



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA GESTIÓN DE
PROBLEMAS FITOSANITARIOS EN EL CULTIVO DE CAFÉ EN EL ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

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

PRESENTA

M. EN CARN. ALFREDO RUIZ ORTA

El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 25 de marzo de 2025.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA GESTIÓN DE
PROBLEMAS FITOSANITARIOS EN EL CULTIVO DE CAFÉ EN EL ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

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

PRESENTA

M. EN CARN. ALFREDO RUIZ ORTA

COMITÉ DE TUTORES

Dr. José Francisco Ramírez Dávila

Dr. Juan Campos Alanís

Dr. Francisco Gutiérrez Rodríguez

El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 25 de marzo de 2025

INDICE

Contenido

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	8
AGRADECIMIENTOS	11
I. INTRODUCCION.....	12
II. REVISION DE LITERATURA	15
2.1 Agricultura de Precisión.....	15
2.2. Sistema de Información Geográfica	15
2.2.1. Estructura de un SIG	16
2.2.2. Usos del SIG	17
3.1 Origen del café.....	18
3.2 Clasificación taxonómica	18
3.2.1. Características generales	19
3.3 Importancia del cultivo.....	20
3.4 Limitantes para el cultivo de café	21
3.5 Problemas fitosanitarios del cultivo del café.....	22
3.5.1 Broca del café.....	23
III. JUSTIFICACIÓN	31
IV. HIPÓTESIS	32
V. OBJETIVOS	33
Objetivos Específicos.....	33

VI.	MATERIALES Y METODOS.....	34
6.1	Área de estudio	34
6.2	Muestreo.....	... ¡Error! Marcador no definido.
6.3	Bases de datos.	¡Error! Marcador no definido.
6.4	Mapas temáticos	¡Error! Marcador no definido.
6.5	Ahorro económico y ambiental	¡Error! Marcador no definido.
VII.	RESULTADOS.....	36
7.3	Otros resultados.....	18
7.3.1	Identificación de la presencia de problemas fitosanitarios del café en campo.....	18
7.3.2	Elaboración de mapas temáticos.....	18
VIII.	DISCUSION GENERAL.....	31
IX.	CONCLUSIONES.....	37
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un sistema de información geográfica (SIG).....	16
Figura 2. Morfología de fruto de <i>Coffea</i>	19

RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los sistemas de posicionamiento global (GPS) son herramientas geoespaciales avanzadas que se utilizan eficazmente en el mapeo de los recursos de la tierra y la planificación del uso de la tierra agrícola. La integración de datos espaciales y su análisis combinado podría realizarse a través de un SIG, para realizar análisis complejos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones para una gestión eficaz de los recursos naturales, así como los mapas temáticos se usan en la agricultura de precisión para la recopilación, análisis y representación de datos de interés; para posibilitar la eficiencia de los cultivos y la minimización de los costos y recursos empleados para diferentes actividades, como la monitorización de plagas y enfermedades.

El café en México es un producto que tiene un alto valor comercial, sin embargo presenta ciertos problemas fitosanitarios que afectan la rentabilidad del cultivo y que requieren de medidas de control específicas óptimas y muy certeras. El objetivo de la investigación fue diseñar un Sistema de Información Geográfica para la gestión sustentable de diversos problemas fitosanitarios del café en tres municipios del Estado de México, estos fueron: Amatepec, Temascaltepec y Sultepec, ya que son los principales municipios productores de café en la entidad.

Se realizaron muestreos georreferenciando 200 árboles por parcela y cada uno de éstos se dividió en tres estratos (alto, medio y bajo) seleccionando 12 hojas por cada estrato y se realizó conteo de presencia y ausencia de cada uno de los problemas evaluados. Dichos muestreos se llevaron a cabo de manera quincenal durante el periodo de septiembre de 2022 a agosto de 2023. Posteriormente, se elaboraron bases de datos en Excel, colocando las coordenadas geográficas de cada árbol, así como los datos de incidencia de las plagas y enfermedades muestreadas, estandarizándolas y obteniendo un promedio mensual.

Con lo anterior, se utilizó el programa QGIS versión 3.24 Tisler, que es una herramienta confiable para el almacenamiento de datos geoespaciales y para la creación de mapas temáticos, que son la nueva información que se obtiene para su posterior análisis y toma de decisiones. Se crearon 12 mapas temáticos que representan

un promedio mensual de la incidencia de minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*), ojo de gallo (*Mycena citricolor*), roya (*Hemileia vastratix*) y mancha de hierro (*Mycosphaerella coffeicola*) en tres parcelas muestreadas por cada municipio; teniendo en total alrededor de 432 mapas temáticos en los cuales se observa el progreso de cada uno de los problemas durante el año de muestreo. Dichos mapas permitieron identificar focos de infección bien marcados, así como los meses con mayor incidencia, siendo generalmente entre julio a octubre los meses con mayor incidencia, ya que, al inicio de la época de lluvias y el incremento de temperaturas, así como la humedad relativa; los organismos tienen mayor presencia en las parcelas de café. El análisis digital de imágenes, como los mapas temáticos, está directamente relacionado con enfoques paramétricos que consideran un clasificador por cada componente, por ejemplo: suelos, temperatura, vegetación, o en la clasificación de las tierras con base en sus características físicas, químicas o estructurales. Además, el uso de Sistemas de Información Geográfica es una alternativa eficiente y precisa que permite la toma de decisiones oportuna en el área agrícola. Se puede ofrecer una agricultura más productiva con un nivel de riesgo menor y una planeación certera de los programas de expansión del cultivo, en este caso, de aguacate en el sur del Estado de México; buscando una producción en ambientes que provean condiciones que satisfagan los requerimientos agroecológicos de las plantas.

Los datos georreferenciados son el elemento primordial y básico para aprovechar un SIG, por eso el desarrollo de mapas temáticos de incidencia de diferentes patógenos en parcelas de café, permite la divulgación de la utilidad de las tecnologías para precisar en la mejora de intercambio de la información entre los agricultores, trabajadores extensivos, investigadores y, en cierta medida, a los responsables políticos, lo que permite una toma de decisiones más oportuna, específica y eficaz para el control de plagas y enfermedades del café, logrando una gestión sustentable del cultivo en la zona.

Palabras clave: gestión sustentable, mapeo temático, café, Roya

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) and Global Positioning Systems (GPS) are advanced geospatial tools that are effectively used in land resource mapping and agricultural land-use planning. Spatial data integration and combined analysis can be performed through GIS to perform complex analyses and decision support systems for effective natural resource management. Thematic maps are also used in precision agriculture for the collection, analysis, and representation of relevant data, enabling crop efficiency and minimizing costs and resources used for various activities, such as pest and disease monitoring.

Coffee in Mexico is a product of high commercial value; however, it presents certain phytosanitary problems that affect crop profitability and require specific, optimal, and highly accurate control measures. The objective of the research was to design a Geographic Information System for the sustainable management of various phytosanitary problems in coffee in three municipalities of the State of Mexico: Amatepec, Temascaltepec, and Sultepec, as these are the main coffee-producing municipalities in the state.

Georeferencing samples were taken from 200 trees per plot, each of which was divided into three strata (high, medium, and low), selecting 12 leaves from each stratum, and counting the presence and absence of each of the problems evaluated. These samples were carried out biweekly during the period from September 2022 to August 2023. Subsequently, Excel databases were created, entering the geographic coordinates of each tree, as well as the incidence data of the sampled pests and diseases, standardizing them and obtaining a monthly average.

For this purpose, the QGIS program version 3.24 (Tisler) was used. This is a reliable tool for storing geospatial data and creating thematic maps, which are the new information obtained for subsequent analysis and decision-making. Twelve thematic maps were created representing a monthly average of the incidence of leaf miner (*Leucoptera coffeella*), corn rust (*Mycena citricolor*), rust (*Hemileia vastratix*), and iron spot (*Mycosphaerella coffeicola*) in three plots sampled for each municipality; a total of around 432 thematic maps were created, which show the progress of each of the problems during the sampling year.

These maps made it possible to identify clearly defined infection hotspots, as well as the months with the highest incidence. July through October are generally the months with the highest incidence, as the organisms are most present in coffee plots at the beginning of the rainy season and with rising temperatures and relative humidity. Digital image analysis, such as thematic maps, is directly related to parametric approaches that consider a classifier for each component—for example, soil, temperature, vegetation—or the classification of land based on its physical, chemical, or structural characteristics.

Furthermore, the use of Geographic Information Systems is an efficient and accurate alternative that enables timely decision-making in the agricultural sector. It can offer more productive agriculture with a lower level of risk and accurate planning of crop expansion programs, in this case, avocado in the southern part of the State of Mexico, seeking production in environments that provide conditions that satisfy the agroecological requirements of the plants.

Georeferenced data is the primary and basic element for leveraging a GIS. Therefore, the development of thematic maps of the incidence of different pathogens in coffee plots allows for the dissemination of the usefulness of the technologies to precisely improve the exchange of information among farmers, field workers, researchers, and, to a certain extent, policymakers. This allows for more timely, targeted, and effective decision-making for the control of coffee pests and diseases, achieving sustainable crop management in the area.

Keywords: sustainable management, thematic mapping, coffee, Roya

I. INTRODUCCION

México es uno de los países con una larga tradición en la producción de café, se consume una cantidad promedio de 1.4 kg por persona al año. El aromático mexicano es conocido a nivel mundial por su calidad y variedad, y la industria cafetalera desempeña un papel importante en la economía y la cultura del país, su producción representa el 2.4% del total de la producción mundial (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2018), ocupando el décimo lugar como productor, con una producción de 947 092.21 t, involucra a más de 500 mil productores, con 15 estados y 480 municipios, que se dedican a su producción de los cuales destacan Chiapas y Veracruz. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022).

El café mexicano destaca por su alta calidad en taza, en gran medida gracias a sus condiciones topográficas, altitudes, climas y suelos que favorecen el cultivo de variedades reconocidas en el mundo como la arábica (SADER, 2018).

Dentro del ámbito de los mercados internacionales, aproximadamente el 53.85% de las exportaciones de café de México se envían a Estados Unidos, mientras que el resto se distribuye entre naciones pertenecientes al bloque de la Unión Europea, así como a otros países como Japón, Cuba y Canadá. En el año 2016, los principales destinos de las exportaciones de café mexicano fueron los países miembros del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), naciones ubicadas en la cuenca del Pacífico, miembros del Tratado de Libre Comercio entre México y la Unión Europea (TLCUEM), además de China y la Unión Europea, ocupando el segundo lugar en la generación de divisas después del petróleo (Sistema de Información Agrícola y Pecuaria [SIAP], 2022).

En el ámbito ambiental, el café ha adquirido relevancia en los últimos años debido a su

contribución a la preservación y cuidado de la biodiversidad, así como a su aporte de servicios ecológicos que incluyen la absorción de dióxido de carbono, la generación de oxígeno y su influencia positiva en la gestión y conservación de los recursos hídricos. Además, es importante destacar que los cultivos de café se encuentran sustancialmente en regiones montañosas y en terrenos inclinados, donde la sombra proporcionada por los árboles contribuye a la protección y preservación de los suelos (Escamilla, 2007).

En este sentido, el estado de México reúne ciertas características que favorecen la calidad de su café, lo que le da potencial para ser café de calidad, prueba de esto es que a algunos productores de la región han obtenido resultados relevantes en el certamen de taza de excelencia nacional, lo que ha hecho que sus oportunidades comerciales se hayan incrementado significativamente (Cup of excelente, 2018, 2019, 2021)

Según el SIAP 2022, el Estado de México tiene una superficie 531.46 ha de café con una producción de 622.29 ton, que al igual que todas las zonas cafetaleras en el mundo, son amenazados por problemas fitosanitarios que en su mayoría son resultado de desequilibrios en el microambiente de la plantación como el exceso de calor, humedad, mala nutrición que propician las circunstancias idóneas para el desarrollo de estos problemas y afectan las condiciones fisiológicas de las plantas del café, y en consecuencia su producción (Pérez y Escamilla, 1999).

