo, se logró identificar la presencia de *C. gloeosporioides*, agente causal de la antracnosis en el aguacate.

Para conocer el patrón espacial de la antracnosis, se elaboraron mapas de densidad para las cuatro zonas de estudio. Además de que se pudo estimar la superficie infectada y la estabilidad espacio-temporal de la antracnosis

En este trabajo se confirmó que la antracnosis es una enfermedad causada por *C. gloeosporioides*, que se distribuye de forma agregada en los huertos de producción de aguacate Hass en el Estado de México.

El patrón espacial que siguen las enfermedades de los cultivos agrícolas a través del tiempo es un aspecto que debe considerarse dentro del manejo de cualquier cultivo.

El cultivo de aguacate es uno de los más susceptibles al ataque de enfermedades como la antracnosis.

Las condiciones ambientales, sobretodo de humedad y temperatura elevadas juegan un papel determinante en la aparición y el proceso infeccioso de la enfermedad.

Gracias a los semivariogramas obtenidos y a los mapas de densidad se pudo establecer el comportamiento espacial agregado de la antracnosis, formando parches infecciosos en las cuatro zonas muestreadas.

Los ensayos de antagonismo mostraron que *Trichoderma harzianum* T-22 y T-39 presentan los valores más altos en eficiencia para controlar a *Colletotrichum gloeosporioides*, causante de la antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México.

13 REFERENCIAS

- Acevedo JCG. 2021. Diseño de una escala diagramática para evaluar la severidad del mildiú *Pseudoperonospora cubensis* en pepino en Morelos, México. Tesis de Posgrado. Universidad Autónoma de Morelos. Indicar número de páginas.
- Alfaro E.E., G.J.L. Morales y S.M.E. Pedraza (2017) Hongos asociados al síndrome de la roña del aguacate en el estado de Michoacán, México.
- Alfaro Espino, E., Morales García, J. L., y Pedraza-Santos, M. E. (2017). Hongos asociados al síndrome de la roña del aguacate en el estado de Michoacán, México.
- Bassanezi R.B. and F.F. Laranjeira (2007) Spatial patterns of leprosis and its mite vector in commercial citrus groves in Brazil. *Plant Pathology* 56:97-106.
- Bock CH, Parker PE, Cook AZ and Gottwald TR. 2008. Characteristics of the perception of different severity measures of citrus canker and the relations between the various symptom types. *Plant Disease* 92:927-939.
- Campbell C.L. and LV. Madden (1990) Introduction to plant disease epidemiology. New York: Wiley Editorial; p. 53-90.
- Cárdenas Pardo, N. J., Darghan, A., SOSA, M. D., y 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), 209220. <https://dx.doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Chávez-León G., L. Tapia, M. Bravo, J. Reyes, H. Flores, I. Fernández, M.C. Guzmán, J. Ánima, F. Ramírez, J. Pérez, J. Rocillo, M. Mendoza (2012) Impacto del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate (impact of forest land use change to avocado orchards).

Clavijo, S. A (1993) Fundamentos de manejo de plagas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas, Venezuela. 205 p.

cnosis%20tomate%20de%20arbol.pdf-Op.Cit.-

Del Ponte EM, Pethybridge SJ, Bock CH, Michereff SJ, Machado FJ and Spolti P. 2017. Standard area diagrams for aiding severity estimation: scientometrics, pathosystems and methodological trends in the last 25 years. *Phytopathology* 107:1161-1174. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-17-0069-FI>.

Espinoza-Zúñiga, P., J.F Ramírez-Dávila, D. Cibrián-Tovar, A. Villanueva-Morales, V.D. Cibrián-Llenderal, D.K. Figueroa-Figueroa y R. Rivera-Martínez (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. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100017>

Farias, P.R.S., S.R. Roberto, J.R.S. Lopes and D. Perecin (2004) Geostatistical characterization of the spatial distribution of *Xylella fastidiosa* sharpshooter vectors on citrus. *Neotropical Entomology*, 33:13-20.

Ferguson, A., Z. Klukowski, B. Walczak, J. Perry, M. Mugglestone, S. Clark and I. Williams (2000) The spatio-temporal distribution of adult *Ceutorhynchus assimilis* in a crop of winter oilseed rape in relation to the distribution of their larvae and that of the parasitoid *Trichomalus perfectus*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 95: 161-171. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2000.00654.x>

- Ferreira AC, Cidadin I, Scariotto S, Pertille RH, Sachet MR, Guerrezi MT, and Donazzolo J. 2021. Escala diagramática para avaliação da severidade de Antracnose em frutos de feijoa. *Ciencia rural*, 51:3-1.
- Figueroa-Figueroa, D. K., Dávila, J. F. R., Antonio-Némiga, X., & Huerta, A. G. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 865-879.
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2020) Análisis del mercado de las principales frutas tropicales. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Gabriel J y Castro C. 2017. Manual para evaluación de daños de enfermedades en cultivos agrícolas. Grupo COMPAS, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. 53 p.
- George N., *Fitopatología*, 2da. Edición, 1989, p.569
- Gómez A. D. y A. M. Higuera (1986) Bases para el manejo integrado de plagas. Revisión crítica de la investigación entomológica. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP), Estación Experimental Zulia. Serie D N° 1-21. Maracaibo, Venezuela. 92 p
- Granadoz R. y Villaverde M. *Microbiología*, 2d Edición.p.10-11.
- Harris I., T.J., Osborn, P. Jones and D.H. Lister (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data* 7, 109 <https://rdcu.be/b3nUI>
- Hernández RL, y Sandoval IJS. 2015. Escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33:1, 95-103.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018533092015000100095&lng=es&tlng=es.

Hernández, TA y Montoya R. 1987. Epidemiología cuantitativa aplicada al análisis de algunas enfermedades de cultivos tropicales. (No. IICA PM-A3/PE 86-008). IICA, Lima (Perú) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Agronomía.

Kogan M. and D. C. Herzog (1980) Sampling methods in soybean entomology. Springer-Verlag. New York. USA. 587 p.

Lemus-Soriano, B. A., & Pérez-Aguilar, D. A. (2017) Manejo de la antracnosis del aguacate con biofungicidas.

Maldonado-Zamora F.I 2016. Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 7: 845-856. 2016.

Marcano G. R., R. S. Acuña and R. B Maestre (2020) Procedimientos estadísticos utilizados en las tesis de maestría en Agricultura Tropical Universidad de Oriente Periodo 1998-2016. Comunicaciones en Estadística, 13(1), 45-66.

Martínez-Martínez, N., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F., & Figueroa-Figueroa, D. K. (2021). Spatial distribution of dwarf mistletoe in Monarch Butterfly Biosphere Reserve. Colombia Forestal, 24(2), 65-81.

McMahon P. and A. Purwantara (2004) Phytophthora on cocoa. In: Drenth A, Guest D, editors. Diversity and Management of Phytophthora in Southeast Asia, 1ra. Ed. Australian Centre for International Agricultural Research. 114:104- 115

- Mekuria W., A. Amare and C. Alemayehu (2016) Evaluación de la marchitez bacteriana (*Xanthomonas campestris* pv. *Musacearum*) del enset en el sur de Etiopía. *African Journal Agriculture Research* 11 (19): 1724-1733.
- Michereff SJ, Noronha MA, Andrade DEGT, Oliveira EP, Filha MS and Moreira PAA. 2006. Development and validation of a diagrammatic key for *Cercospora* leaf spot of sweet pepper. *Summa Phytopathologica* 32:260-266.
- Morales G. J. L., Guzmán, M. D. P. R., Rivero, H. S. A., & Santos, M. E. P. (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(2), 421-424.
- Morales-García, J. L. 1996. Caracterización cultural, morfológica, patogénica y molecular de *Colletotrichum gloeosporioides* Penz. Causante de la antracnosis del aguacate en Michoacán. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 96 p.
- Oliver M. and R. Webster (1997) How geostatistics can help you. *Soil Use Manag.* 7: 206-217.1998.
- Ortega-Acosta SA, Velasco-Cruz C, Hernández-Morales J, Ochoa-Martinez D y Hernández-Ruíz, J. 2016. Diagrammatic logarithmic scales for assess the severity of spotted leaves and calyces of roselle. *Revista Mexicana de Fitopatología* 34: 270-285
- Palomares-Pérez M, Rodríguez-Leyva E, Ortega-Arenas LD, Santillán-Galicia M, Valdovinos-Ponce G y Ramírez-Alarcón S. 2016. El Cacarizo del nopal en *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, Milpa Alta, Ciudad de México. *Agrociencia*, 50:7, 877-887.

- Perry, N., and Z. Klukowsky. 1997. Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. VI Conferencia de la Sociedad de Biometría, Córdoba, España.
- Quiñones-Valdez R., J.R. Sánchez-Pale, A.K. Pedraza-Esquivel, A. Castañeda-Vildózola y O. Franco-Mora (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(2), 209-220.
- Ramírez-Dávila J.F. y C.E. Porcayo (2009^a) Comportamiento espacial de las larvas del mosquito verde *Jacobiasca lybica*, en un viñedo de secano en Andalucía España. *Ciencia ErgoSum* 16:116-127.
- Ramírez-Dávila J.F. y C.E. Porcayo (2009^b) Estudio de la distribución espacial del muérdago enano (*Arcetobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México utilizando el método del SADIE. *Madera y Bosques*. 15:147-160.
- Ramírez-Dávila J.F., J.R. Sánchez Pale y C. De León (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), 1-14.
- Ramírez-Gil JG and Morales-Osorio JG. 2020. Desarrollo y validación de escalas de severidad del complejo marchitez del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi*, *Verticillium dahliae* y el desorden hipoxia-anoxia y sus respuestas fisiológicas en plantas de aguacate. *Agronomía Colombiana*, 38:1. DOI: 10.15446/agron.colomb.v38n1.78527
- Rasband WS. 2016. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.nih.gov/ij>.

- Reina-Noreña J., M.J Mayorga-Cobos., S.J. Caldas-Herrera, J. Rodríguez-Valenzuela, E.H. y Varón-Devia (2015) El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu.* 16(2):265-278
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F., Martínez Quiroz, M. y González Huerta, A. (2020). Spatial modeling of *Bactericera cockerelli* Sulc. nymphs on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) using of geostatistical techniques. *Biotecnia* [online]. vol. 22, n. 1, pp. 142-152. Epub 03-Ago-2020. ISSN 1665-1456. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J.F., & Acosta Guadarrama, A. (2018). Distribución espacial de las poblaciones de huevos de *Bactericera cockerelli* Sulc. en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Acta Universitaria.* 28. 24-33. 10.15174/au.2018.1944.
- Sánchez-Pale, J. R., Ramírez-Dávila, J. F., González-Huerta, A., & de León, C. (2015). Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(7), 1467-1480.
- Santos, J. V. y Noronha, R. Análise geoestatística do patossistema da folha curta em plantação de coco na Amazônia Oriental. Orientador: Paulo Roberto Silva Farias. 2019. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, PA, 2019.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021)
- Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA

- Taliei F., N. Safaie and M.A. Aghajani (2013) Spatial distribution of *Macrophomina phaseolina* and soybean charcoal rot incidence using geographic information system (A case study in Northern Iran). *Journal of Agricultural Science and Technology* 15: 1523- 1536
- Tannure C.L., S.M. Mazza y L.I. Giménez () Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*).
- Taylor L.R. (1971) Aggregation as a species characteristic. Spatial patterns and statistical distributions. The Pennsylvania State University Press. University Park. London, UK. p. 357-377.
- Torres E.J. y L.A. Tovar (2019) Tres procedimientos de análisis epidemiológico en palma de aceite e incorporación de atributos del paisaje. *Revista Palmas*, 31(especial), 403-415. 2010
- Tovar-Soto A, Hernández-Martínez MH, Cristóbal-Alejo J, Romero-Hijo R y Mora AG. 2002. Escala logarítmica diagramática de severidad de la mancha negra (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.) en chirimoyo (*Annona cherimola* Mill.). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 20:1,103109. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61220117>
- Trinidad Ángel, E., Ascencio Valle, F., Ulloa, J., Ramírez Ramírez, J., Ragazzo Sánchez, J., Calderón Santoyo, M. y Bautista Rosales, P. (2017). Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [Internet]. [citado 30jul.2020];(19):3953-64.

- Valbuena-García AM, Rodríguez-Villamizar LA. Análisis espacial en epidemiología: revisión de métodos. Rev. Uni Ind Santander Salud. 2018; 50(4): 358-365. doi: <http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v50n4-2018009>
- Valcarce-Diñeiro R. 2020. Seguimiento y clasificación de parámetros biofísicos de superficies agrícolas a partir de sensores remotos radar.
- van Maanen A. and X.M. Xu (2003) Modeling plant disease epidemics. Europ J Plant Pathol.;109(7):669-682. Doi:10.1023/A:1026018005613.
- Vivas L.E. and A. Notz (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(1), 109-125.
- Winder L., J. Perry, J. Holland (1999) The spatial and temporal distribution of the grain aphid *Sitobion avenae* in winter wheat. Entomologia Experimentalis et Applicata. 93:227- 290. 1999.
- Zavala-León MJ y Cristóbal-Alejo J. 2012. Escala logarítmica diagramática de severidad de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en papaya (*Carica papaya*). Fitosanidad, 16:2,83-86. ISSN: 1562-3009. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209126216004>

14 ANEXOS

Cuadro 1. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas de la antracnosis en el cultivo de aguacate para los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo.

FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	k
AGOSTO 1	1.52s	0.25	NS	S	2.05
AGOSTO 2	0.65ns	0.09	NS	S	4.26
SEP 1	1.66s	0.33	NS	S	3.71
SEP 2	0.91ns	0.59	S	S	11.21
OCT 1	1.57s	0.07	NA	NA	-
OCT 2	1.80s	0.72	NS	S	2.84
NOV 1	1.44s	0.84	NS	S	1.65
NOV 2	2.05s	0.06	NS	S	2.29
DIC 1	0.84ns	0	S	S	13.06
DIC 2	1.71s	0.98	NS	S	3.14
ENERO 1	2.16s	0.45	NS	S	1.83
ENERO 2	1.95s	0.39	NS	S	3.40
FEB 1	0.72ns	0.55	NA	NA	-
FEB 2	1.50s	0.81	NS	S	0.97
MARZO 1	1.62s	0.68	NS	S	1.35
MARZO 2	2.14s	0.49	NS	S	2.68
ABRIL 1	2.26s	0.05	S	S	15.93
ABRIL 2	1.98s	0.76	NS	S	0.82
MAYO 1	1.49s	0.88	NS	S	1.39
MAYO 2	1.84s	0.63	NA	NA	-
JUNIO 1	0.79ns	0	NA	NA	-
JUNIO 2	2.23s	0.74	NS	S	1.42
JULIO 1	2.42s	0.92	NS	S	0.94
JULIO 2	0.88ns	0.69	NS	S	1.07
FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	k
AGOSTO 1	2.07s	0.58	NS	S	2.59
AGOSTO 2	2.39s	0	NS	S	1.26
SEP 1	1.22s	0.48	NA	NA	-
SEP 2	1.40s	0.08	NA	NA	-
OCT 1	1.69s	0.67	NS	S	2.80
OCT 2	1.53s	0.93			1.66
NOV 1	0.87ns	0.51	S	S	19.11
NOV 2	2.13s	0.09	NS	S	1.21
DIC 1	1.91s	0.51	NS	S	3.08
DIC 2	2.25s	0	NA	NA	-
ENERO 1	1.48s	0.82	S	S	13.99
ENERO 2	1.65s	0.99	NS	S	2.44
FEB 1	2.03s	0.42	NS	S	1.95
FEB 2	0.70ns	0.97	NS	S	2.33
MARZO 1	1.74s	0.73	NS	S	1.20
MARZO 2	1.43s	0.06	NA	NA	-
ABRIL 1	1.92s	0.44	NS	S	2.02
ABRIL 2	1.58s	0.76	NS	S	0.86
MAYO 1	0.84ns	0.63	NA	NA	-
MAYO 2	2.28s	0.37	NS	S	2.49
JUNIO 1	1.69s	0.62	NS	S	3.51
JUNIO 2	2.47s	0.87	NS	S	0.75
JULIO 1	0.96ns	0	S	S	17.03
JULIO 2	2.33s	0.57	NS	S	1.15

