



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**



FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**INCIDENCIA DE ANTRACNOSIS EN EL CULTIVO DE AGUACATE USANDO
TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS, EN TENANCINGO, ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA FITOTECNISTA**

PRESENTA

CLAUDIA TRUJILLO AGUILAR

GENERACIÓN: 47, No DE CUENTA:1922979

ASESORES

DR. JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ DÁVILA

M. en CARN. ALFREDO RUIZ ORTA

El Cerrillo Piedras Blancas, 8 de abril 2025

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
III. HIPÓTESIS	7
IV. JUSTIFICACIÓN.....	7
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
5.1 Origen del cultivo de aguacate (<i>Persea americana</i>)	8
5.2 Características botánicas del aguacate (<i>Persea americana</i>).....	8
5.3 Clasificación taxonómica.....	9
5.4 Antracnosis (<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>).....	10
5.5 Clasificación taxonómica.....	10
5.6 Sintomatología del diagnóstico.....	11
5.7 Epidemiología	11
5.8 Ciclo de vida del patógeno	12
5.9 Control cultural	12
5.10 Control químico	13
5.11 Control biológico	14
5.13 Importancia económica de la antracnosis.....	15
5.14 Técnicas geoestadísticas.....	15

VI. MATERIALES Y MÉTODOS	17
6.1 Análisis geoestadístico	17
6.2 Nivel de dependencia espacial	18
6.3 Mapas de densidad y superficie infectada	18
VII. RESULTADOS Y DISCUSION	20
VIII. OTROS RESULTADOS	63
IX. CONCLUSIONES	83
X. BIBLIOGRAFIA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de enero, ajustado al modelo gaussiano.	21
Figura 2 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de enero, ajustado al modelo gaussiano.	21
Figura 3 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de febrero, ajustado al modelo gaussiano.	22
Figura 4 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de febrero, ajustado al modelo gaussiano.	22
Figura 5 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de marzo, ajustado al modelo gaussiano.	23
Figura 6 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de marzo, ajustado al modelo gaussiano.	23
Figura 7 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de abril, ajustado al modelo gaussiano.....	24
Figura 8 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de abril, ajustado al modelo gaussiano.	24

Figura 9 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de mayo, ajustado al modelo gaussiano.	25
Figura 10 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de mayo, ajustado al modelo gaussiano.	25
Figura 11 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de junio, ajustado al modelo gaussiano.	26
Figura 12 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de junio, ajustado al modelo gaussiano.	26
Figura 13 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de julio, ajustado al modelo gaussiano.	27
Figura 14 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de julio, ajustado al modelo gaussiano.	27
Figura 15 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de agosto, ajustado al modelo gaussiano.	28
Figura 16 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de agosto, ajustado al modelo gaussiano.	28
Figura 17 Semivariograma correspondiente a la primeraa quincena de septiembre, ajustado al modelo gaussiano.	29
Figura 18 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de septiembre, ajustado al modelo gaussiano.	29
Figura 19 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de octubre, ajustado al modelo gaussiano.	30
Figura 20 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de octubre, ajustado al modelo gaussiano.	30
Figura 21 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de noviembre, ajustado al modelo gaussiano.	31
Figura 22 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de noviembre, ajustado al modelo gaussiano.	31
Figura 23 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de diciembre, ajustado al modelo gaussiano.	32

Figura 24 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de diciembre, ajustado al modelo gaussiano.	32
Figura 25 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de enero de 2023.....	34
Figura 26 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de enero de 2023	35
Figura 27 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de febrero de 2023.....	36
Figura 28 mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de febrero de 2023	37
Figura 29 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de marzo de 2023	38
Figura 30 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de marzo de 2023.....	39
Figura 31 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de abril de 2023	40
Figura 32 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de abril de 2023.....	41
Figura 33 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de mayo de 2023	42
Figura 34 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de mayo de 2023.....	44
Figura 35 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de junio de 2023	45
Figura 36 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de junio de 2023.....	46
Figura 37 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de julio de 2023.....	47
Figura 38 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de julio de 2023	48

Figura 39 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de agosto de 2023	49
Figura 40 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de agosto de 2023.....	50
Figura 41 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de septiembre de 2023	51
Figura 42 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de septiembre de 2023.....	52
Figura 43 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de octubre de 2023	53
Figura 44 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de octubre de 2023.....	54
Figura 45 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de noviembre de 2023	55
Figura 46 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de noviembre de 2023.....	56
Figura 47 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la primera quincena de diciembre de 2023.....	57
Figura 48 Mapa de incidencia de antracnosis (<i>colletotrichum gloeosporioides</i>) en la segunda quincena de diciembre de 2023.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros de los modelos ajustados a los semivariogramas de antracnosis (<i>Colletotrichum gloesporoides</i>) en aguacate.....	60
Tabla 2 Porcentaje de superficie infectada y no infectada por antracnosis (<i>Colletotrichum gloesporoides</i>) en aguacate.....	62

RESUMEN

INCIDENCIA DE ANTRACNOSIS EN EL CULTIVO DE AGUACATE USANDO TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS, EN TENANCINGO, ESTADO DE MÉXICO

Claudia Trujillo Aguilar. Carrera de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Toluca, Estado de México, México.

Directores de tesis: DR. José Francisco Ramírez Dávila; M. en CARN. Alfredo Ruiz Orta.

El cultivo de aguacate en México ha crecido significativamente gracias a condiciones meteorológicas favorables, lo que ha posicionado al Estado de México como el tercer productor nacional en 2022. Sin embargo, la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) representa una amenaza grave, ya que puede causar pérdidas económicas de hasta un 40 % y afectar hasta el 80 % de la cosecha en postcosecha. Este hongo prospera en ambientes cálidos y húmedos, propagándose a través de semillas infectadas y factores ambientales. Sus síntomas incluyen manchas hundidas en hojas, tallos y frutos, provocando marchitez y necrosis que afectan la calidad y producción del cultivo.

El uso de herramientas como la geoestadística y la agricultura de precisión ha permitido analizar y modelar la distribución espacial de la enfermedad, facilitando la toma de decisiones para su control. La presente investigación tiene como objetivo mapear la incidencia de antracnosis en aguacate en Tenancingo, Estado de México, y determinar el porcentaje de superficie infectada. Se espera que la aplicación de técnicas geoestadísticas ayude a identificar áreas críticas y mejorar las estrategias de manejo, optimizando el uso de recursos y reduciendo los impactos ambientales.

Para el control de la enfermedad existen diversas estrategias, incluyendo métodos culturales, biológicos y químicos. Alternativas innovadoras como los recubrimientos con alginato de sodio y el uso de levaduras antagonistas han demostrado ser

eficaces en la mitigación del impacto en la poscosecha. Aunque el control químico sigue siendo una opción viable, su aplicación debe complementarse con prácticas culturales que minimicen la resistencia del hongo y reduzcan los efectos adversos en el ambiente.

Durante la investigación se registró la presencia de antracnosis en árboles de aguacate Hass en Tenancingo mediante 24 muestreos quincenales. A partir de los datos obtenidos se generaron semivariogramas experimentales ajustados a un modelo gaussiano, lo que evidenció una alta dependencia espacial y una tendencia de expansión del patógeno. Mediante la técnica de krigado ordinario se elaboraron mapas de incidencia de *Colletotrichum gloeosporioides*, observándose variaciones en la distribución y severidad de la enfermedad a lo largo del tiempo.

Los resultados indicaron que la incidencia del patógeno estuvo influenciada por la temperatura, presentándose mayores focos de infección en zonas específicas del área de estudio. Conforme avanzaron los meses se identificó un patrón de expansión y contracción de la enfermedad, con momentos de alta propagación en condiciones favorables. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar medidas de control dirigidas que permitan mitigar la diseminación del hongo y reducir su impacto en la producción de aguacate.

Palabras clave: *Colletotrichum gloeosporioides*, dependencia espacial, gaussiano, krigado ordinario, semivariograma.

ABSTRACT

INCIDENCE OF ANTHRACNOSE IN AVOCADO CROP USING GEOSTATISTICAL TECHNIQUES IN TENANCINGO, STATE OF MEXICO

Claudia Trujillo Aguilar. Carrera de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Toluca, Estado de México, México.

Directores de tesis: DR. José Francisco Ramírez Dávila; M. en CARN. Alfredo Ruiz Orta.

Avocado cultivation in Mexico has grown significantly thanks to favorable weather conditions, which has positioned the State of Mexico as the third national producer in 2022. However, anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) represents a serious threat, as it can cause economic losses of up to 40% and affect up to 80% of the post-harvest crop. This fungus thrives in warm and humid environments, spreading through infected seeds and environmental factors. Its symptoms include sunken spots on leaves, stems, and fruits, causing wilting and necrosis that affect crop quality and production.

The use of tools such as geostatistics and precision agriculture has allowed us to analyze and model the spatial distribution of the disease, facilitating decision-making for its control. The present research aims to map the incidence of anthracnose in avocado in Tenancingo, State of Mexico, and determine the percentage of infected surface. It is expected that the application of geostatistical techniques will help identify critical areas and improve management strategies, optimizing the use of resources and reducing environmental impacts.

There are several strategies for controlling the disease, including cultural, biological and chemical methods. Innovative alternatives such as sodium alginate coatings and the use of antagonistic yeasts have proven effective in mitigating the impact during post-harvest. Although chemical control remains a viable option, its application must be complemented with cultural practices that minimize the resistance of the fungus

and reduce the adverse effects on the environment. During the investigation, the presence of anthracnose in Hass avocado trees in Tenancingo was recorded through 24 biweekly samplings. From the data obtained, experimental semivariograms were generated adjusted to a Gaussian model, which showed a high spatial dependence and a tendency for the pathogen to expand. Using the ordinary kriging technique, maps of the incidence of *Colletotrichum gloeosporioides* were created, observing variations in the distribution and severity of the disease over time.

The results indicated that the incidence of the pathogen was influenced by temperature, with greater foci of infection occurring in specific areas of the study area. As the months progressed, a pattern of expansion and contraction of the disease was identified, with moments of high spread under favorable conditions. These findings highlight the importance of implementing targeted control measures that mitigate the spread of the fungus and reduce its impact on avocado production.

Index words: *Colletotrichum gloeosporioides*, gaussian, ordinary kriging, semiovariogram, spatial dependence.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de aguacate en México se beneficia por sus condiciones meteorológicas, lo que ha impulsado al sector agrícola y ha permitido al país aumentar su participación en el mercado mundial de manera significativa (FAO, 2020). En 2022 el crecimiento de la producción por hectárea (ha) ha posicionado al Estado de México como el tercer productor nacional de aguacate, con una obtención de 128 mil toneladas (t) (SIAP, 2023).

La antracnosis (*Colletotrichum gloeosporoides*), es una de las enfermedades más devastadoras que afectan el cultivo de aguacate, especialmente durante el almacenamiento y la comercialización, generando pérdidas económicas de hasta un 40 % (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2021). En la etapa de poscosecha el patógeno puede afectar entre el 20 % y el 80 % de la cosecha, deteriorando la calidad del fruto (Herrera-González *et al.*, 2024).

C. gloeosporoides se establece en la planta y comienza a presentar síntomas que se caracterizan por manchas hundidas de varios colores en hojas, tallo y frutos, estas a menudo aumentan de tamaño provocando que los tejidos infectados se marchiten y posteriormente mueran (De Silva *et al.*, 2017).

El hongo prospera en condiciones húmedas y cálidas, lo que facilita su propagación a través de semillas infectadas, la salpicadura de lluvias y vientos húmedos, mientras que la germinación y la infección ocurren en temperaturas moderadas, entre 25 y 30°C (Sharma y Kulshrestha, 2015; Guédez *et al.*, 2015).

La Agricultura de Precisión emplea tecnologías avanzadas como sistema de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) y estadística espacial para gestionar parcelas agrícolas de manera más eficiente; ya que la geoestadística permite analizar y modelar con precisión la variabilidad espacial del suelo y de los cultivos; al mapear detalladamente estas variaciones, se optimiza el uso de recursos y se mejora la toma de decisiones, lo que incrementa

significativamente la productividad y sostenibilidad de las prácticas agrícolas (Di Leo, 2015).

Existen investigaciones, que se centran en comprender cómo se manifiesta la enfermedad de la antracnosis en el cultivo de aguacate, así como en café y agave para diferentes problemas fitosanitarios, implementando técnicas de análisis geoestadístico que les permitieron explorar la propagación de enfermedades. Gracias al uso de técnicas de geoestadística, se crearon mapas detallados que muestran no solo la densidad y la superficie infectada, sino también una visión más precisa de la distribución del patógeno en las zonas estudiadas, permitiendo un análisis exhaustivo de la variabilidad espacial y mejorando la comprensión de los patrones de distribución, lo que facilita la identificación de áreas críticas (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020; Ruiz-Orta *et al.*, 2023; González-Dávila *et al.*, 2024).

Por lo anterior el objetivo de esta investigación es determinar la distribución espacial de la incidencia de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en el cultivo de aguacate en Tenancingo, Estado de México, con la finalidad de ofrecer a los productores de la zona una toma de decisiones más oportuna, eficaz y específica para la gestión y control sustentable de dicha enfermedad.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general.

- Determinar la distribución espacial de la incidencia de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en el cultivo de aguacate en Tenancingo, Estado de México.

2.2. Objetivos específicos.

- Elaborar mapas de incidencia de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en el cultivo de aguacate en parcelas comerciales en el Estado de México.
- Determinar el porcentaje de superficie infectada por daño de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en el cultivo de aguacate en parcelas comerciales en Tenancingo, Estado de México.

III. HIPÓTESIS

La antracnosis, provocada por *Colletotrichum gloeosporioides*, en el cultivo de aguacate en Tenancingo, al aplicar técnicas geoestadísticas se podrá determinar el patrón de distribución espacial en las áreas más afectadas, lo cual ayudará a los agricultores a gestionar mejor el cultivo y a su vez mejorar su calidad de vida.

IV. JUSTIFICACIÓN

La antracnosis es una de las enfermedades más devastadoras, causando pérdidas en postcosecha entre 20 y 80% por el deterioro de la calidad del fruto de aguacate (Herrera-González et al.,2024). No solo disminuye la calidad, sino que también el rendimiento de la cosecha de los frutos, causando pérdidas económicas significativas de hasta un 40% para los agricultores (Tapia et al., 2021).

En este contexto, la aplicación de técnicas geoestadísticas ofrece una herramienta avanzada para comprender mejor la distribución espacial de plagas y enfermedades en los cultivos en tiempo real.

Al aplicar tratamientos solo a las áreas afectadas, se puede minimizar el impacto en la fauna benéfica y reducir la contaminación en los huertos de producción. Al emplear esta metodología para estudiar la distribución espacial de *Colletotrichum gloeosporioides*, de esta manera los productores pueden implementar medidas que son más eficaces en el control de dicha enfermedad. Al comprender el comportamiento del hongo, es posible dirigir los tratamientos solo a las zonas que superan el umbral económico, lo que permite evitar tratamientos en áreas no infestadas.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Origen del cultivo de aguacate (*Persea americana*)

El aguacate tiene su origen en las elevadas regiones del centro y este de México, así como en las altas áreas de Guatemala, fue en estos lugares donde comenzó su domesticación. Las pruebas más antiguas de su consumo, que datan de entre los años 8000 y 7000 a.C., se descubrieron en una cueva en Coxcatlán, en la región de Tehuacán, Puebla, México (Barrientos *et al.*, 2000).

5.2 Características botánicas del aguacate (*Persea americana*)

El árbol de aguacate puede llegar a medir hasta 20 metros de altura, sin embargo, cuando se cultiva con fines comerciales, se controla su crecimiento para que no supere los 5 metros (Pérez *et al.*, 2015).

Su sistema radicular se extiende entre 1 a 1.5 metros de profundidad, creciendo de manera horizontal. Su corteza es lisa y suave, con abundantes ramificaciones que son susceptibles a quemaduras por la exposición solar (Monzón *et al.*, 2019).

Las hojas del aguacate tienen pecíolos delgados que miden entre 2 y 6 cm de largo. Su forma varía de ovalada a elíptica, y suelen medir entre 10 y 30 cm de largo, con puntas agudas. La base de las hojas es desigual, algunas son agudas y otras redondeadas, con nervaduras pinnadas. La parte superior es de un verde oscuro y brillante, mientras que la parte inferior es más pálida y glauca. Pueden ser lisas o tener algunos pelos cortos dispersos, especialmente a lo largo de las nervaduras. Las flores del aguacate se agrupan en panículas densas de color grisáceo, ubicadas cerca de las puntas de las ramas. Estas panículas miden entre 6 y 20 cm de largo. Los pedicelos, que sostienen las flores, son delgados y miden entre 3 y 6 mm de largo (Chil *et al.*, 2019).

El fruto es una drupa con forma de pera y su color varía desde un verde claro hasta un verde oscuro, e incluso de violeta a negro. La cáscara es rugosa y en su interior se encuentra una pulpa de un atractivo color verde amarillento, que rodea un hueso central bastante grande (Herrera *et al.*, 2013).

5.3 Clasificación taxonómica

Algunos aspectos de la clasificación taxonómica de esta especie, según el Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI, 2024) son:

Superreino: Eucariota

Reino: Viridiplantae

Filo: Estreptofitas

Clase: Magnoliopsida

Orden: Laurales

Familia: Lauraceae

Género: *Persea*

Especie: *Persea americana Mill.*

5.4 Antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*)

La antracnosis es causada por el hongo *Colletotrichum gloeosporioides*, una de las enfermedades más importantes que afectan al cultivo del aguacate (*Persea americana*), este hongo causa pérdidas significativas, especialmente en la etapa de postcosecha afectando la calidad de producción (Xoca *et al.*, 2019).

El hongo *C. gloeosporioides* presenta diferentes interacciones a lo largo de su ciclo de vida y dichas variaciones dependen de diversos factores como su madurez, la resistencia del huésped y condiciones ambientales, a medida que el hongo se establece en la planta comienza a presentar síntomas que se caracterizan por manchas hundidas de varios colores en hojas, tallo y frutos, estas manchas a menudo aumentan de tamaño provocando que los tejidos infectados se marchiten y posteriormente mueran (De Silva *et al.*, 2017).

Sharma y Kulshrestha (2015) describen a *Colletotrichum gloeosporioides* como un patógeno que causa antracnosis en frutas y verduras, que prospera en condiciones húmedas y cálidas, condiciones perfectas para su desarrollo, y se propaga de varias maneras: por semillas infectadas, la salpicadura de lluvias y vientos húmedos.

5.5 Clasificación taxonómica

Algunos aspectos de la clasificación taxonómica de esta especie, según el Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI, 2024) son:

Superreino: Eucariota

Reino: Fungi

Filo: Ascomycota

Clase: Sordariomycetes

Orden: Glomerulosales

Familia: Glomereláceas

Género: *Colletotrichum*

Especie: *Colletotrichum gloeosporioides*

5.6 Sintomatología del diagnóstico

La antracnosis afecta el cultivo de aguacate, incluyendo hojas, ramas, flores y frutos.

En las hojas se manifiestan pequeñas manchas marrones a negras, generalmente están rodeadas por un halo amarillo, a medida que la infección progresa las manchas tienden a unirse desarrollando una necrosis más grande que abarca gran parte de la superficie de la hoja (Rodríguez *et al.*, 2009).

Según Zakaria (2021), las ramas y tallos infestados suelen presentar lesiones alargadas que van de marrón a negro. En las flores la necrosis provocada por el hongo puede llevar a la muerte antes de que complete el proceso de la polinización afectando la producción de frutos; en cuanto a estos, las lesiones pueden variar de tamaño, pero tienden a expandirse rápidamente por la piel de la fruta, esta expansión no solo compromete la apariencia del fruto, sino que también puede afectar su pulpa, llevando a la aparición de podredumbre.

5.7 Epidemiología

Para que se inicie la infección, los conidios deben asentarse en el fruto, este periodo depende de tres procesos claves: la adhesión de las conidios, su germinación y la formación de apresorios en el tejido del hospedero. Estos procesos previos a la infección dependen de varios factores ambientales, entre estos se destacan, la susceptibilidad de la planta y el aumento de la población del patógeno, humedad relativa superior al 80%, precipitaciones entre 10 y 25 mm de lluvia en un período corto, temperaturas entre 20°C y 30°C, vientos fuertes, así como la intensidad de la luz (Campo-Arana *et al.*, 2020).

5.8 Ciclo de vida del patógeno

Cifuentes y Jaramillo (2006) describen las fases biológicas de infección de *Colletotrichum gloeosporioides* de la siguiente manera:

Comienza cuando las esporas del hongo aterrizan en la superficie de la planta, listas para iniciar el proceso, estas esporas, llamadas conidios, se adhieren firmemente a la planta para asegurar su posición. En condiciones favorables de humedad, los conidios germinan y empiezan a crecer, durante esta germinación, el hongo forma una estructura especializada llamada apresorio, éste con forma de bulbo, se desarrolla cuando la hifa del hongo hace contacto con la planta, incrementando la zona de unión y permitiendo que el hongo se adhiera con mayor firmeza. El apresorio es crucial para la infección, ya que le permite al hongo penetrar directamente en la epidermis de la planta, una vez dentro de la planta, el hongo comienza a crecer y a colonizar los tejidos, causando daños visibles como necrosis y lesiones. El ciclo culmina cuando el hongo produce acérvulos, estructuras que liberan nuevas esporas al ambiente, listas para infectar otras plantas y reiniciar el ciclo de infección.

5.9 Control cultural

En su investigación, Iñiguez-Moreno *et al.* (2020) abordaron un enfoque innovador para combatirla *Colletotrichum gloeosporioides*, el hongo responsable de la antracnosis en aguacates, el estudio se centra en el uso de recubrimientos de alginato de sodio enriquecidos con la levadura *Meyerozyma caribbica*, como una estrategia de control biológico que busca proteger los aguacates durante la poscosecha.

El alginato de sodio, un polisacárido natural derivado de algas, se utiliza como base para crear estos recubrimientos que protegen la superficie de la fruta, este material actúa como una barrera física contra los patógenos, al tiempo que permite que el aguacate respire, ayudando a extender su vida útil. Al añadir *M. caribbica*, una

levadura conocida por sus propiedades de control biológico, se mejoran las capacidades antifúngicas del recubrimiento, esta levadura compite con *C. gloeosporioides* por el espacio y los nutrientes, y produce compuestos que inhiben el crecimiento del hongo, ofreciendo así una protección adicional.

La aplicación de este recubrimiento de alginato de sodio con *M. caribbica* es sencilla y puede integrarse fácilmente en las prácticas de manejo poscosecha, este método representa una alternativa ecológica y segura a los fungicidas químicos tradicionales, ya que ayuda a reducir los residuos químicos en los alimentos y minimiza el impacto ambiental.

Tofiño-Rivera *et al.* (2020) investigaron la efectividad del aceite de *Cymbopogon citratus* encapsulado en quitosano sobre *Colletotrichum gloeosporioides*, esta combinación busca mejorar la efectividad del aceite como agente antifúngico. Esta estrategia de control biológico representa una alternativa ecológica y sostenible a los métodos químicos tradicionales, ofreciendo una solución que no solo protege la salud de las plantas, sino también la del medio ambiente.

En su artículo, Landero-Valenzuela *et al.* (2016) analizan diversas estrategias para el control de *Colletotrichum spp.*, entre las soluciones que proponen son las alternativas biológicas, como el uso de microorganismos antagonistas y extractos de plantas con propiedades antimicrobiales, una de estas especies es *Thyme vulgaris L.*, cuyo aceite esencial ha demostrado ser antibacterial y antifúngico. Destacando la importancia de implementar prácticas culturales, como la rotación de cultivos, deshacerse de las plantas infectadas y utilizar variedades que sean resistentes, estas acciones son fundamentales para evitar la propagación de *Colletotrichum spp.*

5.10 Control químico

El control químico de la antracnosis se basa en la aplicación de fungicidas eficaces, como azoxistrobina, un fungicida sistémico que inhibe la respiración del hongo, y

clorotalonil, un fungicida de contacto que previene la germinación de esporas y limita la propagación del hongo en las hojas. Se recomienda aplicar estos fungicidas de manera preventiva para lograr un control óptimo, aunque también pueden usarse de forma curativa si la enfermedad ya está presente. Además, el estudio sugiere combinar el uso de fungicidas con prácticas culturales, como la eliminación de hojas infectadas y la mejora de la ventilación, para optimizar el control de la antracnosis (Pérez-León *et al.*, 2015).

5.11 Control biológico

En el estudio realizado por Urbina Parra *et al.* (2021) en la finca Villa Paulina, ubicada en Saravena, Arauca, se evaluó el uso de los microorganismos antagonistas *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis* como alternativas biológicas para el control de la antracnosis en maracuyá en etapa de producción. Se implementaron tratamientos en surcos de 29 plantas cada uno, utilizando tres surcos por tratamiento, donde los dos surcos laterales actuaron como bordes para evitar efectos de interferencia, y las muestras se recolectaron del surco central.

Los resultados mostraron que la incidencia de la enfermedad con la aplicación de *T. harzianum* fue de 21,37% y 20,27%, mientras que con *B. subtilis* fue de 23,81% y 25,17%. En cuanto a la severidad, *T. harzianum* presentó valores de 2,48% y 10,88%, y *B. subtilis* de 2,55% y 6,92%. La aplicación combinada de ambos antagonistas no mostró un control significativo sobre la incidencia y severidad de la enfermedad; sin embargo, cuando se aplicaron por separado, se observó un efecto favorable en la producción de fruta sana de maracuyá.

Estos hallazgos sugieren que el uso individual de *T. harzianum* o *B. subtilis* puede ser una estrategia efectiva para el control biológico de la antracnosis en maracuyá, reduciendo la dependencia de fungicidas químicos y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

5.13 Importancia económica de la antracnosis

La antracnosis causa pérdidas significativas en el cultivo de aguacate, especialmente durante el almacenamiento y la comercialización, esta enfermedad se manifiesta a través de manchas circulares de color café oscuro en la cáscara del fruto y también provoca el ablandamiento y la pudrición de la pulpa, los daños ocasionados por esta enfermedad pueden generar pérdidas económicas de hasta un 40% (Tapia *et al.* 2021).

5.14 Técnicas geoestadísticas

Fernández *et al.* (2014) exploran cómo las herramientas modernas pueden transformar la agricultura, en particular, destacan el papel de la geoestadística y los sistemas de información geográfica (SIG) para analizar patrones en los datos agrícolas, estas tecnologías permiten a los agricultores visualizar y gestionar grandes cantidades de información espacial a través de mapas detallados. Este enfoque facilita un manejo más preciso de los recursos, optimiza las labores agrícolas y contribuye a una agricultura más sostenible.

La investigación realizada por Rivera Martínez *et al.* (2020) se llevó a cabo en cuatro municipios del Estado de México, donde la producción de aguacate es significativa, en este estudio, se aplicaron técnicas geoestadísticas como el kriging para analizar cómo el ácaro *Oligonychus perseae*, una plaga que afecta a los cultivos de aguacate se distribuye espacialmente, este enfoque permite implementar estrategias de control más efectivas y sostenibles, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente.

Rodríguez *et al.* (2020) se centran en comprender cómo se manifiesta la enfermedad de la antracnosis, provocada por el hongo *Colletotrichum gloeosporioides*, en los cultivos de aguacate de varios municipios, incluyendo Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec; para lograr esto, emplearon técnicas de análisis geoestadístico que les permitieron evaluar el nivel

de dependencia espacial y crear mapas que muestran tanto la densidad como la superficie afectada por la enfermedad.

La investigación incluyó la recolección de muestras de aguacate en diferentes huertos, lo que proporcionó datos para el análisis, a través del uso del krigeado ordinario, lograron elaborar mapas que mostraban la superficie infestada, lo que les permitió tener una visualización más clara y detallada de cómo se distribuye la antracnosis en las áreas estudiadas.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevará a cabo en el municipio de Tenancingo, Estado de México, este lugar está situado a una latitud de 18°57'38"N y una longitud de 99°34'32"O, con una altitud que varía entre 2,200 y 2,700 metros sobre el nivel del mar (msnm); con temperaturas que generalmente fluctúan entre 4 °C y 27 °C, siendo raro que bajen de 0 °C o superen los 30 °C.

Para llevar a cabo el muestreo, se seleccionarán 200 árboles de aguacate de entre 8 y 10 años, distribuidos aleatoriamente. Se realizará un muestreo cada 15 días, durante un año, examinando 12 frutos por árbol, seleccionándolos desde los cuatro puntos cardinales y desde los estratos alto, medio y bajo, se contabilizará cuántos de estos frutos presentan síntomas de la enfermedad para calcular su incidencia.

Los árboles muestreados serán etiquetados y georreferenciados para obtener su ubicación espacial precisa mediante un sistema de posicionamiento global diferencial (dGPS, modelo SPS351, Trimble, EE. UU.). Además, se seleccionarán 50 árboles que presenten síntomas severos de la enfermedad, de los cuales se recolectarán tres frutos infectados por árbol para su análisis.

6.1 Análisis geoestadístico

Rodríguez *et al.* (2020) explican que un análisis geoestadístico se desarrolla en tres fases: primero se realiza un análisis exploratorio de datos para comprender mejor la información disponible, después se estima el semivariograma y se ajustan los parámetros del modelo para captar la variabilidad de los datos, por último, se crean mapas que ayudan a visualizar y estimar la superficie afectada usando el método de krigeado.

Una vez que se integren las bases de datos obtenidas de los muestreos de frutos de aguacate afectados por antracnosis, se procederá a la estimación de los semivariogramas, para su elaboración para cada muestreo se utilizará el programa

Variowin 2.2 (Software para el análisis de datos espaciales en 2 D. Primavera Verlag, Nueva York; EE. UU.).

6.2 Nivel de dependencia espacial

La determinación del grado de relación o nivel de dependencia espacial se obtendrá mediante la relación entre el efecto pepita y el sill, expresada como un porcentaje. Un resultado inferior al 25 % indica un alto nivel de dependencia espacial; entre 26 % y 75 %, se considera un nivel moderado; y un resultado superior al 76 % indica un bajo nivel de dependencia (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2019).