A nivel nacional se han reportado 16 plagas de importancia económica que afectan la producción del café; como la broca del fruto (*Hypotenemus hampei* Ferrari), el minador de la hoja (*Leucoptera coffeella* Guérin Méneville), piojo harinoso del follaje y de la raíz (*Planococcus citri*), barrenador del tallo (*Plagiohamus maculosus* Bates) y araña roja (*Tetranychus urticae*), en el caso de las enfermedades las de mayor importancia según los daños que causan en las plantaciones cafetaleras son la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*

Berk & Broome), ojo de gallo (*Mycena citricolor* Berkeley & Curtis), antracnosis (*Colletotrichum kahawae* J. M. Waller & Bridge), requemo (*Phoma costarricensis* Echarri) y mancha de hierro (*Mycosphaerella coffeicola* Cooke J. A Stevens y Wellman) (SENASICA, 2023).

Los sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas de posicionamiento global (GPS) son herramientas geoespaciales avanzadas que se utilizan eficazmente en el mapeo de los recursos de la tierra y la planificación del uso de la tierra agrícola. La integración de datos espaciales y su análisis combinado podría realizarse a través de un SIG, para realizar análisis complejos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones para una gestión eficaz de los recursos naturales (Reddy *et al.*, 2018)

Los SIG se utilizan para evaluar coberturas vegetales de ecosistemas, inventarios forestales y dinámica del medio biótico y abiótico. El análisis digital de imágenes y su representación en mapas temáticos está directamente relacionado con enfoques paramétricos; sin embargo, a pesar de las ventajas particulares, éstas técnicas individuales o en conjunto están limitadas a expresar diferencias entre objetos que comparten características similares (Bautista *et al.*, 2018).

Con base en lo antes mencionado, el propósito de este estudio fue diseñar un Sistema de Información Geográfica para la gestión de problemas fitosanitarios en el cultivo del café en el Estado de México, partiendo de la premisa que en la entidad existe presencia de varios problemas que ya han sido identificados y muestreados.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Agricultura de Precisión

La Agricultura de Precisión (AP) es una estrategia que permite reunir, procesar y analizar datos espaciales e individuales y al combinarlos sirven para apoyar en la toma de decisiones administrativas, con la finalidad de mejorar el uso eficiente de recursos, la productividad, la calidad, las ganancias y la sostenibilidad de la producción agrícola (Foladori, 2022).

Esta herramienta aporta a los agricultores una forma de gestionar de manera sostenible, eficiente y más oportuna los cultivos; puede funcionar a una escala pequeña, generando múltiples beneficios como económicos en plantaciones pequeñas, ventajas para el medio ambiente; sin embargo, dentro de las limitaciones para implementar la agricultura de precisión se encuentran las dificultades tecnológicas, la falta de apoyo profesional o de mano de obra calificada y políticas insuficientes. El uso de las nuevas tecnologías, como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores, monitores de rendimiento del cultivo, imágenes satelitales, y Sistemas de Información Geográfica (SIG) son incorporadas al campo. Los SIG vinculados a tareas de AP están limitados a la visualización de mapas de cosecha, cálculo del rendimiento promedio parcial o total de un lote, entre otras funcionalidades (Uva y Campanella, 2009). El establecer programas educativos para implementar la agricultura de precisión, el compartir conocimientos, tener estándares y la capacitación sobre el uso de este tipo de tecnologías puede ser de gran aportación para los agricultores, es importante establecer políticas adecuadas, normas y leyes para agilizar la implementación de la agricultura de precisión (Oropeza *et al.*, 2023).

2.2. Sistema de Información Geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG), integran eficazmente datos relevantes de un lugar

geográfico específico, además de su posición geográfica muchos datos pueden ser analizados y mostrados mediante estos sistemas. Los SIG no solamente integran herramientas de software sino también herramientas de hardware, que en la mayoría de casos son para la toma de datos y análisis de estos. En la actualidad estos sistemas son propuestos como alternativa de mejoramiento de calidad en la ejecución en un sector económico específico (Reinoso y Herrera, 2016). Específicamente en la agricultura, los SIG juegan un papel primordial ya que posibilitan, entre otros: la clasificación, mapeo y cartografía de cultivos con información georreferenciada, la identificación de etapas fenológicas de las plantas, el monitoreo del riego, la predicción de rendimientos y el monitoreo de incidencia de plagas y enfermedades (Pérez-García, 2019).

2.2.1. Estructura de un SIG

Un SIG es considerado como una tecnología particularmente horizontal, por lo que tiene una amplia variedad de usos en diferentes entornos, por lo que tiende a resistir la definición simplista. Para hablar sobre un SIG, fuera del contexto industrial, se requiere de una herramienta más flexible para poder explicarlo, tal es el caso de un modelo.

En la Figura 1 se presenta un modelo holístico de un SIG, el cual procesa y convierte datos espaciales, es decir, datos sin procesar pero que tienen un vínculo geográfico, en información útil mediante cierto análisis. Posteriormente, en la parte central de la figura, puede verse que el sistema almacena dichos datos, especificando sus atributos, en una base de datos de almacenamiento, con la finalidad de generar ciertos productos informativos donde las funciones analíticas están controladas de manera interactiva por un operario, tal es el caso de los mapas temáticos (Tomlinson, 2007).



Figura 1. Partes de un sistema de información geográfica (SIG) (Tomlinson, 2007).

2.2.2. Usos del SIG

La enseñanza de las nuevas tecnologías está cada vez más difundida y, a la vez, la Geografía una de las disciplinas con mayores ventajas dados los adelantos tecnológicos registrados en materia cartográfica, como los SIG. Si bien los SIG son una herramienta desde el punto de vista tecnológico del software en sí mismo, desde el punto de vista didáctico constituyó el eje vertebrador para la construcción de planos y mapas a partir de informaciones obtenidas por distintos medios, incluyendo aplicaciones informáticas; así como la comparación y evaluación de la información social, política, económica y ambiental referenciada espacialmente (sistematización, bases de datos, tabulaciones, sistemas de información geográfica, atlas digitales, etc) (Zappettini, 2007).

3.1 Origen del café

La historia del café comienza en las regiones de África, específicamente en Etiopía. Según una antigua leyenda, un pastor llamado Kaldi descubrió casualmente el poder del café cuando notó que sus cabras se volvían especialmente animadas después de mordisquear los frutos rojos de un arbusto. Intrigado, él mismo probó los granos y experimentó una sensación renovada de vitalidad. Este descubrimiento eventualmente llevó a la preparación de una bebida que se convirtió en un estimulante natural.

La expansión del café desde Etiopía hacia otras partes de África y la Península Arábiga marcó el inicio de su viaje global. Los árabes fueron pioneros en el cultivo del café y desarrollaron métodos para tostar y preparar la bebida.

El siglo XVII presenció la introducción del café en América gracias a los colonizadores europeos. A medida que las plantaciones de café se establecieron en países como Brasil y Colombia, este cultivo se convirtió en una fuente económica de estas regiones, transformándose en uno de los principales productos de exportación.

En México tiene sus raíces en la colonización española y la introducción de cultivos. Las primeras plantas de café en México fueron plantadas en la región de Veracruz, convirtiendo a este estado en la primera región cafetalera del país, y con el paso del tiempo estados como Chiapas y Oaxaca, se sumaron a la producción de dicho cultivo. Con el tiempo, nuestro país se ha consolidado como un productor importante de café en América Latina, y el grano mexicano se hizo apreciado por su sabor y calidad; que van desde los cafés de altura hasta los granos cultivados sobre el nivel del mar.

3.2 Clasificación taxonómica

De acuerdo con el National Center of Biotechnology Information (NCBI, 2024), la clasificación taxonómica de la planta del café es la siguiente:

REINO	:	Plantae
DIVISIÓN	:	Magnoliophyta
CLASE	:	Magnoliopsida
ORDEN	:	Gentianales
FAMILIA	:	Rubiaceae
SUBFAMILIA	:	Ixoroideae
TRIBU	:	Coffeae
GENERO	:	Coffe

3.2.1. Características generales

Los cafetos son arbustos del género *Coffea*, de la familia de las Rubiáceas con un aproximado de 100 especies, comúnmente este cultivo se produce en zonas tropicales y ecuatoriales, con altitudes entre los 600 y 1600 metros sobre el nivel del mar (msnm). Pueden alcanzar de 2 a 5 metros de altura, dependiendo la especie, las más comunes son arábica y robusta, por ser las más cultivadas. La época de floración es cuando comienza la temporada de lluvias, mostrando unas flores blancas y perfumadas; con el paso de ocho o nueve meses aparecen los frutos, que son bayas rojas y carnosas, asemejando a las cerezas. En cada época de lluvia los cafetos florecen, por lo que se pueden encontrar flores, frutos verdes y maduros al mismo tiempo, razón por la que se debe tener cuidado al recogerlos (León, 1987).

Hojas: Las hojas del café son opuestas, persistentes y de color verde oscuro brillante. Tienen una forma alargada y puntiaguda.

Flores: Las flores son pequeñas, blancas y fragantes. Generalmente, se producen en las axilas de las hojas.

Frutos: El fruto del café es una drupa que se conocen como cerezas de café, contiene dos semillas (granos de café) en su interior que están envueltas por una membrana semirrígida transparente, llamada pergamino, que es la pared del núcleo, y un mesocarpio rico en

mucílago, que es una capa de pulpa azucarada, una vez retirado el grano, se seca y el café toma una tonalidad verde rodeado de una piel plateada adherida, que se corresponde con el tegumento de la semilla. Estos granos son lo que se cosechan, tostan y muelen para producir la bebida de café (Leon, 1987).



Figura 2. Morfología de fruto de *Coffea*. (Vanegas, 2016).

3.3 Importancia del cultivo

El cultivo del café en México tiene una importancia significativa tanto a nivel económico como cultural, ya que es uno de los productos agrícolas más importantes en la república y una fuente crucial de ingresos para muchas comunidades rurales. Según SIAP (2023) y FAO (2022) el cultivo del café en México ocupa el sexto lugar en superficie sembrada a nivel nacional y el décimo como productor de café a nivel mundial, con un valor en su producción (miles de pesos) de \$34,986,565.12 pesos mexicanos.

Hay 15 estados productores de café, siendo Chiapas el principal estado productor de nuestro país, seguido por Veracruz y Puebla. Dichos estados generan una cantidad significativa de empleo, desde las actividades agrícolas en las plantaciones hasta las tareas de procesamiento y comercialización generando un impacto positivo en las economías locales, además forma parte integral de la cultura mexicana (SIAP, 2022).

Además México tiene relevancia por producir café de alta calidad con una diversidad de perfiles de sabor, desde los suaves y afrutados hasta los más intensos y con cuerpo, la variedad de climas y suelos en México contribuye a esta riqueza de sabores.

También son importantes en el turismo, las regiones cafetaleras de México, como Chiapas y Veracruz, a menudo atraen a turistas interesados en la cultura del café.

En temas ecológicos la conservación del medio ambiente y la biodiversidad son objetivos importantes en muchas fincas cafetaleras que han adoptado prácticas agrícolas sostenibles y ecológicas.

En los mercados internacionales de café, contribuye a la diversificación de la oferta global ya la presencia de cafés mexicanos en los gustos de los consumidores de todo el mundo.