S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No

Ajustada

Cuadro 2. Valor de los índices Ia y Ja y sus respectivas probabilidades Pa y Qa en la incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1.39	0.009s	1.16	0.266
	2	1.48	0.016s	1.11	0.150
AGOSTO	1	1.29	0.011s	1.06	0.158
	2	1.66	0.012s	1.26	0.252
SEPTIEMBRE	1	1.43	0.006s	1.18	0.166
	2	1.37	0.012s	1.15	0.144
OCTUBRE	1	1.51	0.010s	1.13	0.184
	2	1.47	0.013s	1.22	0.550
NOVIEMBRE	1	1.40	0.008s	1.07	0.206
	2	1.57	0.011s	1.25	0.142
DICIEMBRE	1	1.30	0.015s	1.20	0.219
	2	1.60	0.007s	1.17	0.178
ENERO	1	1.34	0.007s	1.14	0.197
	2	1.63	0.016s	1.24	0.153
FEBRERO	1	1.49	0.015s	1.09	0.241
	2	1.52	0.013s	1.11	0.222
MARZO	1	1.62	0.011s	1.21	0.213
	2	1.28	0.014s	1.10	0.160
ABRIL	1	1.46	0.011s	1.14	0.252
	2	1.41	0.012s	1.12	0.173
MAYO	1	1.54	0.014s	1.15	0.149
	2	1.32	0.010s	1.19	0.247
JUNIO	1	1.58	0.014s	1.23	0.235
	2	1.44	0.011s	1.08	0.192
TENANCINGO					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1.46	0.010s	1.17	0.256ns
	2	1.56	0.013s	1.10	0.167ns
AGOSTO	1	1.44	0.015s	1.25	0.159ns
	2	1.52	0.010s	1.11	0.135ns
SEPTIEMBRE	1	1.30	0.017s	1.19	0.215ns
	2	1.37	0.014s	1.16	0.144ns
OCTUBRE	1	1.60	0.006s	1.06	0.201ns
	2	1.49	0.007s	1.21	0.154ns
NOVIEMBRE	1	1.50	0.011s	1.13	0.235ns
	2	1.39	0.013s	1.15	0.170ns
DICIEMBRE	1	1.41	0.010s	1.18	0.189ns
	2	1.38	0.014s	1.09	0.149ns
ENERO	1	1.63	0.012s	1.11	0.241ns
	2	1.35	0.011s	1.12	0.162ns
FEBRERO	1	1.40	0.009s	1.20	0.183ns
	2	1.51	0.010s	1.13	0.222ns
MARZO	1	1.49	0.011s	1.15	0.239ns
	2	1.62	0.016	1.20	0.151ns
ABRIL	1	1.65	0.008s	1.07	0.228ns
	2	1.58	0.007s	1.14	0.195ns
MAYO	1	1.54	0.012s	1.08	0.173ns
	2	1.42	0.013s	1.14	0.244ns
JUNIO	1	1.31	0.008s	1.23	0.166ns
	2	1.64	0.010s	1.08	0.248ns
JULIO	1	1.46	0.010s	1.17	0.256ns
	2	1.56	0.013s	1.10	0.167ns

Cuadro 3. 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.

COATEPEC HARINAS								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.
AGO 1	10.89	53.80	EXPO	0	30.45	35.1	0	ALTA
AGOSTO 2	12.36	61.88	ESERICO	0	59.94	43.2	0	ALTA
SEPT 1	12.89	66.42	ESFER	0	3.29	45.9	0	ALTA
SEPT2	9.89	36.95	EXPO	0	54.27	56.7	0	ALTA
OCTUBRE 1	11.05	55.59	EXPO	0	1.67	23	0	ALTA
OCTUBRE 2	10.70	45.65	EXPO	0	2.82	43.2	0	ALTA
NOV1	3.81	9.69	EXPO	0	1.02	27	0	ALTA
NOV 2	10.73	36.77	EXPO	0	3.01	37.8	0	ALTA
DIC1	10.60	31.71	GAUSS	0	2.13	29.9	0	ALTA
DIC2	9.97	34.75	GAUSS	0	3.39	35.1	0	ALTA
ENERO 1	1.50	2.27	ESFER	0	48.18	40.5	0	ALTA
ENERO 2	1.68	1.41	GAUSS	0	34.78	45.9	0	ALTA
FEBRERO 1	2.50	2.04	GAUSS	0	6.79	45.9	0	ALTA
FEBRERO 2	2.08	4.00	GAUSS	0	34.76	29.7	0	ALTA
MARZO 1	1.61	1.13	GAUSS	0	2.068	22.4	0	ALTA
MARZO 2	2.80	2.14	ESFER	0	1.14	52.2	0	ALTA
ABRIL 1	2.77	2.21	GAUSS	0	59.11	41.4	0	ALTA
ABRIL 2	4.73	21.09	GAUSS	0	55.44	43.2	0	ALTA
MAYO 2	3.93	3.49	GAUSS	0	64.02	43.7	0	ALTA
MAYO 2	6.68	31.00	EXPO	0	35.22	23	0	ALTA
JUNIO 1	9.42	43.54	GAUSS	0	2.139	32.2	0	ALTA
JUNIO 2	12.85	80.73	GAUSS	0	48.06	39.1	0	ALTA
JULIO 1	12.53	65.72	ESFER	0	44.02	34.5	0	ALTA
JULIO 2	12.52	65.72	EXPO	0	29.12	27	0	ALTA
TENANCINGO								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP
AGOSTO 1	19.86	119.15	GAUSS	0	98.4	26.4	0	ALTA
AGOSTO 2	20.29	116.16	GAUSS	0	100.8	18	0	ALTA
SEPT 1	22.39	154.47	ESFER	0	173	37.79	0	ALTA
SEPT 2	22.25	180.62	EXPO	0	171	32.4	0	ALTA
OCTUBRE 1	20.10	136.36	GAUSS	0	131.6	20	0	ALTA
OCTUBRE 2	18.85	109.73	EXPO	0	106.7	24	0	ALTA
NOV 1	14.43	80.93	EXPO	0	72.9	14	0	ALTA
NOV 2	14.19	59.04	EXPO	0	54	18	0	ALTA
DIC 1	10.11	36.32	GAUSS	0	53.4	16	0	ALTA
DIC 2	8.89	31.05	EXPO	0	109.2	39.6	0	ALTA
ENERO 1	2.23	1.88	ESFER	0	1.76	35.99	0	ALTA
ENERO 2	1.82	1.49	GAUSS	0	1.455	33.6	0	ALTA
FEBRERO 1	2.56	1.92	EXPO	0	1.78	28.8	0	ALTA
FEBRERO 2	2.22	1.61	EXPO	0	1.41	28.8	0	ALTA
MARZO 1	2.97	3.55	GAUSS	0	3.24	41.4	0	ALTA
MARZO 2	3.02	2.36	GAUSS	0	1.23	32.4	0	ALTA
ABRIL 1	2.81	2.06	ESFER	0	1.32	39.6	0	ALTA
ABRIL 2	2.86	3.63	GAUSS	0	1.2	32	0	ALTA

MAYO	3.42	1.54	EXPO	0	1.2	37.8	0	ALTA
MAYO 1	5.85	28.40	EXPO	0	23.78	30.6	0	ALTA
JUNIO 1	13.34	69.68	EXPO	0	63.7	34.2	0	ALTA
JUNIO 2	15.52	85.96	GAUSS	0	63.7	32.4	0	ALTA
JULIO 1	15.31	96.45	EXPO	0	85.56	12	0	ALTA
JULIO 2	17.84	91.74	GAUSS	0	86.48	16	0	ALTA

Cuadro 4. Porcentajes de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS			TENANCINGO		
MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %	MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %
AGOSTO 1	81	19	AGOSTO 1	86	14
AGOSTO 2	89	11	AGOSTO 2	92	8
SEP 1	83	17	SEP 1	94	6
SEPT 2	91	9	SEPT 2	88	12
OCT 1	90	10	OCT 1	89	11
OCT 2	97	3	OCT 2	97	3
NOV 1	98	2	NOV 1	98	2
NOV 2	90	10	NOV 2	91	9
DIC 1	95	5	DIC 1	93	7
DIC 2	97	3	DIC 2	97	3
ENERO 1	96	4	ENERO 1	93	7
ENERO 2	97	3	ENERO 2	92	8
FEB 1	91	9	FEB 1	91	9
FEB 2	90	10	FEB 2	96	4
MARZO 1	90	10	MARZO 1	92	8
MARZO 2	88	12	MARZO 2	91	9
ABRIL 1	86	14	ABRIL 1	90	10
ABRIL 2	99	1	ABRIL 2	88	12
MAYO 1	88	12	MAYO 1	85	15
MAYO 2	96	4	MAYO 2	91	9
JUNIO 1	95	5	JUNIO 1	93	7
JUNIO 2	97	3	JUNIO 2	82	18
JULIO 1	97	3	JULIO 1	93	7
JULIO 2	99	9	JULIO 2	92	8

Cuadro 5. Evaluación económica y medioambiental de los muestreos de antracnosis en el cultivo de aguacate aplicando el fungicida Manzate para Coatepec Harinas y Tenancingo.

COATEPEC HARINAS					TENANCINGO				
Mes	Muestro	Costo en agricultura de precisión (pesos/ha)	Ahorro (pesos/ha)	Cantidad de fungicida aplicado en agricultura de	Ahorro en fungicida (kg/ha)	Costo en agricultura de precisión (pesos/ha)	Ahorro (pesos/ha)	Cantidad de fungicida aplicado en agricultura de	Ahorro en fungicida (kg/ha)

				precisión (kg/ha)				precisión (kg/ha)	
AGOSTO	1	18,144	4,256	51.84	12.16	19264	3136	55.04	8.96
	2	19,936	2,464	56.96	7.04	20608	1792	58.88	5.12
SEPTIEMBRE	1	18,593	3,807	53.12	10.88	21056	1344	60.16	3.84
	2	20,384	2,016	58.24	5.76	19712	2688	56.32	7.68
OCTUBRE	1	20,160	2,240	57.6	6.4	19936	2464	56.96	7.04
	2	21,728	672	62.08	1.92	21728	672	62.08	1.92
NOVIEMBRE	1	21,952	448	62.72	1.28	21952	448	62.72	1.28
	2	20,160	2,240	57.6	6.4	20384	2016	58.24	5.76
DICIEMBRE	1	21,280	1,120	61.75	2.25	20832	1568	59.52	4.48
	2	21,728	672	62.08	1.92	21728	672	62.08	1.92
ENERO	1	21,504	896	61.44	2.56	20832	1568	59.52	4.48
	2	21,728	672	62.08	1.92	20608	1792	58.88	5.12
FEBRERO	1	20,384	2,016	58.24	5.76	20384	2016	58.24	5.76
	2	20,160	2,240	57.6	6.4	21504	896	61.44	2.56
MARZO	1	20,160	2,240	57.6	6.4	20608	1792	58.88	5.12
	2	19,712	2,688	56.32	7.68	20384	2016	58.24	5.76
ABRIL	1	19,264	3,136	55.04	8.96	20160	2240	57.6	6.4
	2	22,176	224	63.36	0.64	19712	2688	56.32	7.68
MAYO	1	19,712	2,688	56.32	7.68	19040	3360	54.4	9.6
	2	21,504	896	61.44	2.56	20384	2016	58.24	5.76
JUNIO	1	21,280	1,120	61.75	2.25	20832	1568	59.52	4.48
	2	21,728	672	62.08	1.92	18368	4032	52.48	11.52
JULIO	1	21,728	672	62.08	1.92	20832	1568	59.52	4.48
	2	22,176	224	63.36	0.64	20608	1792	58.88	5.12
Total		497,281	40,319	1,360.95	113.3	491,456	46,144	1,404.16	131.84

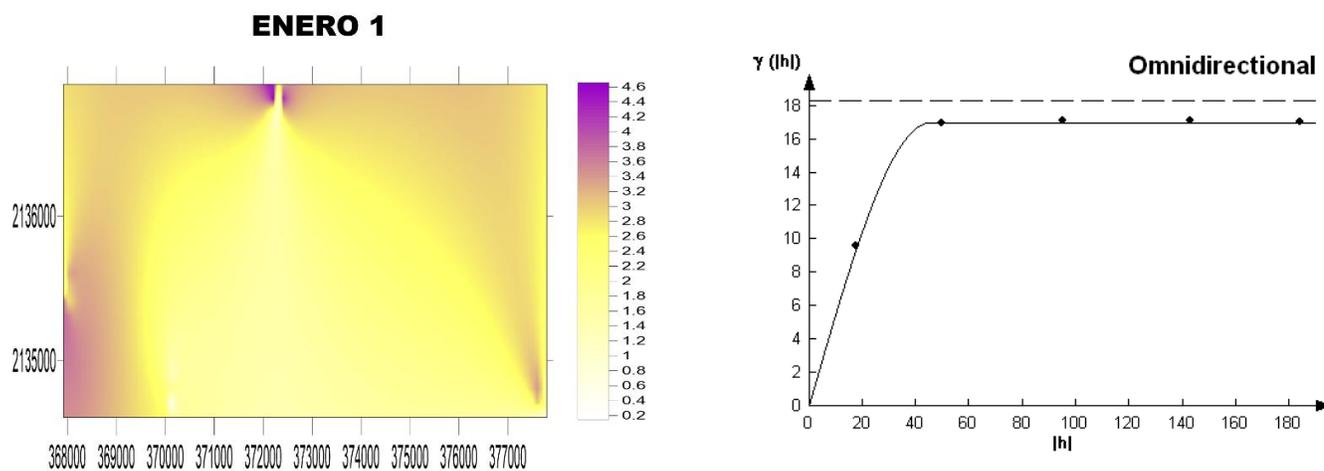
Cuadro 6. Evaluación económica y medioambiental de los muestreos de antracnosis en el cultivo de aguacate aplicando *Trichoderma harzianum* en dosis de 500 g/ha para Coatepec Harinas y Tenancingo.