Se analizarán los semivariogramas obtenidos para determinar la estructura de la dependencia espacial de la antracnosis en los frutos de aguacate. Asimismo, se llevarán a cabo comparaciones entre distintas áreas de muestreo para identificar patrones de distribución.

6.3 Mapas de densidad y superficie infectada

Para la elaboración de mapas se tomarán los datos de las dos quincenas de cada mes para obtener resultados mensuales, por medio de la interpolación de valores mediante el krigeado ordinario, lo que permitirá estimar de manera no sesgada los valores asociados a puntos no muestreados. La validación del modelo teórico se realizará por medio de validación cruzada (Ramírez, 2012).

Las estimaciones obtenidas se representarán en mapas específicos para cada parcela de árboles enfermos, utilizando el software Surfer 16 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. Colorado, EE. UU.); esto facilitará la visualización y el análisis de la distribución espacial de la enfermedad.

El krigeado ordinario asume que la función aleatoria es estacionaria de segundo orden con media desconocida, esto implica que las muestras sean homogéneas dentro del área de estudio y que la correlación entre dos variables aleatorias

depende únicamente de la distancia que las separa, independientemente de su ubicación específica (Fernández *et al.*, 2016).

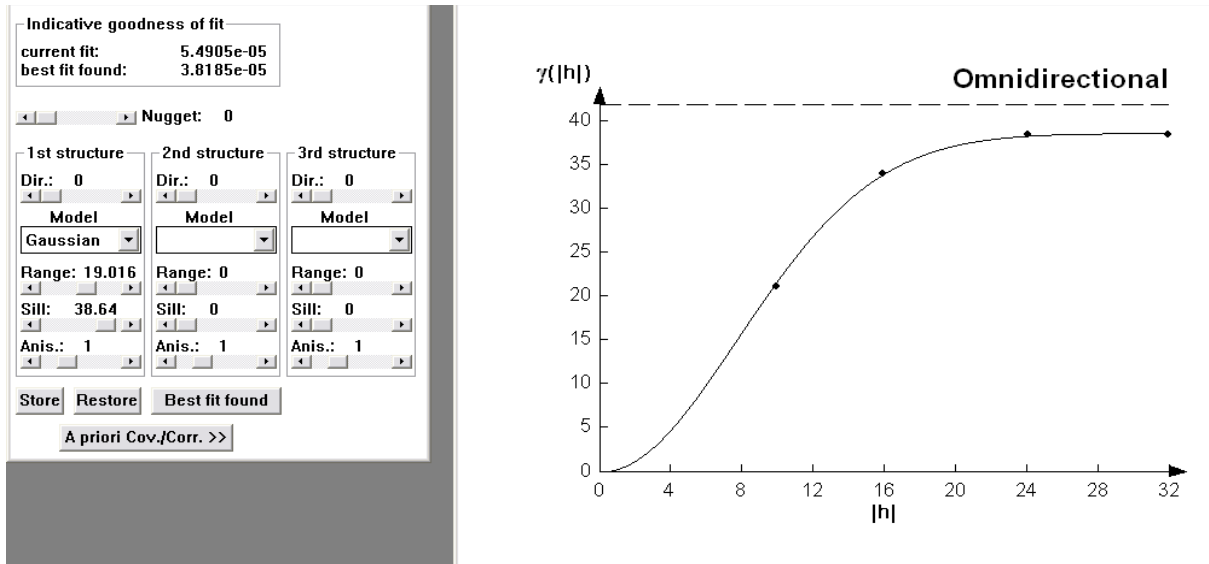
VII. RESULTADOS Y DISCUSION

En esta investigación se registró la presencia de antracnosis en árboles de aguacate variedad Hass en el municipio de Tenancingo, Estado de México, donde se realizaron 24 muestreos quincenales en distintos puntos de la zona productora para analizar cómo se distribuye la enfermedad.

La metodología se utiliza en estudios sobre el comportamiento espacial de enfermedades y plagas, y esta técnica permite implementar medidas de control específicas, lo que contribuye a reducir significativamente las pérdidas ocasionadas por estos factores (Figuroa-Figuroa *et al.*, 2023).

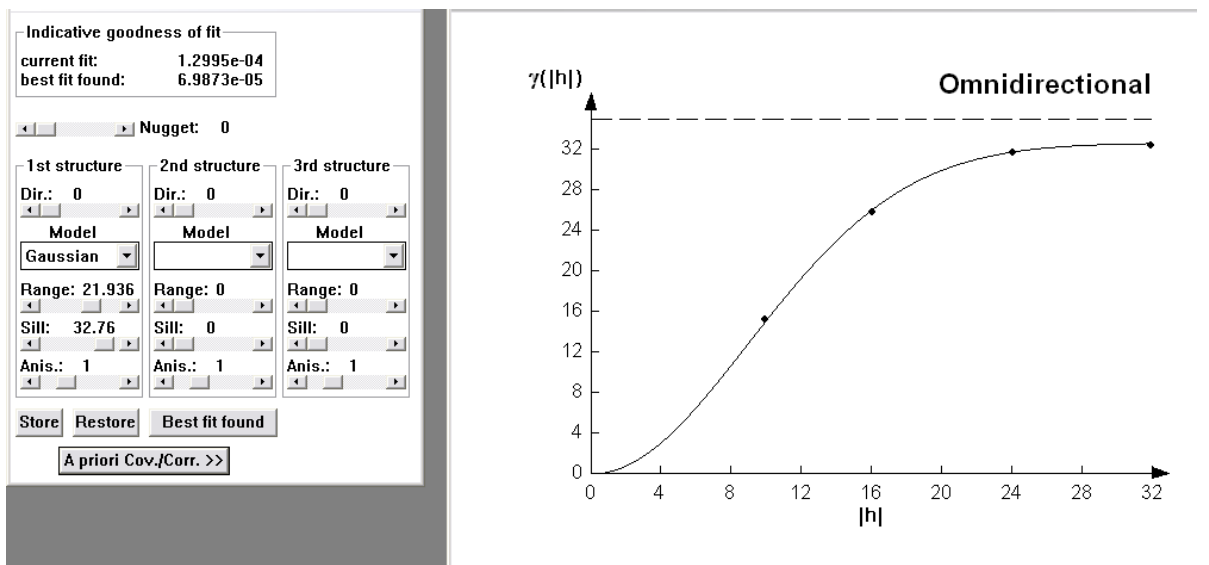
A partir de los datos recopilados se obtuvieron 24 semivariogramas experimentales (Figuras 1-24) que se ajustaron a un modelo gaussiano y mostraron alta dependencia espacial. Tapia-Rodríguez *et al.* (2021) reportan que cuando un modelo de semivariograma se ajusta al tipo gaussiano la agregación se expresa de forma continua dentro del área muestreada y tendrá una tendencia a expandirse. Gómez-Correa *et al.* (2017) indican que su investigación se ajustó al modelo gaussiano, permitiendo que el patógeno se expanda de manera constante en relación con los puntos muestreados, reflejando la gran capacidad de diseminación y la alta continuidad espacial de la enfermedad, explicada por su extensión radial hacia otras plantas o áreas vecinas, siempre que las condiciones ambientales sean favorables. De manera similar, Vanegas-Carrillo *et al.* (2021) hacen mención que la distribución de especies de mosca de la fruta mostró un ajuste al modelo gaussiano en su investigación, revelando una agrupación continua y propagación radial influenciada por factores ambientales y la disponibilidad de recursos.

Figura 1 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de enero, ajustado al modelo gaussiano.



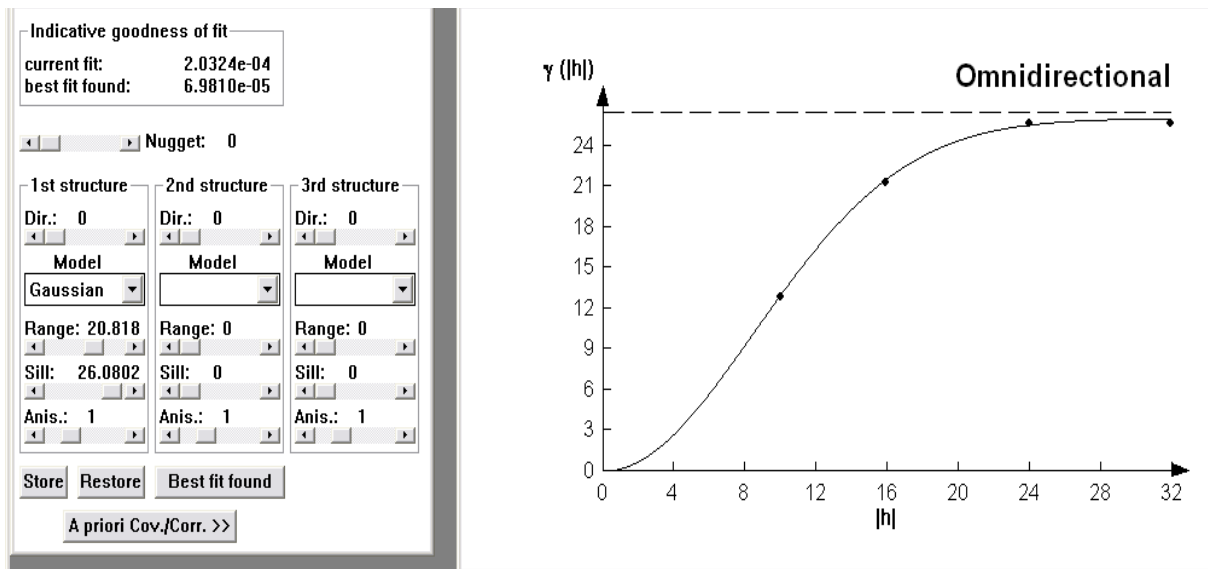
Fuente: propia.

Figura 2 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de enero, ajustado al modelo gaussiano.



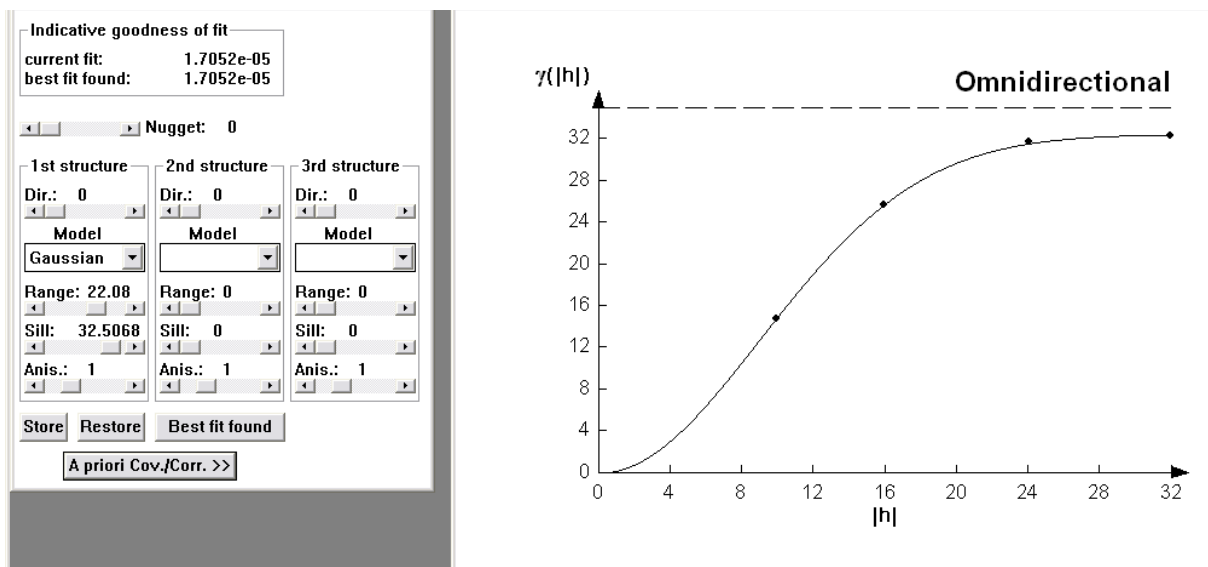
Fuente: propia.

Figura 3 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de febrero, ajustado al modelo gaussiano.



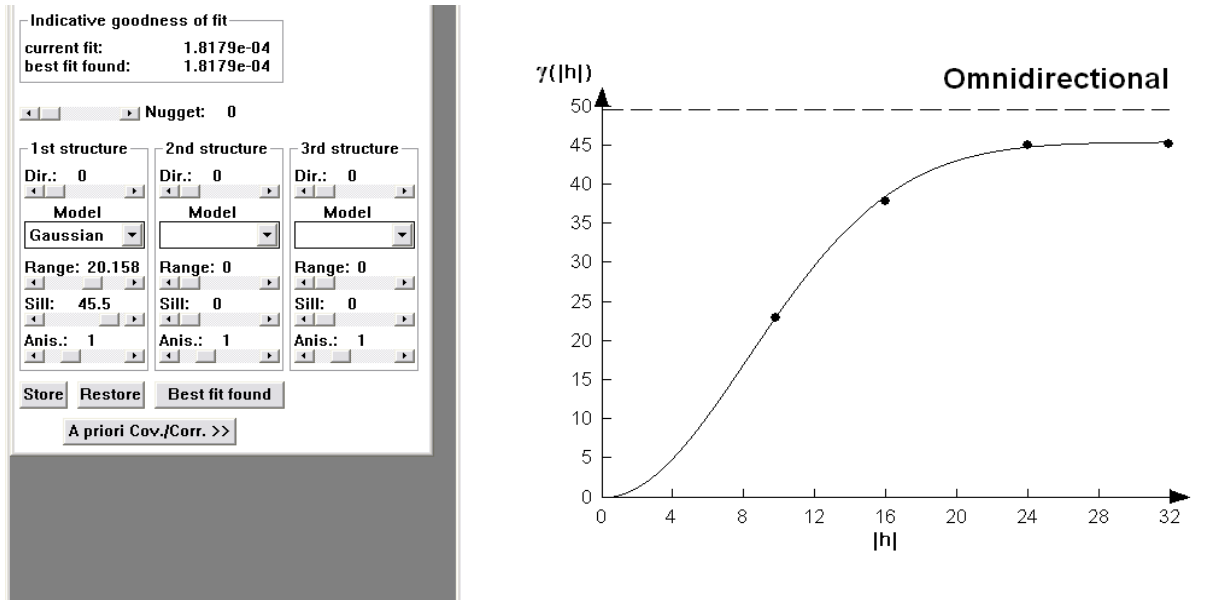
Fuente: propia.

Figura 4 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de febrero, ajustado al modelo gaussiano.



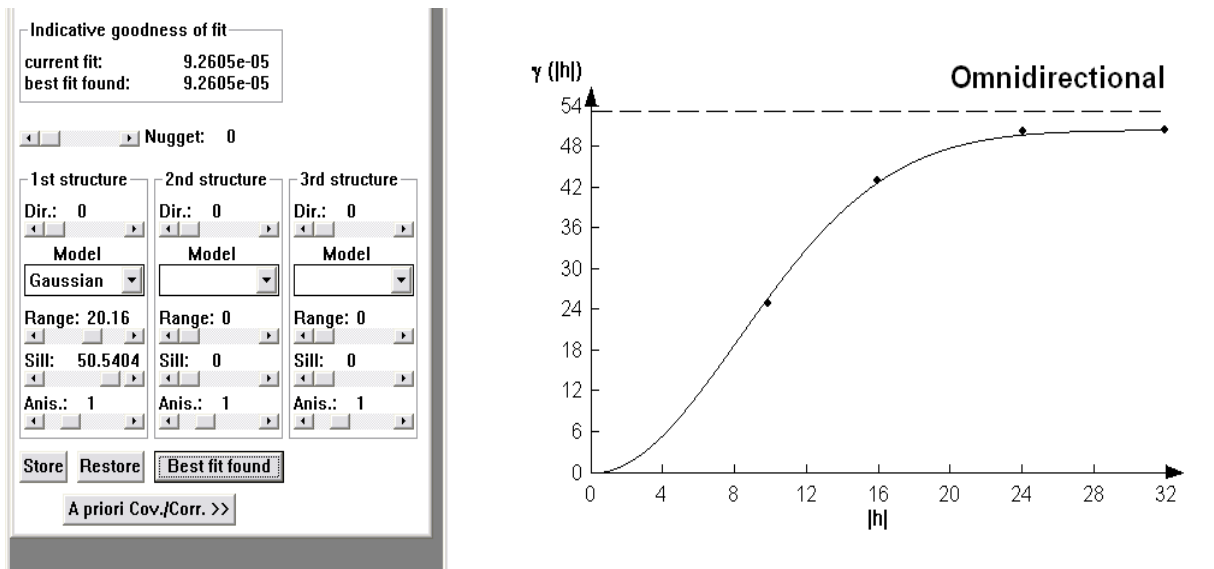
Fuente: propia.

Figura 5 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de marzo, ajustado al modelo gaussiano.



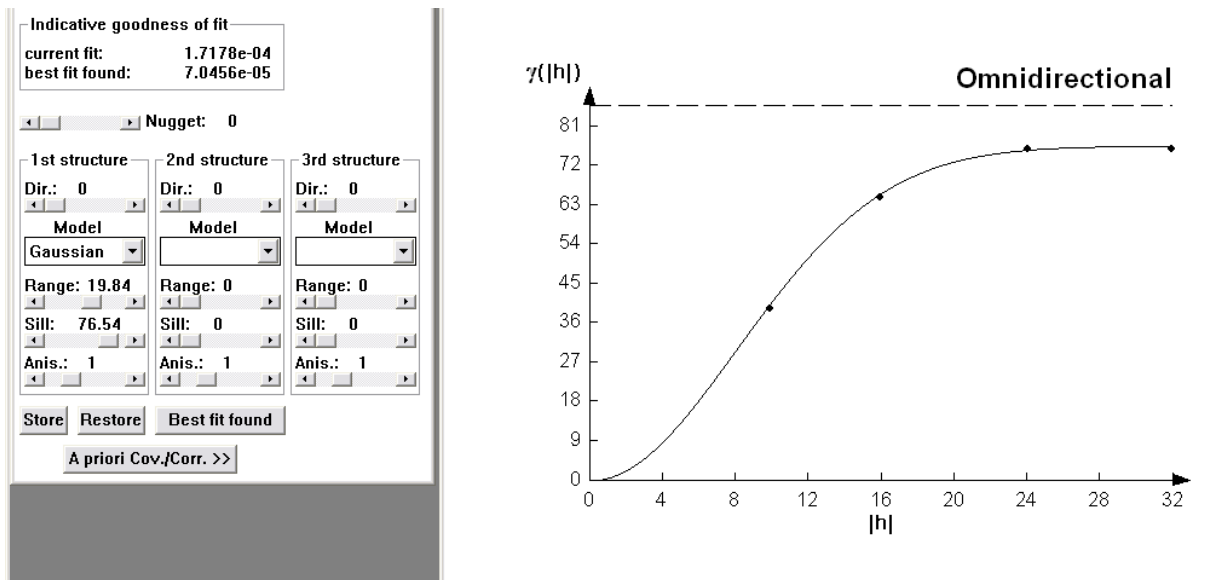
Fuente: propia.

Figura 6 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de marzo, ajustado al modelo gaussiano.



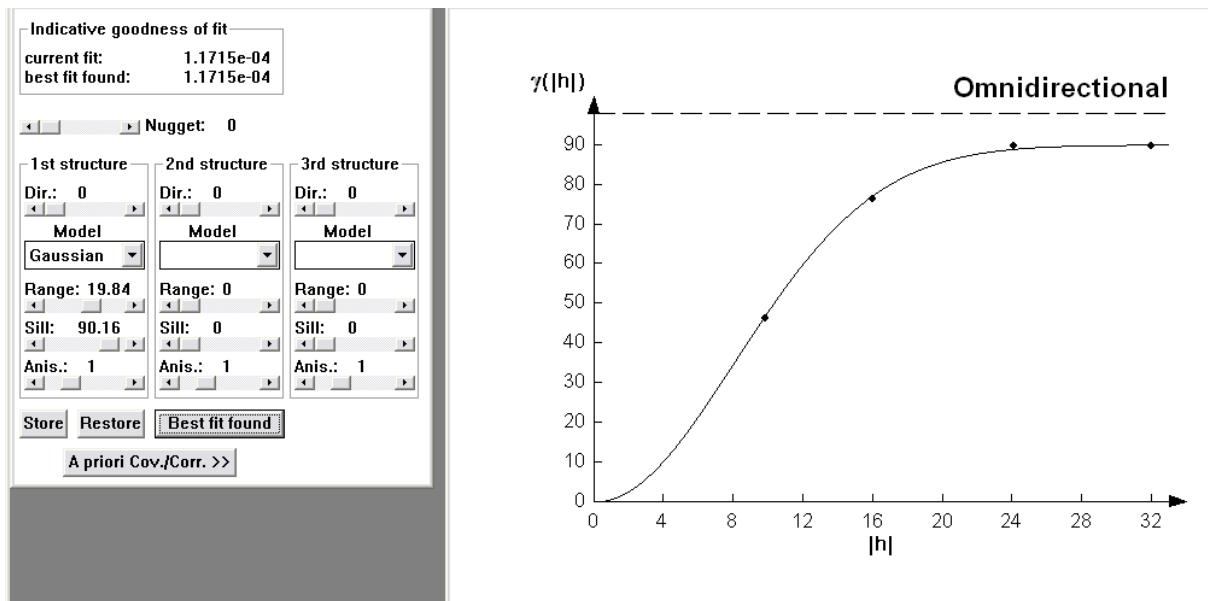
Fuente: propia.

Figura 7 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de abril, ajustado al modelo gaussiano.



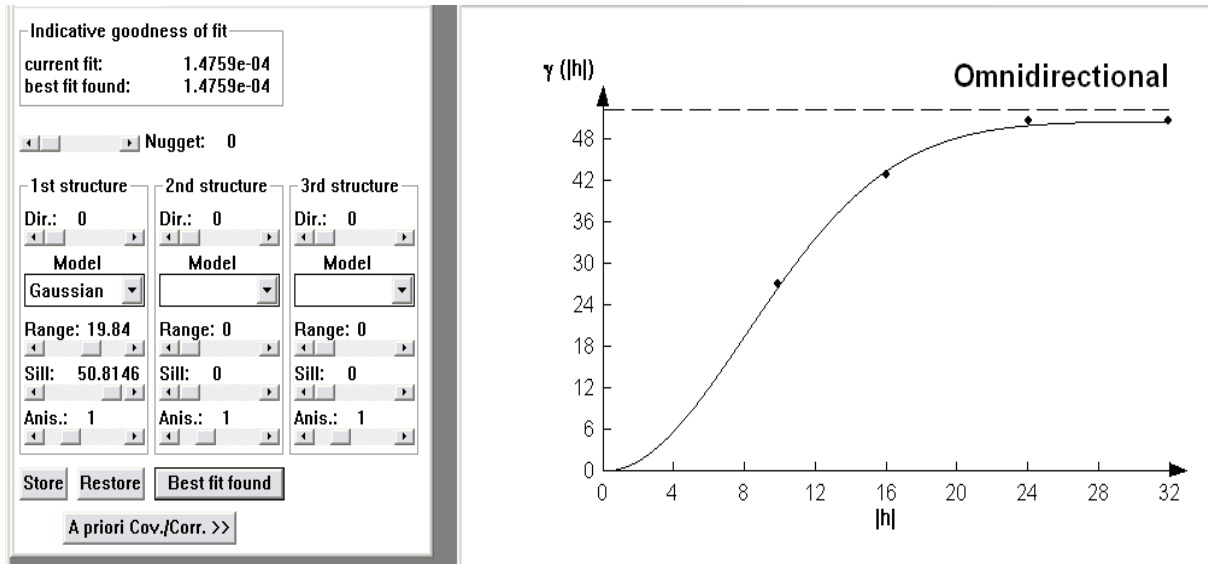
Fuente: propia.

Figura 8 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de abril, ajustado al modelo gaussiano.



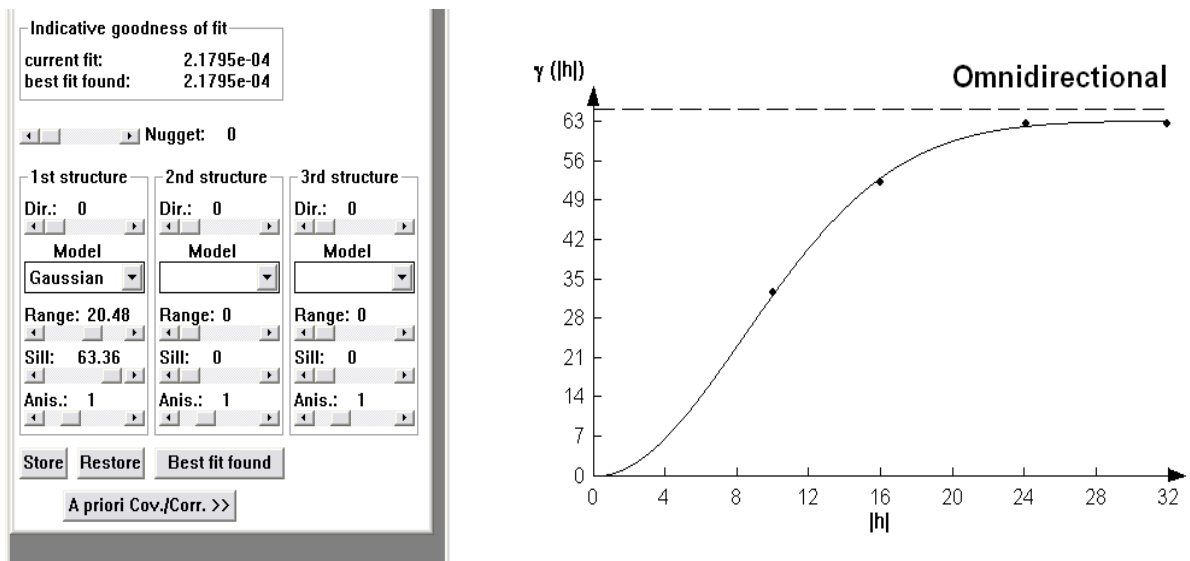
Fuente: propia.

Figura 9 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de mayo, ajustado al modelo gaussiano.



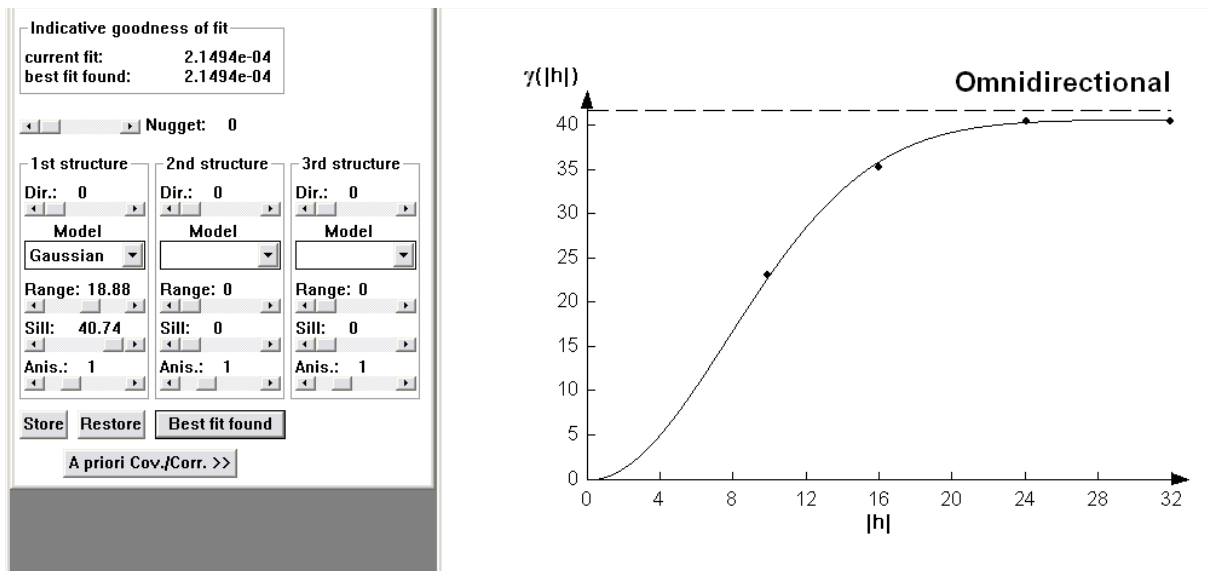
Fuente: propia.

Figura 10 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de mayo, ajustado al modelo gaussiano.



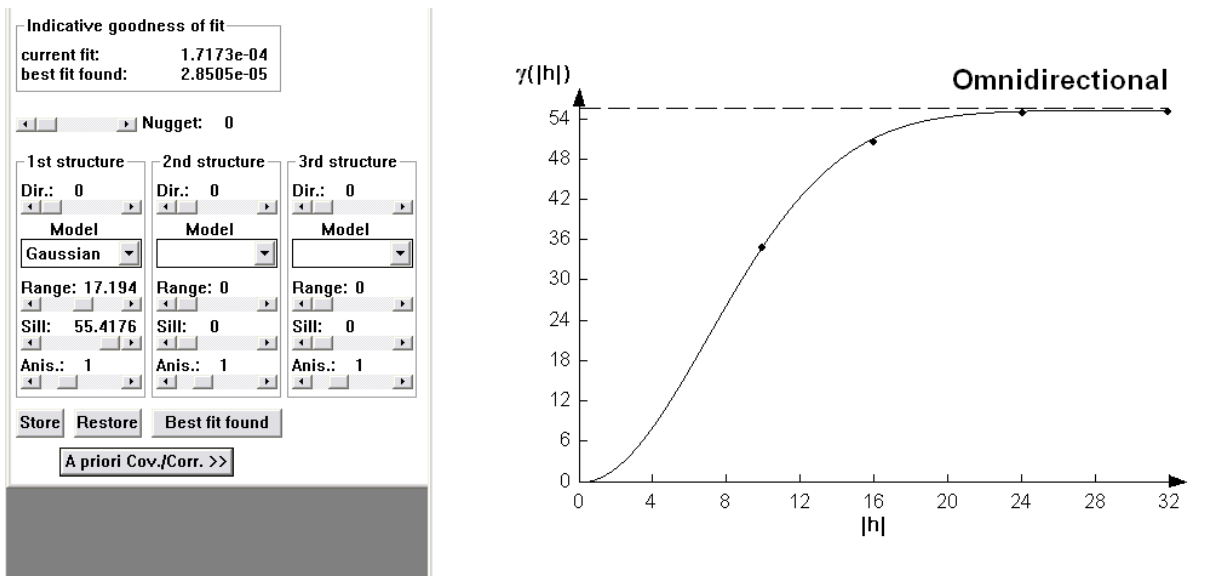
Fuente: propia.