El cultivo del café ha desempeñado un papel en el desarrollo rural al proporcionar oportunidades económicas en áreas donde otras opciones pueden ser limitadas. Esto ha contribuido a mejorar las condiciones de vida en comunidades cafetaleras.

3.4 Limitantes para el cultivo de café

- El cultivo del café enfrenta varias limitaciones y desafíos, que pueden variar según la región y las condiciones específicas de cada plantación.
- El café es susceptible a diversos problemas fitosanitarios, siendo la roya la enfermedad del café las más preocupantes y la broca del café la plaga de mayor importancia.
- Las variaciones en la temperatura, lluvias irregulares y eventos climáticos extremos pueden afectar la calidad y cantidad de la cosecha.
- No todas las regiones son adecuadas para el cultivo de café en contraste ciertas altitudes y condiciones topográficas son necesarias para obtener ciertos perfiles de sabor y calidad.
- Los costos asociados con la producción de café, que incluyen mano de obra, insumos agrícolas y tecnologías, pueden ser altos. La fluctuación en los precios del café en los

mercados internacionales puede afectar la rentabilidad de los productores.

- La apertura de los mercados internacionales y la competencia global pueden afectar la rentabilidad de los productores locales.
- La presión para adoptar prácticas agrícolas sostenibles y socialmente responsables es cada vez mayor. Los productores enfrentan desafíos para cumplir con estos estándares mientras mantienen la rentabilidad.
- Las políticas gubernamentales, la regulación y la falta de apoyo pueden afectar significativamente la viabilidad y competitividad del cultivo del café en algunas regiones. (Montes R. et al., 2012).

3.5 Problemas fitosanitarios del cultivo del café

El cultivo de café, representa la base de la economía agrícola en numerosas regiones, sin embargo, se enfrenta a una serie de problemas fitosanitarios que amenazan su productividad y calidad. Entre estos, destacan las plagas y enfermedades fúngicas, cuya presencia demanda una atención constante y estrategias de manejo efectivas (Lee y Olivares, 2024).

Una plaga se concibe como la proliferación desmedida de organismos que infligen daño estructural o fisiológico a las plantas, alterando su desarrollo y rendimiento. Por otro lado, las enfermedades vegetales, según la definición de Agrios (2005), se manifiestan como alteraciones en las funciones de la planta, desencadenadas por agentes patógenos o condiciones ambientales adversas. Estas respuestas celulares y tisulares pueden traducirse en cambios morfológicos, funcionales o en la integridad de la planta, conduciendo a una disminución de su capacidad productiva o, en casos extremos, a su muerte.

En el contexto del cultivo de café, la presencia de insectos y fitopatógenos es una realidad constante. Diversos estudios han documentado la incidencia de plagas como *Hypothenemus hampei* (broca del café), gusanos minadores, escamas, hormigas arrieras, entre otros.

Asimismo, se han identificado enfermedades fúngicas de relevancia, tales como la fumagina, el ojo de gallo y la roya, todas ellas causadas por diversos hongos fitopatógenos. A continuación se presentan de manera general algunas de ellas (Barrera *et al.*, 2014).

3.5.1 Broca del café

La broca del café (*Hypothenemus hampei*), perteneciente al orden Coleóptera y la familia Curculionidae, se erige como una de las plagas más devastadoras para este cultivo (Giraldo-Jaramillo *et al.* 2018). Originaria de África, su introducción en Colombia a finales de los años 80 marcó el inicio de su rápida dispersión por las zonas cafetaleras (Baker y Barrera, 1993).

El daño principal se centra en el fruto, donde la broca penetra para reproducirse, ocasionando la caída prematura de los mismos y, en situaciones graves, la pérdida total de la cosecha. Además, este insecto afecta la calidad física del grano, lo que repercute negativamente en la calidad en taza. A pesar de su amplia distribución en México, la broca del café se mantiene como plaga cuarentenada.

El manejo de esta plaga abarca estrategias de control químico y biológico, destacando el uso de *Beauveria bassiana* y la liberación de parasitoides como *Prorops nasuta*. La integración de hongos y parasitoides en un programa de manejo integrado de plagas (MIP) puede optimizar el control, siempre y cuando se respeten los intervalos de aplicación para minimizar riesgos de infección (Molina, 2022).

3.5.2 Minador de la hoja

El minador de la hoja, *Leucoptera coffeella*, un microlepidóptero de la familia Lyonetiidae, emerge como una plaga foliar de significativa importancia económica en los cultivos de *Coffea spp.*, donde el adulto, una polilla de coloración blanquecina, deposita sus huevos en

el envés de las hojas, dando origen a larvas que, al eclosionar, penetran el parénquima foliar, iniciando su actividad minadora.

Las larvas, en su desarrollo, se alimentan del mesófilo foliar, creando galerías o minas que se manifiestan como áreas translúcidas en el haz de la hoja, siendo característico que la alimentación larvaria respete las nervaduras, lo que permite diferenciar esta plaga de otras que también causan daños foliares (SENASICA, 2014).

La actividad minadora reduce el área fotosintéticamente activa, afectando la fisiología de la planta y, en infestaciones severas, provocando defoliación prematura. Las poblaciones de *L. coffeella* experimentan fluctuaciones influenciadas por factores ecológicos, siendo los periodos de sequía y alta insolación particularmente favorables para su desarrollo, mientras que el uso indiscriminado de agroquímicos, especialmente herbicidas, ha sido asociado con un incremento en las poblaciones de esta plaga, debido a la alteración del equilibrio biológico, la eliminación de enemigos naturales y la inducción de resistencia en la plaga (Rueda *et al.*, 2016).

El manejo integrado de *L. coffeella* requiere un enfoque holístico que combine diversas estrategias, incluyendo el monitoreo constante de las poblaciones de adultos y larvas para la detección temprana de infestaciones, el control biológico mediante la conservación y promoción de enemigos naturales, el control cultural a través de la implementación de prácticas agronómicas que favorezcan la salud de la planta, y el control químico mediante la aplicación racional de insecticidas selectivos cuando sea necesario, minimizando el impacto ambiental y el riesgo de resistencia (SENASICA, 2014).

La comprensión de la biología y ecología de *L. coffeella*, así como la implementación de estrategias de manejo integrado, son fundamentales para mitigar el impacto de esta plaga en la producción de café.

3.5.3 *Escama verde*

La "escama verde" *Coccus viridis*, es una plaga de relevancia económica en el cultivo de *Coffea* spp., y consiste en la infestación por insectos pertenecientes a la familia Coccidae, caracterizados por la presencia de un escudo ceroso de coloración verdosa. Estos fitófagos, de hábitos sedentarios, establecen colonias sobre el follaje, ramas y frutos, donde ejercen su actividad trófica (Figuerola *et al.*, 2023).

La escama verde, en sus estadios ninfales y adultos, se alimenta de la savia del cafeto, insertando su estilete bucal en el tejido floemático, lo cual induce un debilitamiento generalizado de la planta, manifestándose en una reducción del vigor y la productividad. Adicionalmente, la excreción de melaza, un subproducto metabólico de estos insectos, propicia el desarrollo de hongos saprófitos, dando lugar a la fumagina, que interfiere con la actividad fotosintética (AGROBANCO, 2012).

La infestación por escama verde se manifiesta por la presencia de escudos cerosos adheridos a las estructuras vegetales aéreas. En infestaciones severas, se observa defoliación, caída de frutos y muerte regresiva de ramas. La reducción de la eficiencia fotosintética, derivada de la presencia de fumagina, exacerba el estrés fisiológico de la planta (Figuerola *et al.*, 2023; Ruiz-Orta *et al.*, 2023).

La incidencia de escama verde se ve favorecida por condiciones de alta humedad relativa y temperaturas elevadas, así como por un exceso de sombra y desequilibrios nutricionales en el cafeto (Ruiz-Orta *et al.*, 2023).

El control de la escama verde requiere un enfoque integrado que combine diversas tácticas: control biológico mediante la utilización de parasitoides y depredadores naturales, control químico con la aplicación de insecticidas específicos, prácticas agronómicas como podas y manejo de la sombra para mejorar la ventilación, así como la aplicación de fertilización

balanceada para fortalecer la resistencia de la planta, y el manejo de hormigas, que establecen relaciones simbióticas con las escamas, protegiéndolas de sus enemigos naturales (Jackson *et al.*, 2012).

La implementación de un programa de monitoreo constante permite la detección temprana de la plaga y la aplicación oportuna de medidas de control, minimizando así el impacto económico.

3.6. Enfermedades del cultivo de café

Además de las plagas, el cultivo de café es susceptible a diversas enfermedades fúngicas, entre las que destacan la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), la mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*), la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*), el mal rosado (*Corticium salmonicolor*), el ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y el mal del talluelo (*Rhizoctonia solani*). Estas enfermedades pueden causar daños significativos en las hojas, frutos y tallos, afectando el rendimiento y la calidad del café.

3.6.1. Roya del café

Enfermedad causada por el hongo *Hemileia vastatrix* que tiene un impacto significativo en la producción de café debido a la defoliación que provoca en las plantas (SENASICA, 2014).

La roya se manifiesta principalmente en las hojas del cafeto, donde aparecen manchas amarillas o anaranjadas en el envés. Estas manchas liberan esporas del hongo, que se dispersan fácilmente por el viento, propagando la enfermedad. En infecciones severas, la enfermedad provoca la caída prematura de las hojas, lo que debilita la planta y reduce su capacidad de producción (Libert y Paz, 2018).

El control de la roya implica una combinación de estrategias, incluyendo el uso de variedades de café resistentes, la aplicación de fungicidas y prácticas de manejo integrado de cultivos, el manejo de sombra, una fertilización balanceada y la implementación de podas sanitarias.

3.6.2. Mancha de Hierro

Cercospora coffeicola es un hongo fitopatógeno que causa la enfermedad conocida como "mancha de hierro" en los cultivos de café. Esta enfermedad afecta principalmente las hojas y los frutos del cafeto, y su presencia puede tener un impacto significativo en la producción de café (Pilozo, 2021).

La enfermedad se manifiesta en las hojas y frutos del café con manchas que inicialmente son pequeñas y amarillentas, pero que con el tiempo se oscurecen y adquieren un color marrón rojizo, de ahí el nombre de "mancha de hierro". En infecciones severas, las hojas pueden caer prematuramente, lo que debilita la planta y reduce su capacidad de producción. Los frutos también se ven afectados, lo que puede provocar su caída y afectar la calidad del grano.

La mancha de hierro puede causar pérdidas significativas en la producción de café, especialmente en áreas con condiciones climáticas favorables para el desarrollo del hongo.

Dentro de los factores que favorecen la aparición de la enfermedad se destacan humedades relativas superiores al 80%, temperaturas elevadas y desbalances nutricionales en la planta.

El control de la mancha de hierro implica una combinación de estrategias, incluyendo la aplicación de fungicidas, prácticas de manejo como la poda y el control de la sombra, fertilización balanceada y el uso de variedades resistentes.

3.6.3. Antracnosis

La antracnosis, una enfermedad fúngica presente en los cultivos de café, es causada principalmente por hongos del género *Colletotrichum*, esta patología puede infligir daños considerables en diversas etapas del desarrollo del cafeto (Cristóbal-Martínez *et al.*, 2014).

Su presencia se revela a través de manchas oscuras e irregulares que emergen en las hojas y en los frutos, provocando su pudrición desde el inicio de la floración hasta la maduración de los frutos, condenando así la cosecha a la merma (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020). Además,

puede causar la muerte regresiva de las ramas, un síntoma que presagia la decadencia de la planta.