COATEPEC HARINAS						TENANCINGO			
Mes	Muestreo	Costo en agricultura de precisión (pesos/ha)	Ahorro (pesos/ha)	Cantidad de fungicida aplicado en agricultura de precisión (kg/ha)	Ahorro en fungicida (kg/ha)	Costo en agricultura de precisión (pesos/ha)	Ahorro (pesos/ha)	Cantidad de fungicida aplicado en agricultura de precisión (kg/ha)	Ahorro en fungicida (kg/ha)
AGOSTO	1	3,629	851	6.48	1.52	3853	627	6.88	1.12
	2	3,988	492	7.12	0.88	4122	358	7.36	0.64
SEPTIEMBRE	1	3,718	762	6.64	1.36	4211	269	7.52	0.48
	2	4,077	403	7.28	0.72	3942	538	7.04	0.96
OCTUBRE	1	4,032	448	7.2	0.8	3988	492	7.12	0.88
	2	4346	134	7.76	0.24	4346	134	7.76	0.24
NOVIEMBRE	1	4390	90	7.84	0.16	4390	90	7.84	0.16
	2	4032	448	7.2	0.8	4077	403	7.28	0.72
DICIEMBRE	1	4256	224	7.6	0.4	4166	314	7.44	0.56
	2	4346	134	7.76	0.24	4346	134	7.76	0.24

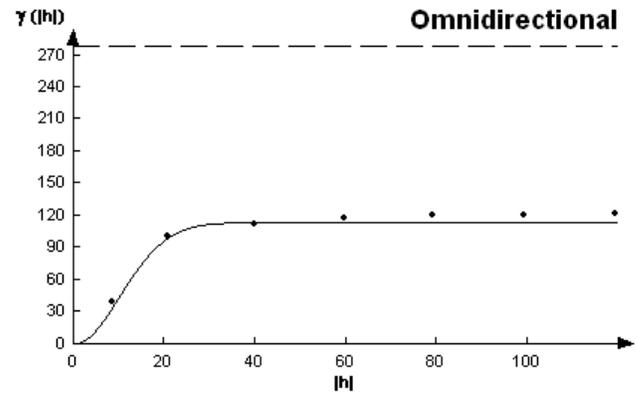
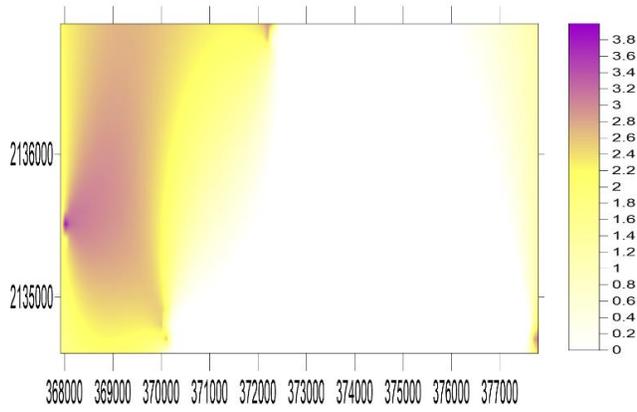
ENERO	1	4301	179	7.68	0.32	4166	314	7.44	0.56
	2	4346	134	7.76	0.24	4122	358	7.36	0.64
FEBRERO	1	4077	403	7.28	0.72	4077	403	7.28	0.72
	2	4032	448	7.2	0.8	4301	179	7.68	0.32
MARZO	1	4032	448	7.2	0.8	4122	358	7.28	0.72
	2	3942	538	7.04	0.96	4077	403	7.28	0.72
ABRIL	1	3853	627	6.88	1.12	4032	448	7.2	0.8
	2	4435	45	7.92	0.08	3942	538	7.04	0.96
MAYO	1	3942	538	7.04	0.96	3808	672	6.8	1.2
	2	4301	179	7.68	0.32	4077	403	7.28	0.72
JUNIO	1	4256	224	7.6	0.4	4166	314	7.44	0.56
	2	4346	134	7.76	0.24	3674	806	6.56	1.44
JULIO	1	4346	134	7.76	0.24	4166	314	7.44	0.56
	2	4435	45	7.92	0.08	4122	358	7.36	0.64
Total		99,458	8,062	177.6	14.4	98,293	9,227	175.44	16.56

Mapas y semivariogramas del comportamiento espacial de antracnosis en Donato

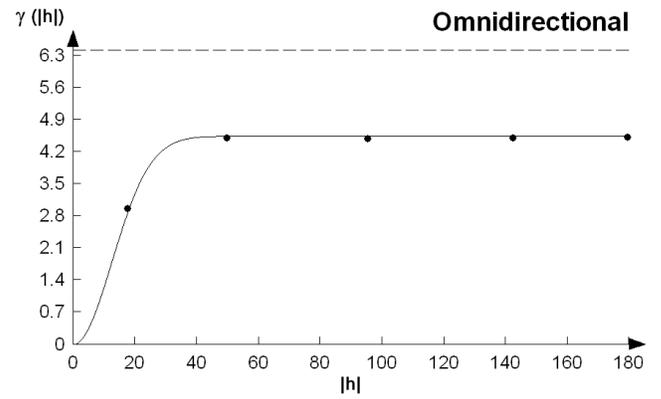
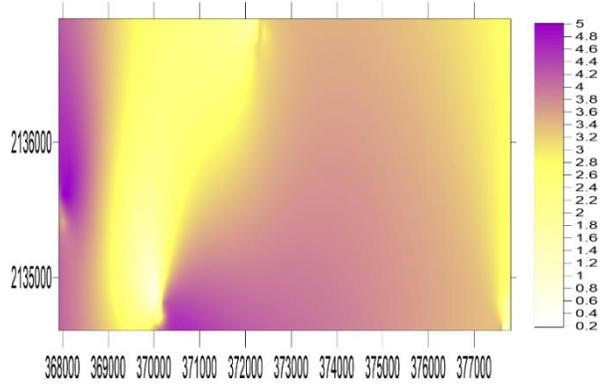
Guerra



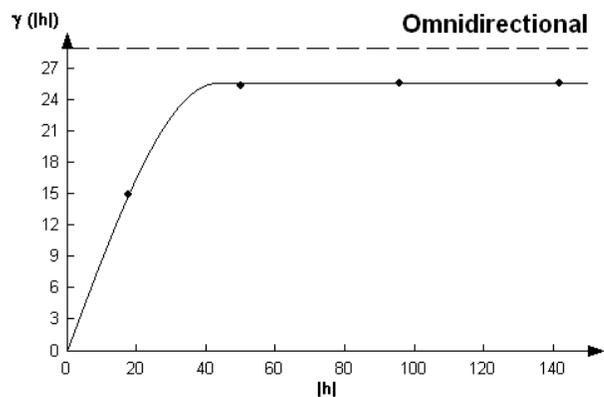
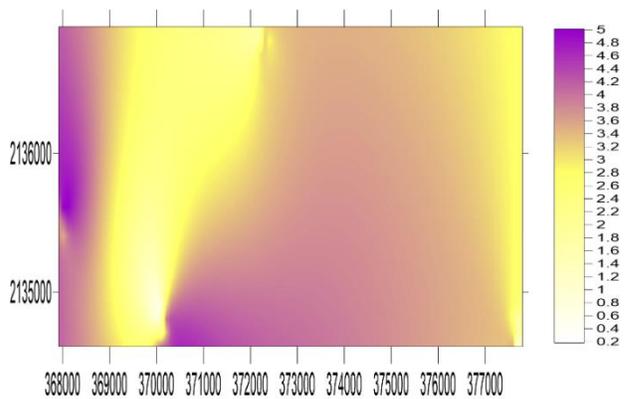
ENERO 2



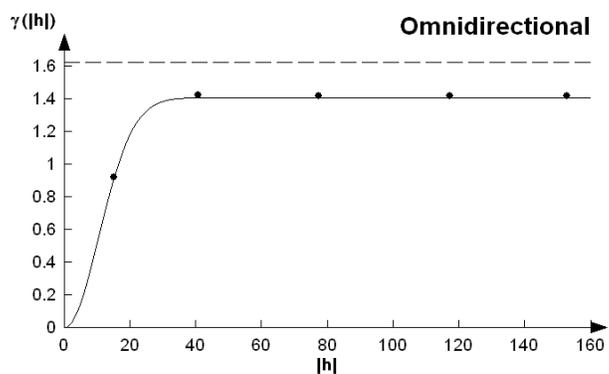
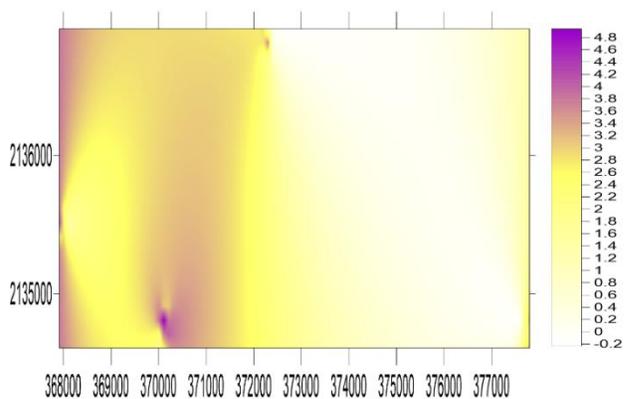
FEBRERO 1



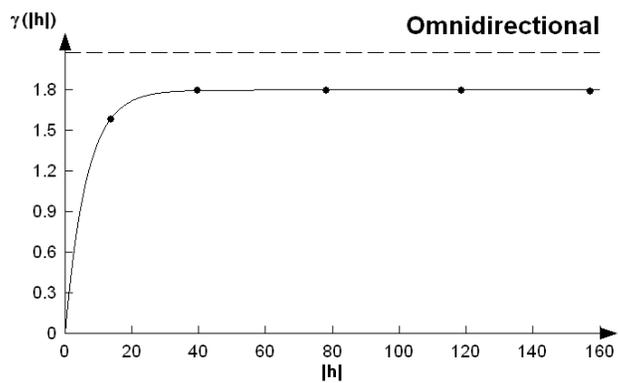
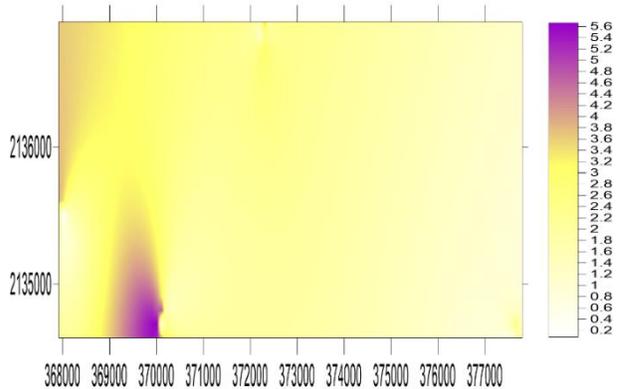
FEBRERO 2



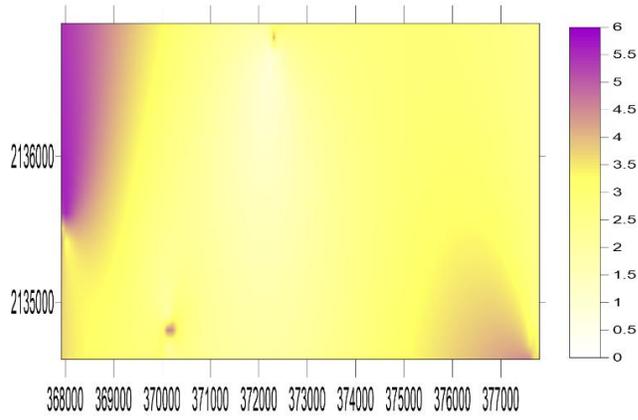
MARZO 1



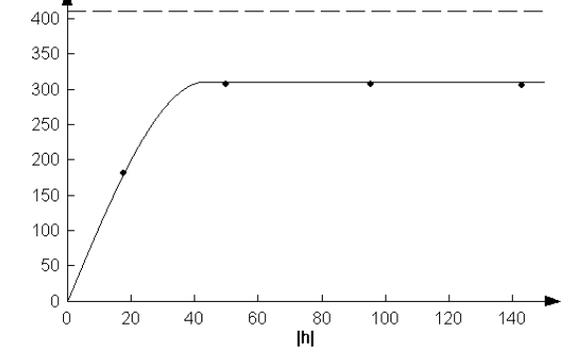
MARZO 2



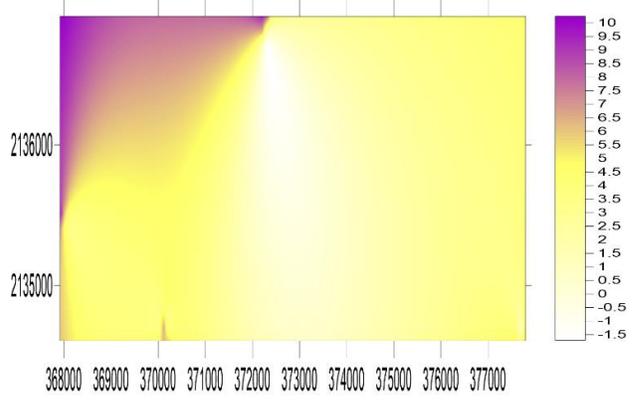
ABRIL 1



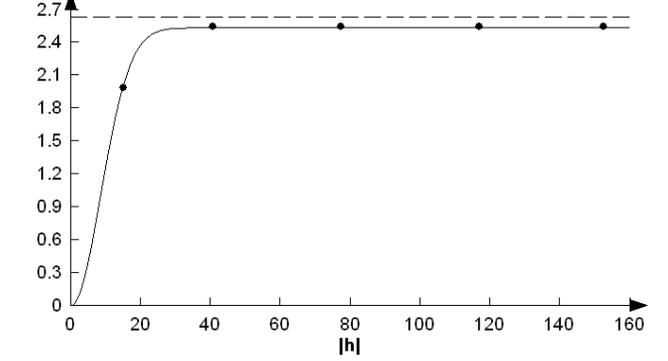
Omnidirectional



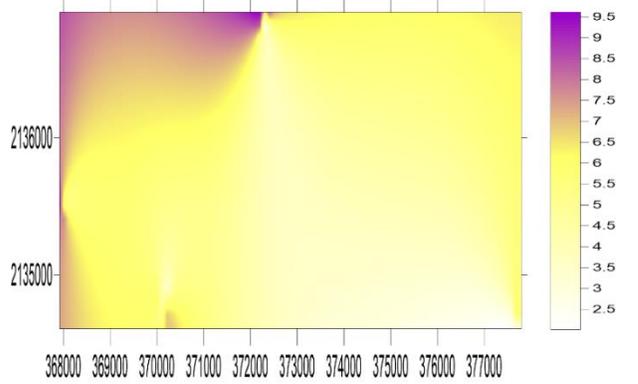
ABRIL 2



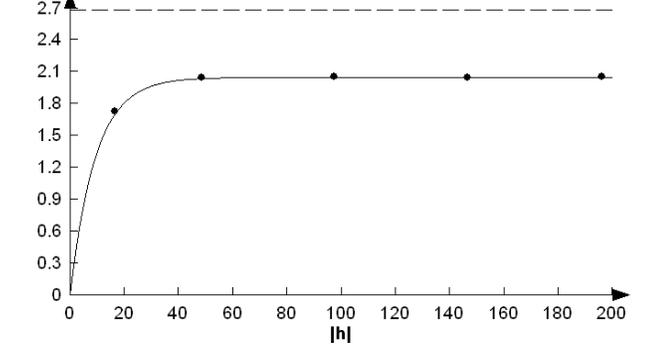
Omnidirectional



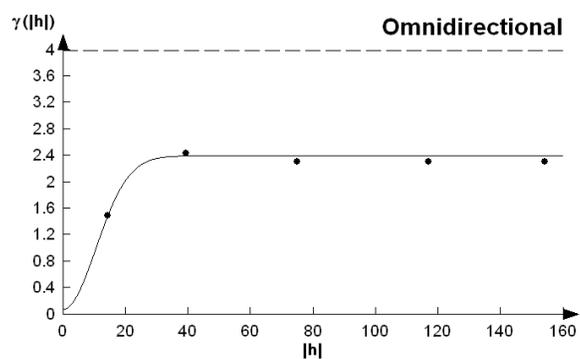
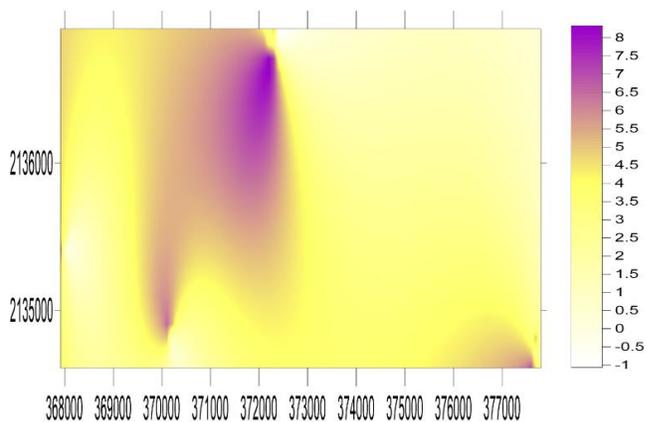
MAYO 1