Figura 11 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de junio, ajustado al modelo gaussiano.



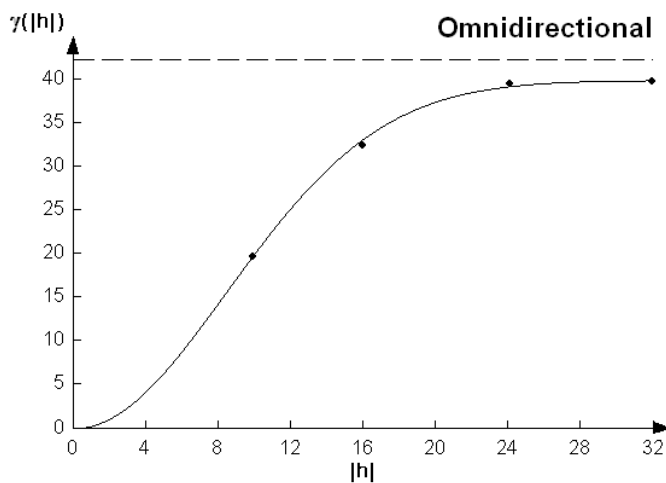
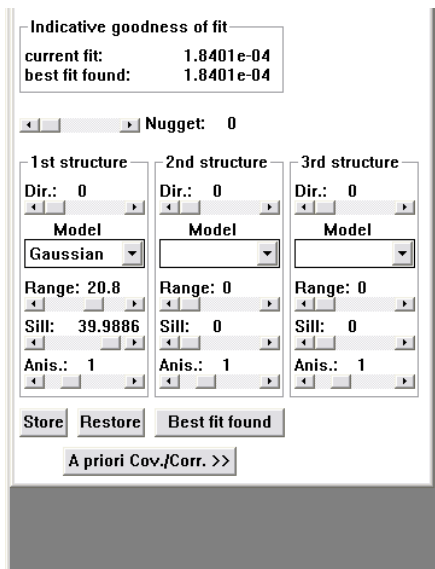
Fuente: propia.

Figura 12 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de junio, ajustado al modelo gaussiano.



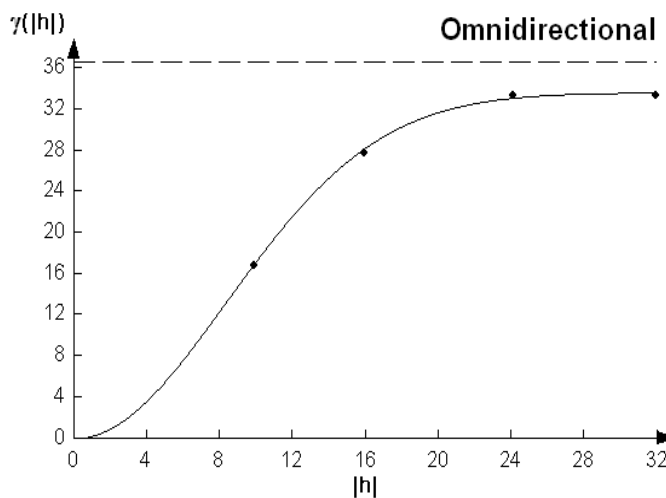
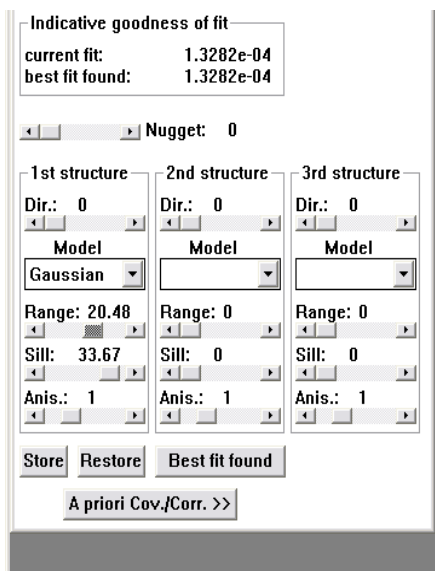
Fuente: propia.

Figura 13 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de julio, ajustado al modelo gaussiano.



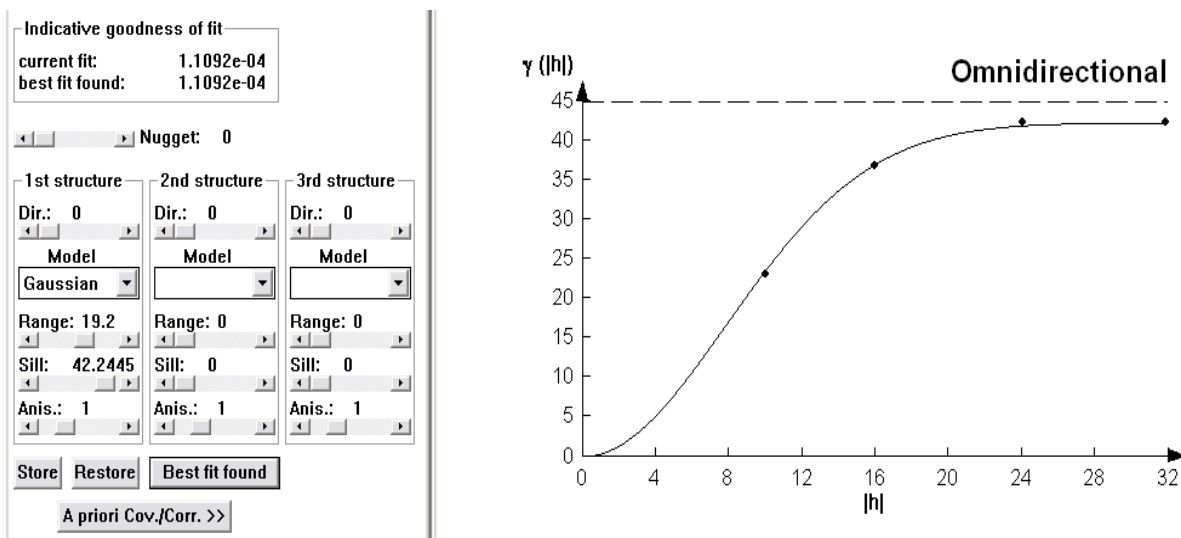
Fuente: propia.

Figura 14 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de julio, ajustado al modelo gaussiano.



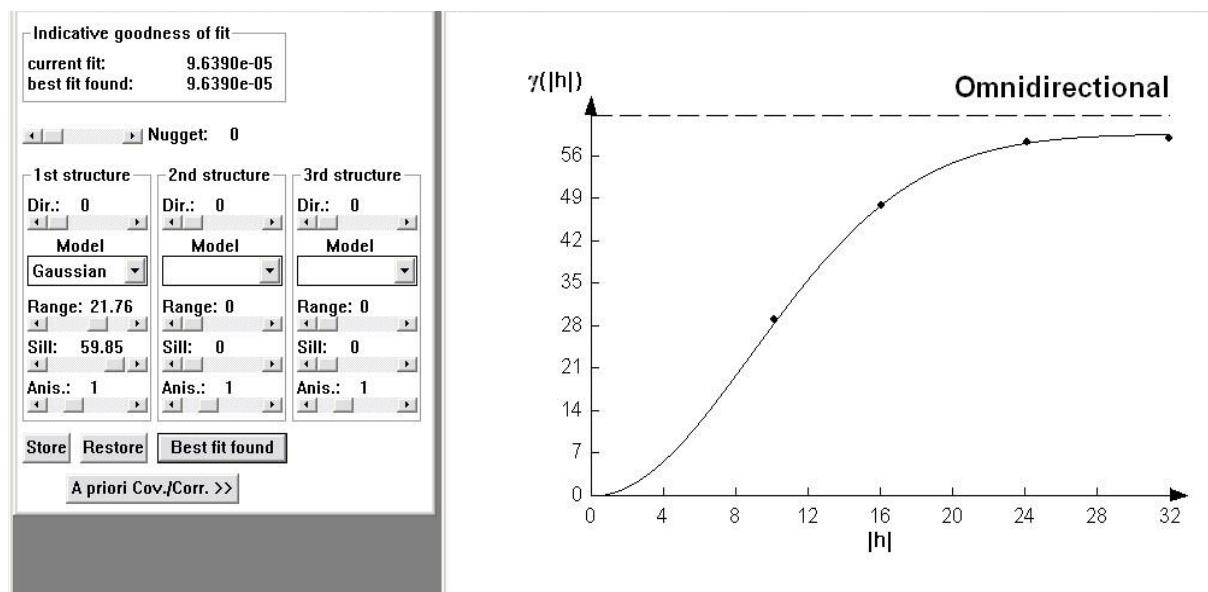
Fuente: propia.

Figura 15 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de agosto, ajustado al modelo gaussiano.



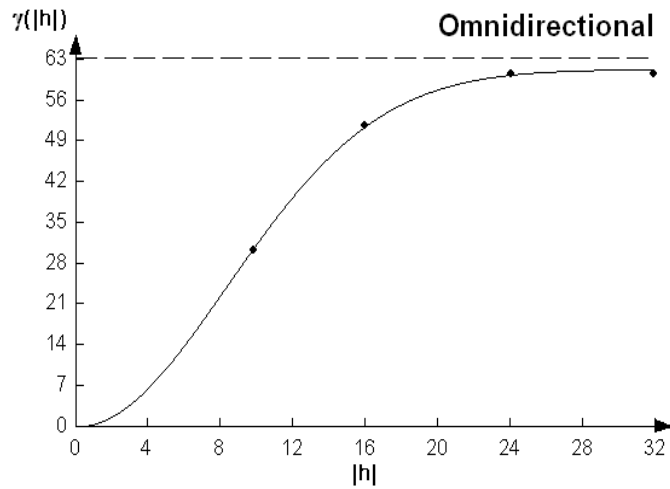
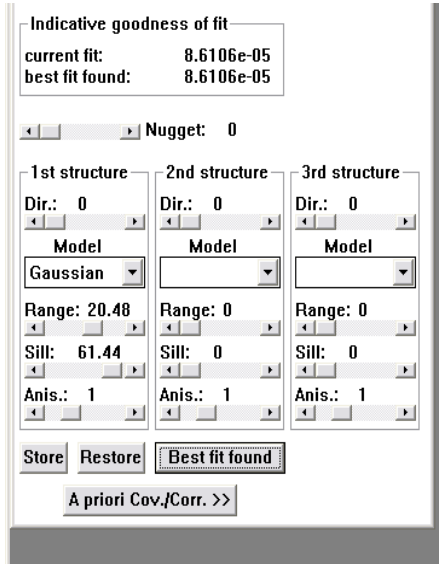
Fuente: propia.

Figura 16 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de agosto, ajustado al modelo gaussiano.



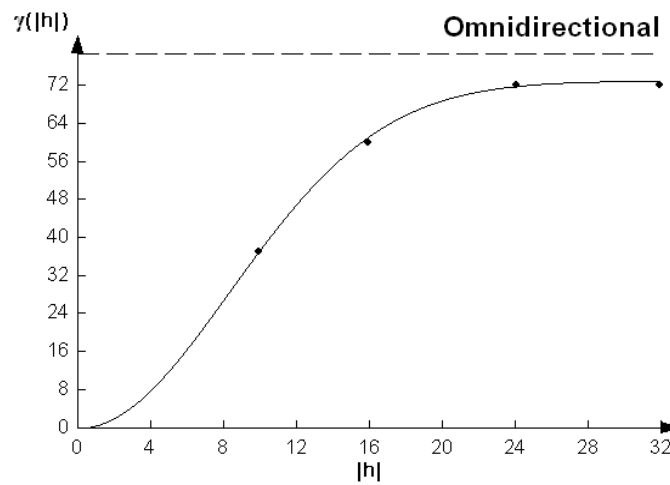
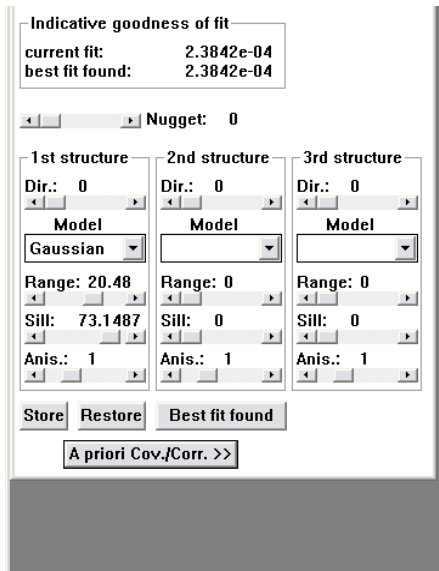
Fuente: propia.

Figura 17 Semivariograma correspondiente a la primeraa quincena de septiembre, ajustado al modelo gaussiano.



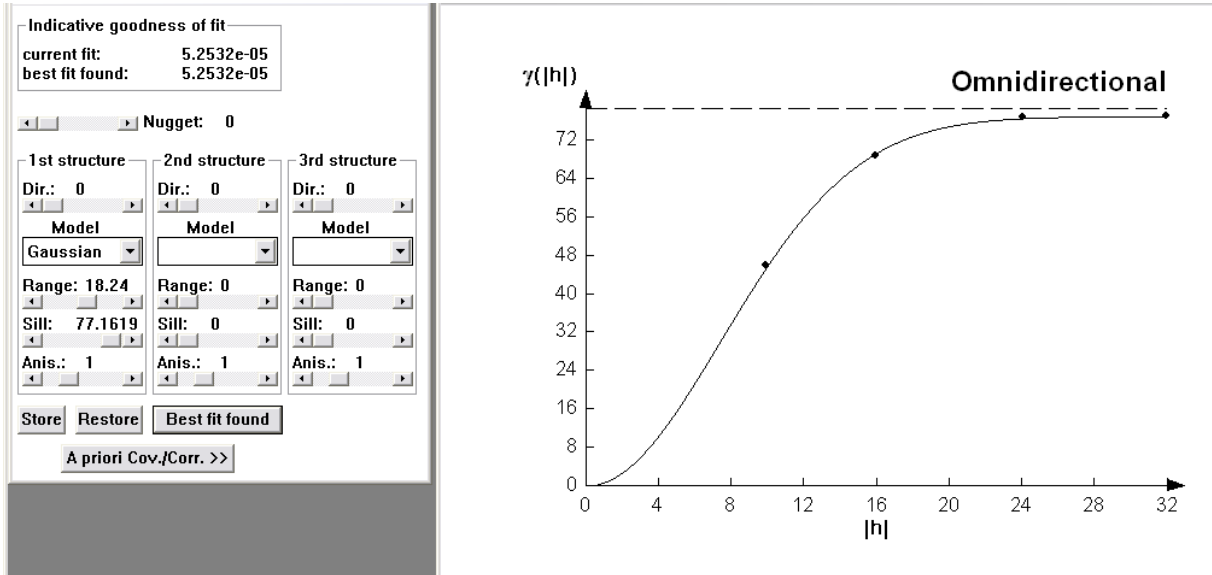
Fuente: propia.

Figura 18 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de septiembre, ajustado al modelo gaussiano.



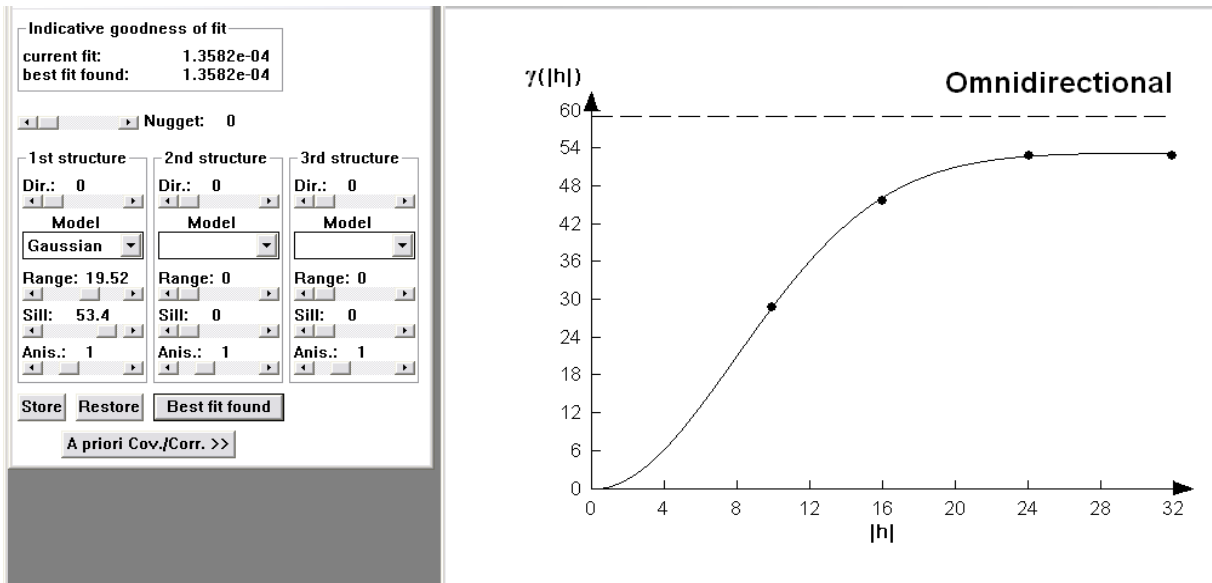
Fuente: propia.

Figura 19 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de octubre, ajustado al modelo gaussiano.



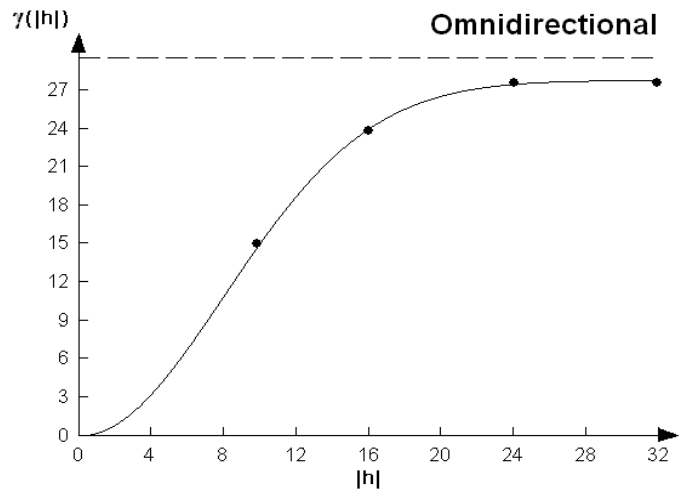
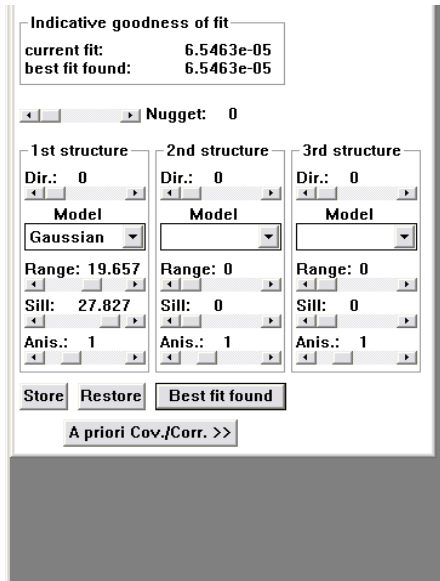
Fuente: propia.

Figura 20 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de octubre, ajustado al modelo gaussiano.



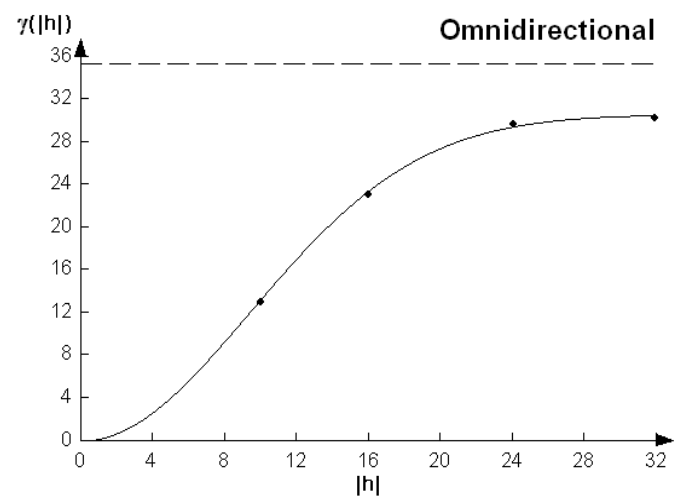
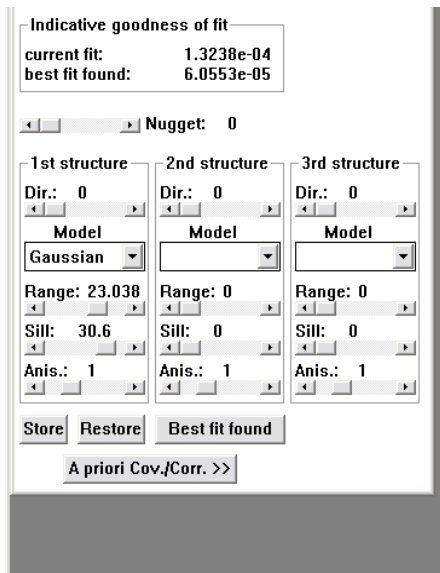
Fuente: propia.

Figura 21 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de noviembre, ajustado al modelo gaussiano.



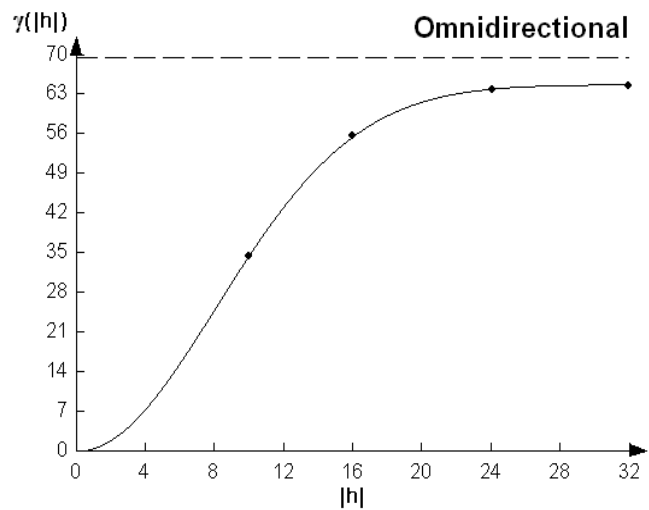
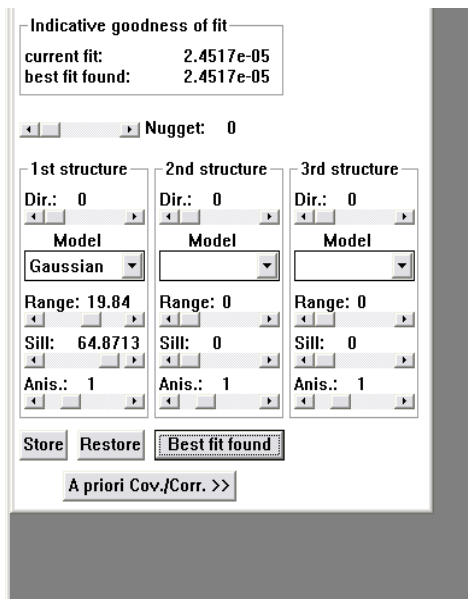
Fuente: propia.

Figura 22 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de noviembre, ajustado al modelo gaussiano.



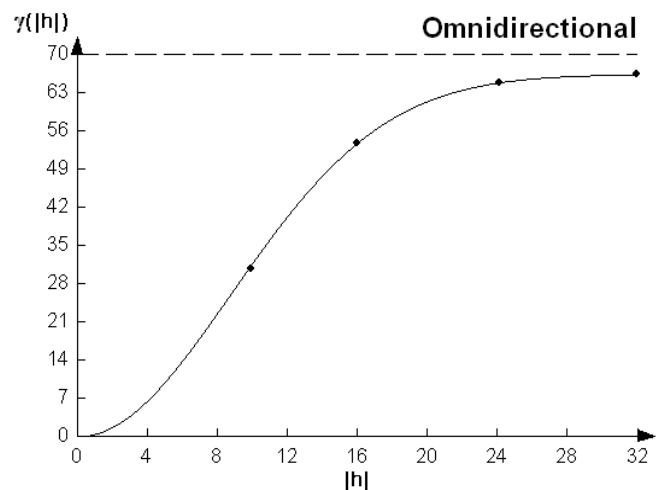
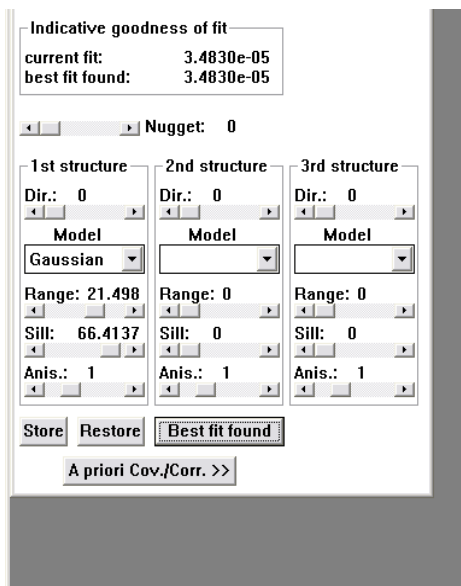
Fuente: propia.

Figura 23 Semivariograma correspondiente a la primera quincena de diciembre, ajustado al modelo gaussiano.



Fuente: propia.

Figura 24 Semivariograma correspondiente a la segunda quincena de diciembre, ajustado al modelo gaussiano.

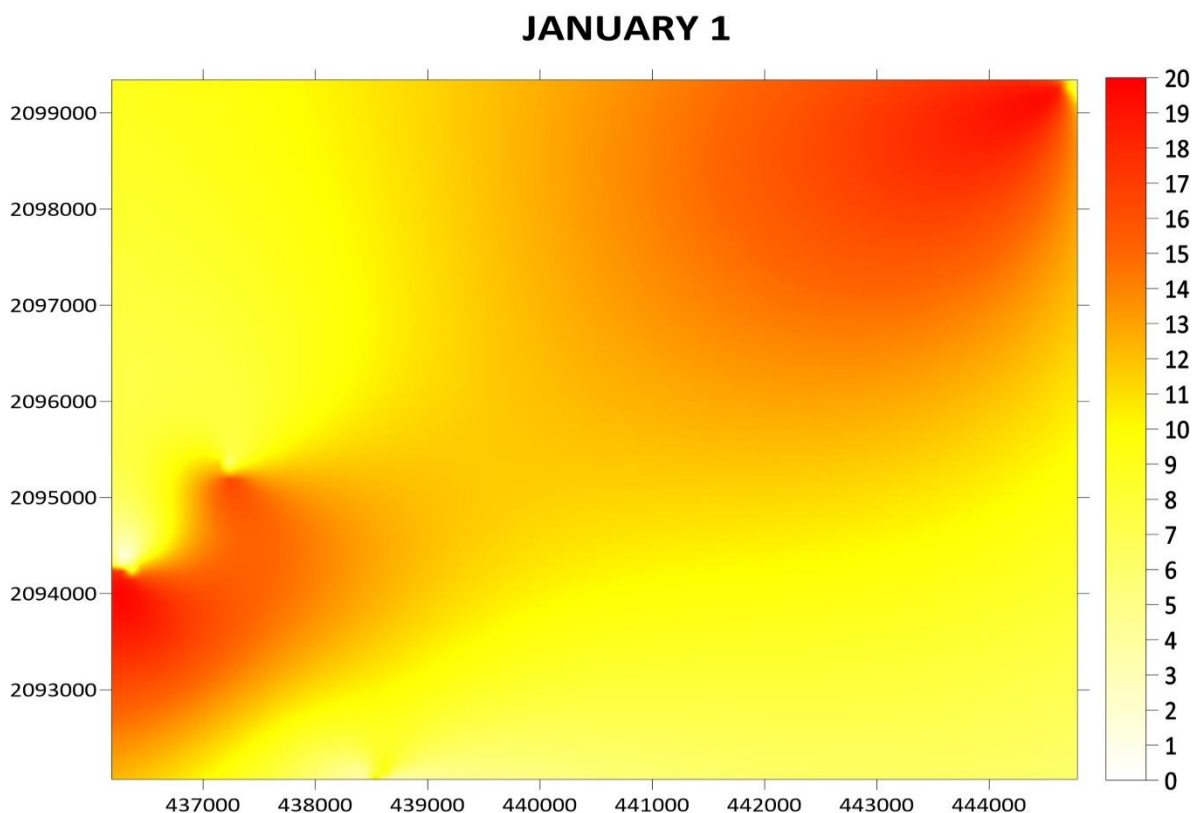


Fuente: propia.

Se elaboraron mapas de incidencia de *C. gloeosporioides* utilizando la técnica de krigeado ordinario para estimar el porcentaje de superficie infectada, en total se generaron 24 proyecciones que permitieron visualizar gráficamente la distribución del hongo, en los mapas las áreas sombreadas de rojo indican una mayor incidencia de la enfermedad, mientras que el color blanco señala la ausencia del patógeno en las zonas muestreadas.