El impacto de la antracnosis se traduce en pérdidas económicas significativas, ya que la caída prematura de frutos y la defoliación reducen drásticamente la producción. La calidad del grano también se ve comprometida, afectando el valor del producto final.

Esta enfermedad prospera en condiciones de alta humedad y temperaturas elevadas, encontrando un aliado en los desequilibrios nutricionales de la planta y en el exceso de sombra. Estos factores crean un entorno propicio para el desarrollo y la propagación del hongo.

Para contrarrestar la antracnosis, los productores de café deben adoptar un enfoque integral que combine diversas estrategias. La aplicación de fungicidas, aunque necesaria en algunos casos, debe complementarse con prácticas de manejo de cultivos que fortalezcan la resistencia de la planta. La poda, el control de la sombra y la fertilización equilibrada son herramientas esenciales en esta lucha. Además, el manejo adecuado de la humedad y la selección de variedades resistentes pueden contribuir a minimizar el riesgo de infección.

3.6.4. Ojo de gallo

La enfermedad del "ojo de gallo" en el café, es una patología foliar de notable impacto económico en las regiones cafetaleras latinoamericanas, se manifiesta como una amenaza insidiosa para la productividad del cultivo. Su agente causal, el hongo basidiomiceto *Mycena citricolor*, encuentra en las hojas, ramas y frutos del cafeto el sustrato idóneo para su desarrollo parasitario (Asociación Nacional del Café [ANACAFÉ], 2017).

La etiología de esta enfermedad se inicia con la dispersión de basidiosporas, propagadas por el viento y la lluvia, que encuentran en los tejidos foliares el punto de partida para la infección (Rivera y Wright, 2020). La penetración del hongo, facilitada por la presencia de estomas o heridas, da inicio a la colonización del mesófilo foliar, desencadenando la formación de lesiones necróticas características.

La sintomatología se revela a través de lesiones foliares circulares u ovaladas, de tonalidades grisáceas a blanquecinas, circundadas por un halo amarillento o anaranjado, evocando la imagen de un "ojo de gallo" (García-Túchez, 2012). En el epicentro de estas lesiones, emergen los basidiocarpos, estructuras reproductivas del hongo, liberando basidiosporas que perpetúan el ciclo de la enfermedad. En situaciones de infección severa, la coalescencia de las lesiones conduce a la defoliación prematura, comprometiendo la salud y el rendimiento de la planta.

La proliferación de *M. citricolor* se ve favorecida por condiciones de alta humedad relativa y temperaturas moderadas, así como por un exceso de sombra, alta densidad de siembra y la persistencia de inóculo residual en plantaciones abandonadas.

El impacto económico de esta enfermedad se traduce en la reducción de la capacidad fotosintética de la planta, la defoliación prematura que afecta la producción de frutos, la disminución de la calidad del grano y, en consecuencia, pérdidas económicas significativas en las regiones más afectadas (Romero y Camilo, 2019).

El control de esta patología demanda un enfoque integrado que combine estrategias culturales, químicas y biológicas. La poda y el manejo de la sombra, la eliminación de malezas y residuos de cosecha, y la siembra de variedades resistentes constituyen pilares fundamentales del control cultural. La aplicación de fungicidas cúpricos o sistémicos, siguiendo las recomendaciones de un técnico especializado, complementa las medidas de control químico. El uso de antagonistas microbianos, por su parte, representa una alternativa prometedora en el control biológico de la enfermedad (Díaz-Sánchez, 2022).

3.6.5. *Fumagina*

La fumagina, un fenómeno observable en los cultivos de *Coffea* spp., no constituye una patología primaria, sino una manifestación epifítica secundaria a la actividad de insectos fitófagos de tipo chupador (Figuroa *et al.*, 2023). Su etiología reside en la proliferación de hongos saprófitos, preponderantemente del género *Capnodium*, sobre el exudado azucarado,

conocido como melaza, secretado por hemípteros tales como coccoideos, áfidos, aleyródidos y psílidos.

La infestación de insectos chupadores desencadena la excreción de melaza, un sustrato rico en carbohidratos, que se deposita sobre el follaje, ramas y frutos del cafeto. Este medio propicia el desarrollo de un micelio fúngico de coloración negruzca, característico de la fumagina (Jiménez-Martínez, 2016).

La fumagina se presenta como una costra micelial oscura, de consistencia pulverulenta, que recubre las estructuras vegetales aéreas. Si bien no induce daños histológicos directos, su presencia interfiere con la actividad fotosintética al reducir la captación de radiación lumínica. Asimismo, deteriora la calidad organoléptica de los frutos y favorece la atracción de otros insectos, pudiendo exacerbar la problemática fitosanitaria (Ormeño-Villajos, 2023).

El control de la fumagina se centra en la erradicación de la población de insectos vectores mediante la aplicación de insecticidas de amplio espectro o de selectividad dirigida, así como en la implementación de medidas de control biológico y prácticas agronómicas que promuevan el equilibrio del agroecosistema (Ruiz-Orta *et al.*, 2023). La eliminación de hormigas, que establecen relaciones simbióticas con los insectos chupadores, también contribuye a la mitigación de la incidencia de fumagina.

III. JUSTIFICACIÓN

El cultivo del café se destaca como el producto agrícola más significativo en el comercio internacional. Incluso una ligera disminución en el rendimiento o un aumento mínimo en los costos de producción debido a casusa de la roya del café puede tener consecuencias significativas para los productores de café y para aquellos países cuyas economías dependen en gran medida de las exportaciones de café (APS, 2011). En la actualidad (2022), en el estado de México hay 531.46 hectáreas de café en por lo menos ocho municipios (Amatepec, Tlatlaya, Sultepec, Temascaltepec. Malinalco, San Simón de Guerrero, Tejupilco y Ocuilan) que poseen condiciones propicias para una producirlos (SIAP, 2022), además del potencial para la producción de café de especialidad (Cup of excelente, 2018, 2019, 2021). El objetivo de este estudio es recopilar datos que permitan diseñar un Sistema de Información Geográfica para la gestión de problemas fitosanitarios del café en el Estado de México que serán fundamentales para identificar zonas de infestación y dirigir medidas de control.

Por lo que es de suma importancia entender la distribución espacial de los diferentes problemas fitosanitarios para desarrollar programas de manejo integrado pertinente y respetuoso con el medio ambiente. En este contexto, también resulta crucial el desarrollo preciso y eficiente de métodos de muestreo y evaluaciones de riesgo (Acevedo et al., 2016). La obtención de estudios más específicos sobre la incidencia y distribución de las plagas y enfermedades, permitirá contar con información precisa que facilite la implementación de acciones de control y manejo más localizadas. De esta manera, se podrán dirigir no solo acciones de control químico, sino también estrategias de manejo cultural y preventivo adaptadas al tiempo y espacio específico del cultivo.

IV. HIPÓTESIS

La integración de datos en el entorno de un Sistema de Información Geográfica puede favorecer la toma de decisiones en la gestión y control de los problemas fitosanitarios del cultivo del café en el Estado de México.

V. OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar un Sistema de Información Geográfica para la gestión sustentable de problemas fitosanitarios en el cultivo de café en el Estado de México

Objetivos Específicos

- Agrupar la información obtenida en campo para realizar la confección de las bases de datos para la creación del SIG.
- Realizar el análisis multicriterio para apoyar a la toma de decisiones sustentables en el sector cafetalero del Estado de México.

VI. MATERIALES Y METODOS

6.1 Área de estudio

La presente investigación se llevó a cabo durante el periodo comprendido entre septiembre de 2022 y agosto de 2023 en tres municipios del Estado de México, Temascaltepec, Amatepec y Sultepec, teniendo éstos un clima templado y una temperatura media de entre 21 y 23 °C (Cardoso, 1999).

6.2 Muestreo

El área de estudio fueron seis parcelas por municipio de 0.5 hectáreas, con un sistema de policultivo tradicional con una mezcla de variedades de café caturra y typica de manejo convencional, entre 40 y 60% de sombra compuesta de árboles de parota, fresnos, naranjas y limones y especie semi leñosas como la higuerilla, en su mayoría cafetos normales generalmente son cafetos jóvenes, menores a 15 años o bien rejuvenecidos, sin poda durante el periodo de evaluación, el tipo de suelo es clasificado como regosoles franco arenosos con 30 cm de profundidad. Cada parcela se dividió en cuadrantes de 10mx10m para tener 50 cuadrantes, de cada uno se marcaron y georreferenciaron 4 árboles con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361) para un total de 200 árboles por parcela (Moral García, 2004) y cada árbol se dividió en estrato bajo, medio y alto.

Se realizaron muestreos cada quince días en 12 hojas por estrato y 3 hojas por rama por punto cardinal (norte, sur, este y oeste) registrando datos de incidencia de cada uno de los problemas fitosanitarios evaluados, tomando como base la escala de severidad e incidencia del SENASICA (2024) para detectar presencia o ausencia de cada problema.

6.3 Bases de datos

Se confeccionaron las bases de datos para cada uno de los problemas fitosanitarios muestreados. Se estandarizaron cada una de las bases con los datos de los 200 árboles georreferenciados y los datos obtenidos de los muestreos quincenales durante el periodo de evaluación en las seis parcelas de cada municipio; obteniendo promedios mensuales de dichos datos.

6.4 Mapas temáticos

En el programa de QGIS versión 3.24 Tisler se añadieron las bases de datos ya estandarizadas de cada plaga y enfermedad muestreada, considerando los pasos de un manual creado para su registro (Anexo), obteniendo 12 mapas mensuales por parcela por problema fitosanitario por municipio, teniendo en total de 576 mapas temáticos de incidencia, los cuales serán la información nueva recabada para la toma de decisiones del SIG.

6.5 Ahorro económico y ambiental

Una de las metas de la agricultura de precisión es dirigir las medidas de control sobre las zonas específicas de infección de enfermedades e insectos plaga, lo cual determinaría un posible ahorro económico y una reducción de la cantidad del volumen de plaguicidas aplicados para su control. Obteniendo el porcentaje de superficie infectada de los mapas elaborados se calculó el gasto y ahorro económico y ambiental con agricultura de precisión contra agricultura convencional.

VII. RESULTADOS

7.1 Artículo Científico

Se envió el artículo “SIG para la gestión de problemas fitosanitarios del café en Sultepec, México” a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, el cual se encuentra en estatus aceptado.



Texcoco, Estado de México, 06 de febrero de 2025
Núm. Ref. 3760-24

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

Por medio de la presente se hace constar que el manuscrito titulado **SIG para la gestión de problemas fitosanitarios del café en Sultepec, México**, del cual son autores: **Alfredo Ruiz-Orta, José Francisco Ramírez-Dávila, Juan Campos-Alanís y Francisco Gutiérrez-Rodríguez**, fue aceptado para ser publicado en el volumen 16(5)2025, en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente

JS/PhFWpRZ00w+VhUygg==Dk0XyGzNRhvvITq0dJF02IFPa=

Dra. Doris M. Saucedo-Jarquín
Editora en Jefe de la Revista
Mexicana de Ciencias Agrícolas



Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5, Coatlincán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 55-38-71-87-00 - Ext. 85355

SIG para la gestión de problemas fitosanitarios del café en Sultepec, México

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como los mapas temáticos se usan en la agricultura de precisión para la recopilación, análisis y representación de datos de interés; para posibilitar la eficiencia de los cultivos y la minimización de los costos y recursos empleados para diferentes actividades, como la monitorización de plagas y enfermedades. El objetivo de la investigación fue diseñar un SIG para la gestión sustentable de problemas fitosanitarios del café en el municipio de Sultepec, Estado de México. Se elaboraron bases de datos y a partir del programa QGIS 3.24 Tisler se crearon 108 mapas temáticos que representan un promedio mensual de la incidencia de ojo de gallo, roya y mancha de hierro en tres parcelas muestreadas; en los cuales se observa el progreso de cada uno de los problemas durante un año de muestreo. Dichos mapas permitieron identificar focos de infección bien marcados, así como los meses con mayor incidencia, septiembre a diciembre para ojo de gallo y mancha de hierro, teniendo una superficie infectada de hasta 86 %, y para roya los meses de enero a abril fueron los que presentan mayor incidencia, alcanzando una superficie infectada de hasta 82 %. Los mapas temáticos permiten la divulgación de la utilidad de las tecnologías y el desarrollo de la toma de decisiones más oportuna y eficaz en el manejo y control de plagas y enfermedades del café, teniendo como desafío la gestión sustentable del cultivo.