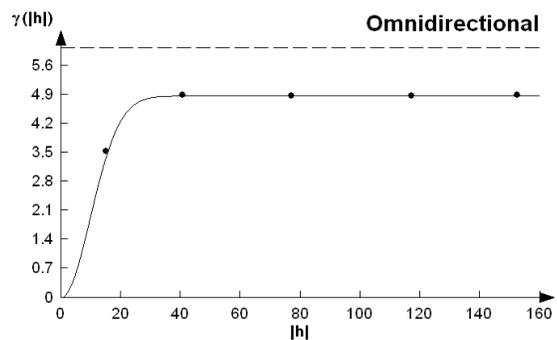
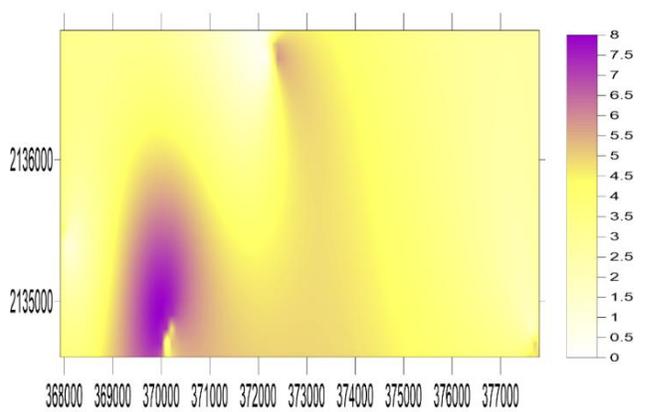
Omnidirectional



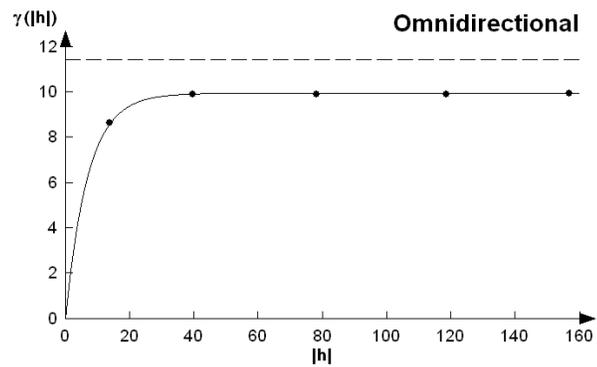
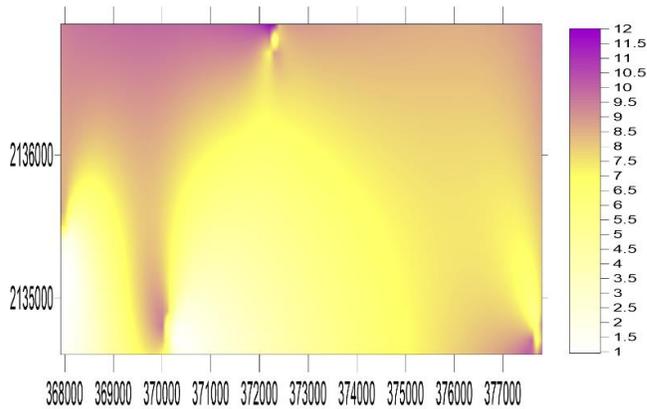
MAYO 2



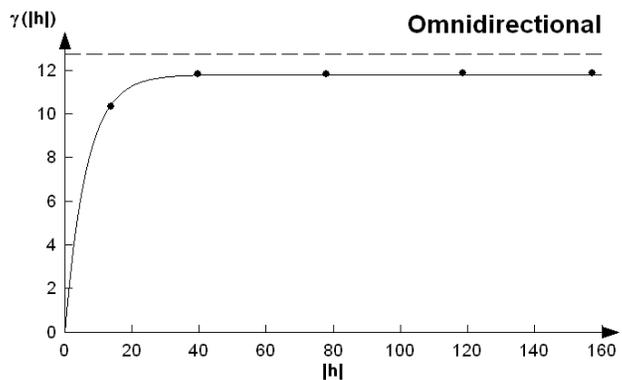
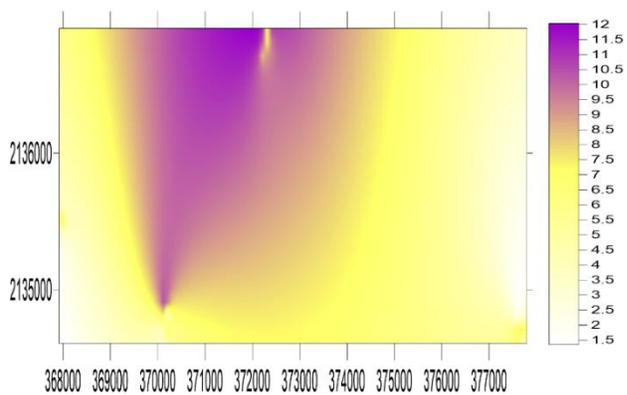
JUNIO 1



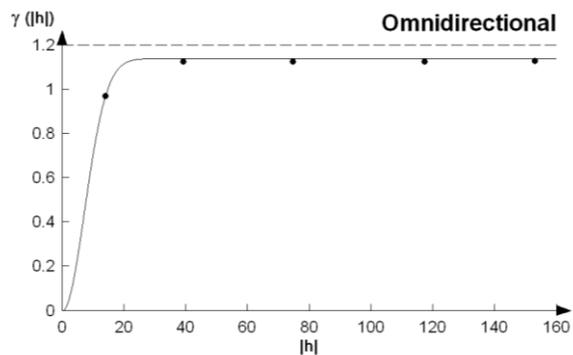
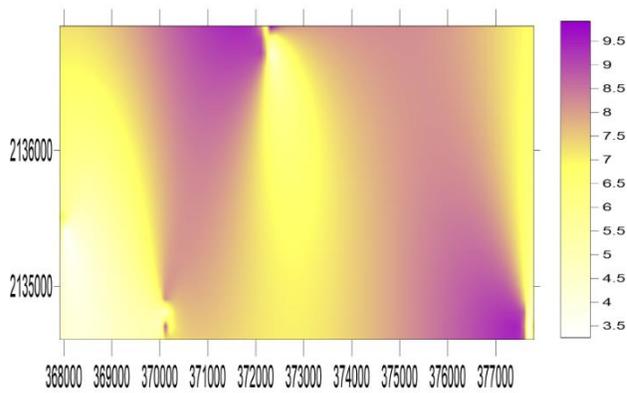
JUNIO 2



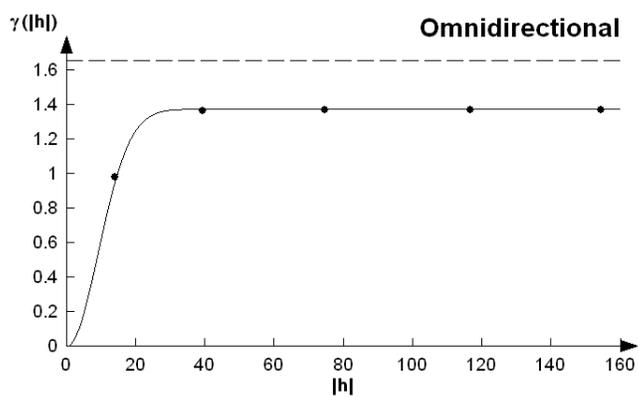
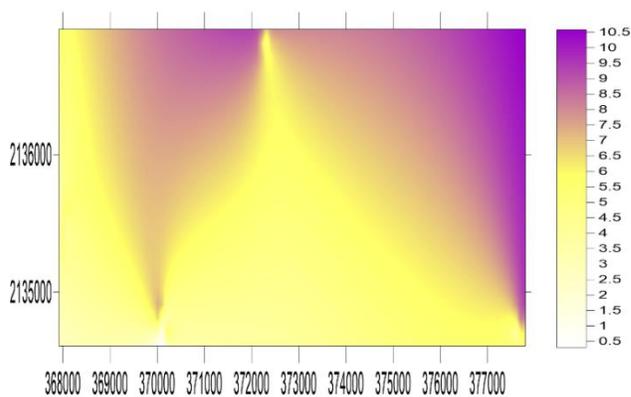
JULIO 1



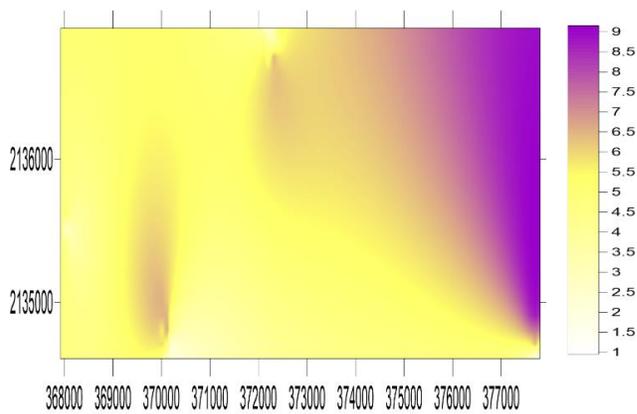
JULIO 2



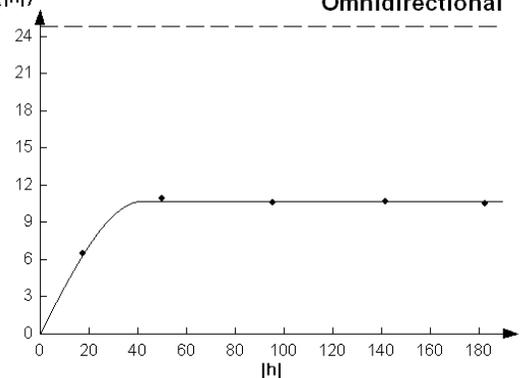
AGOSTO 1



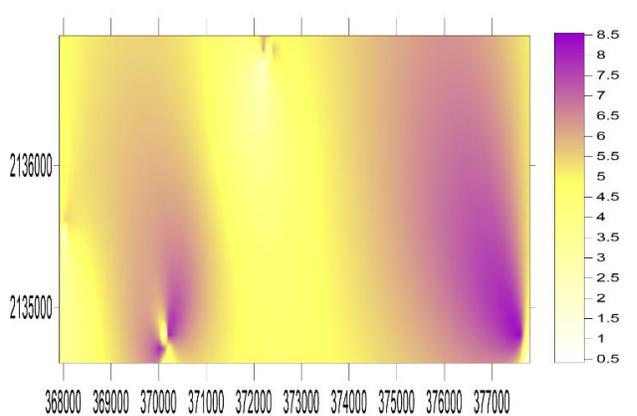
AGOSTO 2



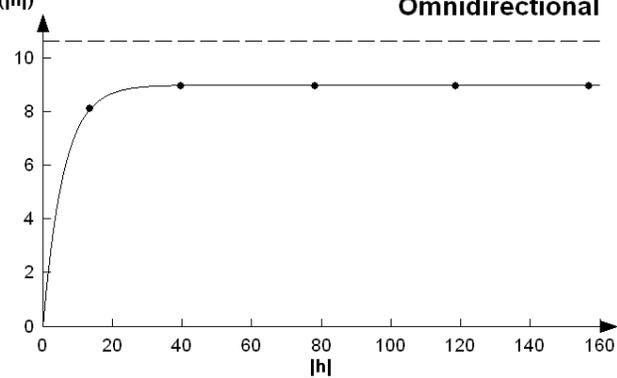
$\gamma(h)$ Omnidireccional



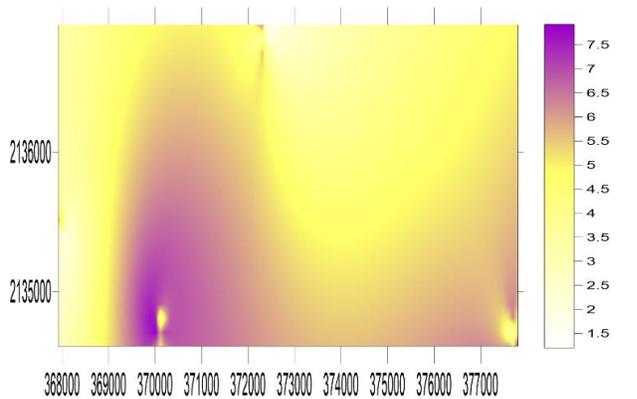
SEPTIEMBRE 1



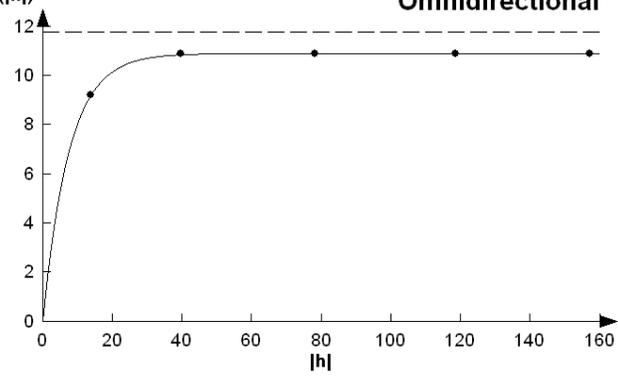
$\gamma(h)$ Omnidireccional



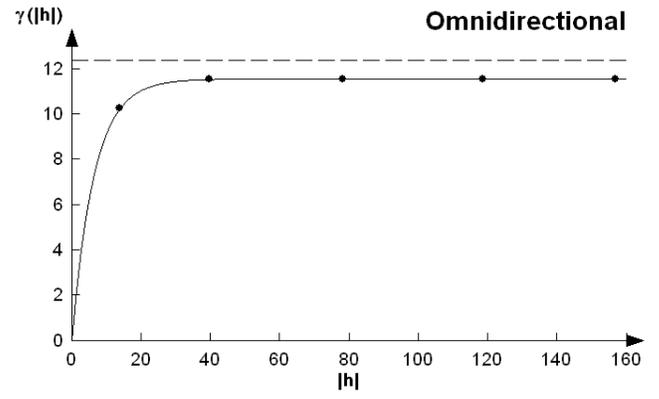
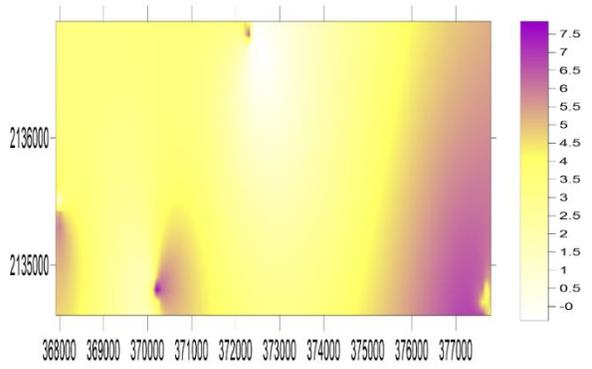
SEPTIEMBRE 2



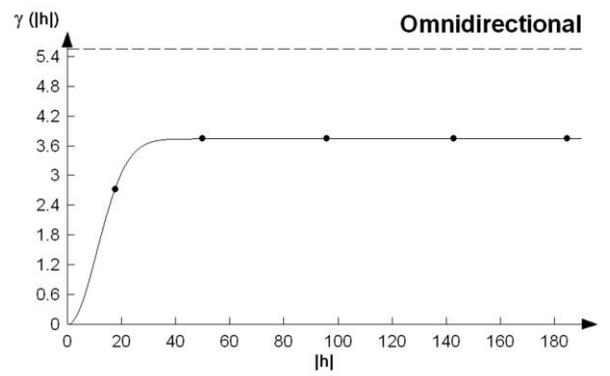
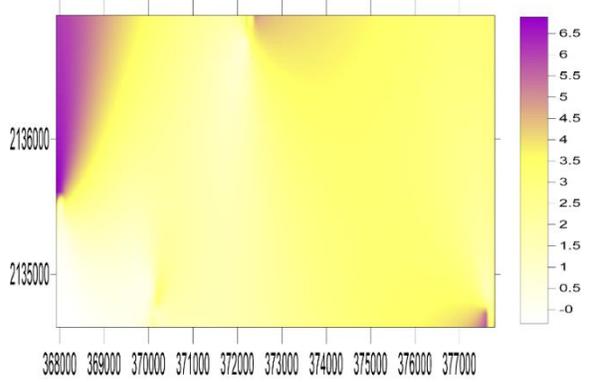
$\gamma(h)$ Omnidireccional