Durante la primera quincena de enero, la temperatura varió entre un mínimo de 3°C y un máximo de 22°C. El mapa (**figura 25**) muestra focos de alta incidencia en la esquina inferior izquierda y la esquina superior derecha, donde el color rojo señala una mayor presencia del patógeno. También se identifican amplias zonas en tonalidades amarillas y naranjas, con una incidencia media a alta del 6-15%, según lo indicado en el varemo, lo que sugiere que el patógeno está distribuido en varios puntos del terreno sin alcanzar niveles críticos en la mayoría de ellos.

Figura 25 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de enero de 2023



Fuente: propia.

Durante la segunda quincena de enero, las temperaturas oscilaron entre un mínimo de 5°C y un máximo de 24°C, creando condiciones propicias para el desarrollo de la antracnosis en el cultivo.

En la **Figura 26**, se observa una alta incidencia del patógeno en la esquina inferior izquierda, donde los tonos rojos indican una mayor concentración de la enfermedad. Asimismo, se identifica una zona de incidencia media a alta en el área central, que se extiende hacia el norte, representada por tonalidades naranjas y amarillas. En contraste, la parte superior derecha muestra una incidencia mínima o nula, reflejada en colores más claros, lo que sugiere condiciones menos favorables para la propagación del patógeno en esa región.

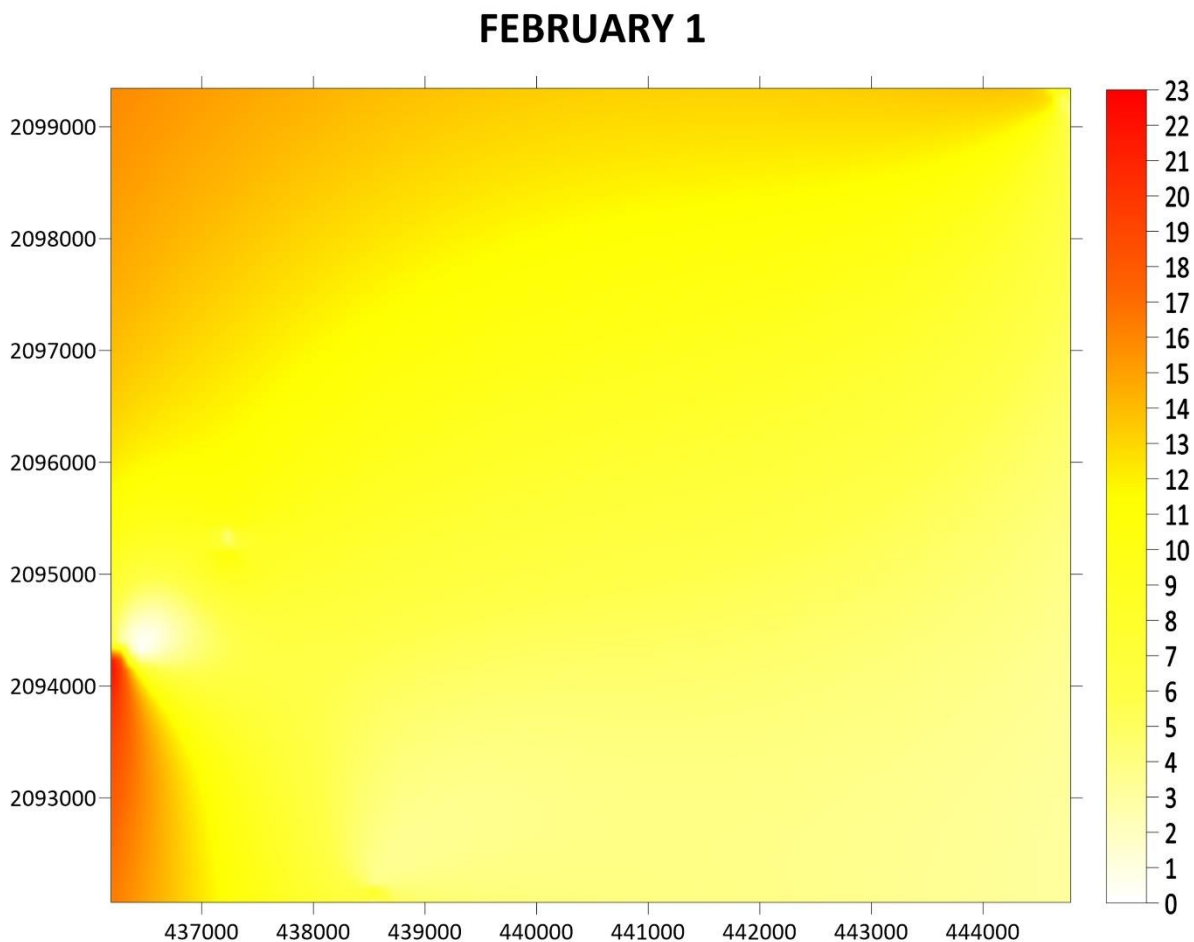
Figura 26 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de enero de 2023



Fuente: propia.

La primera quincena de febrero, con temperaturas entre 5°C y 24°C, la antracnosis mostró una distribución heterogénea. La mayor incidencia se observó (**figura 27**) en la esquina inferior izquierda, en el centro, las zonas amarillas y naranjas reflejan una incidencia media, mientras que la esquina superior derecha muestra una menor afectación.

Figura 27 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de febrero de 2023

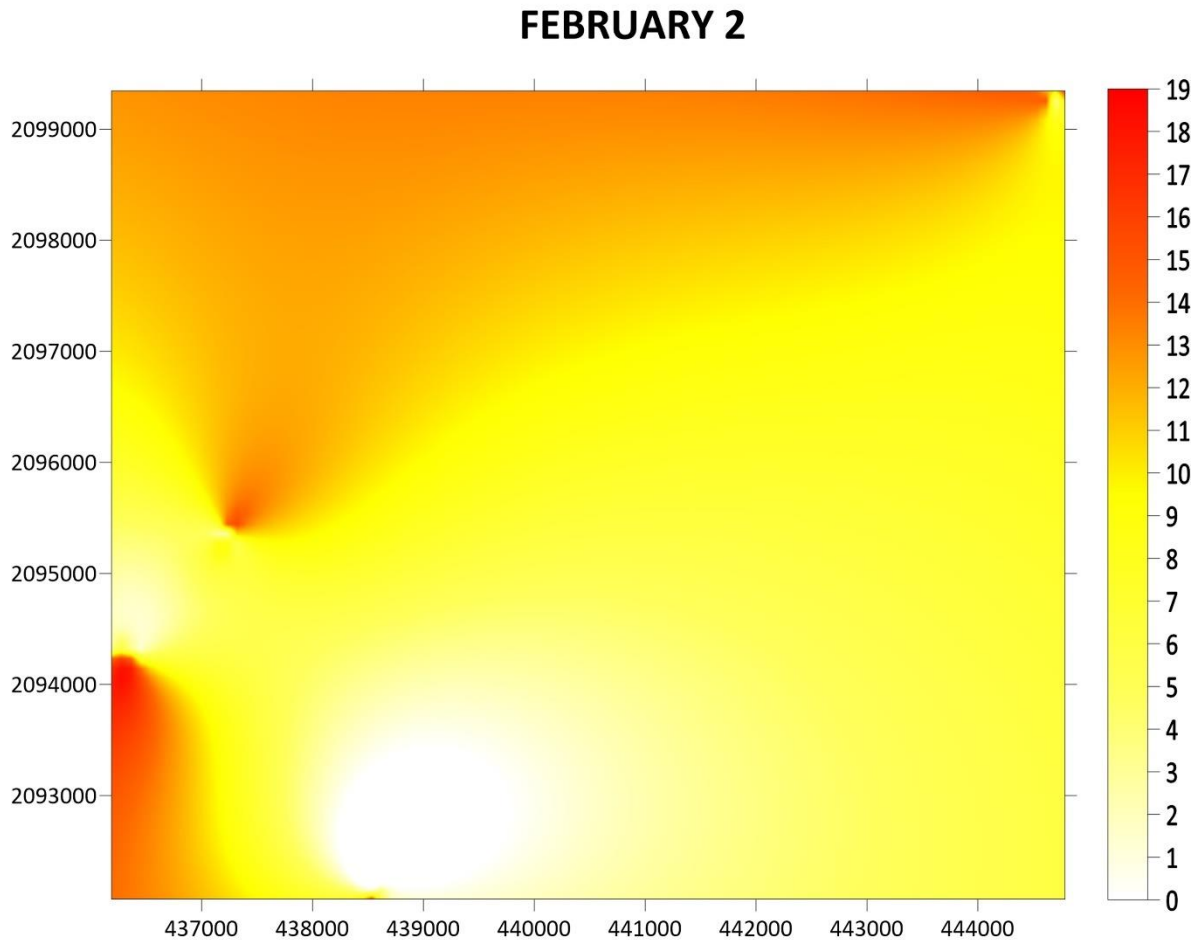


Fuente: propia.

En la segunda quincena de febrero, con temperaturas que fluctuaron entre 6°C y 25°C, se observaron variaciones significativas en la distribución de la antracnosis.

La Figura 28 revela que la mayor incidencia del patógeno se concentra en la esquina inferior izquierda y en la superior derecha, destacadas por tonalidades rojas. Por otro lado, el centro del mapa presenta zonas de incidencia moderada, representadas por colores amarillos y naranjas, lo que indica una propagación activa de la enfermedad en estas áreas.

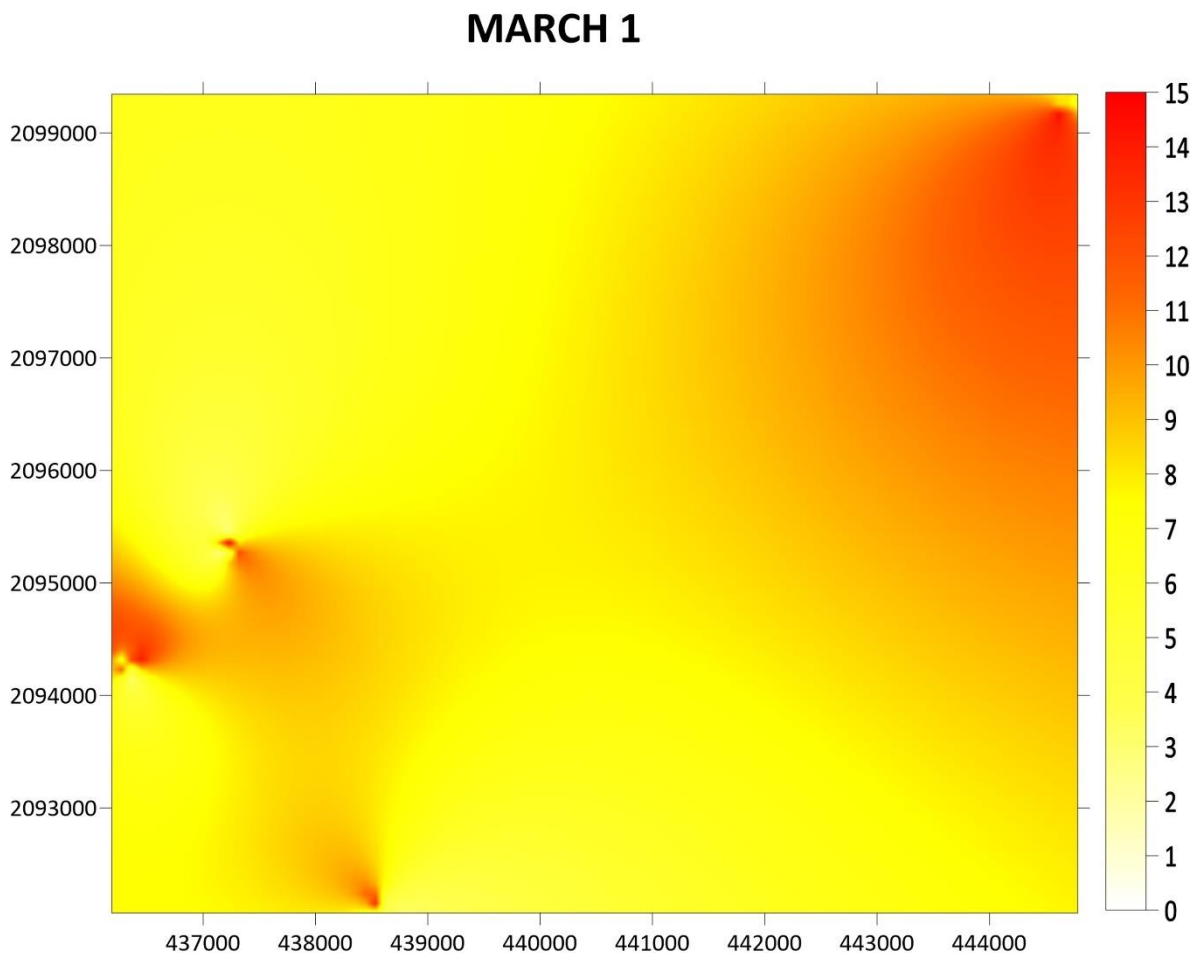
Figura 28 mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de febrero de 2023



Fuente: propia.

Figura 29 muestra las zonas más afectadas aparecen en tonos rojos, destacando principalmente en la esquina superior derecha, donde se concentra el mayor impacto de la enfermedad, en la esquina inferior izquierda se observan varios focos dispersos con alta intensidad, lo que sugiere múltiples puntos de infección. Además, en la parte central izquierda se identifica un punto aislado con una elevada concentración de daño. La primera quincena de marzo tuvo una temperatura que oscilo 7 – 25°C.

Figura 29 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de marzo de 2023

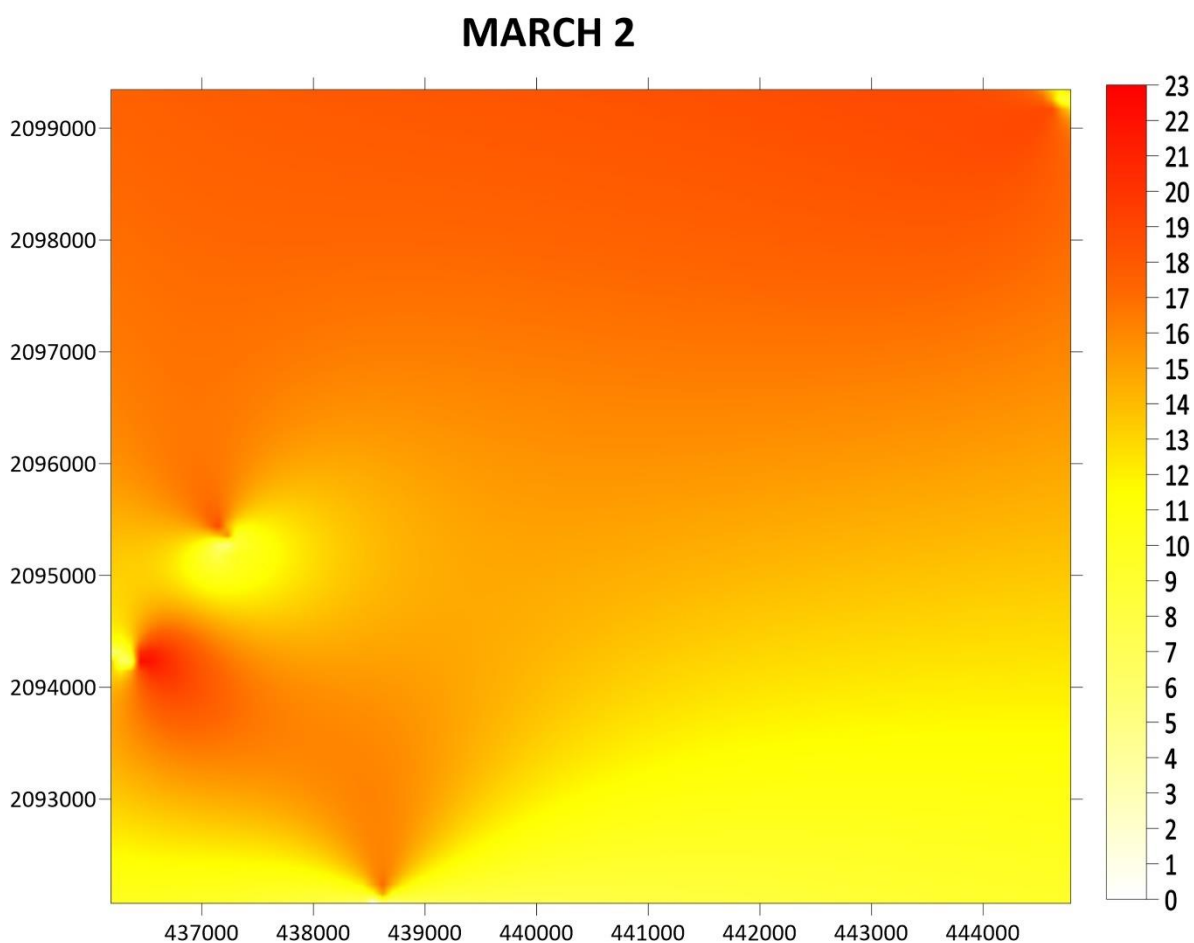


Fuente: propia.

Figura 30 refleja la evolución del daño por antracnosis en comparación con la primera quincena de marzo, se observa un aumento en la severidad de la enfermedad, con más áreas afectadas y un desplazamiento en la intensidad del daño. La esquina superior derecha, donde el daño ha aumentado en extensión e intensidad, lo que sugiere una progresión de la enfermedad en esa área, en la parte inferior izquierda, los focos de infección se mantienen, pero con una ligera expansión, lo que indica una posible dispersión de espora y en la zona central izquierda, la intensidad del daño ha aumentado, lo que sugiere que la infección está

avanzando en esa dirección. Con temperaturas registradas, con valores entre 9 y 26 °C.

Figura 30 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de marzo de 2023



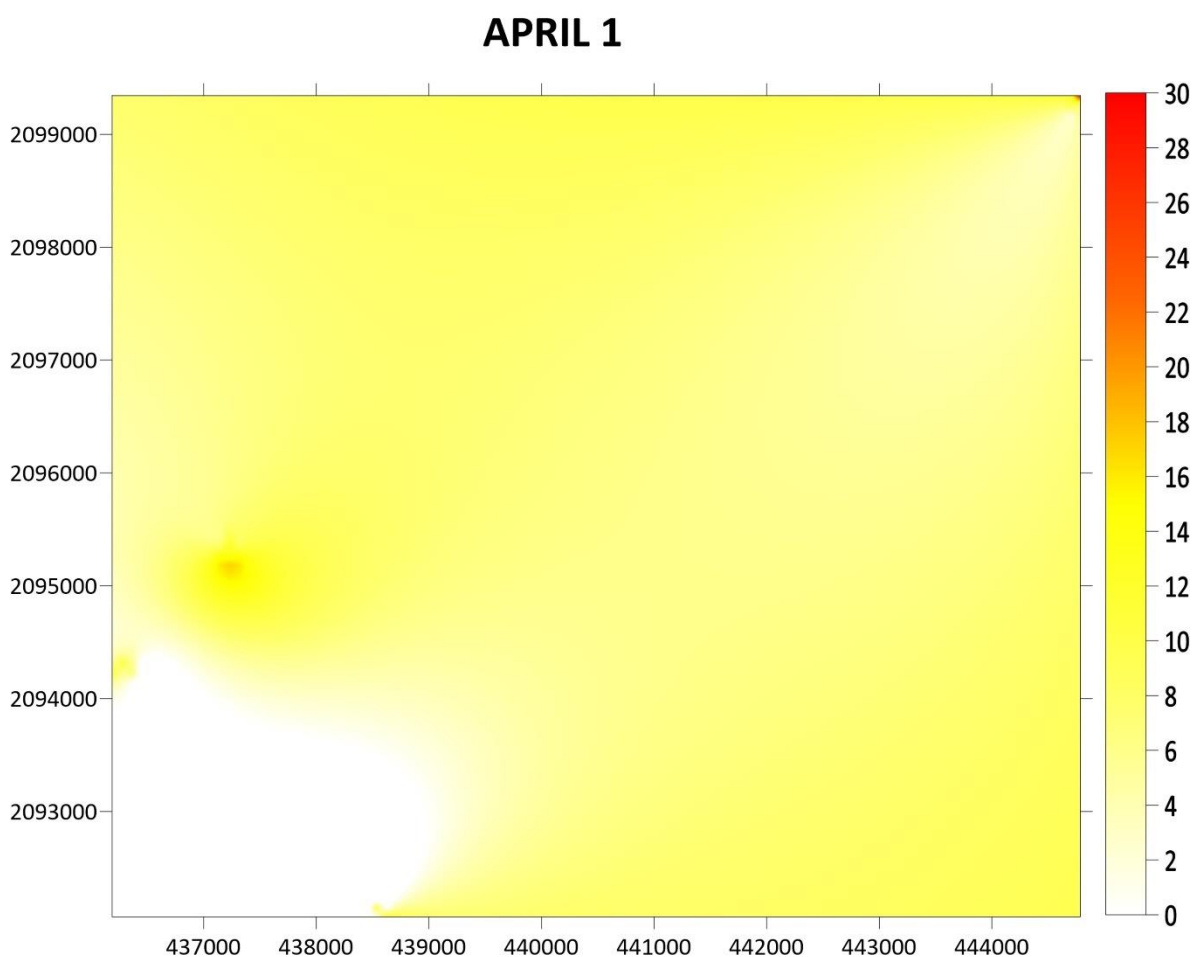
Fuente: propia.

La primera quincena de abril (**figura 31**) muestra la distribución del daño por antracnosis en la región, con una menor presencia de áreas afectadas en comparación con otros periodos.

Se identifican algunos puntos aislados con presencia de daño, principalmente en la parte inferior izquierda y en un pequeño sector del centro-izquierda, donde se

observan ligeras concentraciones en tonos más oscuros. La esquina superior derecha, aunque muestra algo de afectación, presenta una intensidad baja. Las temperaturas registradas, con valores entre 10 y 26 °C, pudieron influir en la propagación limitada del hongo.

Figura 31 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de abril de 2023

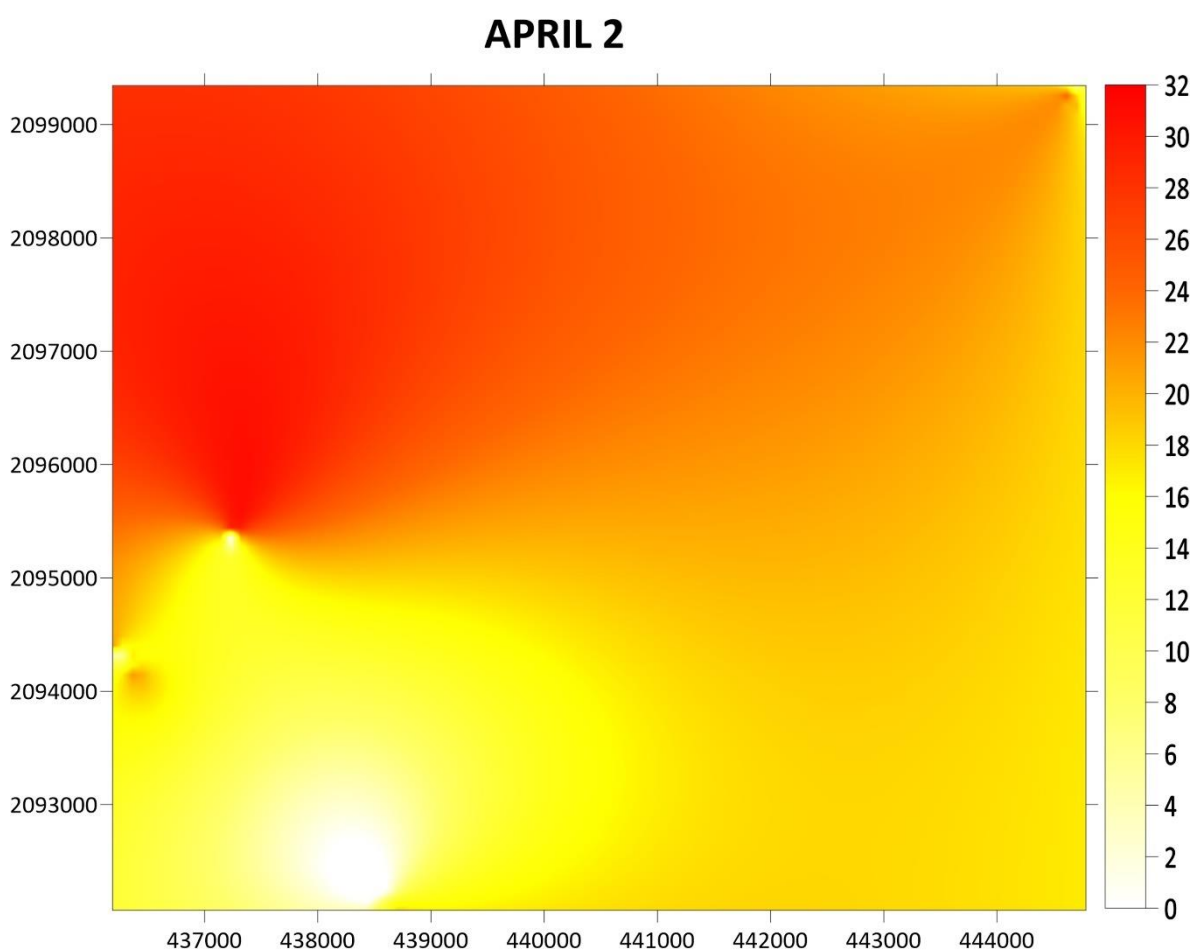


Fuente: propia.

En la **figura 32** la segunda quincena de abril, se observan varios focos, principalmente en el cuadrante inferior izquierdo y cerca del centro-izquierda. La transición de colores de amarillo a rojo en la parte superior y en el borde derecho muestra una propagación progresiva de la incidencia, aunque en menor intensidad

que en los focos más brillantes, sugiriendo etapas iniciales de infección o condiciones menos favorables, pero aún susceptibles. Por otro lado, las zonas de color amarillo claro en la parte inferior derecha y el centro-este del mapa representan áreas con menor incidencia. Dado el rango de temperatura de 11°C a 27°C.

Figura 32 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de abril de 2023

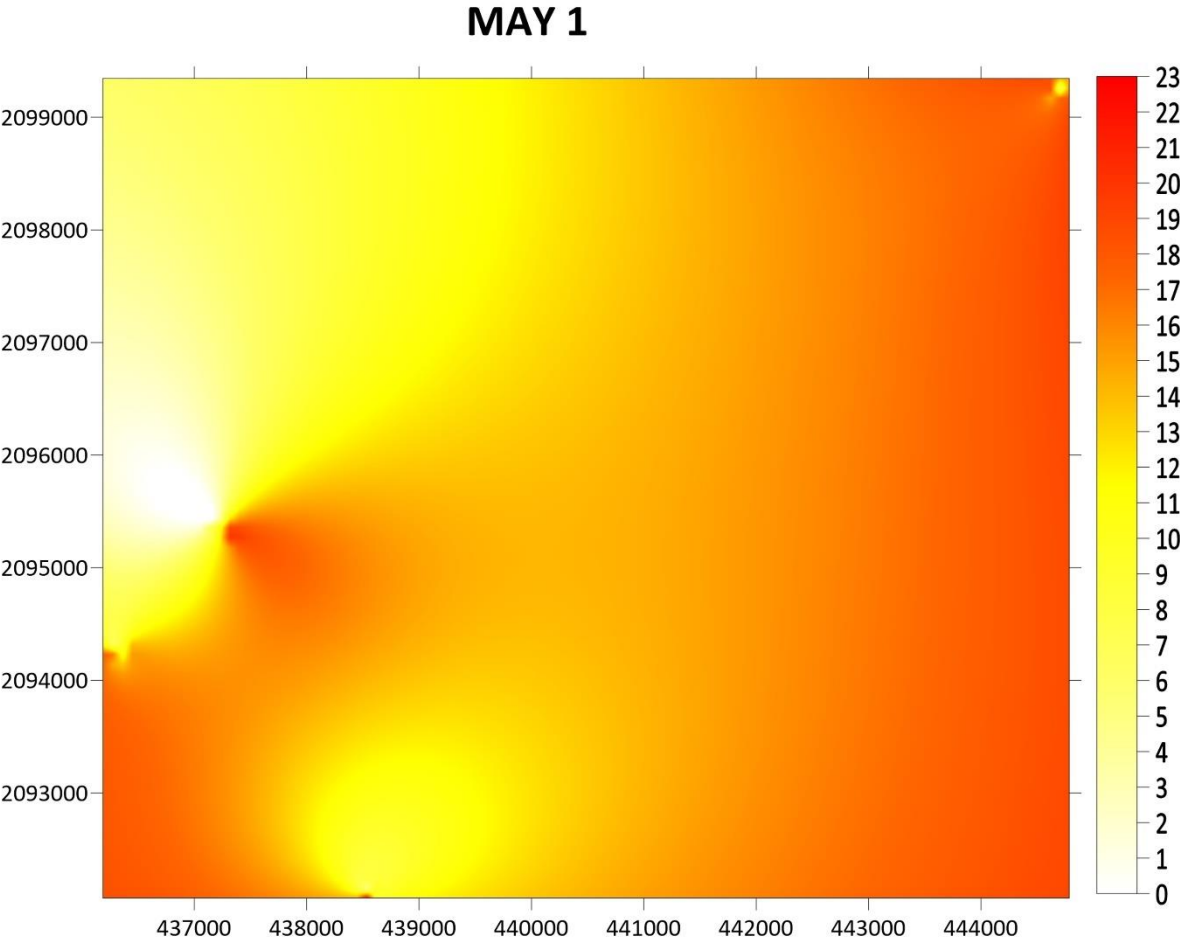


Fuente: propia.