Palabras clave: gestión sustentable, potencial agronómico, mapas temáticos.

Abstract

Geographic Information Systems (GIS), as well as thematic maps, are used in precision agriculture for the collection, analysis and representation of data of interest; to enable the efficiency of crops and the minimization of costs and resources used for different activities, such as pest and disease monitoring. The objective of the research was to design a GIS for the sustainable management of phytosanitary problems of coffee in the municipality of Sultepec, State of Mexico. Databases were created and using the QGIS 3.24 Tisler program, 108 thematic maps were created that represent a monthly average of the incidence of rooster's eye, rust and iron spot in three sampled plots; in which the progress of each of the problems is observed during a sampling year. These maps allowed us to identify well-marked sources of infection, as well as the months with the highest incidence, September to December for rooster's eye and iron spot, having an infected surface of up to 86%, and for rust the months of January to April were the months. that have a higher incidence, reaching an infected surface of up to 82%. Thematic maps allow the dissemination of the usefulness of technologies and the development of more timely and effective decision-making in the management and control of coffee pests and diseases, with the challenge of sustainable management of the crop.

Keywords: sustainable management, agronomic potential, thematic maps.

Introducción

La agricultura es una labor que acompaña al hombre hace miles de años, y sus procesos han evolucionado con el transcurso del tiempo. Recientemente, empresas privadas y públicas del sector agrícola e industrial han unido esfuerzos para proyectar soluciones de la Agricultura de Precisión (AP), cuyo propósito es mejorar el rendimiento de los cultivos, optimizar el uso de recursos, disminuir el impacto ambiental y facilitar la toma de decisiones estratégicas y económicas (Orozco y Ramírez, 2016; Silva *et al.*, 2011).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son empleados en la AP para la recopilación, gestión, manipulación, análisis y representación de datos e información de interés, para lograr el entendimiento de la variación observada de los suelos, la posible asociación entre vegetales y plantaciones, los mapeos de rendimiento de los cultivos, la monitorización en la aparición de plagas y/o enfermedades y el empleo de fertilizantes. Con lo anterior se posibilita la eficiencia de los cultivos y la minimización de los costos y recursos empleados para estas actividades (Jiménez-Moya *et al.*, 2016; Cantos *et al.*, 2022).

El café es un cultivo tradicional, básico, de exportación y estratégico, es fuente generadora de empleos y de divisas para el país, así como para la conservación de la biodiversidad; a nivel nacional alcanza una producción de alrededor de 1,056, 388.39 toneladas y un valor en su producción de \$5,210,614.06 MXN. Su importancia en la economía del país, es un factor determinante para el desarrollo de programas y apoyos al sector cafetalero (CEDRSSA, 2019; SIAP, 2023).

Actualmente la producción cafetalera enfrenta amenazas fitosanitarias, como: Mancha de hierro

(*Mycosphaerella coffeicola*), Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y Roya (*Hemileia vastatrix*); éstas afectan la rentabilidad del cultivo y requieren de aplicación de medidas de control. Particularmente la roya del café, es el principal problema fitosanitario de alto impacto para la caficultura; el impacto económico de la enfermedad no solo se refleja en la reducción de la cantidad y la calidad de la producción, sino también en la necesidad de implementar costosas medidas de control (CEDRSSA, 2019).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue diseñar un Sistema de Información Geográfica para la gestión sustentable de problemas fitosanitarios del cultivo de café en el municipio de Sultepec en el Estado de México; bajo el supuesto de que la integración de datos en el entorno de un SIG puede favorecer la toma de decisiones oportuna en la gestión y control de dichos problemas fitosanitarios en la entidad.

Materiales y métodos

Región de estudio

La investigación se realizó en el municipio de Sultepec, Estado de México, ubicado a 18°52'00" N y 99°57'00" O al sur de la entidad, a una altura de 2,290 msnm durante 12 meses (septiembre 2022 – agosto 2023).

Muestreo

Se realizaron 24 muestreos cada quince días para tres problemas fitosanitarios, Mancha de hierro (*Mycosphaerella coffeicola*), Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y Roya (*Hemileia vastatrix*), en 3 parcelas de media hectárea, las cuales se dividieron en cuadrantes de 10 x 10 m, teniendo un total de 50 cuadrantes que se marcaron con listones y georreferenciaron con un Sistema de

Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) (modelo Trimble® SPS361, Trimble, Dayton, Estados Unidos) seleccionando 4 plantas por cuadrantes dando un total de 200 plantas por parcela. Cada planta se dividió por estrato (bajo, medio y alto) en la que se contabilizaron 12 hojas por estrato, teniendo un total de 36 hojas por planta; registrando el número de hojas con presencia de cada enfermedad, basándose en la guía de síntomas y daños del café del Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria del SENASICA (2024).

Elaboración del SIG

En la investigación se desarrolla un SIG empleando Quantum GIS o QGIS versión 3.24 Tisler (QGIS, 2023) como herramienta principal de procesamiento de datos, disponible para diversos sistemas operativos y posibilita el manejo de una amplia variedad de ficheros de distintas fuentes. También posee soporte de conexión con las bases de datos geoespaciales de mayor renombre internacional, y a su vez permite la configuración de servicios web, mapas de información temática y de metadatos en general (Shekhar y Xiong, 2017; Pérez-García *et al.*, 2019). Las bases de datos se elaboraron y uniformizaron en formato Excel, se introducen a QGIS y posteriormente se generan los mapas temáticos.

Resultados y discusión

Se elaboraron 36 mapas temáticos con promedio mensual, que representan la incidencia de roya, mancha de hierro y ojo de gallo, obteniendo 108 mapas en total, de las 3 parcelas muestreadas, lo que permitió visualizar la presencia de la infección de las enfermedades. Los mapas obtenidos arrojan que las poblaciones problema se encuentran focalizados, con un crecimiento de la infección ascendente.

Específicamente para *H. vastatrix* se puede observar un aumento en las poblaciones durante los meses de enero a abril para las tres parcelas muestreadas con puntos de infección notables (Figura 1-3). Los agregados pueden presentarse de manera aleatoria dentro de la unidad experimental como lo mencionan Pérez-Constantino *et al.* (2024) además de que esto puede ser el resultado de la diseminación de las esporas del hongo por factores ambientales como el viento y la lluvia o factores humanos.

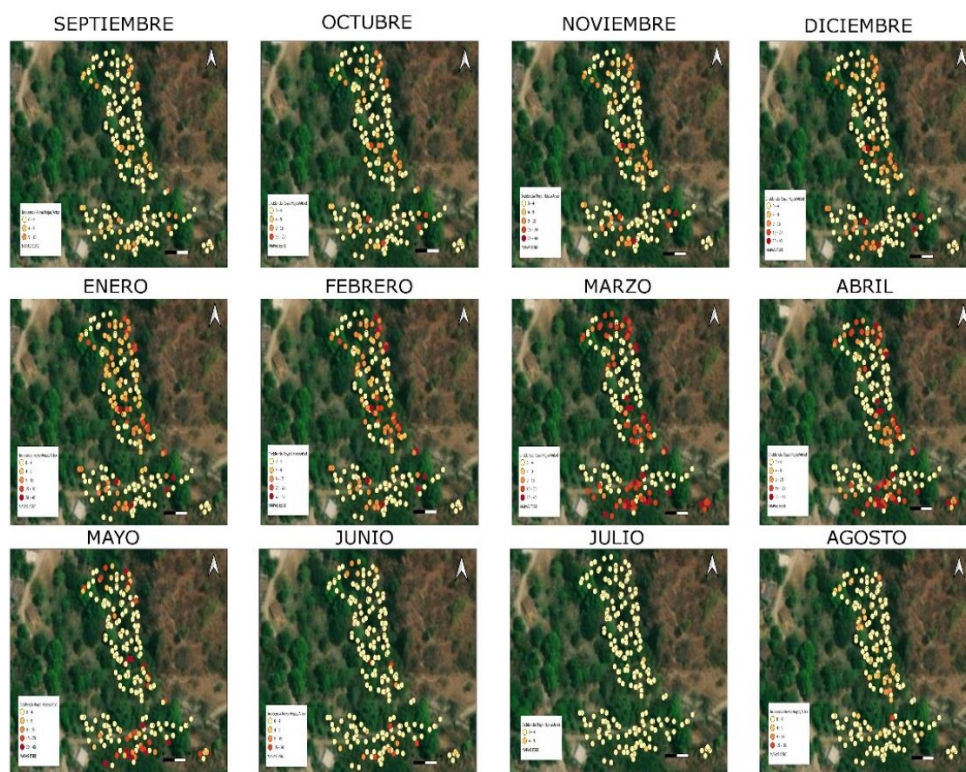


Figura 1. Mapas mensuales de incidencia de Royá (*Hemileia vastatrix*) en la parcela 1 en Sultepec, Estado de México.

Sin embargo, para los meses de junio a agosto se observa que la incidencia del hongo disminuyó bastante en las tres parcelas muestreadas, debido posiblemente porque la precipitación lavó las esporas de la roya y a su vez transporta el inóculo a las hojas y plantas aledañas, de acuerdo a lo mencionado por Mora *et al.* (2015) quienes describen el desarrollo del hongo en focos de

infestación.

Con la combinación de técnicas geoespaciales y la creación de los mapas temáticos se evidenció el progreso de la incidencia de *H. vastatrix* durante el periodo de muestreo (Figura 1-3), coincidiendo con lo mencionado por Bautista *et al.* (2018), quienes usando mapas temáticos lograron distinguir ciertos elementos, como bosques, con precisión para identificar zonas con potencial productivo agrícola de café en Veracruz. Además, debido a la naturaleza cíclica del patógeno, la intensidad de daño puede variar entre parcelas dentro de una misma región de control (Coria-Contreras *et al.* 2014; Pérez-Constantino *et al.* 2024).