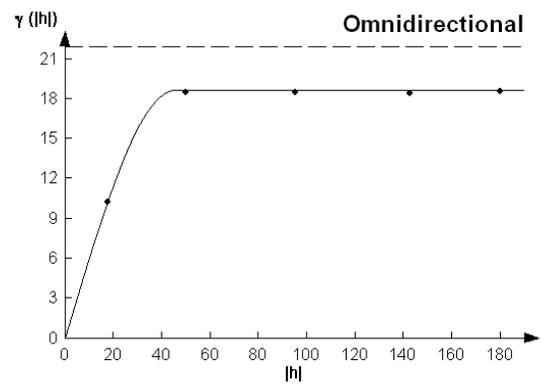
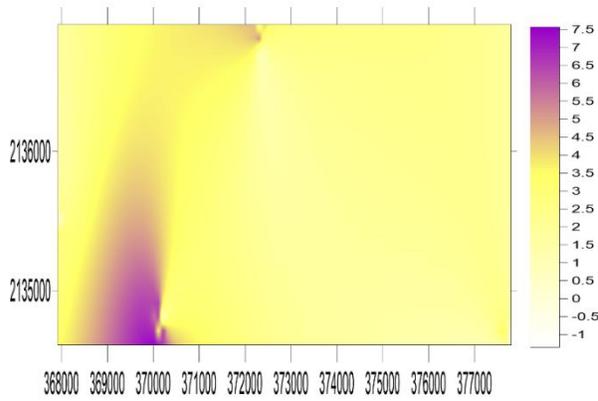
OCTUBRE 1



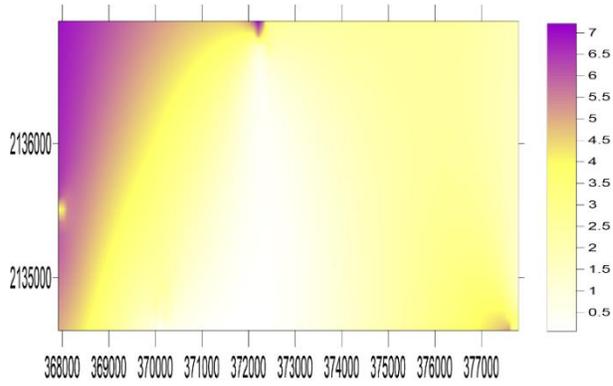
OCTUBRE 2



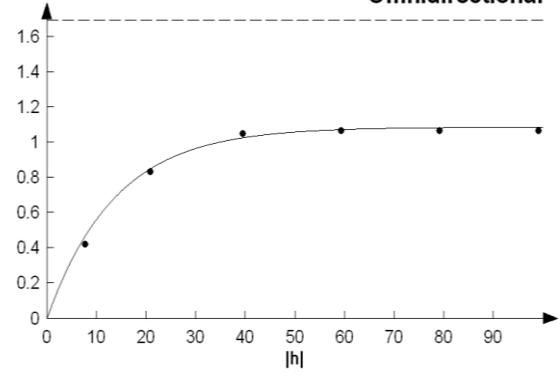
NOVIEMBRE 1



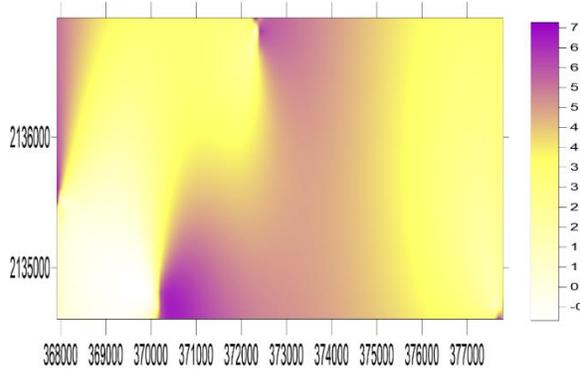
NOVIEMBRE 2



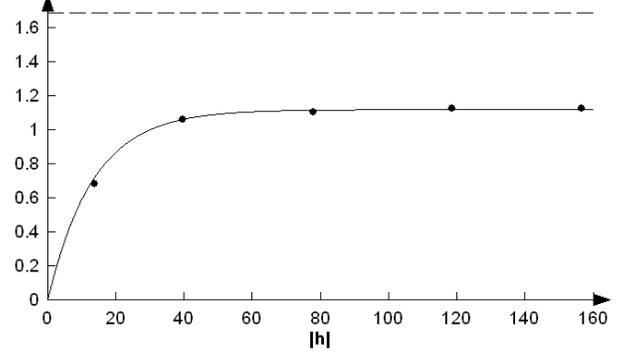
$\gamma(|h|)$ Omnidireccional



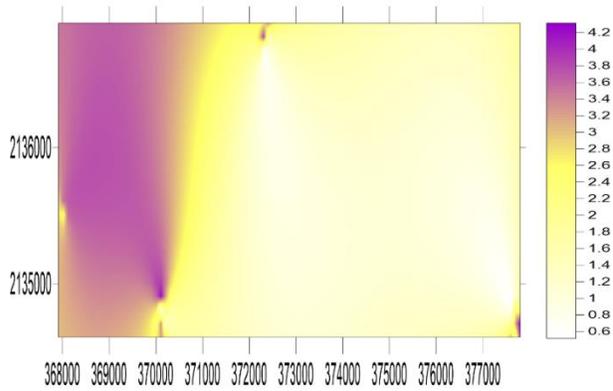
DICIEMBRE 1



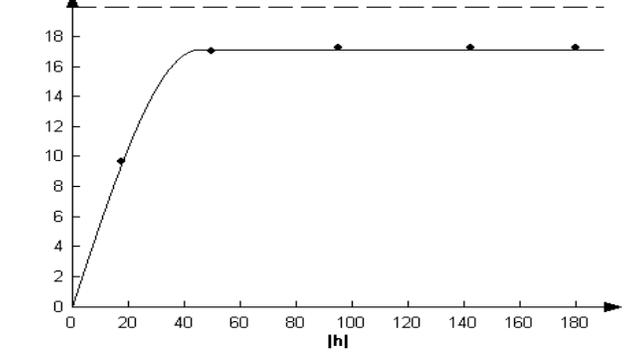
$\gamma(|h|)$ Omnidireccional



DICIEMBRE 2



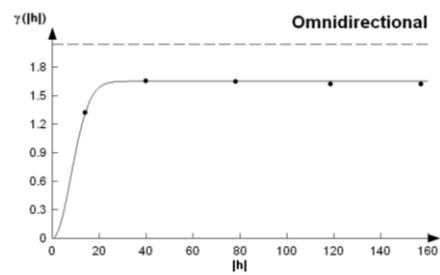
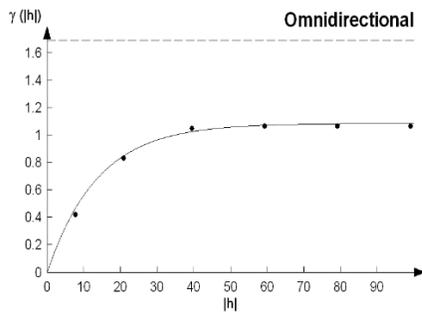
$\gamma(|h|)$ Omnidireccional



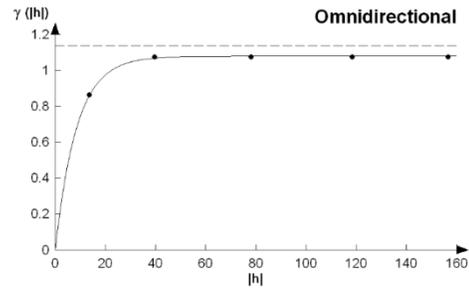
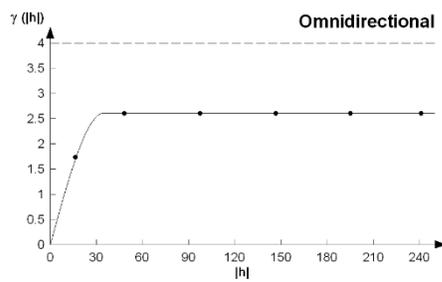
Anexo 2. Análisis Geoestadístico

Semivariogramas y mapas de Antracnosis en aguacate en Coatepec Harinas de enero a diciembre 2021.

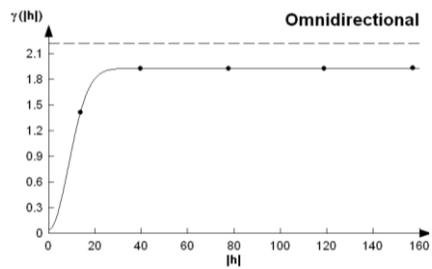
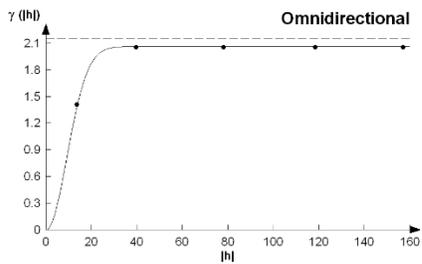
ENERO



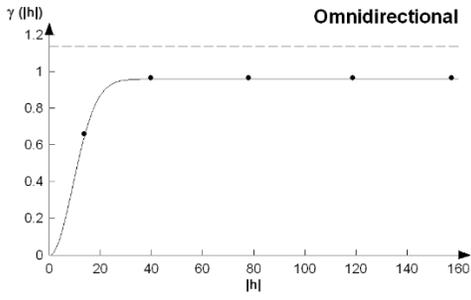
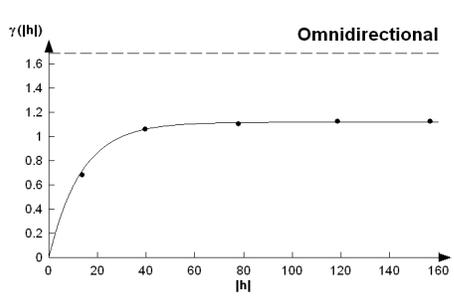
FEBRERO



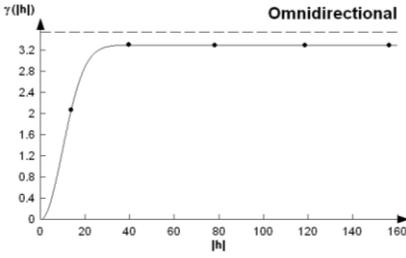
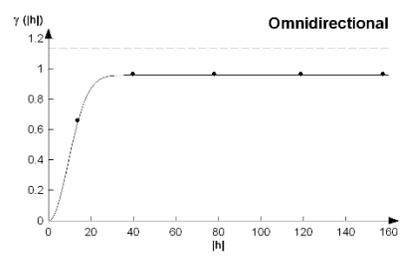
MARZO



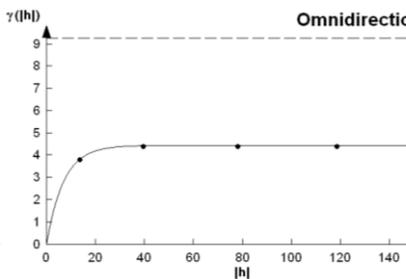
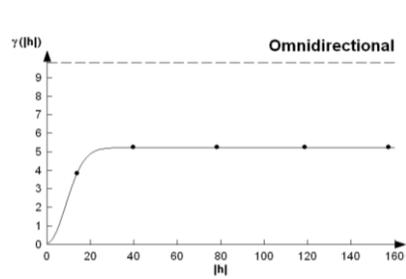
ABRIL



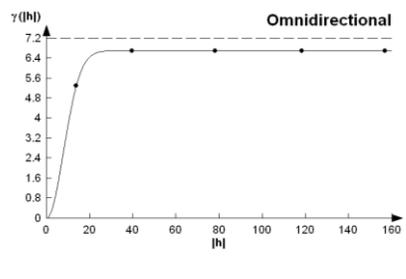
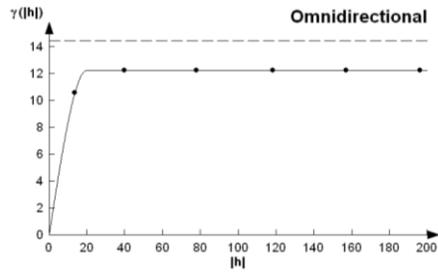
MAYO



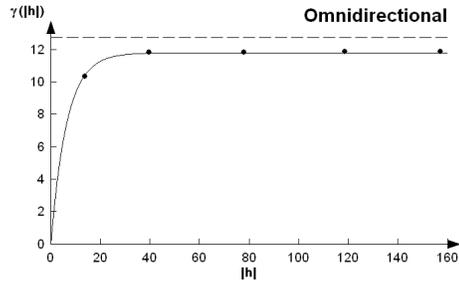
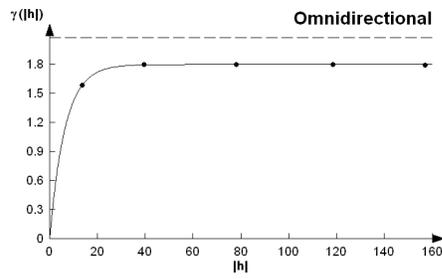
JUNIO



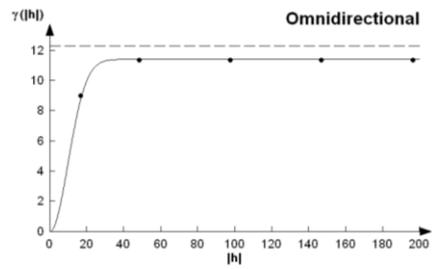
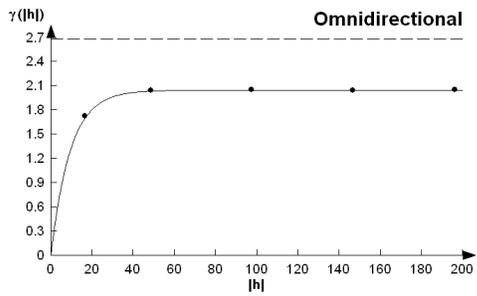
JULIO



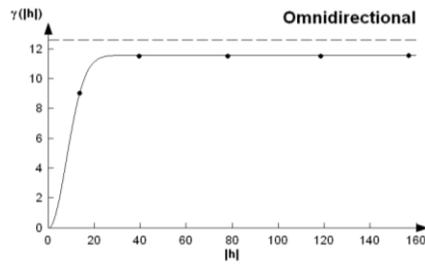
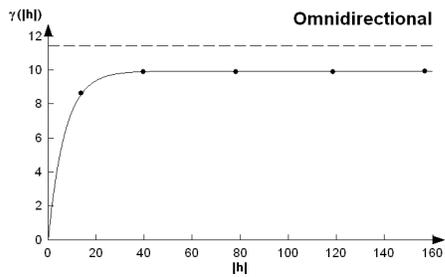
AGOSTO