La primera quincena de mayo (**figura 33**), se identificaron varios focos de daño. Con temperaturas de 12°C a 27°C, favorables para la enfermedad, se observa un foco principal en el cuadrante inferior izquierdo con rojo intenso, lo que indica daño

severo y alta propagación del hongo, otro foco secundario se encuentra en el centro-izquierda, mostrando una transición de rojo a anaranjado, lo que evidencia un daño significativo y expansión hacia el norte y las zonas con tonalidades anaranjadas y amarillas reflejan daños moderados a leves, donde las condiciones han sido menos favorables. Al comparar con la segunda quincena de abril, se observa una expansión de la enfermedad hacia el norte y el este, lo que destaca la necesidad de aplicar medidas de control en estas áreas para limitar la propagación de la antracnosis.

Figura 33 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de mayo de 2023

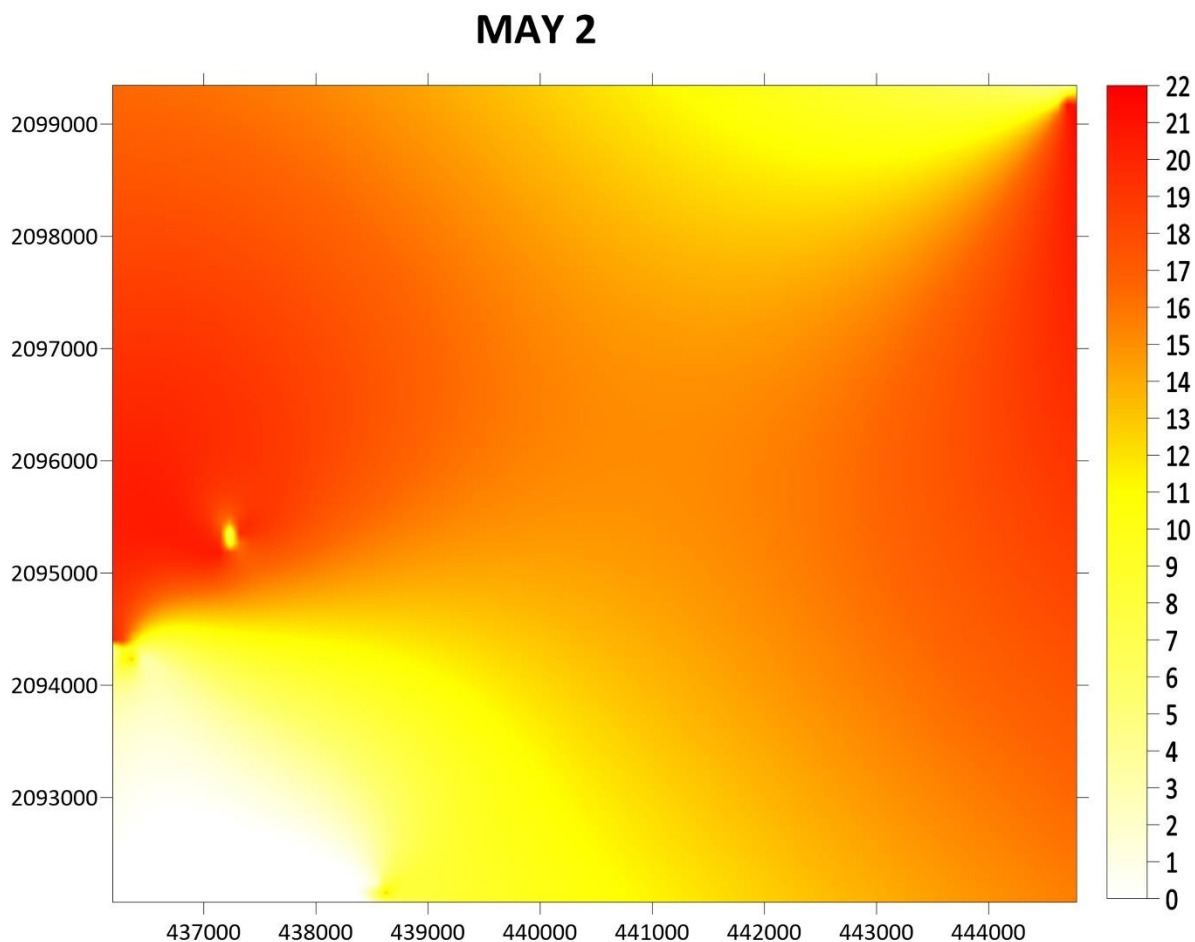


Fuente propia.

En la segunda quincena de mayo las temperaturas fluctuaron entre 13°C a 28°C, condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad.

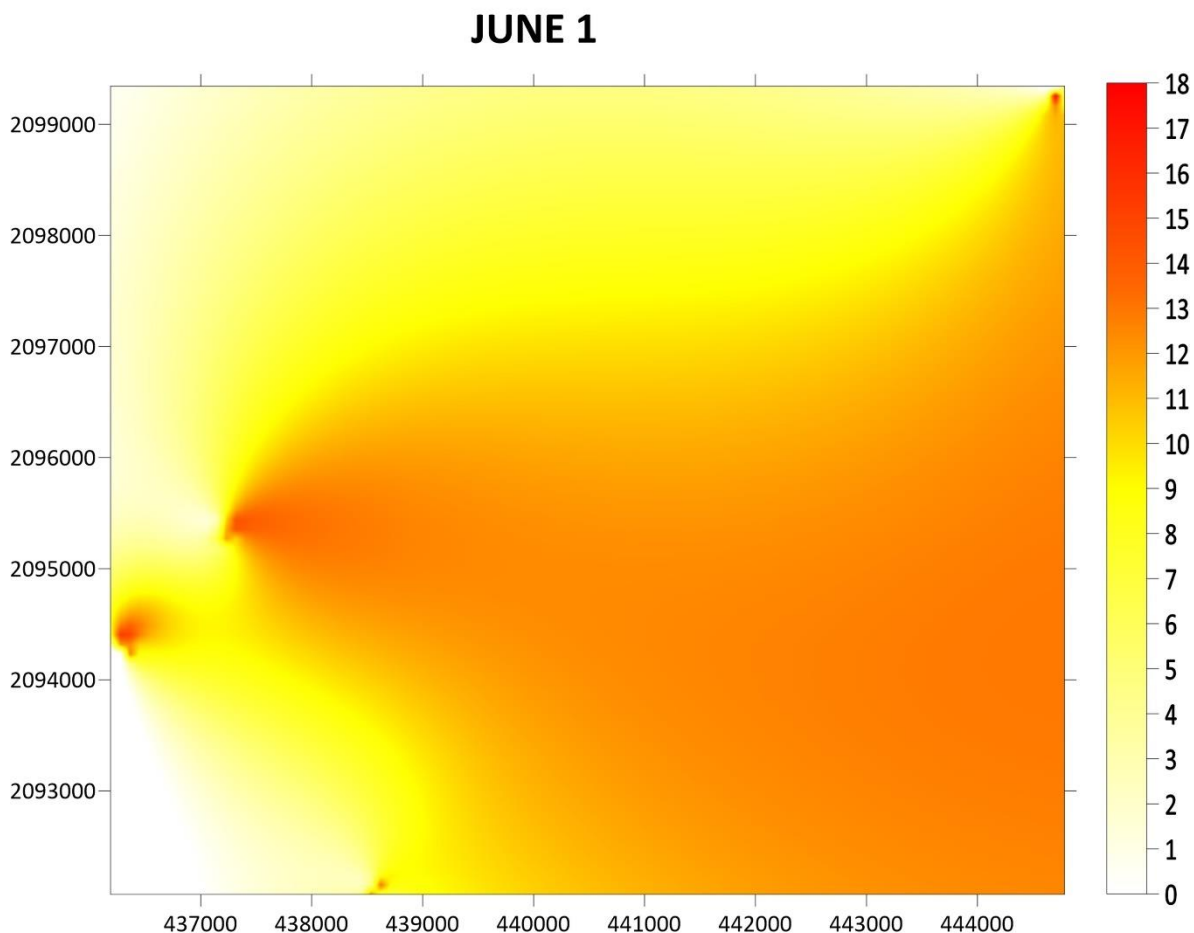
El foco del cuadrante superior izquierdo (**figura 34**) muestra un rojo intenso que se extiende hacia el este, sugiriendo una propagación activa hacia áreas menos afectadas. En el centro-izquierda, un foco más pequeño y concentrado indica un punto crítico de infección. Las zonas en tonos anaranjados y amarillos hacia el centro y el noreste presentan daños moderados a leves, reflejando una propagación en curso en esas direcciones. En comparación con la primera quincena de mayo, se observa una expansión de la enfermedad hacia el este y el noreste, lo que evidencia una tendencia de propagación. Esto resalta la necesidad de implementar medidas de control en las áreas afectadas para limitar el avance de la antracnosis.

Figura 34 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de mayo de 2023



En la **figura 35** la primera quincena de junio, con temperaturas entre 14°C y 25°C, se observan focos de daño, principalmente se encuentra en el cuadrante inferior izquierdo, mostrando alta incidencia y una leve expansión hacia el este. Otro foco pequeño y concentrado aparece al sur de esta área. En el cuadrante superior izquierdo, un foco anaranjado indica daño moderado, mientras que en la esquina superior derecha surge una pequeña área roja, sugiriendo una nueva infección. Las zonas amarillas en el centro y noreste reflejan daños leves, y el oeste y suroeste permanecen sin infección.

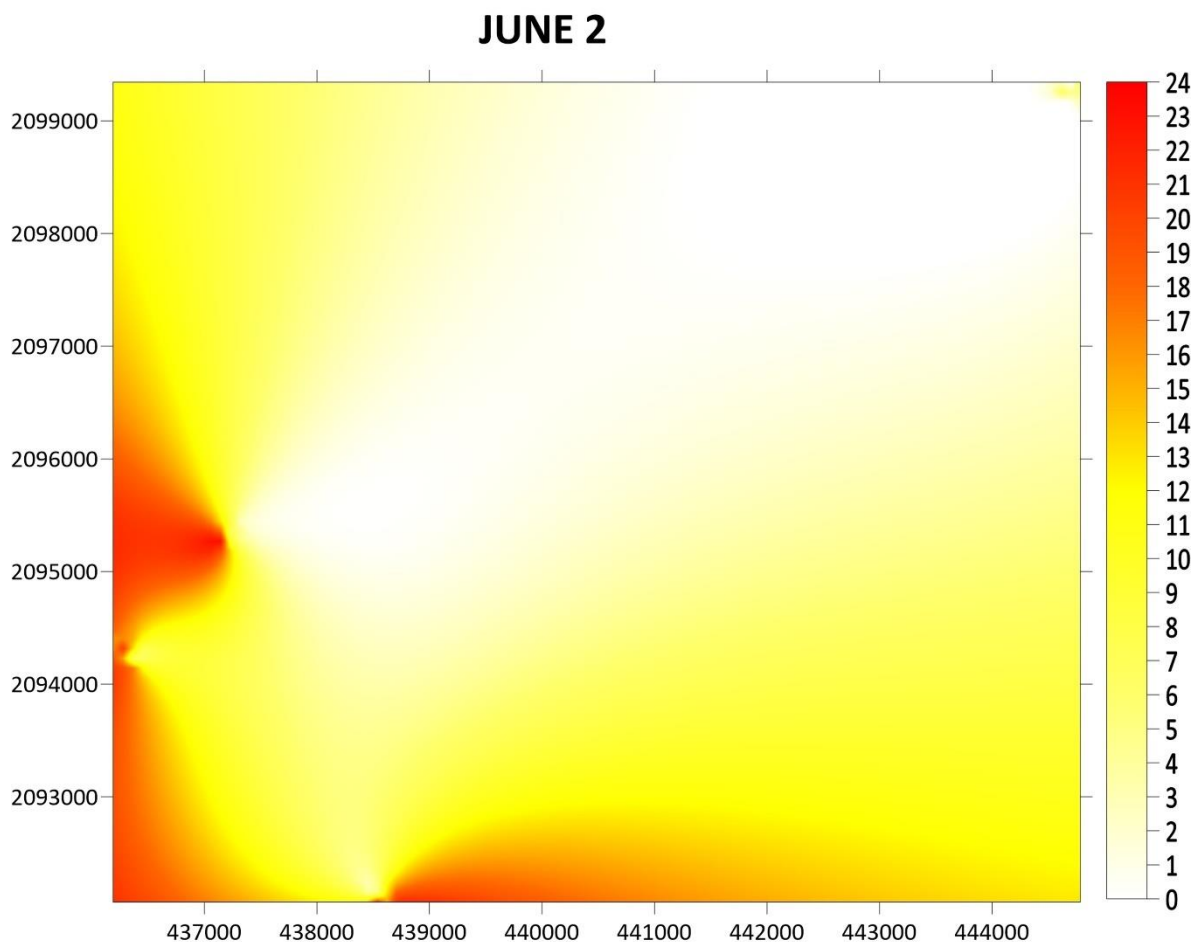
Figura 35 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de junio de 2023



Fuente: propia.

Durante la segunda quincena de junio se presentaron temperaturas entre 13°C y 24°C, (**figura 36**) se observan en el cuadrante inferior izquierdo, mostrando alta incidencia, pero confinada a una pequeña área roja, hacia el centro-oeste, hay manchas anaranjadas que indican daño moderado, mientras que las zonas amarillas alrededor sugieren afectación leve. La mayor parte del mapa, especialmente el noreste y el centro-este, aparece en blanco, indicando ausencia de infección.

Figura 36 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de junio de 2023

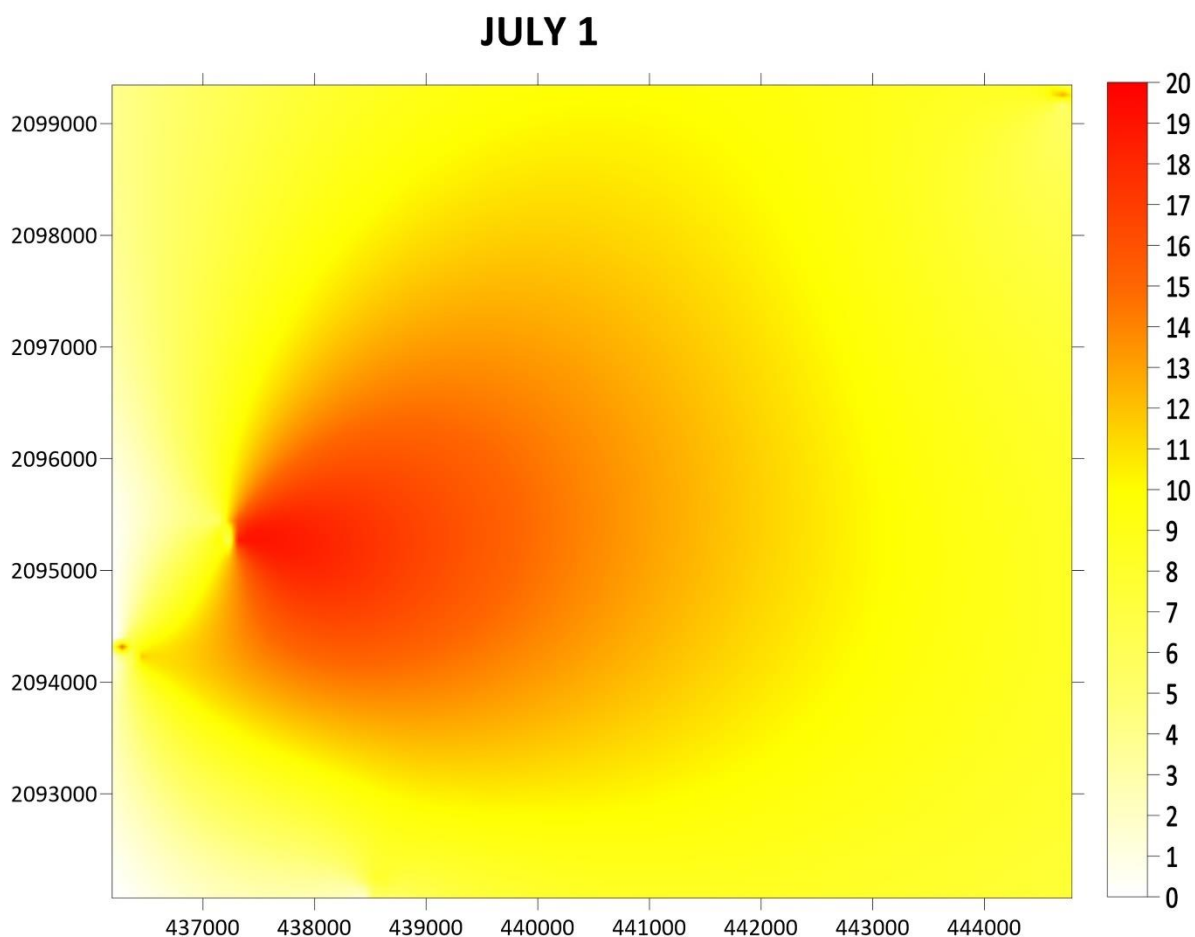


Fuente: propia.

Mientras que en la primera quincena de julio se registraron temperaturas que fluctuaron de 12°C y 23°C, en **figura 37** se observa un foco de daño significativo en el cuadrante suroeste, mostrando una amplia área roja que indica alta incidencia de infección. Este foco tiene una forma de abanico que se expande hacia el centro del mapa con tonos anaranjados, sugiriendo daño moderado. Las zonas amarillas alrededor de este núcleo reflejan afectación leve,

La forma de abanico sugiere una propagación influenciada por factores ambientales como el viento o la topografía local.

Figura 37 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de julio de 2023

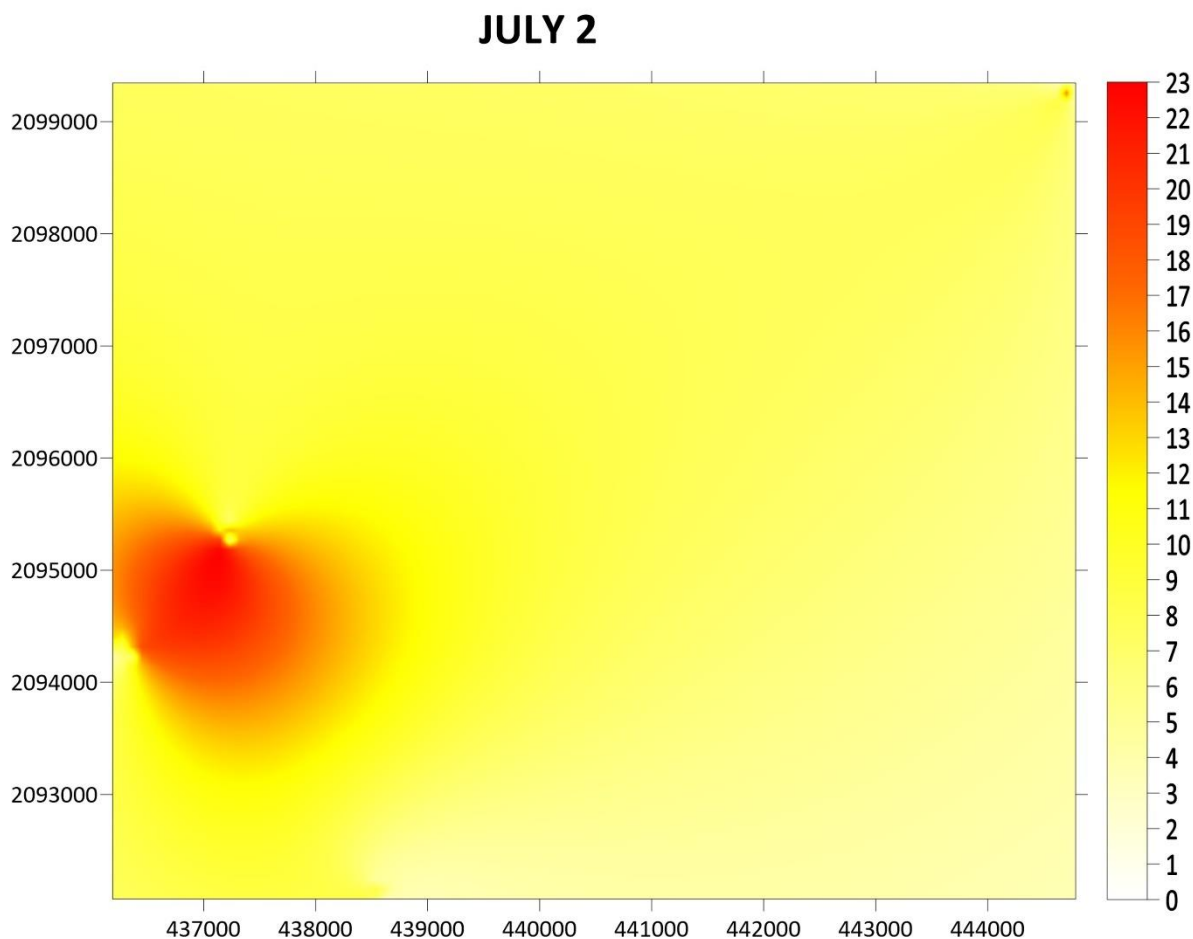


Fuente: propia.

Durante la segunda quincena de julio las temperaturas oscilan entre 11°C y 22°C.

En la **figura 38** se identifica un foco de daño significativo por antracnosis en el cuadrante suroeste caracterizado por un núcleo rojo intenso que indica una alta incidencia de infección este foco adopta una forma de abanico que se extiende hacia el noreste donde los tonos anaranjados y amarillos reflejan una disminución gradual del daño de moderado a leve las zonas más claras en dirección al este presentan una menor afectación mientras que el extremo noreste permanece prácticamente libre de infección.

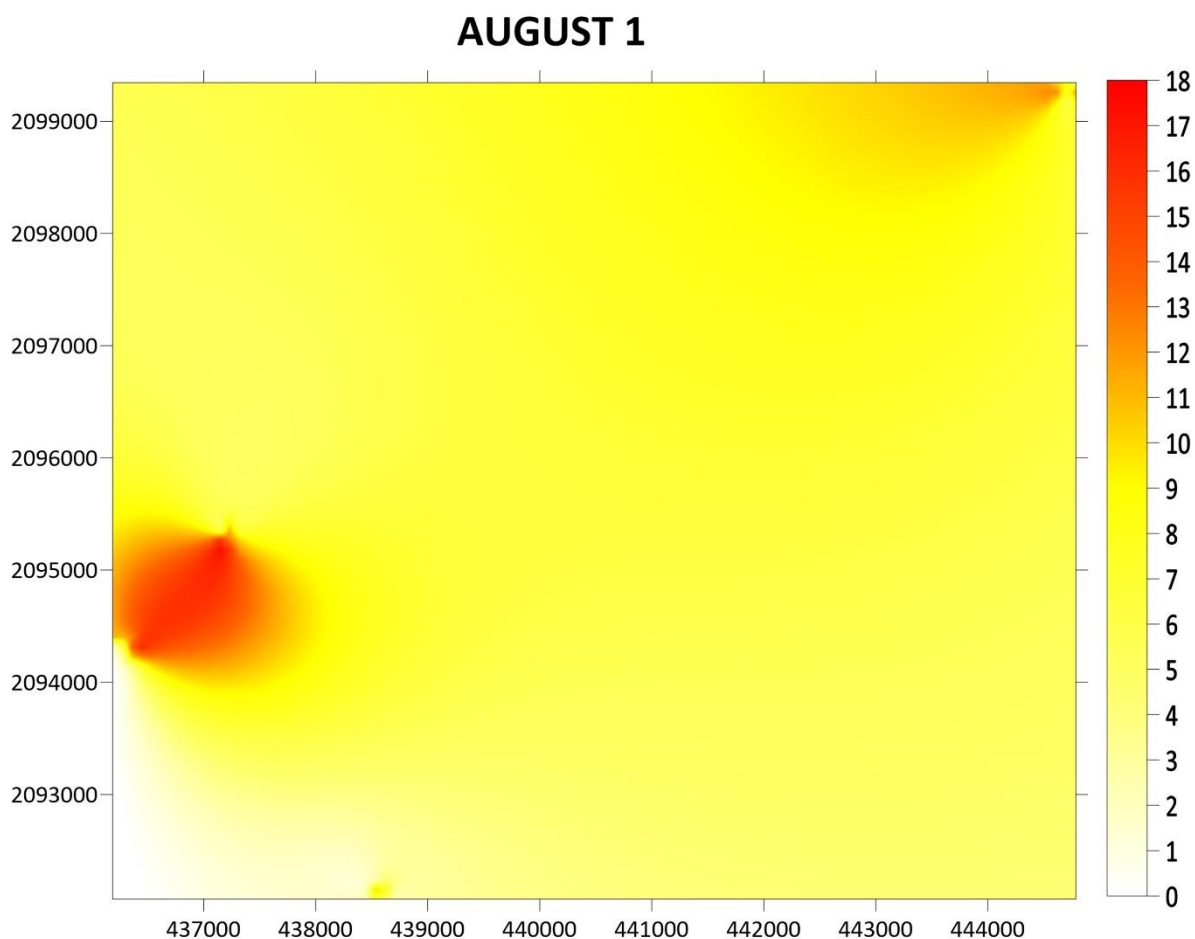
Figura 38 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de julio de 2023



Fuente: propia.

En la primera quincena de agosto (**figura 39**) se identifica un foco de daño significativo en el cuadrante suroeste con un núcleo rojo intenso que evidencia alta incidencia de infección extendiéndose en forma de abanico hacia el noreste donde los tonos anaranjados y amarillos reflejan una disminución del impacto de moderado a leve en el extremo noreste también aparece una pequeña zona afectada aunque con menor intensidad según el baremo de evaluación el rojo indica daño severo el anaranjado moderado y el amarillo leve la distribución muestra que la mayor afectación se concentra en el suroeste reduciéndose progresivamente hacia el noreste bajo temperaturas que oscilaron entre 11°C y 22°C.

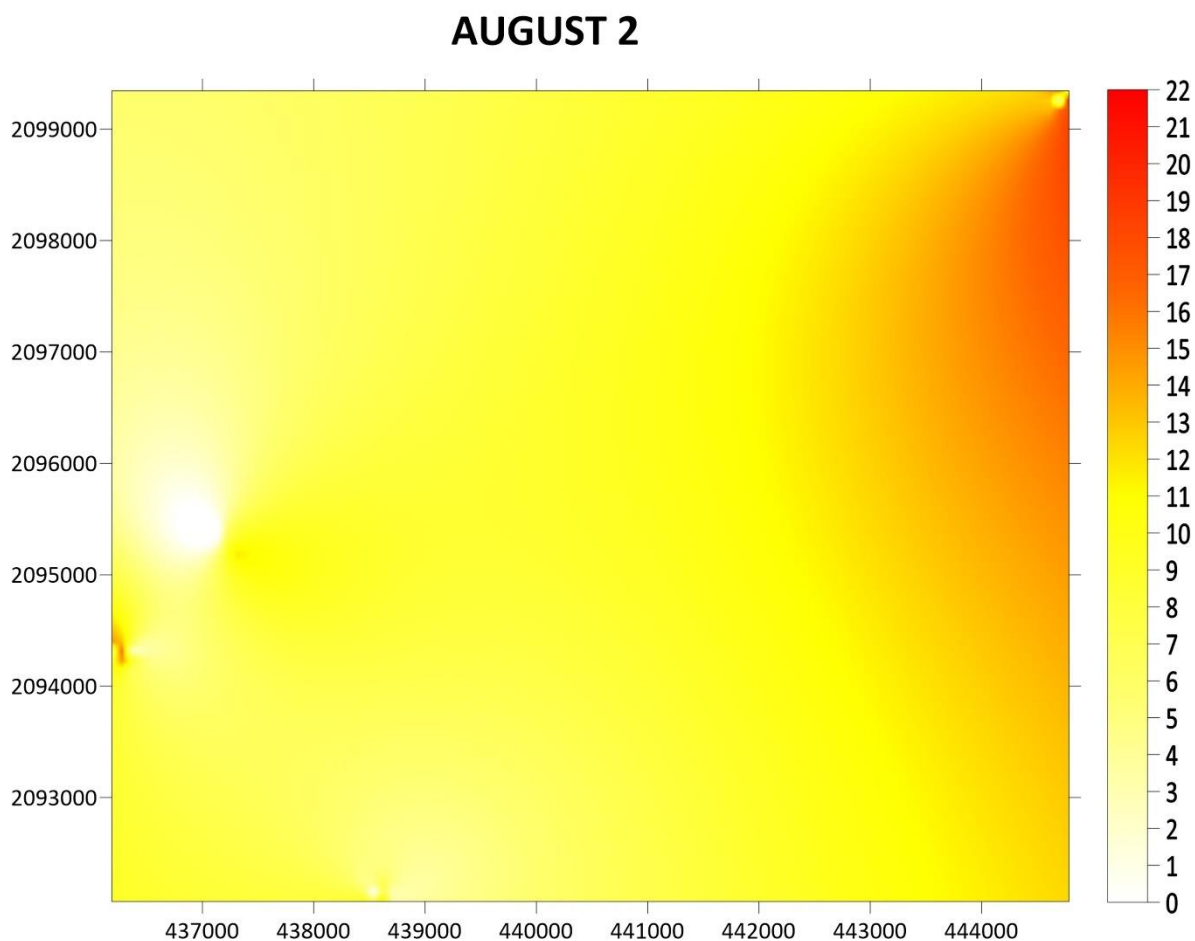
Figura 39 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de agosto de 2023



Fuente: propia.

Durante la segunda quincena de agosto se registraron temperaturas entre 10°C y 21°C, los focos de daño por antracnosis se presentan de forma dispersa y heterogénea (**figura 40**). En el extremo noreste, el daño aparece como una mancha compacta que parece extenderse hacia el suroeste, mientras que en la zona suroeste se observan pequeños focos aislados de forma circular o irregular.