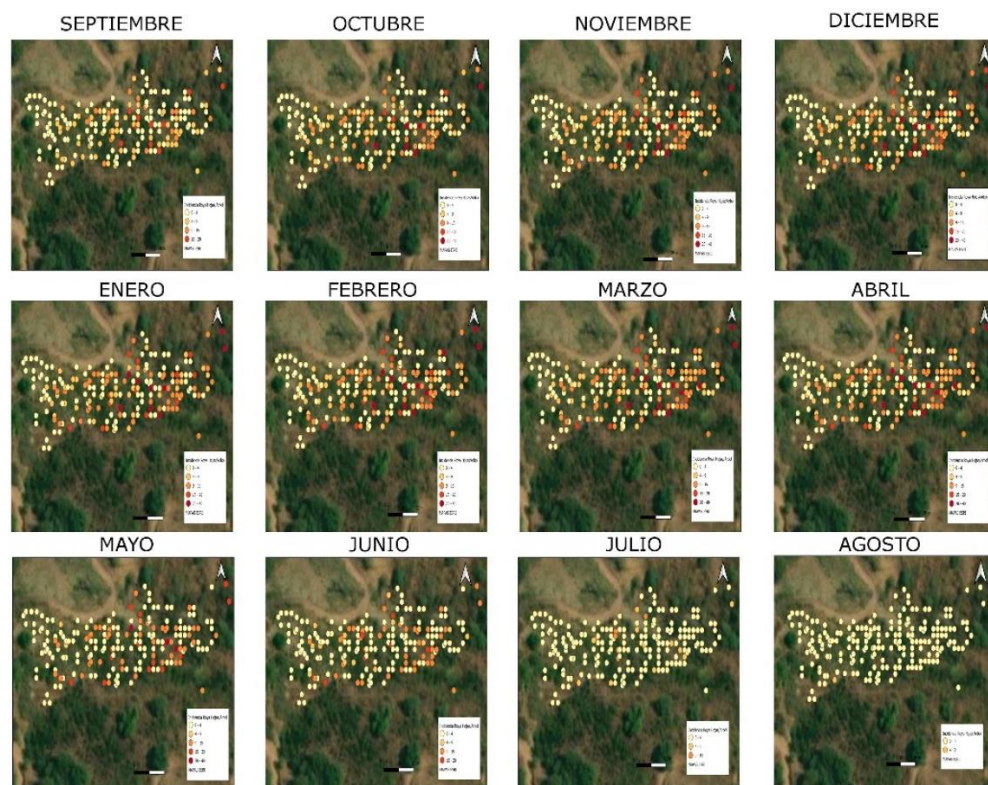


Figura 2. Mapas mensuales de incidencia de Roya (*Hemileia vastatrix*) para la parcela 2 en Sultepec, Estado de México.

Estas tecnologías se han desarrollado y aplicado como estrategia para la gestión de cultivos y la

oportuna toma de decisiones que ayude a determinar el tipo de comportamiento y la distribución de los problemas fitosanitarios en los cultivos (Lokers *et al.*, 2016; Martínez-Martínez *et al.*, 2023).

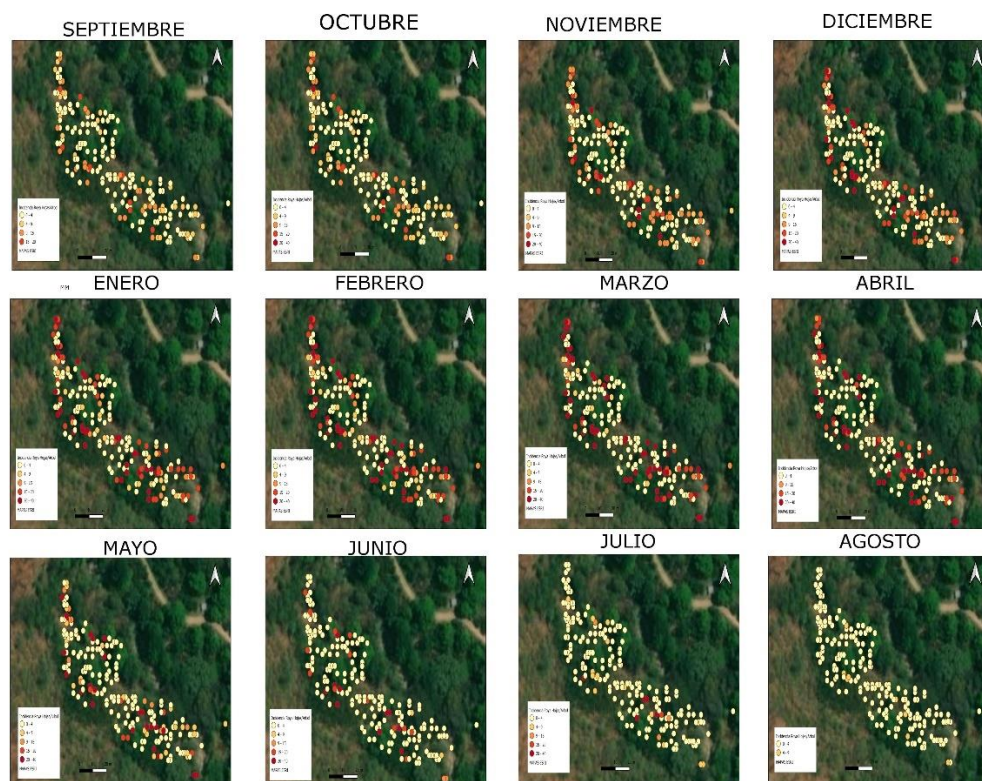


Figura 3. Mapas mensuales de incidencia de Royá (*Hemileia vastatrix*) para la parcela 3 en Sultepec, Estado de México.

En las Figuras 4, 5 y 6 se observa la incidencia de ojo de gallo (*Mycena citricolor*) para las parcelas muestreadas, con un porcentaje de superficie infectada de 86 % al inicio del estudio (septiembre) bajando durante los siguientes meses, lo que indica la disminución de lluvias y humedad, a su vez se observa que a partir de enero y febrero se redujo a 70 % , indicando el inicio de la temporada de sequías en la zona, provocando una disminución en los puntos de agregación de la enfermedad en cada una de las parcelas (Pino *et al.*, 2023).



Figura 4. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) para la parcela 1 en Sultepec, Estado de México.

Figuroa-Figuroa *et al.* (2020) hacen mención que el uso de los sistemas de teledetección son una opción viable para identificar el potencial de cultivos agrícolas de impacto económico en el Estado de México, como lo son el aguacate y el café. En El Salvador, Choriego *et al.* (2023) detallan que su proyecto de “AgroSIG” en café y caña de azúcar, permitió identificar a través de mapas temáticos, el uso de suelo, pendientes, vegetación, entre otros; es decir, al conocer con mayor exactitud lo que poseen los clientes, permite poder capacitarlos en áreas específicas que repercutan de manera más efectiva en sus fincas, lo que coincide con lo que se observa en los mapas de esta investigación. Además los SIG permiten realizar modelos y predicciones que ayudan a la evaluación y gestión de riesgos, lo cual otorga la oportunidad de planificar el manejo de las parcelas y los recursos disponibles (Figuroa *et al.*, 2024).

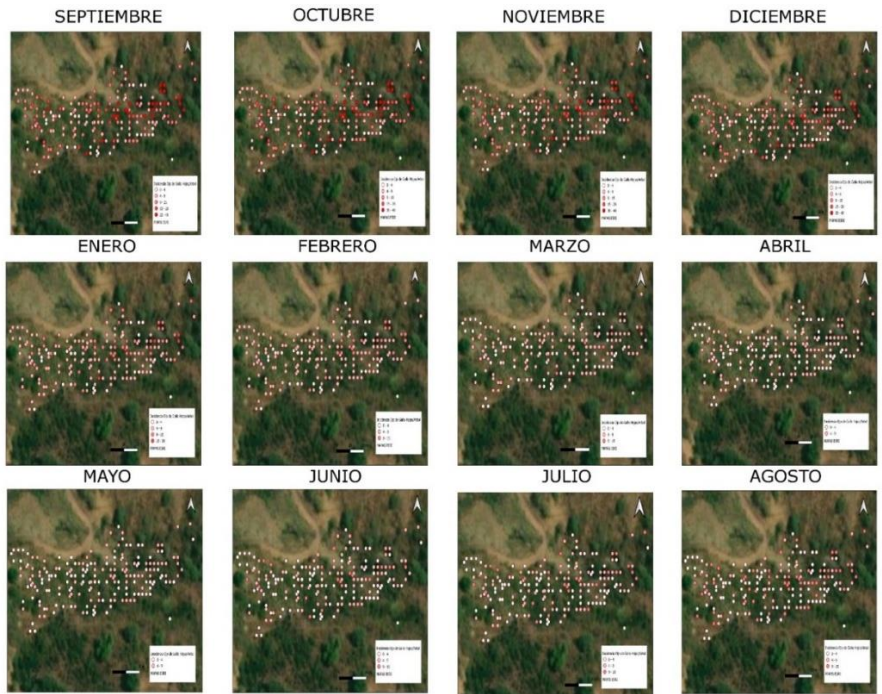


Figura 5. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) para la parcela 2 en Sultepec, Estado de México.

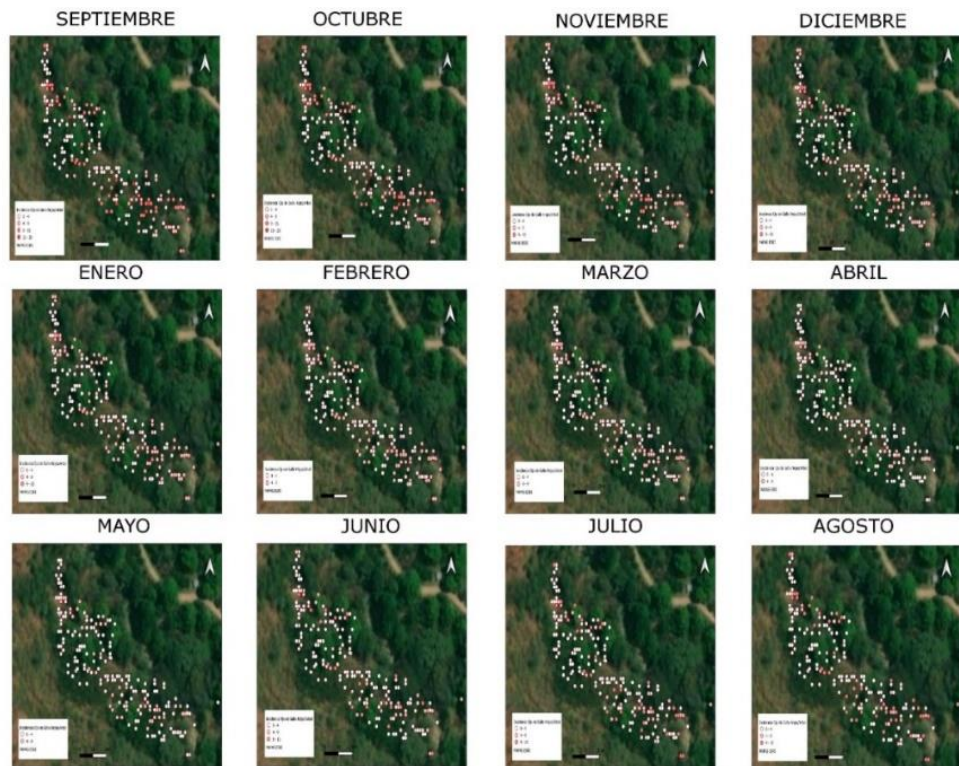


Figura 6. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) para la parcela 3 en Sultepec, Estado de México.

Para los mapas de las parcelas 2 y 3 (Figura 5 y 6) se identificaron focos de infección de la enfermedad, la cual disminuyó a partir del mes de enero y se mantuvo constante hasta el mes de junio, esto podría permitir que los productores realicen un control dirigido a zonas de la parcela donde se encuentra el foco de infección, coincidiendo con lo mencionado por Sosa-Escalona *et al.* (2017), en una provincia de Cuba, se creó un SIG para la identificación digital de campo donde se pronostican las zonas con mayor amenaza de sequía, esto para que los agricultores puedan planificar sus siembras alrededor de los periodos más secos del año.