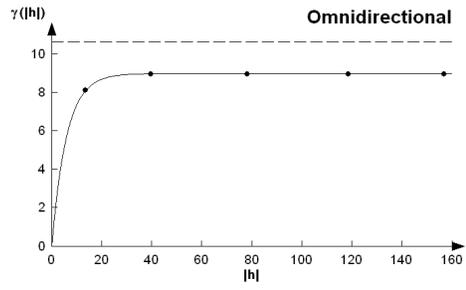
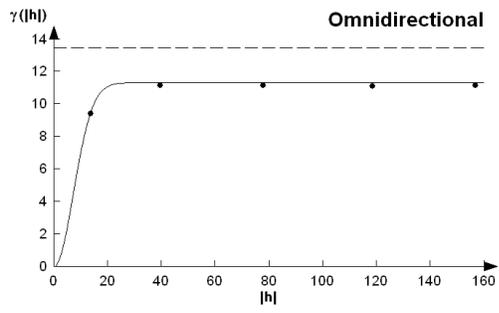
SEPTIEMBRE



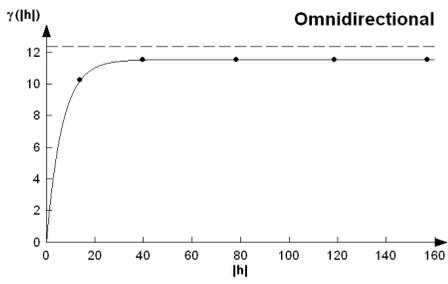
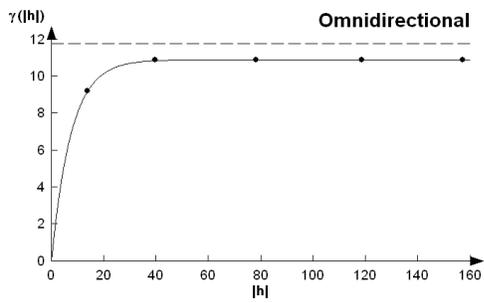
OCTUBRE



NOVIEMBRE



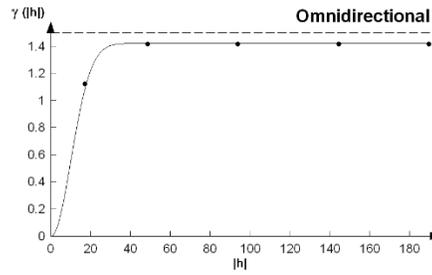
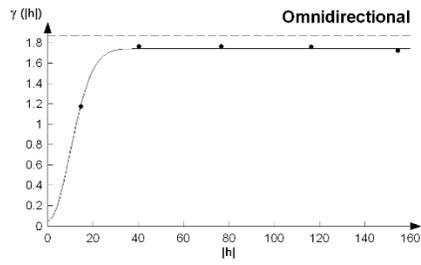
DICIEMBRE



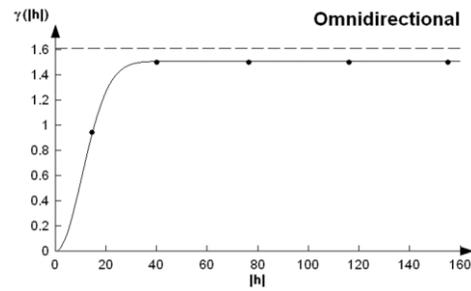
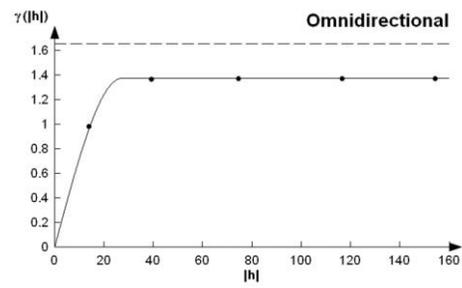
TENANCINGO

Semivariogramas y mapas de Antracnosis en aguacate en Tenancingo de enero a diciembre 2021

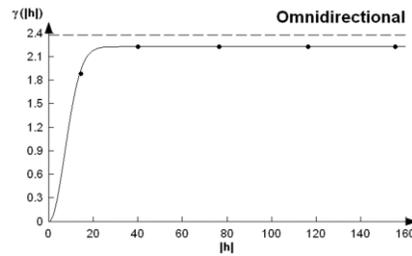
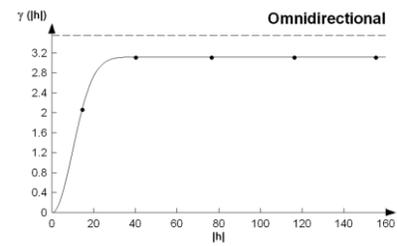
ENERO



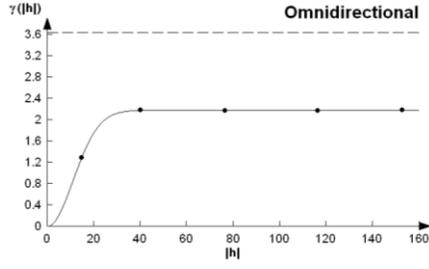
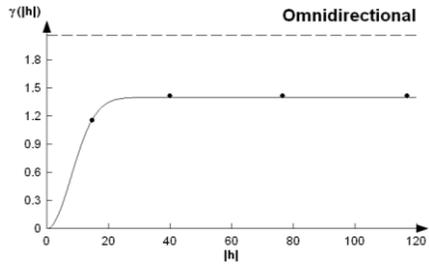
FEBRERO



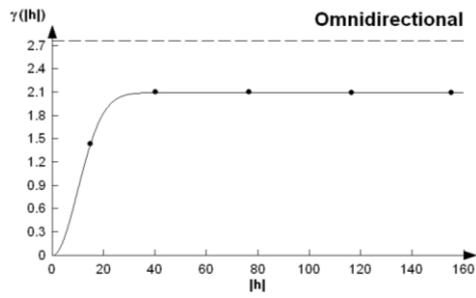
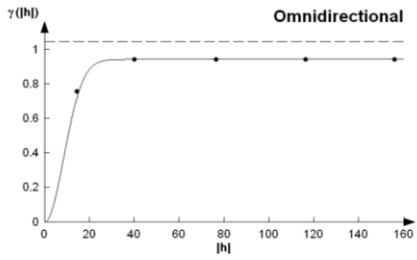
MARZO



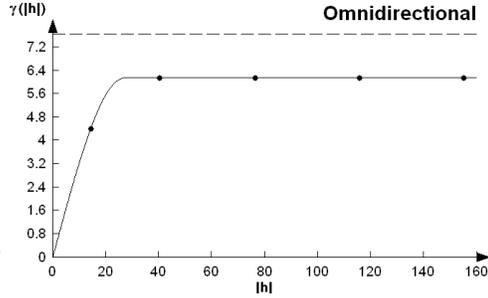
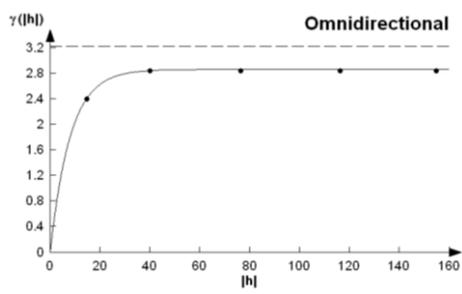
ABRIL



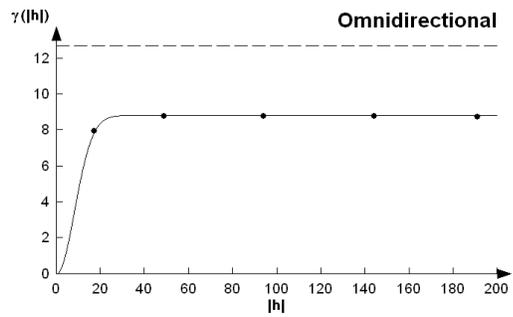
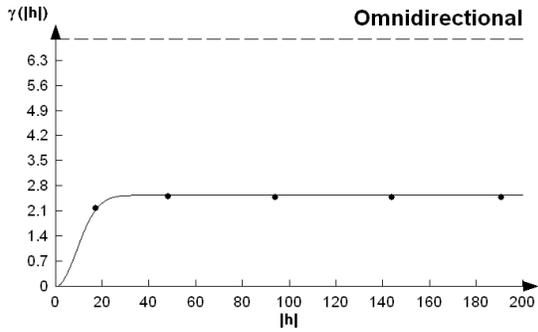
MAYO



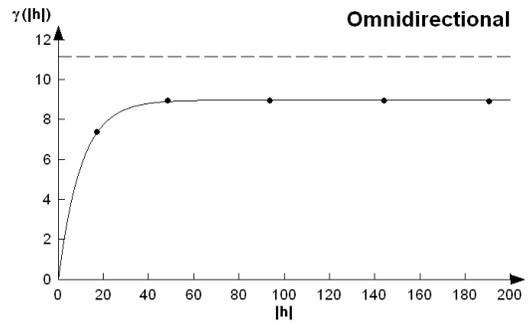
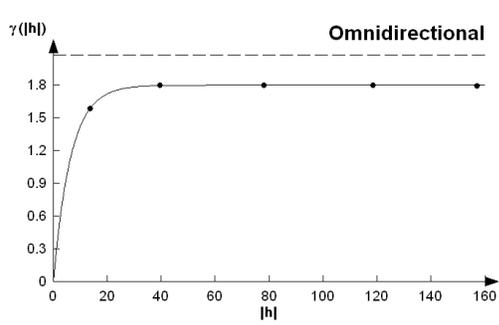
JUNIO



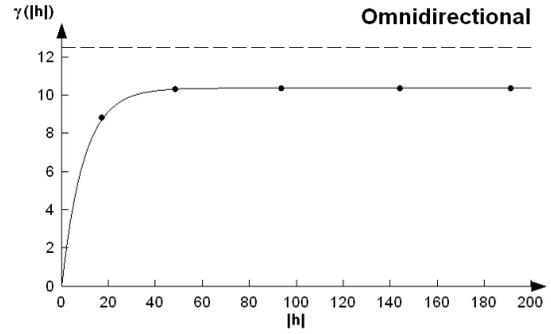
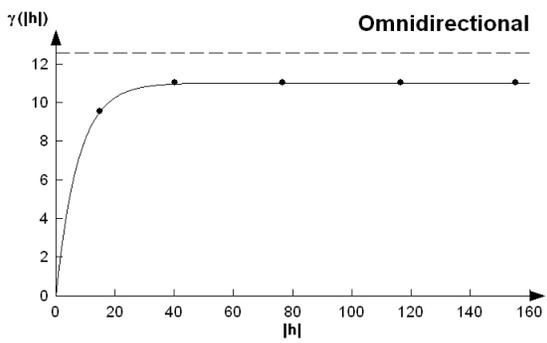
JULIO



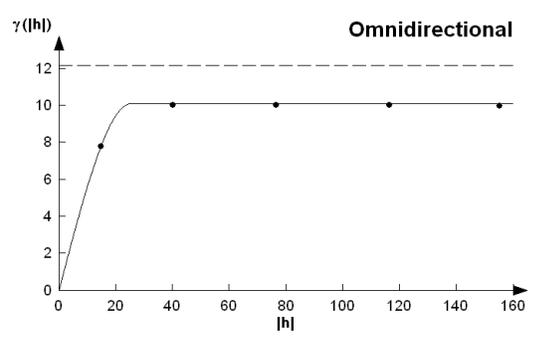
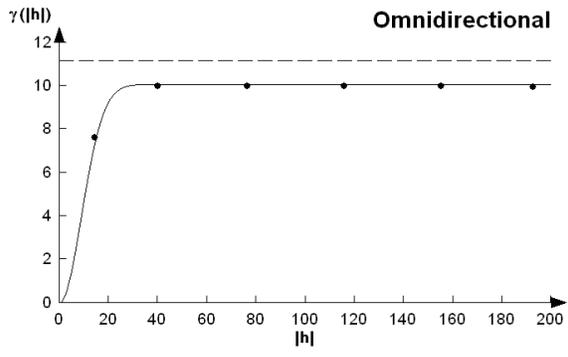
AGOSTO



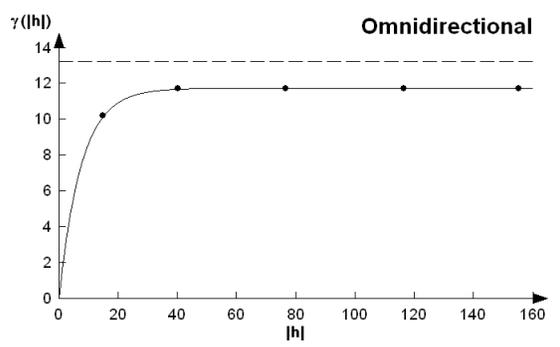
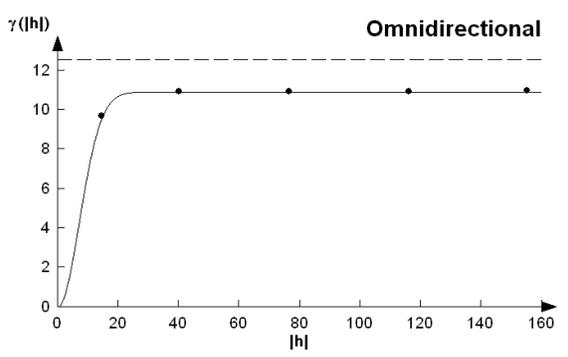
SEPTIEMBRE



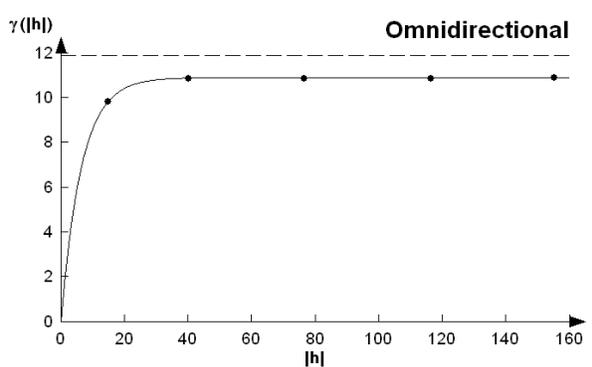
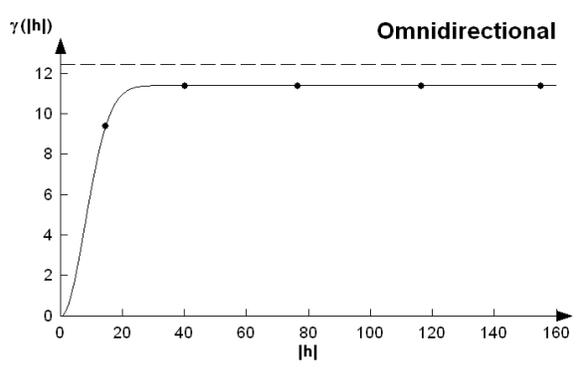
OCTUBRE



NOVIEMBRE



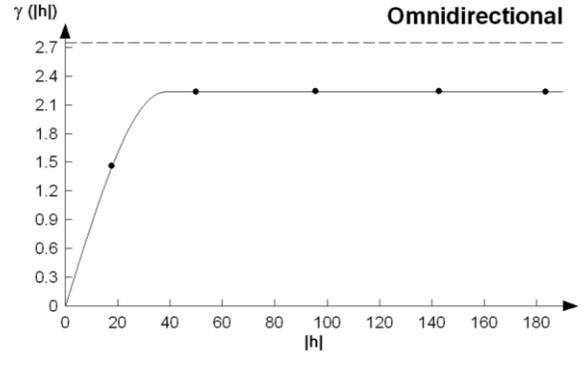
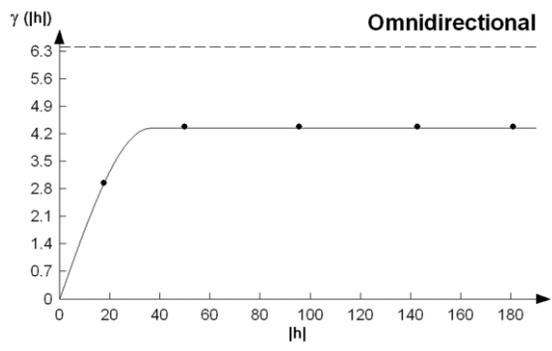
DICIEMBRE



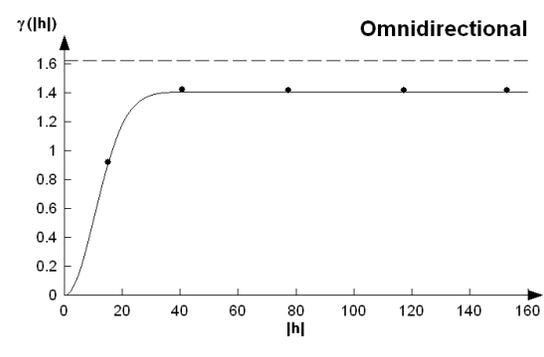
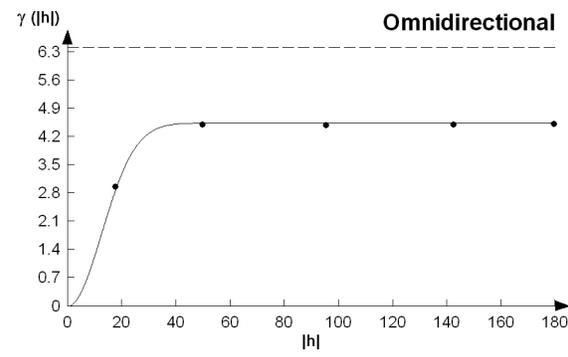
DONATO GUERRA

Semivariogramas y mapas de Antracnosis en aguacate en Donato Guerra de enero a diciembre 2021.