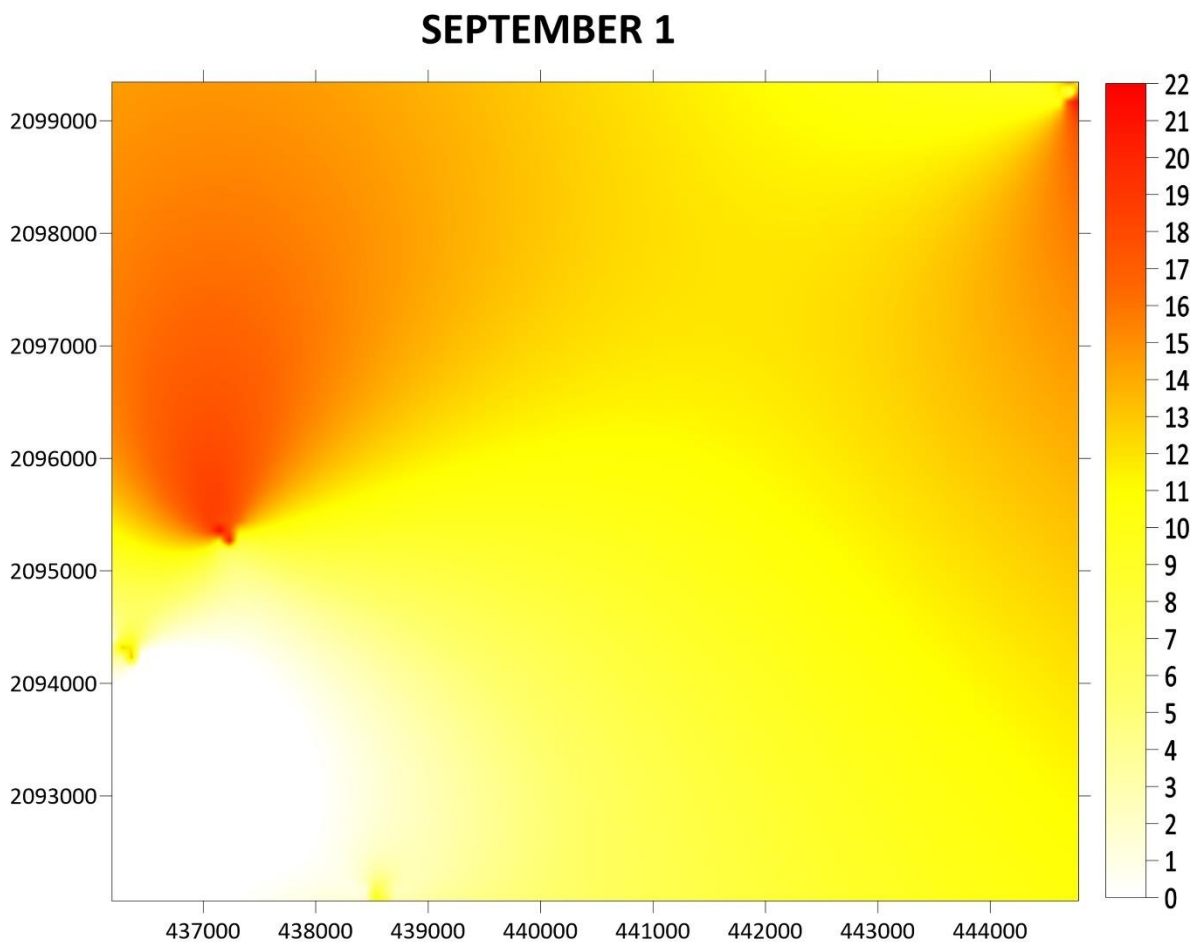
Figura 40 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de agosto de 2023



Fuente: propia.

Durante la primera quincena de septiembre, con temperaturas entre 10°C y 21°C, la **figura 41** muestra que los focos de daño por antracnosis se concentran principalmente en el sector noroeste, donde una intensa mancha roja indica un alto nivel de infección esta área afectada se extiende en forma alargada y difusa hacia el noreste, reduciendo su intensidad conforme avanza hacia el centro del mapa, además, en la esquina noreste se distingue un pequeño foco de daño moderado.

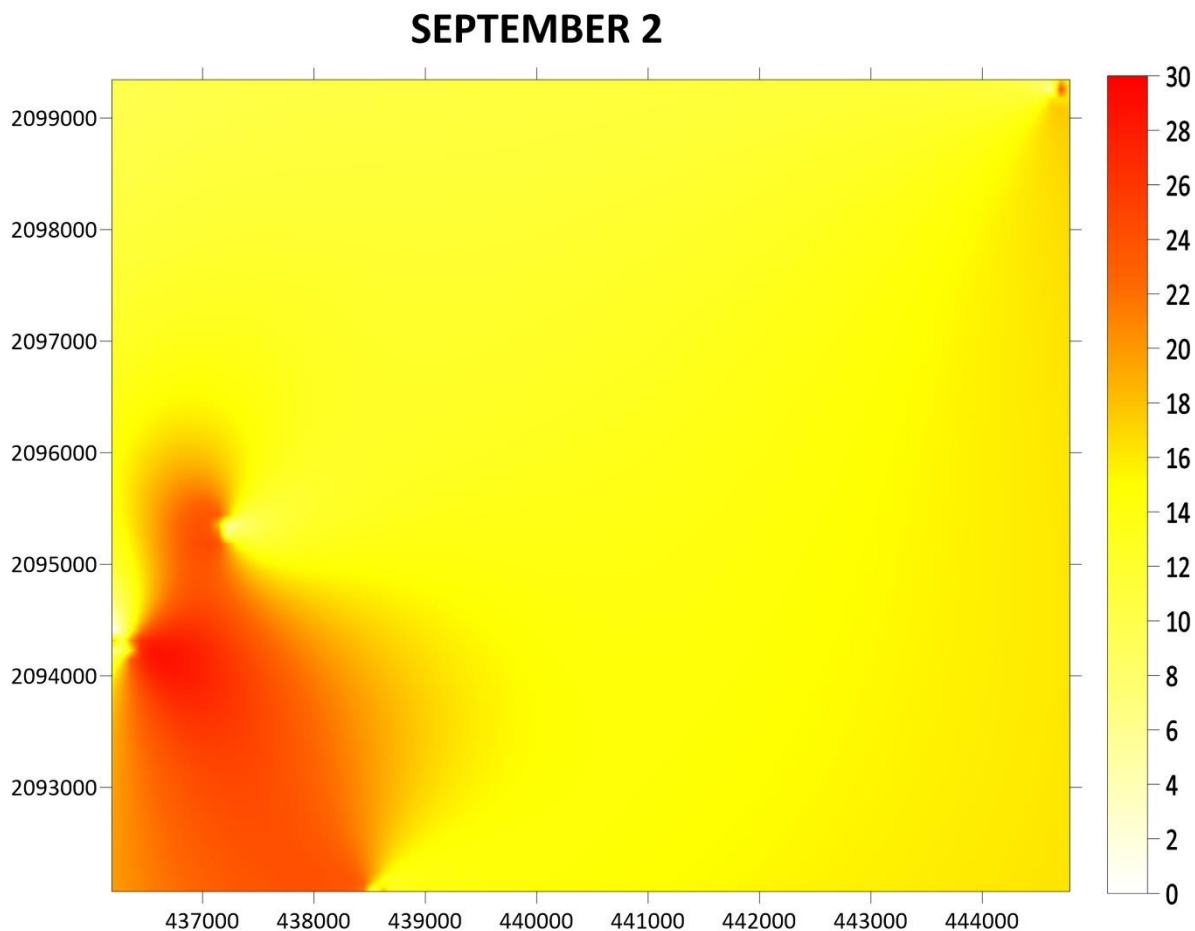
Figura 41 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de septiembre de 2023



Fuente: propia.

Figura 42, la segunda quincena de septiembre, los focos de daño por antracnosis se presentan principalmente en el sector suroeste, donde se observa una concentración intensa de color rojo, lo que indica un alto nivel de infección. Esta área afectada se extiende hacia el sureste de manera alargada y difusa, disminuyendo su intensidad hacia el centro del mapa. Además, se observa un pequeño foco de daño moderado en la parte superior del área afectada. La mayor parte del área muestra tonos amarillos, indicando un daño leve, mientras que las zonas en blanco reflejan ausencia de infección. Con temperaturas entre 9°C y 20°C.

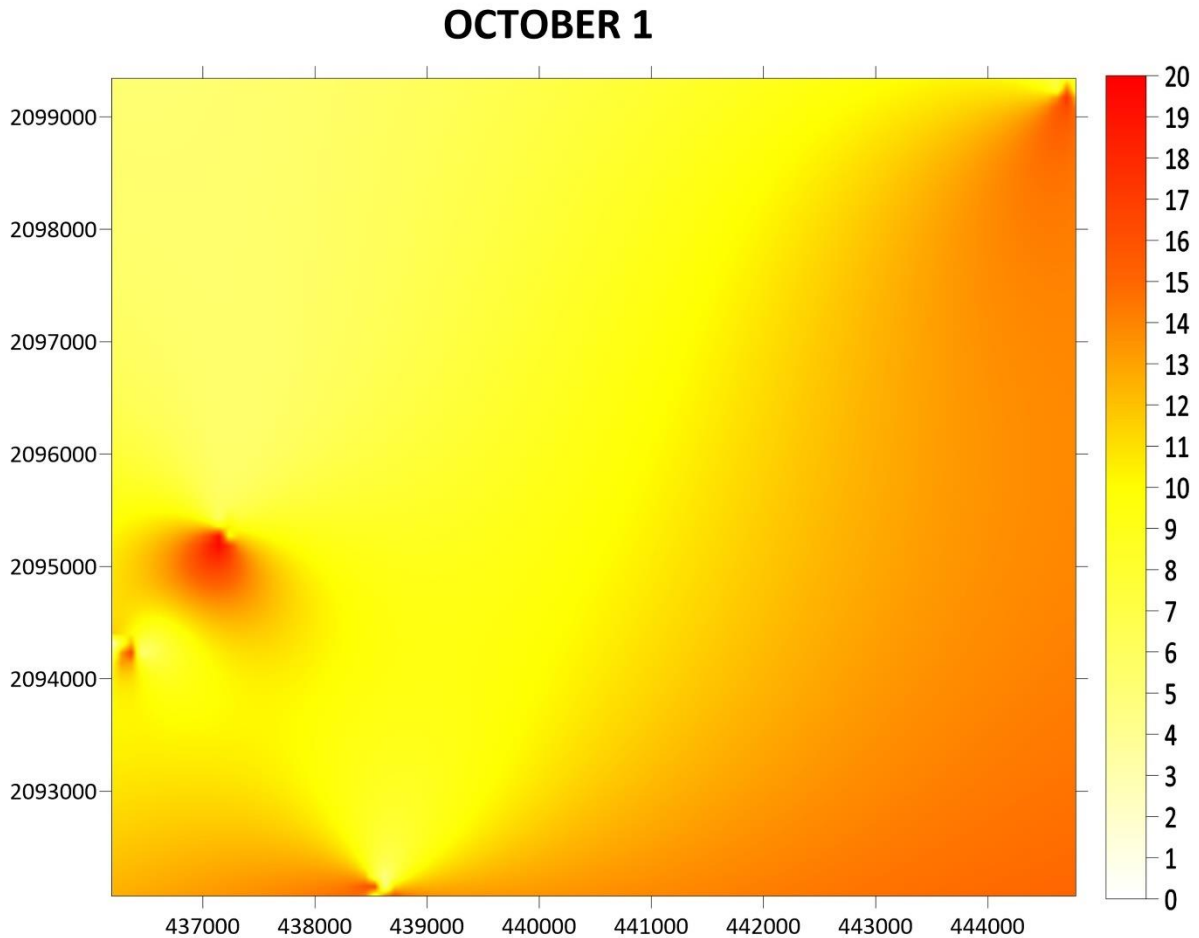
Figura 42 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de septiembre de 2023



Fuente: propia.

En la figura 43 con temperaturas entre 8°C y 20°C, los focos se localizan principalmente en el sector suroeste y sur del mapa. Se observa una concentración de color rojo intenso cerca del borde izquierdo, indicando un alto nivel de infección en esa área específica. Este foco se extiende hacia el sureste con una disminución gradual de intensidad. También hay un foco más pequeño hacia el centro-izquierda, mostrando una infección moderada. Además, en el extremo sur, cerca del centro, se observa otro punto de daño moderado que parece estar aislado. La mayor parte del área está en tonos amarillos, lo que indica niveles bajos de infección, mientras que las zonas en blanco muestran ausencia de daño.

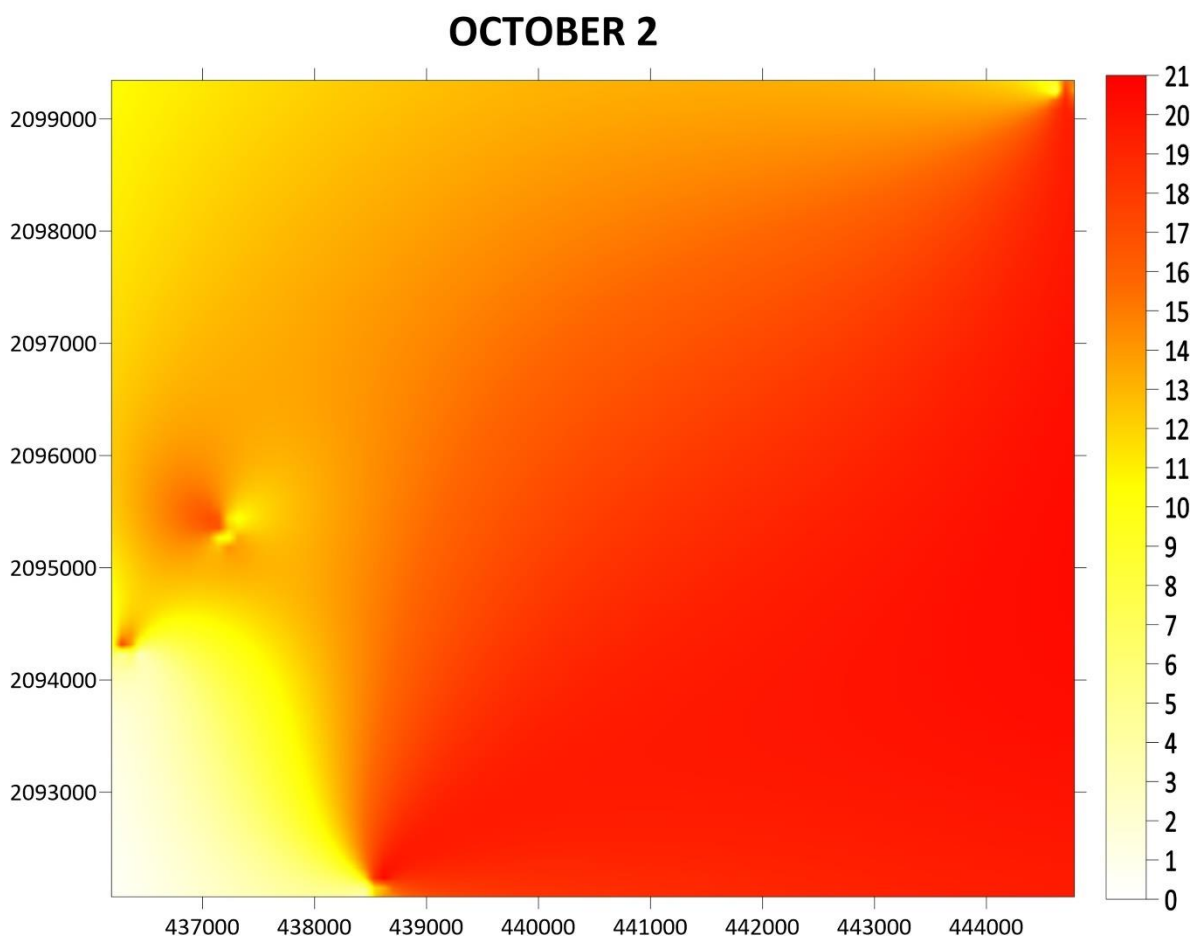
Figura 43 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de octubre de 2023



La segunda quincena de octubre (figura 44) se presentaron temperaturas entre 6°C y 19°C, se observa un avance significativo del daño por antracnosis en comparación con días anteriores. La mayor parte del área está cubierta por tonos rojos intensos, lo que indica un alto nivel de infección en la mayor parte de la región. Los focos más críticos se localizan en el sector sureste y noreste, donde el rojo es más pronunciado, sugiriendo condiciones altamente favorables para la propagación de la enfermedad. Además, en la parte suroeste, cerca del borde izquierdo, se mantiene un foco de infección que ha aumentado en extensión y severidad. Solo se

observan pequeñas zonas en tonos amarillos y blancos en el extremo suroeste, lo que indica niveles bajos o ausencia de infección.

Figura 44 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de octubre de 2023



Las temperaturas en la primera quincena de noviembre fueron entre 5°C y 18°C, se observa una disminución en la intensidad del daño por antracnosis en comparación con fechas anteriores. Aunque aún se presentan focos de infección, estos son menos extensos y severos. Los puntos más críticos (figura 45) se ubican en la región suroeste y en una pequeña área al noreste, donde se observan tonos rojos que indican niveles altos de infección. Sin embargo, en la mayor parte del mapa predominan los tonos amarillos y anaranjados, lo que sugiere niveles moderados a

bajos de daño. Además, se nota una dispersión menos marcada de los focos de infección, indicando una propagación más contenida de la enfermedad.

Figura 45 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de noviembre de 2023

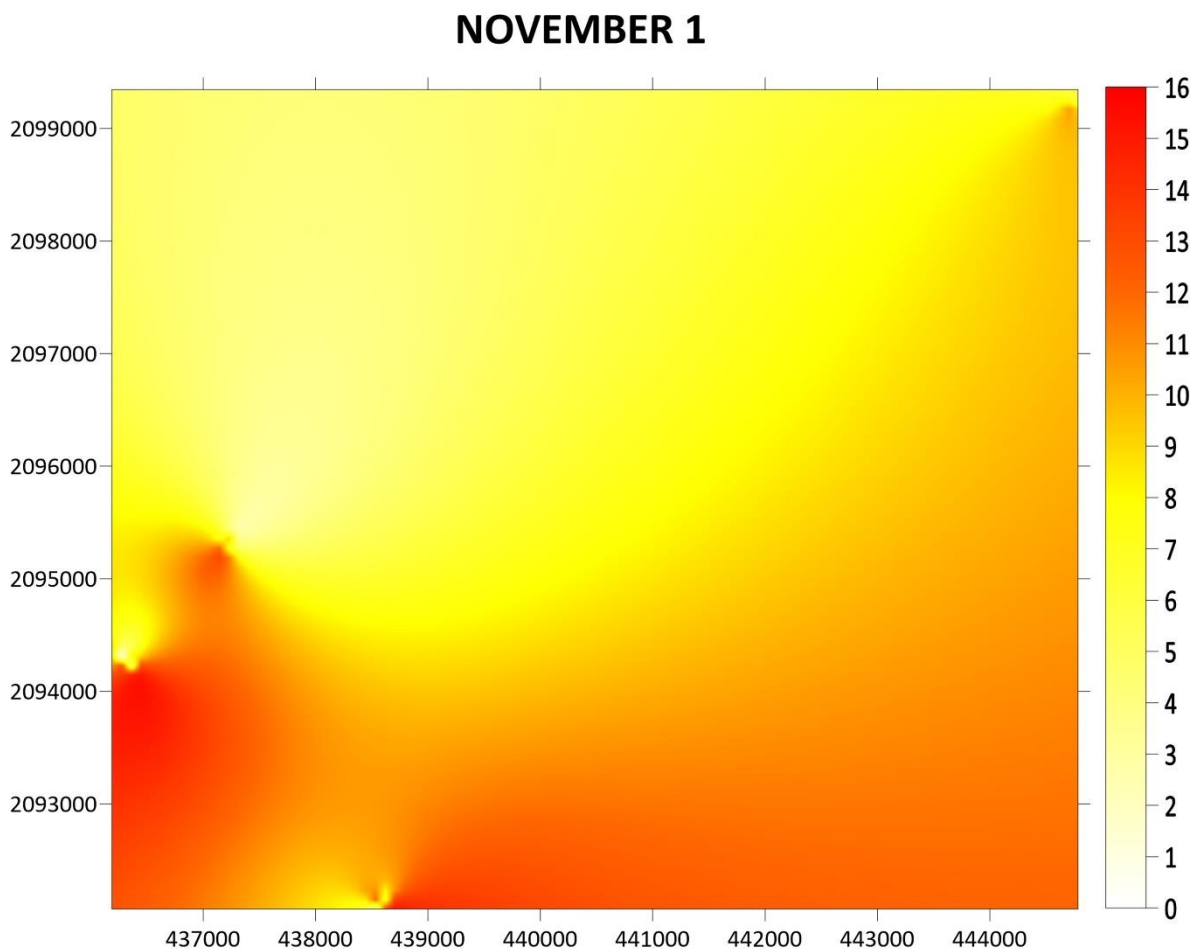


Figura 46, la segunda quincena de noviembre, con temperaturas entre 3°C y 17°C, se observa una reducción significativa en la extensión e intensidad del daño por antracnosis. La mayoría del área presenta tonos amarillos claros, indicando una baja o nula infección. Solo se identifican algunos focos aislados en el suroeste y en la región central-oeste, donde los tonos rojos sugieren presencia de daño, aunque de menor magnitud en comparación con fechas anteriores.

Los focos de infección se han reducido tanto en tamaño como en intensidad, lo cual podría estar relacionado con las temperaturas más bajas, que limitan la actividad y propagación del hongo. Además, la dispersión de la enfermedad parece estar más contenida, concentrándose únicamente en puntos específicos.

Figura 46 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de noviembre de 2023

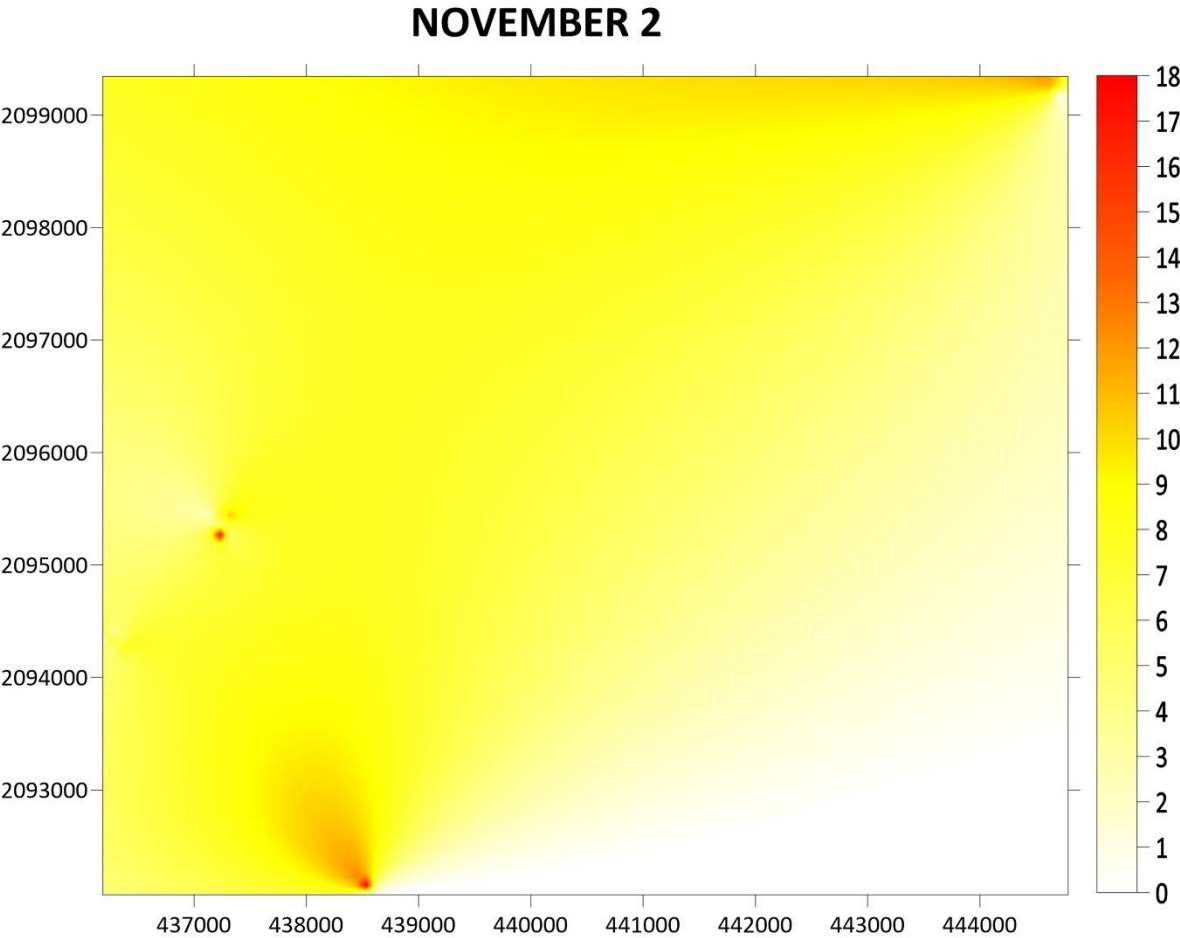


Figura 47 la primera quincena de diciembre, con temperaturas entre 2°C y 16°C, se observa un incremento significativo en la intensidad del daño por antracnosis en comparación con las fechas anteriores. La zona noroeste muestra una amplia área en tonos rojos intensos, indicando un alto nivel de infección. Esta región parece ser

el foco principal de propagación, afectando considerablemente la parte superior izquierda del mapa.

El gradiente de color se desplaza de rojo a amarillo hacia el sureste, lo que sugiere una disminución gradual de la infección en esa dirección. Sin embargo, el área central y oriental muestra una presencia moderada de antracnosis, con tonos naranjas y amarillos que indican niveles de infección de leves a moderados.

Figura 47 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la primera quincena de diciembre de 2023

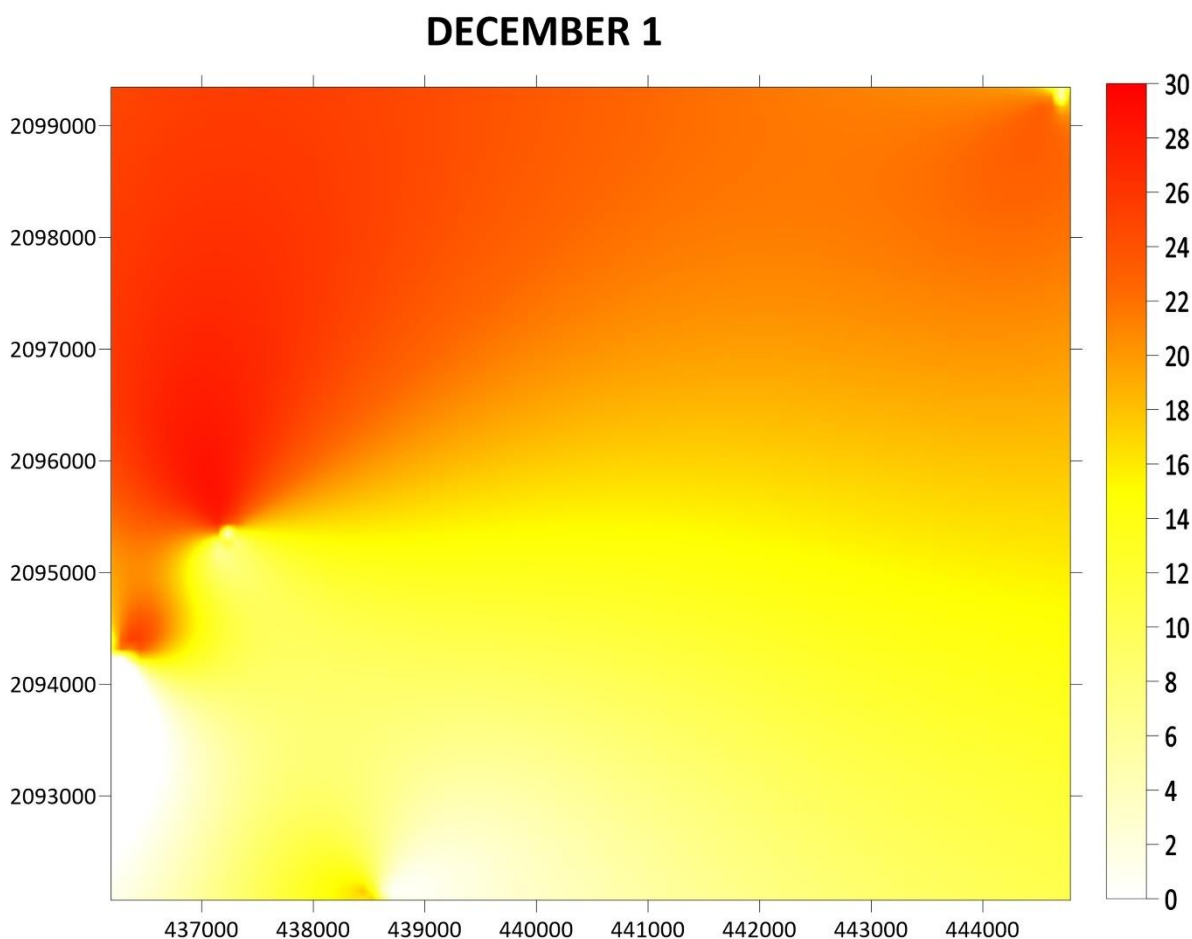
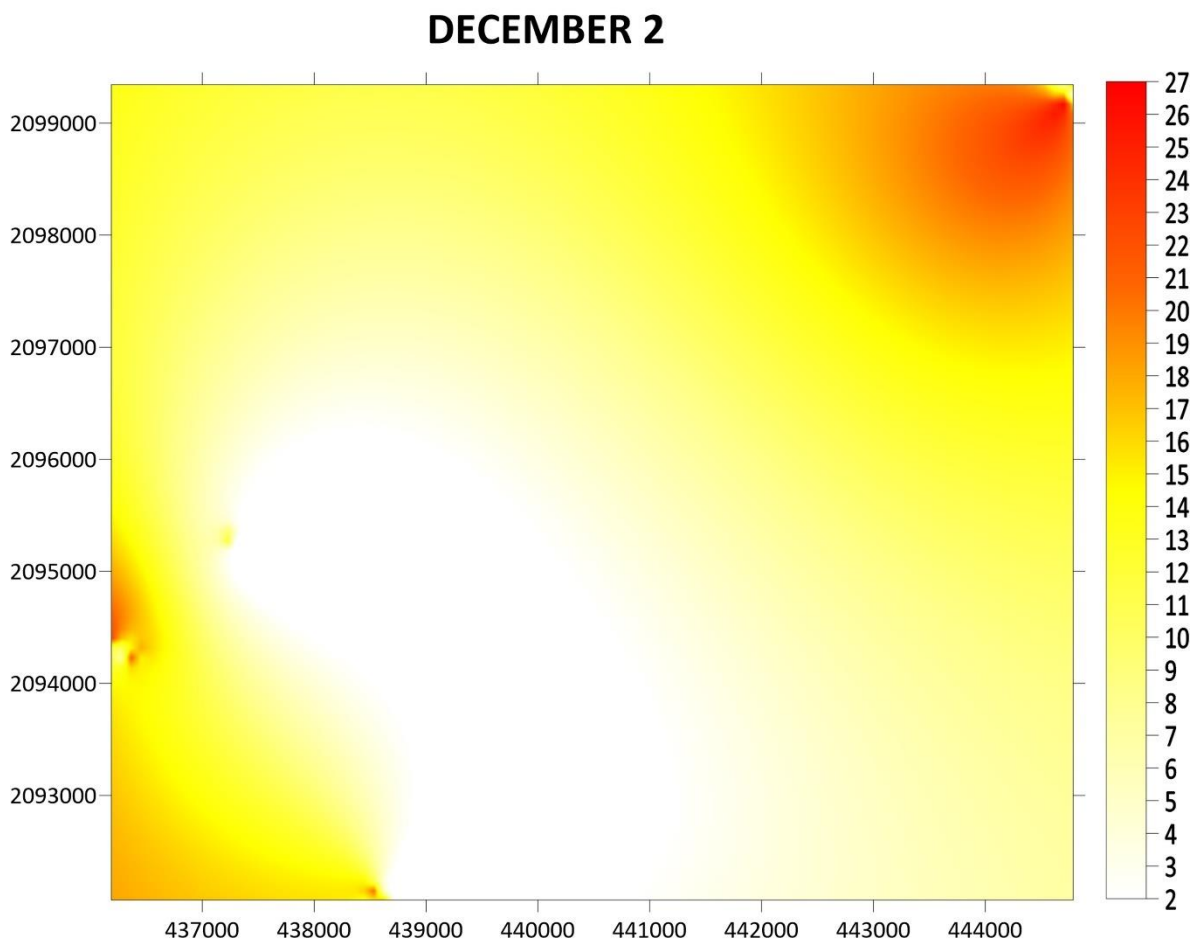


Figura 48, segunda quincena de diciembre, con temperaturas entre 1°C y 15°C, se observa una notable reducción en la intensidad del daño por antracnosis en

comparación con el 1 de diciembre. La región noroeste, que previamente mostraba altos niveles de infección, ahora presenta una disminución en la intensidad, aunque todavía se aprecian algunas áreas en tonos rojos en la esquina superior derecha, indicando focos residuales de alta infección.