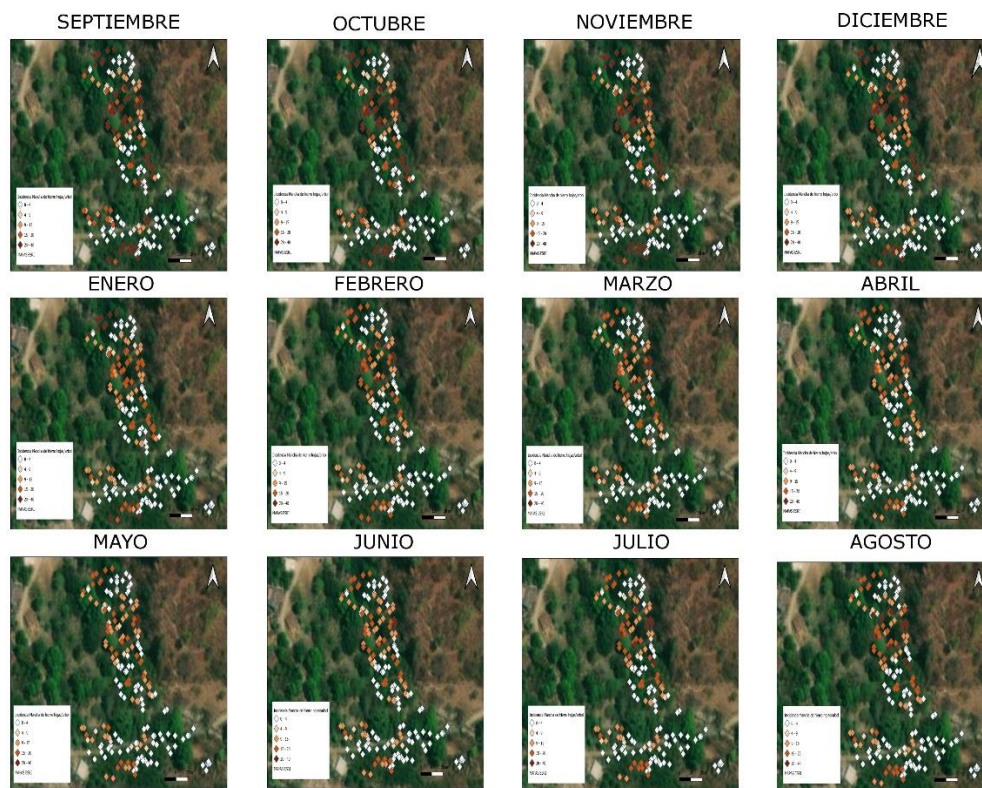


Figura 7. Mapas mensuales de incidencia de Mancha de Hierro (*Mycosphaerella coffeicola*) para la parcela 1 en Sultepec, Estado de México.

En las Figuras 7, 8 y 9 se observan los mapas temáticos de la distribución e incidencia de *Mycosphaerella coffeicola* en las tres parcelas muestreadas; al igual que en los problemas fitosanitarios anteriores, se observan los focos de infección de la enfermedad bien identificados durante los meses de muestreo. Durante los meses de septiembre a diciembre, se presenta mayor incidencia con un porcentaje de 81 % para la parcela 1, 57 % para la parcela 2 y 64 % para la parcela 3.

De acuerdo con Rea-Sánchez *et al.* (2015) en el tratamiento de imágenes aéreas y la generación de mapas temáticos se identifican zonas detalladas para la toma de decisiones en tiempo real, ya que reduce al mínimo el tiempo de respuesta ante determinados fenómenos, como la aplicación de fertilizantes e insecticidas, para estimar, evaluar y entender dichas variaciones, con la finalidad de predecir con mayor exactitud la producción de los cultivos.

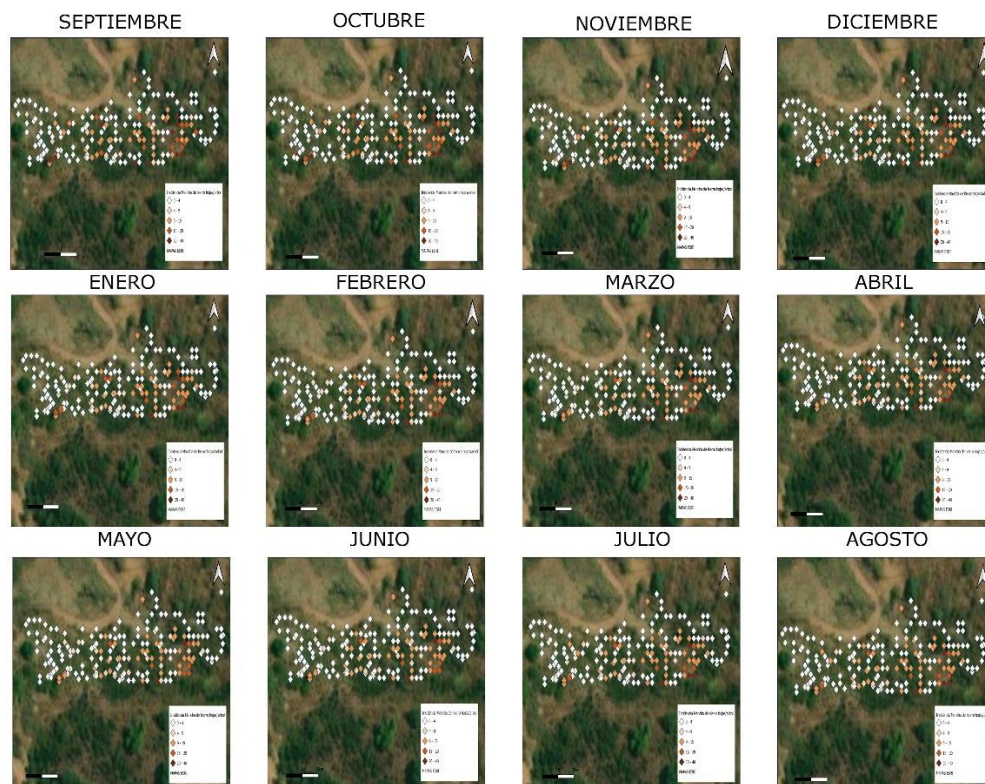


Figura 8. Mapas mensuales de incidencia de Mancha de Hierro (*Mycosphaerella coffeicola*) para la parcela 2 en Sultepec, Estado de México.

Goyes-Chávez *et al.* (2022) realizaron un estudio para evaluar zonas potenciales de centros de distribución de café en Colombia, y arrojan como resultados que herramientas geográficas como los SIG, métodos multicriterio y criterios geográficos son adecuados para la ubicación idónea de centros de distribución cafeteros, sin embargo, es necesario contar con información detallada de las zonas para tomar decisiones, como por ejemplo resolver conflictos del uso de la tierra, intereses de las asociaciones cafetaleras, entre otros; y así mejorar la ventaja competitiva, no sólo en el café sino en todos los sectores agrícolas.

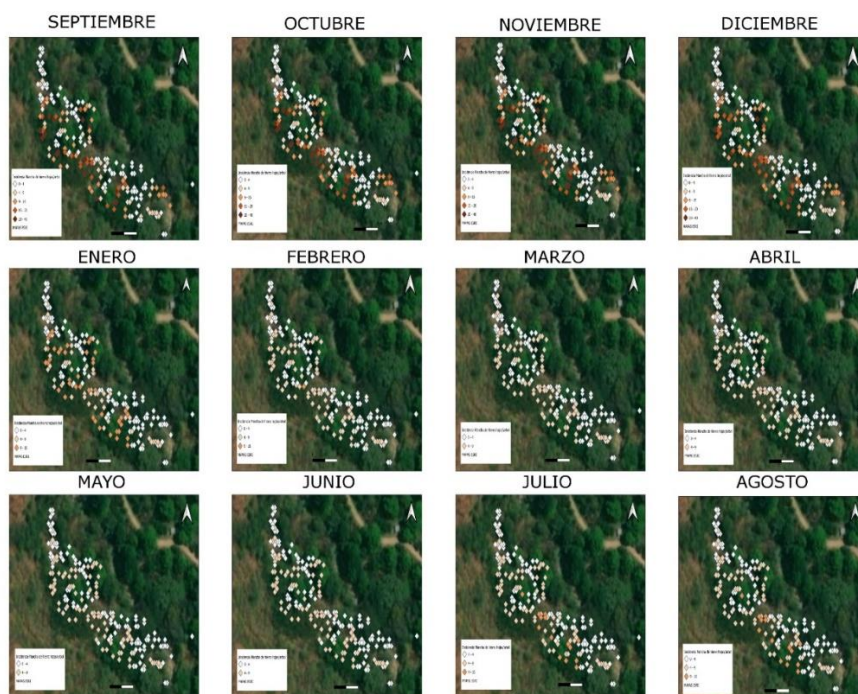


Figura 9. Mapas mensuales de incidencia de Mancha de Hierro (*Mycosphaerella coffeicola*) para la parcela 3 en Sultepec, Estado de México.

Conclusiones

Los datos georreferenciados son el elemento primordial y básico para aprovechar un SIG, por eso el desarrollo de mapas temáticos de incidencia de diferentes patógenos en parcelas de café, permite la divulgación de la utilidad de las tecnologías para precisar en la mejora de intercambio de la información entre los agricultores, trabajadores extensivos, investigadores y, en cierta medida, a los responsables políticos, lo que permite una toma de decisiones más oportuna, específica y eficaz para el control de plagas y enfermedades del café, logrando una gestión sustentable del cultivo en la zona.

Literatura citada

- Bautista, C. E.A.; Gutiérrez, C.E.V.; Ordaz, C.V.M.; Gutiérrez, C.M.C. y Cajuste, B.L. 2018. Sistemas agroforestales de café en Veracruz: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana*, 36(3): 261-273. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>
- Cantos, S.E.A.; Portilla, S.I.M.; Fajardo, E.P.G. & Lara, G.A.N. 2024. Evaluación multicriterio con aplicación de sistemas de información geográficas SIG para definir espacios de expansión urbana en el cantón Naranjito. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 6(6): 93-109. <https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v6i6.1259>
- CEDRSSA. 2019. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Investigación interna, comercio internacional, el caso de México. Ciudad de México, México. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/94Caf%C3%A9%20Producci%C3%B3n%20y%20Consumo.pdf> (Recuperado: mayo 2024).

- Choriego, M.R.A.; Hernández, S.V.S. y Martínez, S.D.N. 2023. Utilización de drones con aplicaciones tecnológicas en la agricultura por el sector bancario de El Salvador. Ceiba, 56(1): 61-68. <https://doi.org/10.5377/ceiba.v56i1.16361>
- Coria-Contreras, J.; Mora-Aguilera, G.; Martínez-Bolaños, M.; Guzmán-Deheza, A., Acevedo-Sánchez, G. y Flores-Sánchez, J. 2014. Epidemiología de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Soconusco, Chiapas. Revista Mexicana de Fitopatología. 32:43-53.
- Figuroa-Figuroa, D.K.; Ramírez-Dávila, J.F.; Antonio-Némiga, X. y González-Huerta, A. 2020. Cartografía del aguacate en el sur del Estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(4): 865-879. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2173>
- Figuroa-Figuroa, D.K.; Ramírez-Dávila, J.F.; Antonio-Némiga, X. y Serrato-Cuevas, R. 2024. Modelo espacial de áreas potenciales para plantaciones de aguacate en el Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15(5), e3515. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i5.3515>
- Goyes-Chávez, D.M.; Jaramillo-Molina, C. y Arango-Pastrana, C.A. 2022. Evaluación espacial de zonas potenciales de centros de distribución de cafés especiales, caso del Departamento de Nariño-Colombia. Revista EIA, 19(38): 1-22. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1542>
- Jiménez-Moya, G.E.; León, C.A.; Piñero, P.P.Y. y Romillo, T.A. 2016. SIGESPRO: Sistemas de Información Geográfica para controlar proyectos. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 10(2): 181-195. Recuperado en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222718992016000200012&lng=es&tlng=pt
- Lokers, R.; Knapen, R.; Janssen, S.; Van-Randen, Y. and Jansen, J. 2016. Analysis of big data technologies for use in agro-environmental science. Environmental Modelling & Software. 84:494-504. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.07.017>
- Martínez-Martínez, N.; Ramírez-Dávila, J.F.; Mejía-Carranza, J.; Vera-Noguez, S. y Ramírez-