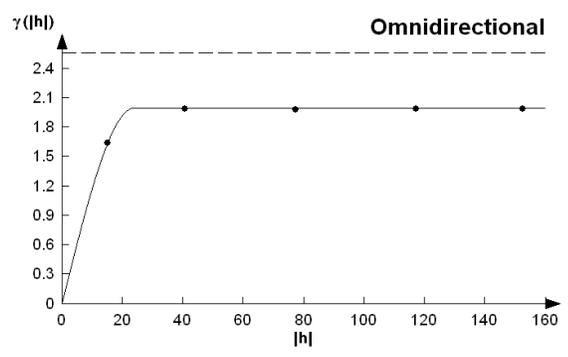
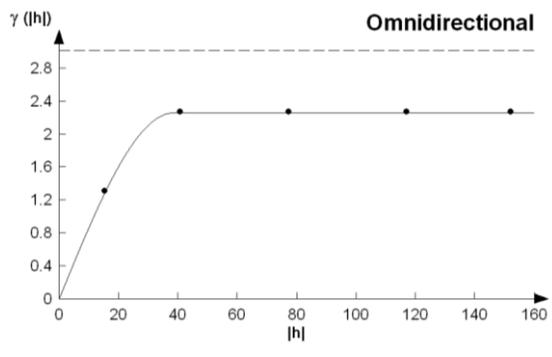
ENERO



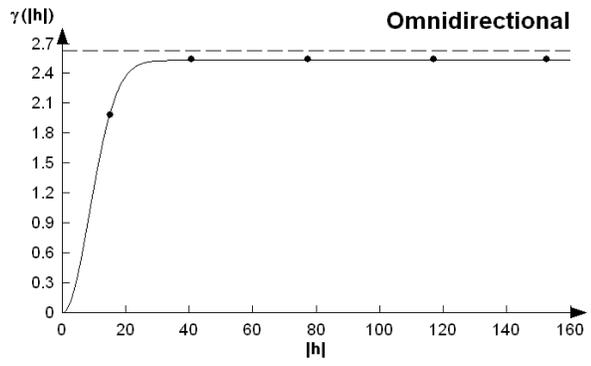
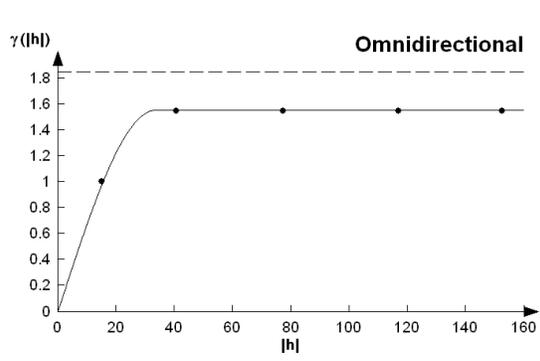
FEBRERO



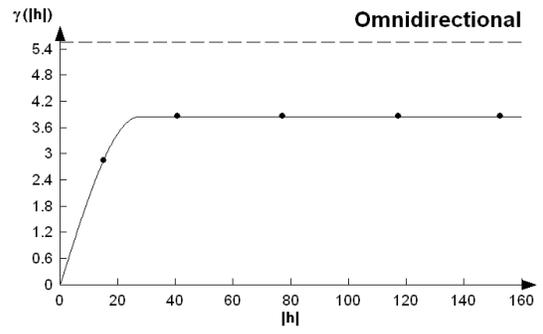
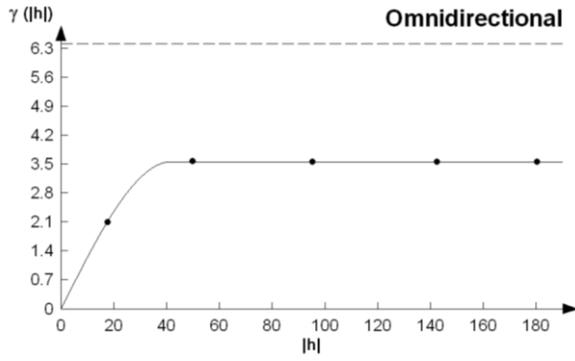
MARZO



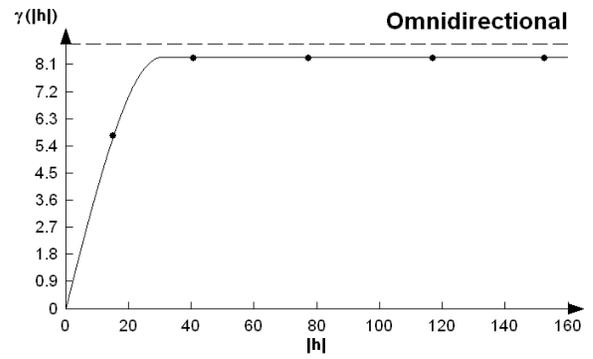
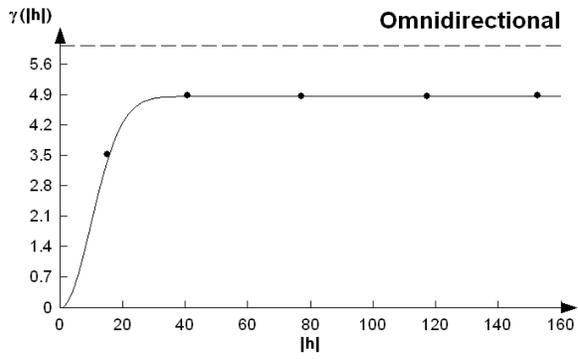
ABRIL



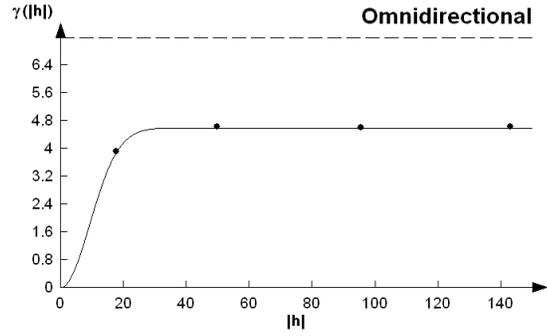
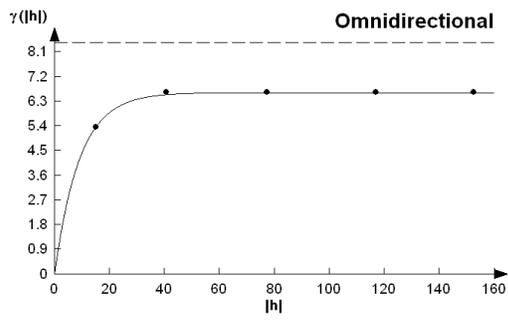
MAYO



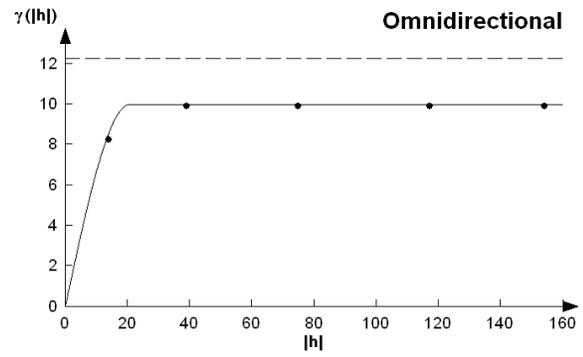
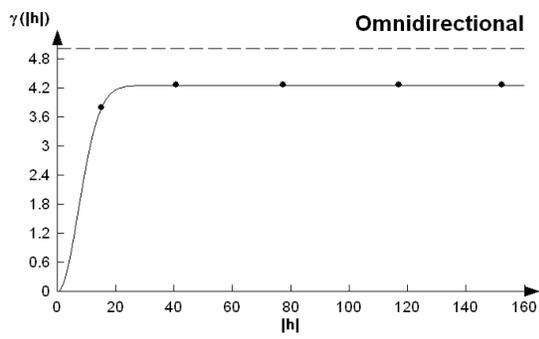
JUNIO



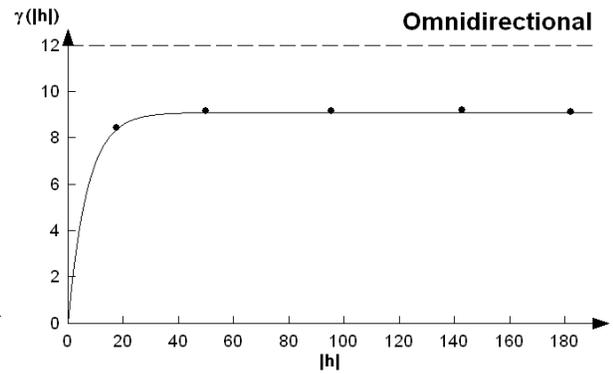
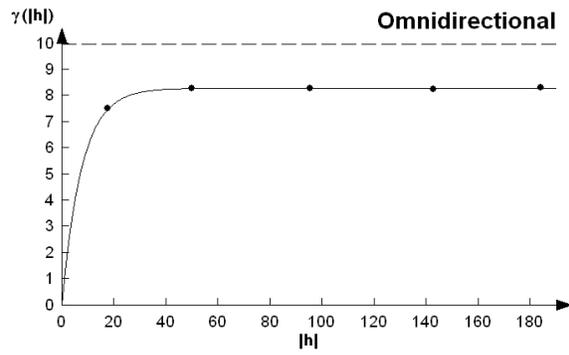
JULIO



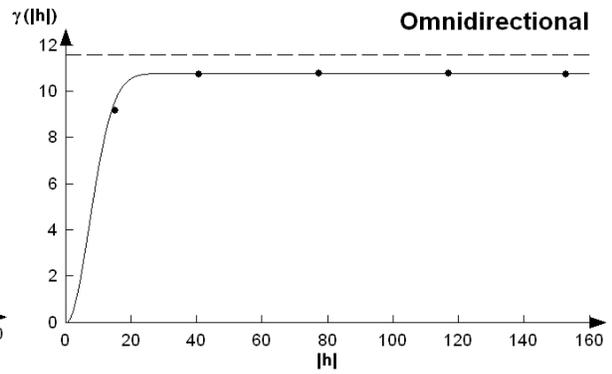
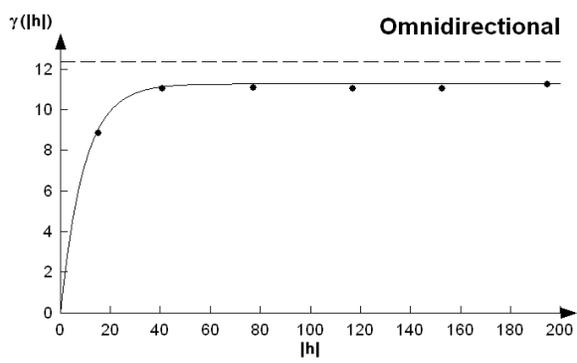
AGOSTO



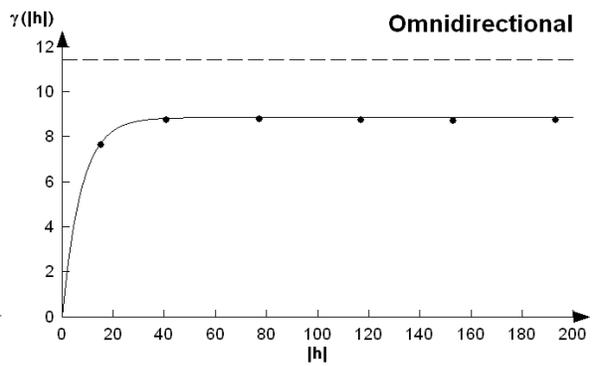
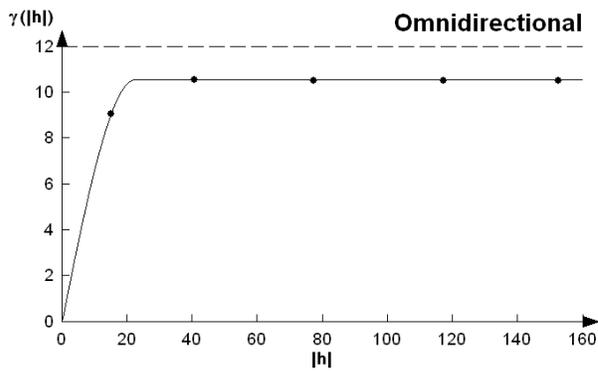
SEPTIEMBRE



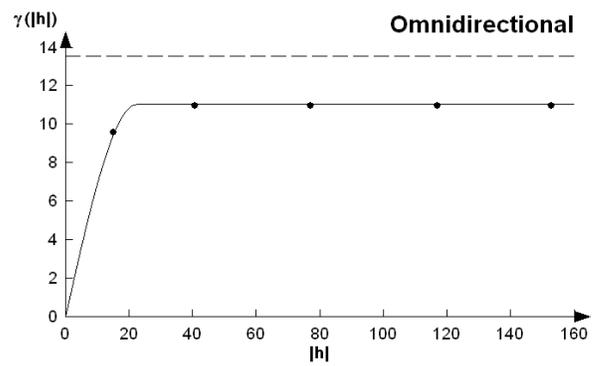
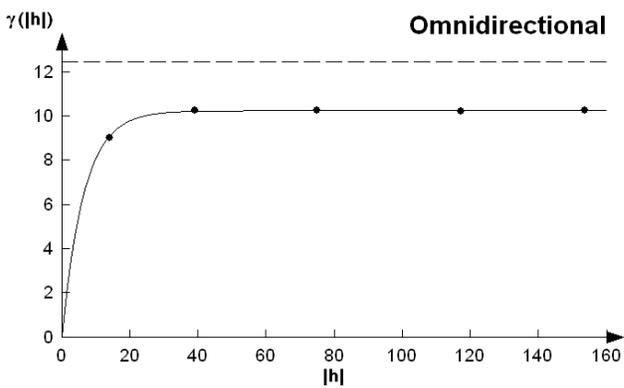
OCTUBRE