El resto del mapa muestra una distribución mayoritariamente en tonos amarillos y algunos naranjas suaves, sugiriendo niveles de infección bajos a moderados. La zona central aparece menos afectada, lo que podría indicar una recuperación o una menor propagación del hongo en esa área.

Figura 48 Mapa de incidencia de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides*) en la segunda quincena de diciembre de 2023



La **tabla 1** proporcionó datos quincenales de incidencia de antracnosis, revelando variaciones en diferentes parámetros a lo largo del año muestreado. Los valores de las medias muestrales oscilaron entre 5.85 en la primera quincena de abril y 16.40 en la primera quincena de diciembre, lo que indicó que la enfermedad pudo haber sido más predominante en ciertos meses, especialmente hacia el final del año. Las temperaturas óptimas y los altos niveles de humedad son cruciales para la germinación de las esporas, lo que acelera la propagación de *C. gloeosporoides* durante los meses más cálidos y húmedos explica el incremento en la incidencia hacia finales del año (Singh y Deepankar 2020; Mansoor et al., 2023).

La varianza (**Tabla 1**), experimentó cambios significativos a lo largo del año, alcanzando en la primera quincena de diciembre un nivel alto de 50.11, lo que indica que la incidencia de antracnosis no era uniforme en todas las áreas. En marzo, en cambio, las variaciones fueron más bajas, lo que sugería que el patógeno fue menos constante en esos meses. Las bajas temperaturas y la alta humedad generan una mayor variabilidad en la incidencia de la enfermedad, afectando así a distintas áreas; cuando el clima se estabiliza el crecimiento del patógeno se vuelve más predecible y uniforme, lo que reduce las diferencias entre las zonas afectadas (Tsai et al., 2022).

Además, en todos los casos, el nugget fue cero (**Tabla 1**), lo que indica que no hay variabilidad aleatoria en los datos que no pudiera ser explicada por el modelo. Rivera-Martínez et al., (2020) mencionan que un efecto pepita de cero en los modelos ajustados indica que el muestreo fue adecuado y el error mínimo, lo que da a los modelos un 98% de confiabilidad.

La dependencia espacial de la antracnosis se ubicó en un rango del semiovariograma de 17.19 a 23.03 metros (m). Los rangos superiores a 100 m en el análisis de Vega-Blancas (2022) indican una fuerte dependencia espacial, sugiriendo que, a mayor distancia, hay un mayor grado de homogeneidad entre los valores; en cambio, un rango menor refleja variabilidad a una escala más pequeña,

donde los puntos de muestreo cercanos presentan severidades similares, mientras que un rango mayor muestra diferencias más marcadas entre puntos distantes.

Tabla 1 Parámetros de los modelos ajustados a los semivariogramas de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporoides*) en aguacate.

Sampling	Sample Mean	Sample variance	Model	Nugget	Range	Plateau	Nugget/plateau (%)	Spatial Dependence
January 1	11.27	8.99	Gaussian	0	19.01	38.64	0	High
January 2	7.64	17.35	Gaussian	0	21.93	32.76	0	High
February 1	8.11	13.79	Gaussian	0	20.81	26.08	0	High
February 2	7.90	15.00	Gaussian	0	22.08	32.50	0	High
March 1	7.91	3.04	Gaussian	0	20.15	45.50	0	High
March 2	14.93	7.03	Gaussian	0	20.16	50.54	0	High
April 1	5.85	9.31	Gaussian	0	19.84	76.54	0	High
April 2	20.24	36.92	Gaussian	0	19.84	90.16	0	High
May 1	13.64	16.60	Gaussian	0	19.84	50.81	0	High
May 2	13.96	20.07	Gaussian	0	20.48	63.36	0	High
June 1	9.09	14.04	Gaussian	0	18.88	40.74	0	High

June 2	5.63	28.01	Gaussian	0	17.19	55.41	0	High
July 1	9.98	10.30	Gaussian	0	20.80	39.98	0	High
July 2	7.93	8.67	Gaussian	0	20.48	33.67	0	High
August 1	6.34	4.63	Gaussian	0	19.20	42.24	0	High
August 2	9.05	9.68	Gaussian	0	21.76	59.85	0	High
September 1	10.14	21.38	Gaussian	0	20.48	61.44	0	High
September 2	14.84	11.45	Gaussian	0	20.48	73.14	0	High
October 1	10.32	8.11	Gaussian	0	18.24	77.16	0	High
October 2	15.80	17.01	Gaussian	0	19.52	53.40	0	High
November 1	8.29	8.26	Gaussian	0	19.65	27.82	0	High
November 2	5.41	8.93	Gaussian	0	23.03	30.60	0	High
December 1	16.40	50.11	Gaussian	0	19.84	64.87	0	High
December 2	8.25	28.91	Gaussian	0	21.49	66.41	0	High

En la **tabla 2** se detallan los resultados obtenidos del porcentaje de la superficie infectada que varió a lo largo del año, con valores fluctuando entre 69 % y 99 %, por otro lado, la superficie no dañada presentó valores que oscilaron entre 3 % y 27 %. El porcentaje de superficie afectada está influenciado por varios factores como la alta humedad, las temperaturas moderadas, las prácticas de manejo, la densidad

de plantas, el manejo fitosanitario deficiente, la falta de ventilación y la mala poda, lo que contribuye a una mayor extensión de la infestación, siendo más frecuente en zonas con condiciones desfavorables (Tapia-Rodríguez et al., 2020; Figueroa-Figueroa et al., 2023).

Tabla 2 Porcentaje de superficie infectada y no infectada por antracnosis (*Colletotrichum gloeosporoides*) en aguacate.

Sampling	% Infectada	% No infectada
January 1	97	3
January 2	89	11
February 1	96	4
February 2	85	15
March 1	99	1
March 2	99	1
April 1	83	17
April 2	90	10
May 1	92	8
May 2	87	13
June 1	84	16
June 2	69	31
July 1	89	11
July 2	98	2
August 1	90	10
August 2	92	8
September 1	86	14
September 2	99	1
October 1	99	1
October 2	92	8
November 1	96	4
November 2	77	23

December 1	89	11
December 2	73	27

La agricultura de precisión aplicada a la protección de cultivos permite una gestión específica y optimizada de las necesidades agronómicas de cada zona del terreno, contribuyendo a la reducción de pérdidas y a la detección temprana de plagas y enfermedades. A través de tecnologías avanzadas, como sensores multiespectrales, drones de monitoreo equipados con cámaras de alta resolución, sistemas de posicionamiento geoespacial y algoritmos de Machine Learning, se obtiene información precisa y en tiempo real sobre el estado fenológico y fitosanitario de los cultivos. Esta información posibilita la aplicación localizada de insumos agrícolas como agua, pesticidas y fertilizantes, optimizando su uso y evitando excesos. Al reducir la cantidad de insumos y mejorar la eficiencia en su aplicación, se incrementa la productividad y rentabilidad del cultivo, al tiempo que se minimiza el impacto ambiental, favoreciendo así una gestión agrícola más sostenible y eficiente en términos ecológicos y económicos (De Martí 2018; Pino 2019; Ramírez-Gómez 2020).

VIII. OTROS RESULTADOS

Como resultado de la investigación, se obtuvo información clave para la elaboración del artículo científico **"INCIDENCE OF ANTHRACNOSE IN AVOCADO CROP USING GEOSTATISTICAL TECHNIQUES IN TENANCINGO, STATE OF MEXICO"**. Este fue enviado a la revista *Chilean Journal of Agricultural Research*, donde actualmente se encuentra en proceso de revisión para su posible publicación. Su contenido aporta al conocimiento sobre la distribución espacial de la antracnosis en aguacate y su manejo en zonas productoras.



CHILEAN JOURNAL
of AGRICULTURAL RESEARCH

Chillán, Chile, November 13, 2024

Mister/Miss

Jose Francisco Ramirez Davila
Universidad Autonoma del Estado de Mexico
Toluca
Mexico

Dear author:

Chilean Journal of Agricultural Research has received on November 13, 2024; the manuscript **Incidence of anthracnose in avocado crop using geostatistical techniques in Tenancingo, State of Mexico**, of the author(s) **Claudia Trujillo-Aguilar, Jos? Francisco Ram?rez-D?vila, Alfredo Ruiz-Orta, Atenas Tapia-Rodr?guez, Fidel Lara-V?zquez, Jordi Izquierdo-Figarola**. We have assigned it the code **CJAR240530**, which should be used for any further request.

Kind regards,



Pablo Undurraga D.
Editor

Chilean J. Agricultural Research

Instituto de
Investigaciones
Agropecuarias
Ministerio de Agricultura

INIA Quilamapu: Avda Vicente M?ndez 515, Chill?n. Casilla 428
Tel.: +56 42 220 6780

**INCIDENCE OF ANTHRACNOSE IN AVOCADO CROP USING
GEOSTATISTICAL TECHNIQUES IN TENANCINGO, STATE OF MEXICO**

**INCIDENCIA DE ANTRACNOSIS EN EL CULTIVO DE AGUACATE USANDO
TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS EN TENANCINGO, ESTADO DE MÉXICO**

**Claudia Trujillo-Aguilar¹, Alfredo Ruiz-Orta¹, José Francisco Ramírez-Dávila^{1*},
Atenas Tapia-Rodríguez² y Fidel Lara-Vazquez¹**

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Toluca, Estado de México, México.

²Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero, Villa Guerrero, Estado de México, México.

*Corresponding author: jframirezd@uaemex.mx

SUMMARY

Anthracnose, caused by *Colletotrichum gloeosporioides*, represents a serious threat to avocado cultivation in Mexico, with post-harvest losses of up to 40 %. The aim of this study was to determine the spatial distribution of the incidence of this disease in Tenancingo, State of Mexico, using geostatistical techniques to assist producers in its management. Sampling was carried out in 200 Hass avocado trees, collecting bi-weekly data for one year. Samples were analysed using ordinary kriging and semivariograms, fitted to theoretical models (spherical, Gaussian and exponential) that revealed the spatial variability of the disease. The results showed a high spatial dependence, with infection values between 69 % and 99 %, and non-

infected areas between 3 % and 27 %. During warm 25-30 °C and humid months, incidence levels increased significantly, while in cold periods they decreased, confirming the impact of environmental conditions on the spread of the pathogen. The maps generated allow the visualisation of critical areas of infection, facilitating the implementation of specific control measures. The application of geostatistical techniques in precision agriculture is effective in identifying the spatial distribution of anthracnose, contributing to a more efficient management of the disease and reducing economic losses, providing farmers with tools to improve decision making in avocado crop management, promoting more sustainable agricultural practices.

Index words: *Colletotrichum gloeosporioides*, gaussian, ordinary kriging, semiovariogram, spatial dependence.

RESUMEN

La antracnosis, causada por *Colletotrichum gloeosporioides*, representa una grave amenaza para el cultivo de aguacate en México, con pérdidas de hasta un 40 % en la poscosecha. Este estudio tuvo como objetivo determinar la distribución espacial de la incidencia de esta enfermedad en Tenancingo, Estado de México, utilizando técnicas geoestadísticas para ayudar a los productores en su gestión. Se realizó un muestreo en 200 árboles de aguacate variedad Hass, recolectando datos quincenales durante un año. Las muestras se analizaron mediante krigeado ordinario y semivariogramas, ajustados a modelos teóricos (esférico, gaussiano y exponencial) que revelaron la variabilidad espacial de la enfermedad. Los resultados mostraron una dependencia espacial alta, con valores de infección entre 69 % y 99 %, y áreas sin infección entre 3 % y 27 %. Durante los meses cálidos 25-30 °C y húmedos, los niveles de incidencia aumentaron significativamente, mientras que en los periodos fríos disminuyeron, confirmando el impacto de las condiciones ambientales en la propagación del patógeno. Los mapas generados permiten visualizar las zonas críticas de infección, facilitando la implementación de medidas de control específicas. La aplicación de técnicas geoestadísticas en la agricultura de precisión es efectiva para identificar la distribución espacial de la antracnosis,

contribuyendo a un manejo más eficiente de la enfermedad y reduciendo pérdidas económicas, ofreciendo a los agricultores herramientas para mejorar la toma de decisiones en el manejo del cultivo de aguacate, promoviendo prácticas agrícolas más sustentables.

Palabras clave: *Colletotrichum gloeosporoides*, dependencia espacial, gaussiano, krigado ordinario, semiovariograma.

INTRODUCTION

Avocado cultivation in Mexico benefits from its weather conditions, which has boosted the agricultural sector and allowed the country to increase its share of the world market significantly (FAO, 2020). In 2022, the growth in production per hectare (ha) has positioned the State of Mexico as the third largest national producer of avocado, with a production of 128,000 tonnes (t) (SIAP, 2023).

Anthrachnose (*Colletotrichum gloeosporoides*), is one of the most devastating diseases affecting avocado cultivation, especially during storage and marketing, generating economic losses of up to 40 % (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2021). In the postharvest stage, the pathogen can affect between 20 % and 80 % of the harvest, deteriorating the quality of the fruit (Herrera-González *et al.*, 2024).

C. gloeosporioides becomes established on the plant and begins to show symptoms characterised by multi-coloured sunken spots on leaves, stem and fruit, which often increase in size causing the infected tissues to wilt and subsequently die (De Silva *et al.*, 2017).

The fungus thrives in moist and warm conditions, which facilitates its spread through infected seeds, rain splash and wet winds, while germination and infection occur at moderate temperatures, between 25 and 30°C (Sharma and Kulshrestha, 2015; Guédez *et al.*, 2015).

Precision agriculture uses advanced technologies such as global positioning systems (GPS), geographic information systems (GIS) and spatial statistics to

manage agricultural plots more efficiently, as geostatistics allows accurate analysis and modelling of soil and crop spatial variability; by mapping these variations in detail, resource use is optimised and decision-making is improved, significantly increasing the productivity and sustainability of agricultural practices (Di Leo, 2015).

Research has focused on understanding how anthracnose disease manifests itself in avocado, as well as in coffee and agave for different phytosanitary problems, implementing geostatistical analysis techniques that allowed them to explore the spread of diseases. Thanks to the use of geostatistical techniques, detailed maps were created showing not only the density and infected area, but also a more precise view of the pathogen distribution in the studied areas, allowing a comprehensive analysis of the spatial variability and improving the understanding of distribution patterns, which facilitates the identification of critical areas (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020; Ruiz-Orta *et al.*, 2023; González-Dávila *et al.*, 2024).

Therefore, the objective of this research is to determine the spatial distribution of the incidence of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) in the avocado crop in Tenancingo, State of Mexico, with the aim of offering the producers of the area a more timely, effective and specific decision making for the management and sustainable control of this disease.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted during the year 2023 in the municipality of Tenancingo, State of Mexico (18°96'08"N-99°59'05"W), with an altitude of 2022 metres above sea level (masl); with temperatures fluctuating between 4 and 30 °C (Weather Spark 2023; CONAGUA, 2024).

Sampling began with the random tagging and geo-referencing of 200 Hass avocado trees, between eight and ten years old, using a differential global positioning system (dGPS, model SPS351, Trimble, USA) to obtain their spatial location.

During one year, fortnightly samplings were carried out, in each one twelve fruits were selected per tree, taking samples from the four cardinal points and considering the low, medium and high strata of the tree canopy. In addition, fifty trees showing severe disease symptoms were identified, from which three infected fruits per tree were collected for further analysis.

Tapia-Rodríguez *et al.* (2020) explain that a geostatistical analysis is carried out in three phases: First, an exploratory data analysis is performed to better understand the available information. The semi-variogram is then estimated and the model parameters are fitted to capture the variability of the data. Finally, maps are created to help visualise and estimate the affected area using the ordinary kriging method.

In the study, the databases obtained from the sampling of fruits affected by anthracnose were integrated. We started with the estimation of the experimental semivariograms for each sampling, using the software Variowin 2.2 (a programme specialised in the analysis of 2D spatial data, developed by Primavara Verlag, New York, USA).

They were then fitted to theoretical models, such as spherical, Gaussian and exponential models. The plateau, range and nugget effect parameters were carefully modified until optimal results were obtained in the cross-validation statistics, allowing the fitted models to be mathematically validated.

The spatial level determination was obtained by dividing the nugget effect by the plateau, the result of which was expressed as a percentage. A score below 25 % indicates a high level of spatial dependence; between 26 % and 75 %, it is considered a moderate level; and a score above 76 % indicates a low level of dependence (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2019).

By applying the ordinary kriging method, data interpolation was performed, which made it possible to visualise the spatial distribution patterns of the pathogen. This method allowed us to establish the correlation between two random variables, which facilitated an accurate and unbiased estimation of the non-sampling points.

Using Surfer 16 software (Surface Mapping System, Golden Software Inc., Colorado, USA), estimates were obtained, including the calculation of the infected area, and represented in maps reflecting the distribution of diseased trees (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2024).

RESULTS AND DISCUSSION

In this research, the presence of anthracnose was recorded in avocado trees of Hass variety in the municipality of Tenancingo, State of Mexico, where 24 biweekly samplings were carried out. Incidence maps of *C. gloeosporioides* were made using the ordinary kriging technique, as well as to estimate the percentage of infected surface, obtaining a total of 24 projections, which graphically allowed the visualisation of the presence of the fungus; by means of the scale it is indicated that in red areas there is a higher incidence and the white colour represents the absence of the disease in the sampled area.

The methodology is used in studies on the spatial behaviour of diseases and pests, and this technique allows the implementation of specific control measures, which contributes to a significant reduction in losses caused by these factors (Figuroa-Figuroa *et al.*, 2023). The results were 24 experimental semivariograms that fitted a Gaussian model and showed high spatial dependence. Tapia-Rodriguez *et al.* (2021) report that when a semivariogram model fits the Gaussian type the aggregation is expressed continuously within the sampled area and will have a tendency to expand. Gómez-Correa *et al.* (2017) indicate that their investigation conformed to the Gaussian model, allowing the pathogen to spread steadily in relation to the points sampled, reflecting the high capacity for dissemination and the high spatial continuity of the disease, explained by its radial spread to other plants or neighbouring areas, provided environmental conditions are favourable. Similarly, Vanegas-Carrillo *et al.* (2021) mention that the distribution of fruit fly species showed a fit to the Gaussian model in their research, revealing a continuous clustering and radial spread influenced by environmental factors and resource availability.

In the maps of the first six months of sampling (Figure 1), a significant infection was observed during the second half of April, with temperatures ranging between 26 and 30 °C, with a focus located in the upper central and right part of the graph. Whereas, in the second half of May, with temperatures between 25 and 29 °C, showed a similar pattern, also standing out on the left side. While in the second half of the year, the density maps (Figure 2) indicate that in the first half of December, with temperatures between 23 and 25 °C, there were outbreaks located in the centre and on the right of the sampled area. Infection occurs under moderate temperatures, ranging from 25-30°C, which facilitates the development and spread of the pathogen (Guédez *et al.*, 2015). Likewise, Pérez-Márquez *et al.* (2016) indicate that the high levels of anthracnose damage are due to environmental conditions conducive to disease development, such as temperatures between 20 and 30 °C and relative humidity above 95 %, which create an ideal environment for the fungus *C. gloeosporioides* to cause latent infections. On the other hand, Peralta-Ruiz *et al.* (2023) point out that relative humidity above 90 % and temperatures ranging between 22 and 32 °C also contribute to disease development.

In contrast, the lowest levels were recorded in the first half of April (Figure 1), with temperatures between 10 and 23 °C, where most of the area appeared yellow, indicating a minimal presence of the fungus. In a similar way, in the second half of November (Figure 2), with temperatures fluctuating between 20 and 10 °C, the affectation was concentrated on the left side and was lower compared to December. Salotti *et al.* (2022) point out that *Colletotrichum spp.* require temperatures above 20 °C for optimal growth; at lower temperatures, the fungus is limited in its development, which reduces its ability to cause infections.

Table 1 provided fortnightly data on anthracnose incidence, revealing variations in different parameters throughout the year sampled. Sample mean values ranged from 5.85 in the first half of April to 16.40 in the first half of December, indicating that the disease may have been more prevalent in certain months, especially towards the end of the year. Optimal temperatures and high humidity levels are crucial for

spore germination, which accelerates the spread of *C. gloeosporoides* during the warmer, wetter months and explains the increase in incidence towards the end of the year (Singh and Deepankar 2020; Mansoor *et al.*, 2023). The variance (Table 1), experienced significant changes throughout the year, reaching a high level of 50.11 in the first half of December, indicating that the incidence of anthracnose was not uniform in all areas. In March, on the other hand, the variations were lower, suggesting that the pathogen was less constant in those months. Low temperatures and high humidity lead to greater variability in disease incidence, thus affecting different areas; when the climate stabilises, pathogen growth becomes more predictable and uniform, reducing differences between affected areas (Tsai *et al.*, 2022).

Furthermore, in all cases, the nugget was zero (Table 1), indicating that there is no random variability in the data that could not be explained by the model. Rivera-Martínez *et al.*, (2020) mention that a nugget effect of zero in the fitted models indicates that the sampling was adequate and the error minimal, giving the models a 98% reliability.

The spatial dependence of anthracnose was located in a semiovariogram range of 17.19 to 23.03 metres (m). Ranges greater than 100 m in the Vega-Blancas (2022) analysis indicate a strong spatial dependence, suggesting that, at greater distances, there is a greater degree of homogeneity between values; in contrast, a smaller range reflects variability at a smaller scale, where nearby sampling points show similar severities, while a larger range shows more marked differences between distant points.

Table 2 shows the results obtained for the percentage of the infected area, which varied throughout the year, with values ranging from 69 % to 99 %, while the undamaged area showed values ranging from 3 % to 27 %. The percentage of affected area is influenced by several factors such as high humidity, moderate temperatures, management practices, plant density, poor phytosanitary management, lack of ventilation and poor pruning, which contribute to a greater

extent of infestation, being more frequent in areas with unfavourable conditions (Tapia-Rodríguez et al., 2020; Figueroa-Figueroa et al., 2023).

Precision agriculture applied to crop protection allows specific and optimised management of the agronomic needs of each area of land, contributing to the reduction of losses and the early detection of pests and diseases. Through advanced technologies, such as multispectral sensors, monitoring drones equipped with high-resolution cameras, geospatial positioning systems and Machine Learning algorithms, accurate and real-time information on the phenological and phytosanitary status of crops is obtained. This information enables localised application of agricultural inputs such as water, pesticides and fertilisers, optimising their use and avoiding excesses. Reducing the amount of inputs and improving the efficiency of their application increases crop productivity and profitability, while minimising environmental impact, thus favouring a more sustainable and efficient agricultural management in ecological and economic terms (De Martí 2018; Pino 2019; Ramírez-Gómez 2020).

CONCLUSIONS

The research achieved its objective of identifying the spatial distribution of anthracnose in the avocado crop in Tenancingo, State of Mexico, by using geostatistical techniques. The maps generated by ordinary kriging support the initial hypothesis, revealing specific infestation patterns that provide an accurate picture of affected areas. Semivariogram analysis, fitted to a Gaussian model, showed a strong spatial dependence of disease and similar patterns in the severity of infection. The data reflect a higher incidence in months with temperatures between 25 and 30 °C and high humidity, conditions that favour germination and spread of the pathogen. On the other hand, infection levels decreased in periods of cooler temperatures, when disease spread is limited by less favourable conditions.

The creation of detailed maps of the infested area by ordinary kriging will allow farmers to apply specific and effective strategies for the management and control of

the pathogen, contributing not only to mitigate its impact on the crop, but also to reduce economic losses and ensure fruit quality. The results show that the use of geostatistical techniques in precision agriculture is effective in identifying critical areas of infection.

BIBLIOGRAPHY

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2024) Normales Climatológica por Estado.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacionclimatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=mex> (October 2024).

De Martí, S. P. (2018) Agricultura de precisión y protección de cultivos. Revista de Ingeniería, (47), 10. <https://doi.org/10.16924/revinge.47.3>

De Silva, D.D., Crous, P.W., Ades, P.K., Hyde, K.D., Taylor, P.W. (2017) Lifestyles of Colletotrichum species and implications for plant biosecurity. Fungal biology reviews, 31(3), <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.05.001>

Di Leo N. (2015) Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. Universidad Nacional Del Rosario <http://rehip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/2133/13373/2/2AM41.pdf> (September 2024).

Espinoza-Zúñiga, P., Lara-Vázquez, F., Cibrián-Tovar, D., Ruiz-Orta, A., Galacho-Jiménez, F. B., Dávila, J. F. R. (2024) Variabilidad espacial de muérdago (Loranthaceae) en áreas verdes de la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 15(85), 171-195. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1469>

Espinoza-Zúñiga, P., Ramírez-Dávila, J. F., Cibrián-Tovar, D., Villanueva-Morales, A., Cibrián-Llenderal, V. D., Figueroa-Figueroa, D. K., & Rivera-Martínez, R. (2019) Modelación de la distribución espacial del muérdago (Santalales: Loranthaceae) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan,

México. Bosque (Valdivia), 40(1), 17-28. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100017>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020) Análisis del mercado de las principales frutas tropicales Panorama general de febrero de 2020. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca9213es> (October 2024).

Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F., Mora-Escamilla, M., Galacho-Jiménez, F. B. (2023) Distribución espacial de la escama verde y fumagina en cafetales de Amatepec, Estado de México. Revista fitotecnia mexicana, 46(4), 419-428. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.419>

Gómez-Correa, J. C., Torres-Aponte, W. S., Cayón-Salinas, D. G., Hoyos-Carvajal, L. M., Castañeda-Sánchez, D. A. (2017) Modelación espacial de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano cv. Gran Enano. Revista Ceres, 64(1), 47-54. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764010007>

González-Dávila, M., Ramírez-Dávila, J.F., Acosta-Guadarrama, A.D., Figueroa-Figueroa, D.K. (2024) Distribución espacial de las poblaciones del picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Dryophthoridae) en el Estado de México, México. Revista Colombiana de Entomología, 50(2). <https://doi.org/10.25100/socolen.v50i2>

Guédez, C., Rodríguez, D., Olivar, R., Cañizalez, L., Castillo, C. (2015) Eventos de pre-penetración, penetración y colonización de *Colletotrichum gloeosporioides* en flores y frutos de guayabo (*Psidium guajava* L.). Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia, 32(3). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27185>

- Herrera-González, J. A., Bautista-Baños, S., Serrano, M., Ramos-Bell, S., Gutiérrez-Martínez, P. (2024)** olletotrichum siamense causing anthracnose in postharvest of 'Hass' avocado. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 15(5). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3434>
- Mansoor, T., Abdurrehman, Subhani, M. N., Malik, M. T., Abbas, A., Hasnain, A., ... & Zhou, L. (2023)** Extensive field surveys, spatiotemporal analysis, and response of fungicidal chemistries reveal dynamic nature of *Colletotrichum gloeosporioides*, a cause of mango Anthracnose disease. *Erwerbs-Obstbau*, 65(6), 2459-2468. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00927-3>
- Peralta-Ruiz, Y., Rossi, C., Grande-Tovar, C. D., Chaves-López, C. (2023)** Green management of postharvest anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of fungi*, 9(6), 623. <https://doi.org/10.3390/jof9060623>
- Pérez-Márquez, A., Vidal-Aguilar, Y., Mulkay-Vitón, T. (2016)** Contenido de Fenoles Totales en frutos de mango Super Haden dañados por antracnosis y tratados en poscosecha. *Cultivos Tropicales*, 37(1), 71-77. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000100010&lng=es&tlng=en.
- Pino, E.V. (2019)** Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)*, 37(1), 75-84. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- Gómez, C. A. R. (2020)** Aplicación del machine learning en agricultura de precisión. *Revista Cintex*, 25(2), 14-27. <https://doi.org/10.33131/24222208.356>
- Rivera-Martínez, R., Ramírez-Dávila, J.F, Martínez-Quiroz, M., González-Huerta, A. (2020)** Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. En tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnia*, 22(1), 142-152. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>

- Ruiz-Orta, A., Tapia-Rodríguez, A., Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F. (2023)** Analysis of the spatial association of fumagina (*Capnodium* spp.) and green scale (*Coccus viridis*) in coffee in Sultepec, Mexico. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i7.2945>
- Salotti, I., Ji, T., & Rossi, V. (2022)** Temperature requirements of *Colletotrichum* spp. belonging to different clades. *Frontiers in Plant Science*, 13, 953760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.953760>
- Sharma, M., & Kulshrestha, S. (2015)** *Colletotrichum gloeosporioides*: an anthracnose causing pathogen of fruits and vegetables. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 12(2), 1233-1246. <https://doi:10.13005/bbra/1776>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023)** Anuario estadístico de la producción agrícola (Aguacate). http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (October 2024).
- Singh, R., & Deepankar. (2020)** Modeling for anthracnose development in mango in relation to weather parameters. *Australasian Plant Pathology*, 49, 285-294. <https://doi.org/10.1007/s13313-020-00704-w>
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J.F., Aquino-Martínez, J.G., Rubí-Arriaga, M., Ruiz-Orta, A. (2021)** Determination of the spatial behavior of anthracnose in avocado cultivation using spatial statistics. *Investigación Agraria*, 23(2), 63-72. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302697>
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J.F., Salgado-Siclan, M., Castañeda-Vildozola, A., Maldonado-Zamora, F.I., Lara-Díaz, A.V. (2020)** Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista argentina de microbiología*, 52(1), 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>

Tsai, W. A., Brosnan, C. A., Mitter, N., & Dietzgen, R. G. (2022) Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2, 37. <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>

Vanegas-Carrillo, R., Ramírez-Dávila, J. F., & Rivera-Martínez, R. (2021) Distribución espacial de mosca mexicana de la fruta (*Anastrepha* spp.) (Diptera: Tephritidae) en Michoacán, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 47(1). <https://doi.org/10.25100/socolen.v47i1.7715>

Vega-Blancas, V. D. J., Fernández-Reynoso, D. S., Macedo-Cruz, A., Ríos-Berber, J. D., & Ruiz-Bello, A. (2022) Análisis de la fertilidad del suelo mediante la validación e interpolación Kriging de sus variables. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1573>

Weather Spark. (2023) Tenancingo climate, Weather by month, Average temperature (Mexico). <https://weatherspark.com/> (October 2024).

Tables and Figures

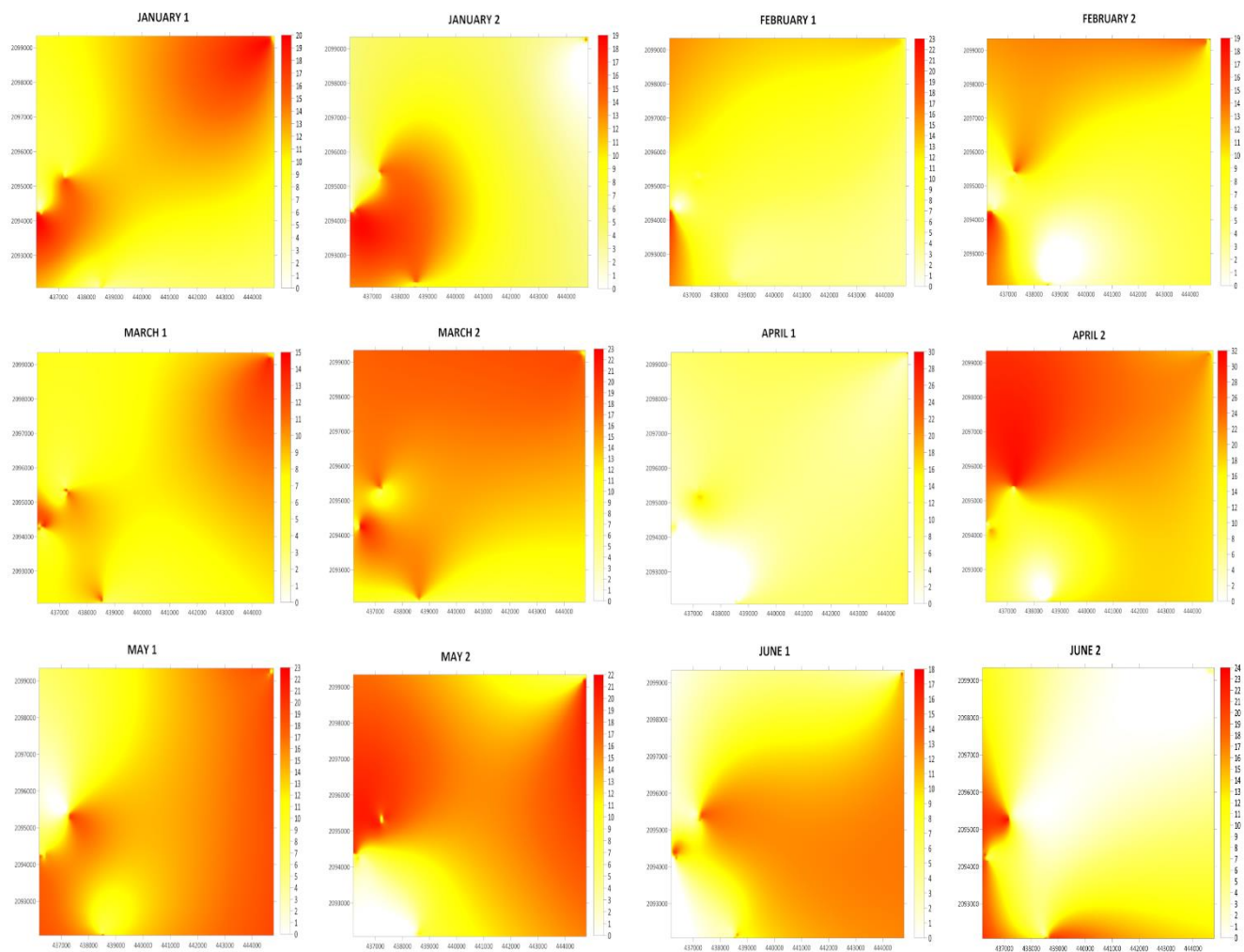


Figure 1. Bi-weekly maps of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporoides*) incidence during the first half of the sampling year; red colour indicates high incidence, orange shades reflect intermediate levels and white colour represents no incidence.

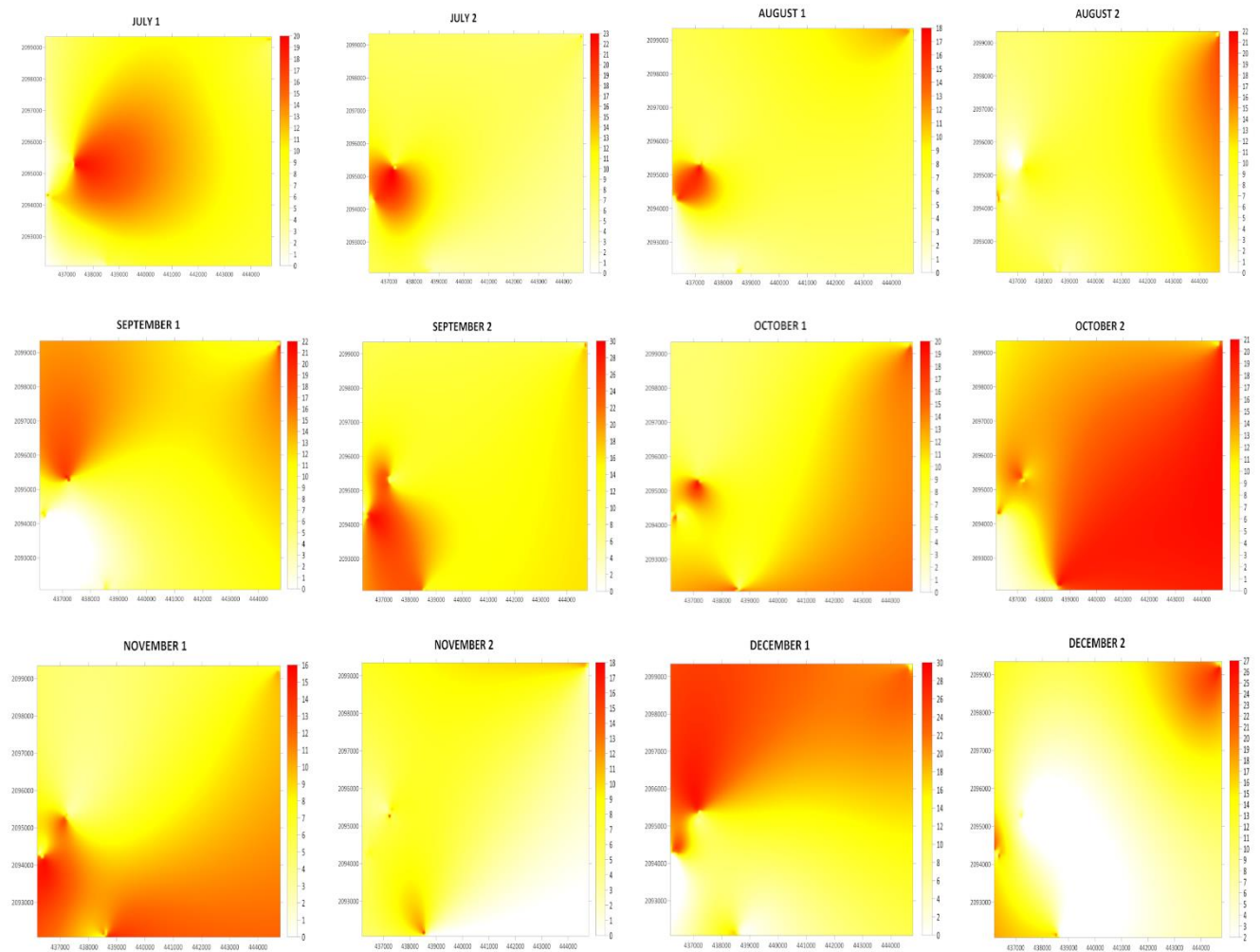


Figure 2. Bi-weekly maps of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporoides*) incidence for the second half of the sampling year; red colour indicates high incidence, orange shades reflect intermediate levels and white colour represents no incidence.

Table 1. Parameters of the models fitted to the semivariograms of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporoides*) on avocado.

Sampling	Sample Mean	Sample variance	Model	Nugget	Range	Plateau	Nugget/plateau (%)	Spatial Dependence
January 1	11.27	8.99	Gaussian	0	19.01	38.64	0	High

January 2	7.64	17.35	Gaussian	0	21.93	32.76	0	High
February 1	8.11	13.79	Gaussian	0	20.81	26.08	0	High
February 2	7.90	15.00	Gaussian	0	22.08	32.50	0	High
March 1	7.91	3.04	Gaussian	0	20.15	45.50	0	High
March 2	14.93	7.03	Gaussian	0	20.16	50.54	0	High
April 1	5.85	9.31	Gaussian	0	19.84	76.54	0	High
April 2	20.24	36.92	Gaussian	0	19.84	90.16	0	High
May 1	13.64	16.60	Gaussian	0	19.84	50.81	0	High
May 2	13.96	20.07	Gaussian	0	20.48	63.36	0	High
June 1	9.09	14.04	Gaussian	0	18.88	40.74	0	High
June 2	5.63	28.01	Gaussian	0	17.19	55.41	0	High
July 1	9.98	10.30	Gaussian	0	20.80	39.98	0	High
July 2	7.93	8.67	Gaussian	0	20.48	33.67	0	High
August 1	6.34	4.63	Gaussian	0	19.20	42.24	0	High
August 2	9.05	9.68	Gaussian	0	21.76	59.85	0	High
September 1	10.14	21.38	Gaussian	0	20.48	61.44	0	High
September 2	14.84	11.45	Gaussian	0	20.48	73.14	0	High
October 1	10.32	8.11	Gaussian	0	18.24	77.16	0	High
October 2	15.80	17.01	Gaussian	0	19.52	53.40	0	High
November 1	8.29	8.26	Gaussian	0	19.65	27.82	0	High
November 2	5.41	8.93	Gaussian	0	23.03	30.60	0	High
December 1	16.40	50.11	Gaussian	0	19.84	64.87	0	High

December	8.25	28.91	Gaussian	0	21.49	66.41	0	High
2								

Table 2. Percentage of area infected and not infected by anthracnose (*Colletotrichum gloeosporoides*) on avocado.

Sampling	% Infected	% Not infected
January 1	97	3
January 2	89	11
February 1	96	4
February 2	85	15
March 1	99	1
March 2	99	1
April 1	83	17
April 2	90	10
May 1	92	8
May 2	87	13
June 1	84	16
June 2	69	31
July 1	89	11
July 2	98	2

August 1	90	10
August 2	92	8
September 1	86	14
September 2	99	1
October 1	99	1
October 2	92	8
November 1	96	4
November 2	77	23
December 1	89	11
December 2	73	27

IX. CONCLUSIONES

El cultivo de aguacate en México ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, posicionando al Estado de México como el tercer productor nacional. No obstante, la antracnosis, causada por *Colletotrichum gloeosporioides*, representa una amenaza grave para la productividad y calidad del fruto, generando considerables pérdidas económicas, especialmente en la etapa de poscosecha.

La identificación y comprensión de la distribución espacial de esta enfermedad son fundamentales para implementar estrategias de control más eficaces. El uso de técnicas geoestadísticas ha permitido mapear y analizar con mayor precisión la incidencia de la antracnosis, facilitando la toma de decisiones y el manejo localizado

del patógeno. Esto no solo optimiza los recursos agrícolas, sino que también contribuye a la sostenibilidad del cultivo al reducir el uso innecesario de fungicidas.

Las condiciones climáticas de la región juegan un papel clave en la propagación del hongo, ya que este prospera en ambientes húmedos y cálidos. La aplicación de estrategias integradas de control, que incluyan manejo cultural, biológico y químico, resulta esencial para mitigar el impacto de la enfermedad en la producción de aguacate.

El presente estudio permitió identificar la distribución espacial y temporal de la antracnosis en árboles de aguacate Hass en el municipio de Tenancingo, Estado de México. A partir de 24 muestreos quincenales y el análisis de semivariogramas, se confirmó que la enfermedad presenta una alta dependencia espacial y un patrón de agregación continua, ajustándose al modelo gaussiano. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas, lo que sugiere que la propagación del patógeno está influenciada tanto por factores ambientales como por la proximidad entre árboles afectados.

El uso de la técnica de krigeado ordinario permitió generar mapas detallados de incidencia, evidenciando focos de alta presencia de la enfermedad en distintas zonas a lo largo del año. Se identificó una tendencia de expansión hacia el norte y el este durante los meses de mayor temperatura y humedad relativa. Además, se determinó que la temperatura es un factor determinante en la severidad y distribución de la antracnosis, con picos de incidencia en periodos donde las temperaturas oscilan entre 10 y 28 °C.

Durante los primeros meses del año, la enfermedad mostró una distribución heterogénea con focos de infección en las zonas inferiores del área de estudio. A medida que avanzaron los meses, especialmente en mayo y junio, se registró un aumento en la severidad y extensión del daño, con una progresión hacia el este y noreste. Posteriormente, entre agosto y septiembre, la propagación presentó variaciones, con una disminución en algunas áreas y la aparición de nuevos focos

en sectores previamente no afectados. Para octubre y noviembre, la incidencia de la enfermedad comenzó a reducirse, lo que sugiere una posible relación con la disminución de las temperaturas.

Los resultados obtenidos en este estudio resaltan la importancia de implementar estrategias de monitoreo continuo y medidas de control dirigidas a las zonas de mayor riesgo. Se recomienda la aplicación de programas de manejo integrado que incluyan podas sanitarias, monitoreo periódico y el uso de fungicidas en los periodos críticos para reducir la propagación de la enfermedad. Asimismo, se sugiere realizar estudios complementarios que analicen la interacción de factores ambientales específicos en la dinámica de la antracnosis, con el fin de mejorar la toma de decisiones en la producción de aguacate Hass en la región.

La implementación de tecnologías de Agricultura de Precisión representa una herramienta clave para mejorar la sanidad y productividad del cultivo, contribuyendo a una gestión más eficiente y a la reducción de pérdidas económicas.

X. BIBLIOGRAFIA

Barrientos-Priego, A. F., & López-López, L. (2000). Historia y genética del aguacate. *El aguacate y su manejo integrado. Mundi-Prensa, Distrito Federal, México*, 19-31.

Campo-Arana, R. O., & Royet-Barroso, J. D. J. (2020). La antracnosis del ñame y estrategias de manejo: una revisión. *Temas Agrarios*, 25(2), 190-201. <https://doi.org/10.21897/rta.v25i2.2458>

Centro Nacional para la Información Biotecnológica (2024). En línea: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/taxonomy/tree/?taxon=3435>. Consulta el 14 de julio de 2024.

- Chil-Núñez, I., Molina-Bertrán, S., Ortiz-Zamora, L., Dutok, C. M. S., & Souto, R. N. P. (2019).** Estado del Arte de la especie *Persea americana* Mill (aguacate). *Amazonia Investiga*, 8(21), 73-86.
- Cifuentes, M. C. B., & Jaramillo, D. J. G. (2006).** *Colletotrichum gloesporioides* fitopatógeno asociado a la nutrición humana. *Investigaciones Andina*, 8(13), 73-80.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2024)** Normales Climatológica por Estado.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacionclimatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=mex> (October 2024).
- De Martí, S. P. (2018)** Agricultura de precisión y protección de cultivos. *Revista de Ingeniería*, (47), 10. <https://doi.org/10.16924/revinge.47.3>
- De Silva, D.D., Crous, P.W., Ades, P.K., Hyde, K.D., Taylor, P.W. (2017)** Lifestyles of *Colletotrichum* species and implications for plant biosecurity. *Fungal biology reviews*, 31(3), <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.05.001>
- Di Leo N. (2015)** Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. Universidad Nacional Del Rosario <http://rehip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/2133/13373/2/2AM41.pdf> (September 2024).
- Espinoza-Zúñiga, P., Lara-Vázquez, F., Cibrián-Tovar, D., Ruiz-Orta, A., Galacho-Jiménez, F. B., Dávila, J. F. R. (2024)** Variabilidad espacial de muérdago (Loranthaceae) en áreas verdes de la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85), 171-195.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1469>
- Espinoza-Zúñiga, P., Ramírez-Dávila, J. F., Cibrián-Tovar, D., Villanueva-Morales, A., Cibrián-Llenderal, V. D., Figueroa-Figueroa, D. K., & Rivera-Martínez, R. (2019)** Modelación de la distribución espacial del muérdago

(Santalales: Loranthaceae) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan, México. *Bosque (Valdivia)*, 40(1), 17-28. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100017>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020) Análisis del mercado de las principales frutas tropicales Panorama general de febrero de 2020. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca9213es> (October 2024).

Fernández Díaz, M., Espinosa Ramirez, J. G., & García-Jacas, C. R. (2016). Algoritmo paralelo para la interpolación espacial de Krigeado Ordinario. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10(3), 57-70.

Fernandez, D. E., & Dasi, R. I. (2014). Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Figuroa-Figuroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F., Mora-Escamilla, M., Galacho-Jiménez, F. B. (2023) Distribución espacial de la escama verde y fumagina en cafetales de Amatepec, Estado de México. *Revista fitotecnia mexicana*, 46(4), 419-428. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.419>

Gómez, C. A. R. (2020) Aplicación del machine learning en agricultura de precisión. *Revista Cintex*, 25(2), 14-27. <https://doi.org/10.33131/24222208.356>

Gómez-Correa, J. C., Torres-Aponte, W. S., Cayón-Salinas, D. G., Hoyos-Carvajal, L. M., Castañeda-Sánchez, D. A. (2017) Modelación espacial de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) en banano cv. Gran Enano. *Revista Ceres*, 64(1), 47-54. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764010007>

- González-Dávila, M., Ramírez-Dávila, J.F., Acosta-Guadarrama, A.D., Figueroa-Figueroa, D.K. (2024)** Distribución espacial de las poblaciones del picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* (Coleoptera: Dryophthoridae) en el Estado de México, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 50(2). <https://doi.org/10.25100/socolen.v50i2>
- Guédez, C., Rodríguez, D., Olivar, R., Cañizalez, L., Castillo, C. (2015)** Eventos de pre-penetración, penetración y colonización de *Colletotrichum gloeosporioides* en flores y frutos de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia*, 32(3). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/27185>
- Herrera González, J. A., Salazar-García, S., Gutiérrez-Martínez, P., & González-Durán, I. J. L. (2013)**. El comportamiento poscosecha de frutos de aguacate 'Hass' es influenciado por el portainjerto. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(1), 19-32.
- Herrera-González, J. A., Bautista-Baños, S., Serrano, M., Ramos-Bell, S., Gutiérrez-Martínez, P. (2024)** *Colletotrichum siamense* causing anthracnose in postharvest of 'Hass' avocado. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 15(5). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3434>
- Iñiguez-Moreno, M., Ragazzo-Sánchez, JA, Barros-Castillo, JC, Sandoval-Contreras, T., & Calderón-Santoyo, M. (2020)**. Recubrimientos de alginato de sodio adicionados con *Meyerozyma caribbica*: Biocontrol poscosecha de *Colletotrichum gloeosporioides* en aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass). *Postharvest Biology and Technology* , 163 , 111123.
- Landero-Valenzuela, N., Lara-Viveros, F. M., Andrade-Hoyos, P., Aguilar-Pérez, L. A., & Aguado Rodríguez, G. J. (2016)**. Alternativas para el control de *Colletotrichum* spp. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(5), 1189-1198.
- López-López, M. E., Del-Toro-Sánchez, C. L., Ochoa-Ascencio, S., Aguilar-López, J. A., Cruz, O. M., Madrigal-Pulido, J. A., ... & Gutiérrez-Lomelí, M.**

(2023). Antagonismo de cepas de *Trichoderma* spp. aisladas en Tanaxuri, Michoacán, México contra patógenos del aguacate (*Persea americana* Mill). *Biotecnia*, 25(1), 24-33. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1726>

Mansoor, T., Abdurrehman, Subhani, M. N., Malik, M. T., Abbas, A., Hasnain, A., ... & Zhou, L. (2023) Extensive field surveys, spatiotemporal analysis, and response of fungicidal chemistries reveal dynamic nature of *Colletotrichum gloeosporioides*, a cause of mango Anthracnose disease. *Erwerbs-Obstbau*, 65(6), 2459-2468. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00927-3>

Monzón, C. E. L., Vásquez, A. R. G., & García, H. G. M. (2019). Caracterización in situ morfológica y físico-química de aguacates nativos (*Persea americana* Mill) en dos localidades de la región Huista, Huehuetenango.

Peralta-Ruiz, Y., Rossi, C., Grande-Tovar, C. D., Chaves-López, C. (2023) Green management of postharvest anthracnose caused by *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of fungi*, 9(6), 623. <https://doi.org/10.3390/jof9060623>

Pérez Álvarez, S., Ávila Quezada, G., & Coto Arbelo, O. (2015). El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales*, 36(2), 111-123.

Pérez-León, G., Castillo-Matamoros, R., Chavarría-Pérez, L., Brenes-Angulo, A., & Gómez-Alpizar, L. (2015). Combate químico de la antracnosis de *Sansevieria trifasciata* var. *Hahnii* en un sistema de hojas separadas. *Agronomía Mesoamericana*, 305-313. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19323>

Pérez-Márquez, A., Vidal-Aguilar, Y., Mulkay-Vitón, T. (2016) Contenido de Fenoles Totales en frutos de mango Super Haden dañados por antracnosis y tratados en poscosecha. *Cultivos Tropicales*, 37(1), 71-77. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000100010&lng=es&tlng=en.

- Pino, E.V. (2019)** Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia* (Arica), 37(1), 75-84.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- Ramírez Dávila, J. F. (2012).** Geoestadística, principios básicos, aplicaciones y limitaciones, pp. 71.
- Ramírez Dávila, J. F., Sánchez Pale, J. R., & León, C. D. (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.
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F., Martínez Quiroz, M., & González Huerta, A. (2020).** Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnia*, 22(1), 142-152.
<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Rivera-Martínez, R., Ramírez-Dávila, J.F, Martínez-Quiroz, M., González-Huerta, A. (2020)** Modelización espacial de ninfas de *Bactericera cockerelli* Sulc. En tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) por medio de técnicas geoestadísticas. *Biotecnia*, 22(1), 142-152.
<https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Rodríguez-López, E. S., González-Prieto, J. M., & Mayek-Pérez, N. (2009).** La infección de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc. en aguacatero (*Persea americana* Mill.): Aspectos bioquímicos y genéticos. *Revista mexicana de fitopatología*, 27(1), 53-63.
- Ruiz-Orta, A., Tapia-Rodríguez, A., Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F. (2023)** Analysis of the spatial association of fumagina (*Capnodium* spp.) and green scale (*Coccus viridis*) in coffee in Sultepec, Mexico. *Agrociencia*.
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i7.2945>

- Salotti, I., Ji, T., & Rossi, V. (2022)** Temperature requirements of *Colletotrichum* spp. belonging to different clades. *Frontiers in Plant Science*, 13, 953760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.953760>
- Sharma, M., & Kulshrestha, S. (2015)** *Colletotrichum gloeosporioides*: an anthracnose causing pathogen of fruits and vegetables. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 12(2), 1233-1246. <https://doi.org/10.13005/bbra/1776>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023)** Anuario estadístico de la producción agrícola (Aguacate). http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (October 2024).
- Singh, R., & Deepankar. (2020)** Modeling for anthracnose development in mango in relation to weather parameters. *Australasian Plant Pathology*, 49, 285-294. <https://doi.org/10.1007/s13313-020-00704-w>
- Tapia Rodríguez, A., Ramírez Dávila, J. F., Aquino Martínez, J. G., Arriaga, M. R., & Ruiz Orta, A. (2021)**. Determinación del comportamiento espacial de antracnosis en el cultivo de aguacate utilizando estadística espacial. *Investigación agraria*, 23(2), 63-72. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302697>
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J.F., Aquino-Martínez, J.G., Rubí-Arriaga, M., Ruiz-Orta, A. (2021)** Determination of the spatial behavior of anthracnose in avocado cultivation using spatial statistics. *Investigación Agraria*, 23(2), 63-72. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2021.diciembre.2302697>
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J.F., Salgado-Siclan, M., Castañeda-Vildozola, A., Maldonado-Zamora, F.I., Lara-Díaz, A.V. (2020)** Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista argentina de microbiología*, 52(1), 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>

- Tofiño-Rivera, AP, Castro-Amaris, G., & Casierra-Posada, F. (2020).** Efectividad del aceite de *Cymbopogon citratus* encapsulado en quitosano sobre *Colletotrichum gloeosporioides* aislado de *Capsicum annum*. *Molecules*, 25 (19), 4447. <https://doi.org/10.3390/molecules25194447>
- Tsai, W. A., Brosnan, C. A., Mitter, N., & Dietzgen, R. G. (2022)** Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2, 37. <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>
- Urbina Parra, F y González Barragán, F. (2021).** Control Biológico de antracnosis (*colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc.) con microorganismos antagonistas en el cultivo de maracuyá (*passiflora edulis* f. *flavicarpa* Degener) en etapa de producción en el municipio de Saravena departamento de Arauca. Universidad de los Llanos. Disponible en: <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/2799>
- Vanegas-Carrillo, R., Ramírez-Dávila, J. F., & Rivera-Martínez, R. (2021)** Distribución espacial de mosca mexicana de la fruta (*Anastrepha* spp.) (Diptera: Tephritidae) en Michoacán, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 47(1). <https://doi.org/10.25100/socolen.v47i1.7715>
- Vega-Blancas, V. D. J., Fernández-Reynoso, D. S., Macedo-Cruz, A., Ríos-Berber, J. D., & Ruiz-Bello, A. (2022)** Análisis de la fertilidad del suelo mediante la validación e interpolación Kriging de sus variables. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1573>
- Weather Spark. (2023)** Tenancingo climate, Weather by month, Average temperature (Mexico). <https://weatherspark.com/> (October 2024).
- Xoca-Orozco, L. A., Aguilera-Aguirre, S., López-García, U. M., Gutiérrez-Martínez, P. O. R. F. I. R. I. O., & Chacon-Lopez, A. (2019).** Effect of chitosan on the in vitro control of *Colletotrichum* sp., and its influence on post-harvest quality in Hass avocado fruits. *Revista Bio Ciencias*, 5, 1-20. <https://doi.org/10.15741/revbio.05.e355>

Zakaria, L. (2021). Diversity of *Colletotrichum* species associated with anthracnose disease in tropical fruit crops—A review. *Agriculture*, 11(4), 297.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11040297>