NOVIEMBRE



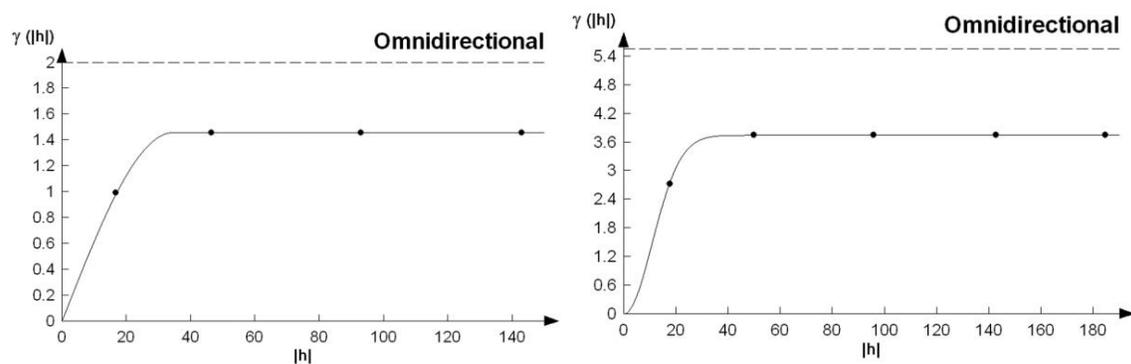
DICIEMBRE



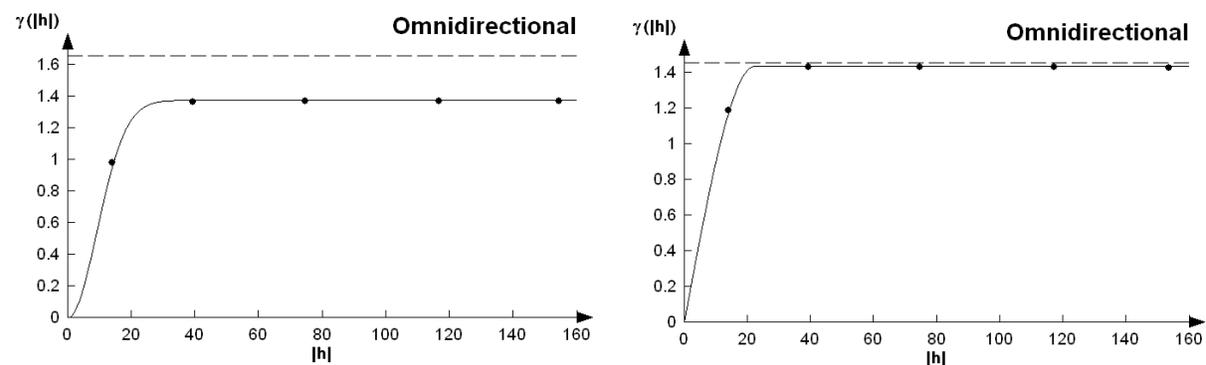
TEMASCALTEPEC

Semivariogramas y mapas de Antracnosis en aguacate en Temascaltepec de enero a diciembre 2021.

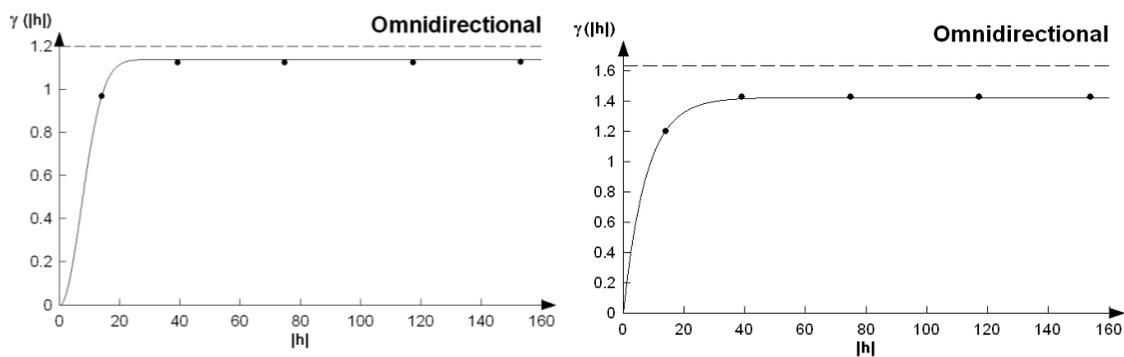
ENERO



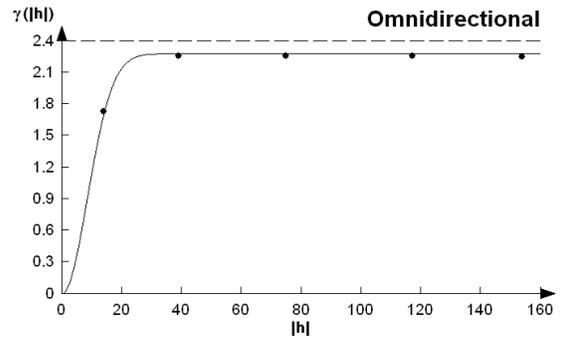
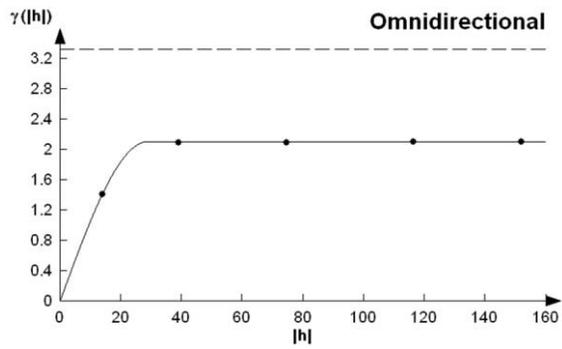
FEBRERO



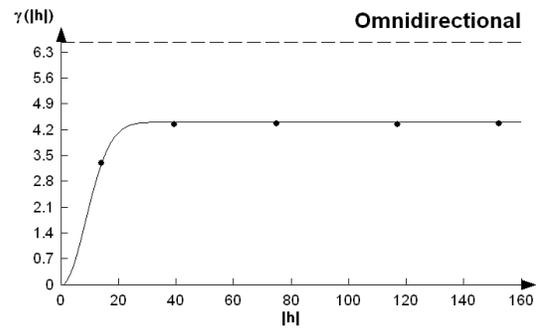
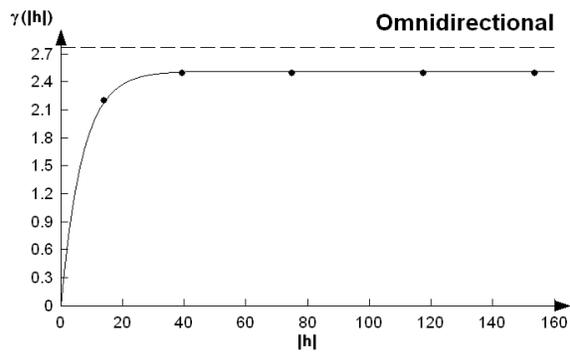
MARZO



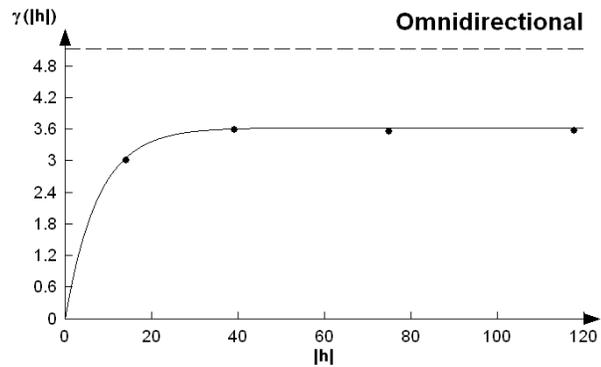
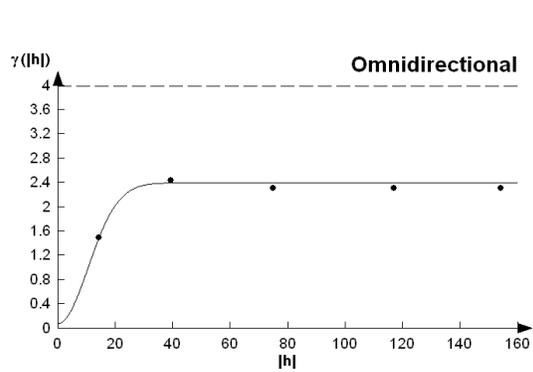
ABRIL



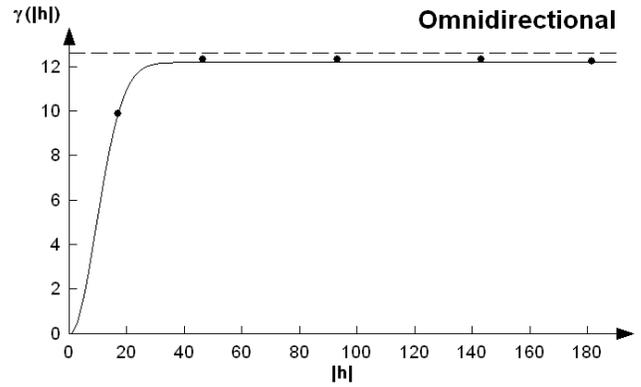
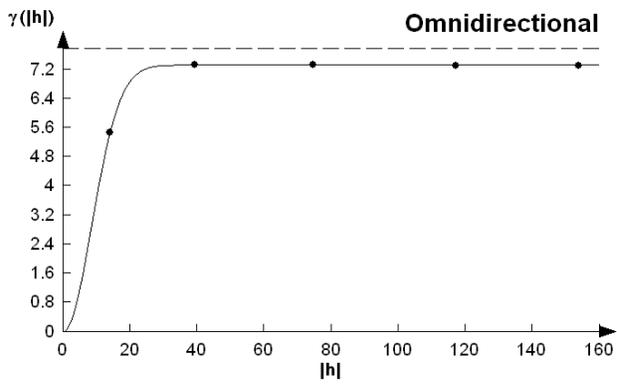
MAYO



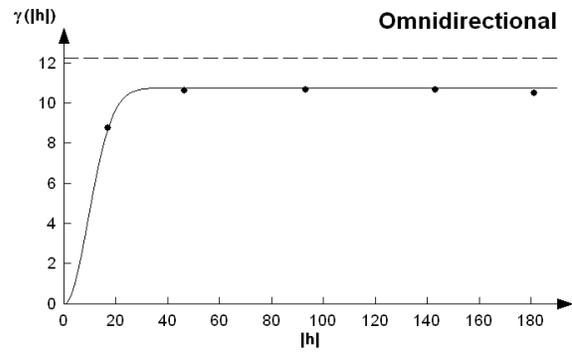
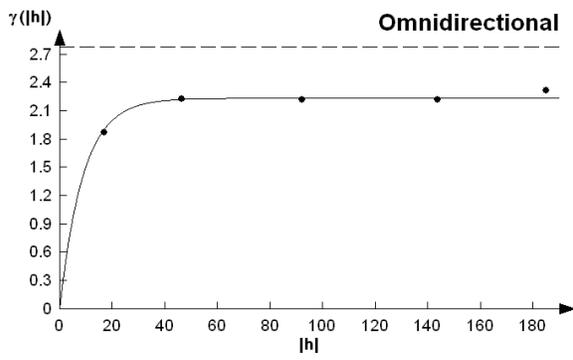
JUNIO



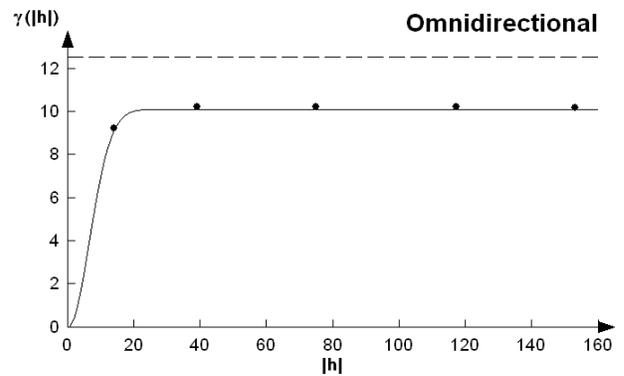
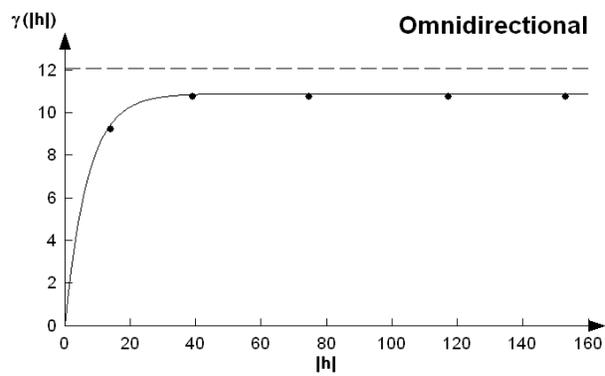
JULIO



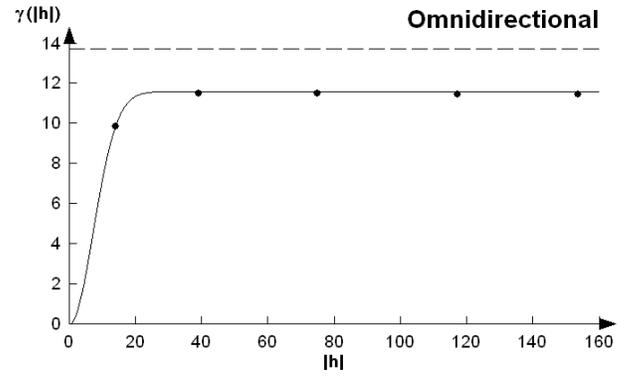
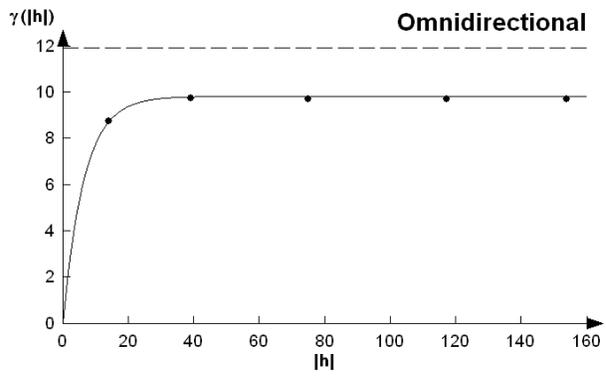
AGOSTO



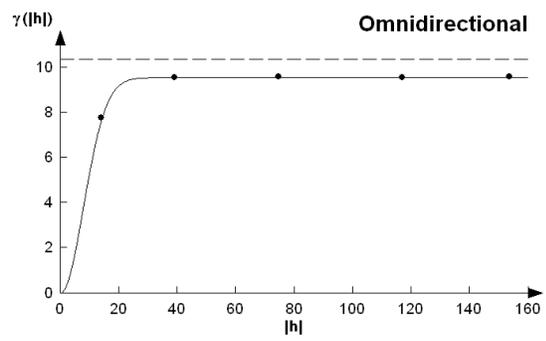
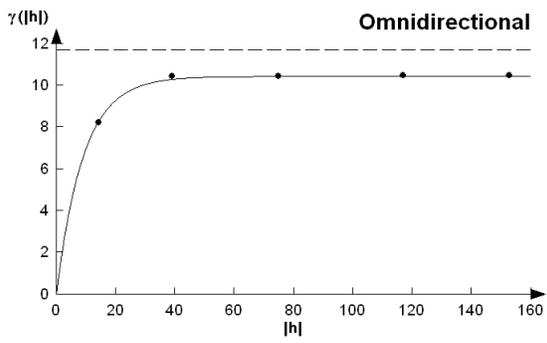
SEPTIEMBRE



OCTUBRE



NOVIEMBRE



DICIEMBRE