- Chimal, J. 2023. Ahuacatl: aplicación móvil para determinar la distribución espacial de problemas fitosanitarios en aguacate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3): 471-476. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3052>
- Mora, A.G.; Acevedo, S.G.; Contreras, J.; González, G.R.; López, B.A. y López, J.M. 2015. Alertas tempranas para el manejo de focos de roya del cafeto en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, suplemento: 62-70.
- Orozco, Ó. A., y Ramírez, G. L. 2016. Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28): 103-124. <https://doi.org/10.22395/rium.v15n28a6>
- Pérez-García, C.A.; Pérez-Atray, J.J.; Hernández-Santana, L.; Gustabello-Cogle, R. y Becerra de Armas, E. 2019. Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 13(2): 30-46. Recuperado en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222718992019000200030&lng=es&tlng=en
- Pérez-Constantino, A.; Ramírez-Dávila, J.F.; Gutiérrez-Rodríguez, F. y Pérez-López, D. 2024. Comportamiento espacial de roya del cafeto en Sultepec, Estado de México, México. *Revista Acta Agrícola y Pecuaria*, 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101004>
- Pino, M.E. 2023. Comportamiento espacial de ojo de gallo *Mycena citricolor*, en cafetales del municipio de Sultepec, Estado de México. En Herrera-Tapia, F., Rubí-Arriaga, M. y Rivera-Rojo, C.R. *Café Mexiquense: Producción, mercado y política pública*. (pp. 293-328). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Rea-Sánchez, V.; Maldonado-Cevallos, C. y Villao-Santos, F. 2015. Los sistemas de información para lograr un desarrollo competitivo en el sector agrícola. *Revista Ciencia Unemi*, 8(13): 122-129. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol8iss13.2015pp122-129p>
- Shekhar, S. y Xiong, H. 2017. *Enciclopedia de SIG*. Medios de ciencia y negocios de Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-23519-6>

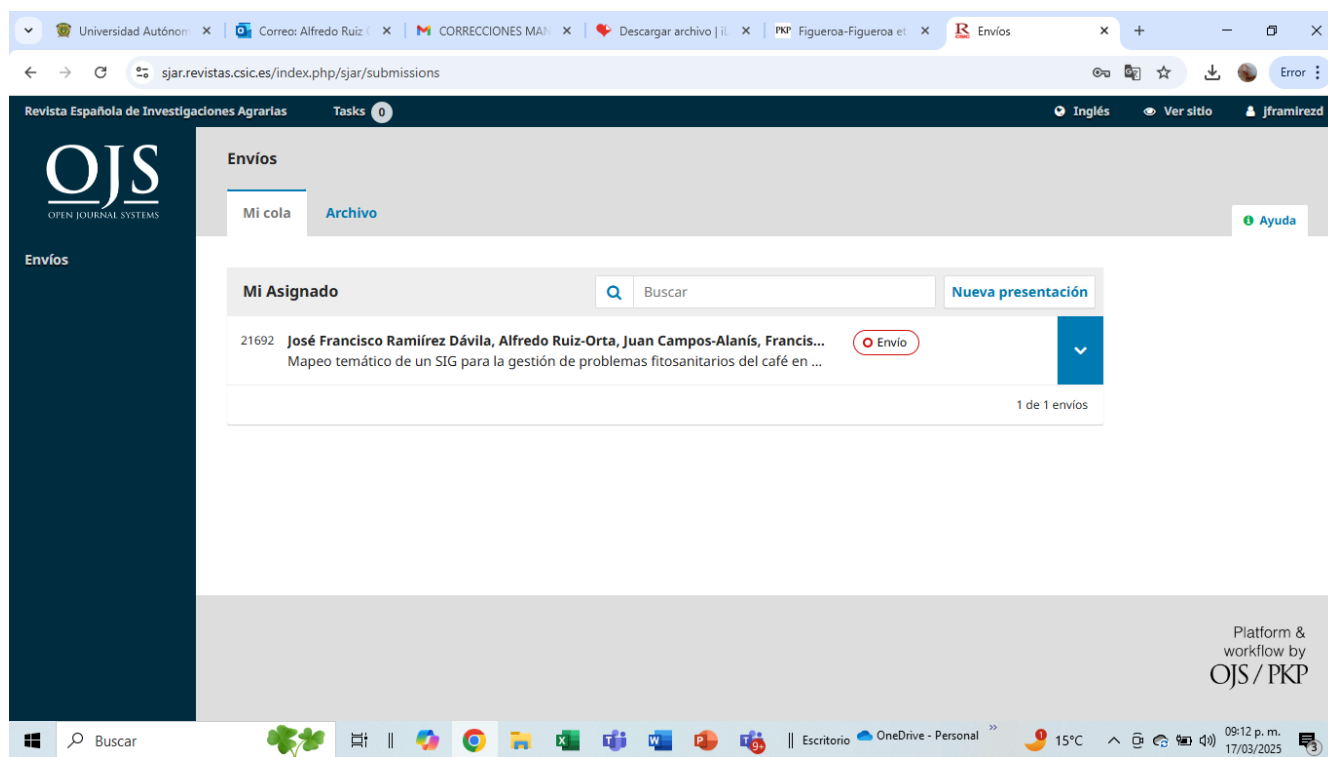
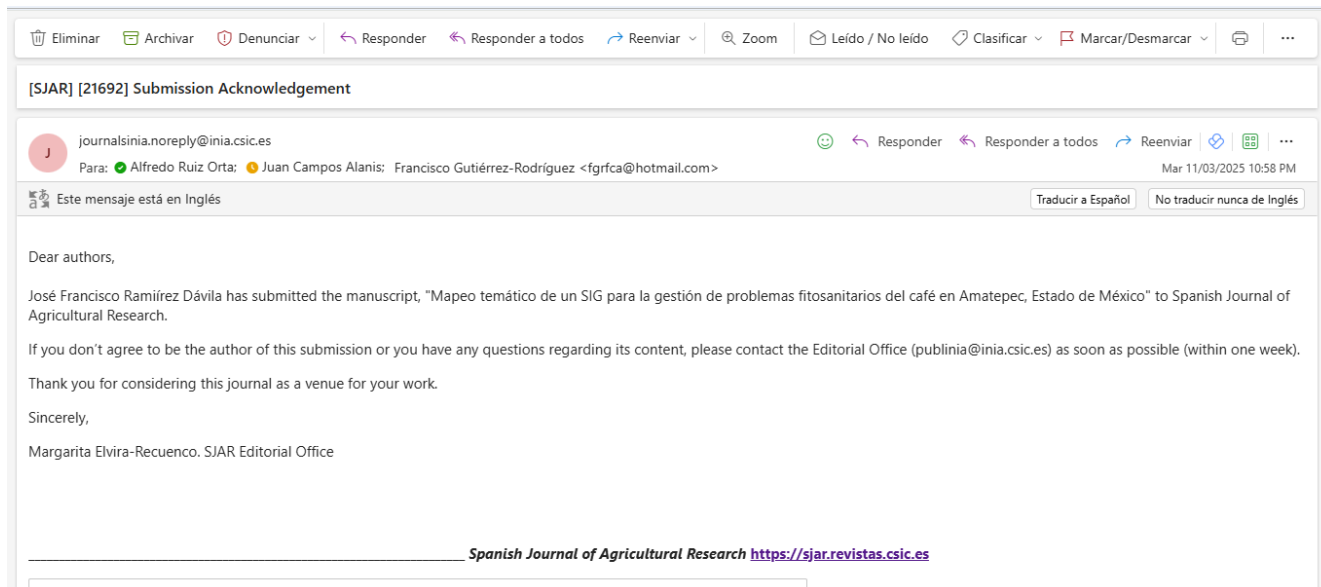
SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/>

Silva, C.B.; de Moraes, M.A.F.D. y Molin, J.P. 2011. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. *Precision Agric* 12: 67–81. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9155-8>

SENASICA. 2024. SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD, INOCUIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA. Muestreo y evaluación de variables de daño de Roya. <https://www.royacafe.lanref.org.mx/>.

Sosa-Escalona, Y.; Peña-Casadevall, M. and Santiesteban-Toca, C.E. 2017. System for early warning of the effects of climate change on agriculture. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 11(3): 64-76. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222718992017000300006&lng=es&tlng=es

7.2 Se envió el artículo “Mapeo temático de un SIG para la gestión de problemas fitosanitarios del café en Amatepec, Estado de México” a la Revista Spanish Journal of Agricultural Research.



RESEARCH ARTICLE

Title: Mapeo temático de un SIG para la gestión de dos problemas fitosanitarios del café en Amatepec, Estado de México

Alfredo Ruiz-Orta¹, José Francisco Ramírez-Dávila^{1*}, Juan Campos-Alanís², Francisco Gutiérrez-Rodríguez

Author	ORCID IDs
Alfredo Ruiz-Orta	http://orcid.org/0000-0002-1330-3110
José Francisco Ramírez-Dávila	http://orcid.org/0000-0002-8625-4655
Juan Campos-Alanís	http://orcid.org/0000-0002-5391-2447
Francisco Gutiérrez-Rodríguez	http://orcid.org/0000-0003-1464-0976

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15, El Cerrillo Piedras Blancas S/N, entronque a El Cerrillo, Toluca, Estado de México, México. C.P. 502000.

² Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía. Cerro de Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México. C.P. 50110.

***Correspondence** should be addressed to José Francisco Ramírez-Dávila: e-mail address: jframirez@uaemex.mx

Running title: Mapas temáticos para gestión de problemas fitosanitarios del café

Topic: plant protection

Abstract

Geographic Information Systems (GIS) are powerful geospatial tools used in resource mapping and agricultural land use planning. Coffee in Mexico is a product that has a high commercial value, however it presents certain phytosanitary problems, such as leaf miner and rooster's eye, which affect the profitability of the crop and require optimal and very accurate control measures, for this reason the objective of the research is to carry out a GIS for the sustainable management of various phytosanitary problems of coffee in Amatepec, Mexico. 72 thematic maps were made representing the monthly incidence of problems in the three plots sampled during 2023. These maps show the incidence of the red-eye beetle and the leaf miner; for the former, the months from August to December are those with the highest presence of the pathogen due to the presence of the rainy season and the percentage of relative humidity, which also increased considerably on average up to 85% in these months. For leaf miners, it is possible to identify that during the months of February to June, a higher incidence of this problem is observed, this is because this pest tends to increase its presence when the temperature increases to approximately 25°C. The use of thematic maps can help make more timely, effective and optimal decisions for the sustainable management and handling of these problems and more that occur in the crop and in the area.

Additional keywords: Incidence, *Mycena citricolor*, *Leucoptera coffeella*, Geographic Information System.

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas geoespaciales eficaces que se utilizan en el mapeo de los recursos y la planificación del uso de la tierra agrícola. El café en México es un producto que tiene un alto valor comercial, sin embargo presenta ciertos problemas fitosanitarios, como Minador de hoja y Ojo de gallo, que afectan la rentabilidad del cultivo y que requieren de medidas de control óptimas y muy certeras, por tal motivo el objetivo de la investigación es realizar un SIG para la gestión sustentable de diversos problemas fitosanitarios del café en Amatepec, México. Se realizaron 72 mapas temáticos que representan la incidencia mensual de los problemas en las tres parcelas muestreadas durante el año 2023. En dichos mapas se observa la incidencia de ojo de gallo así como de minador de hoja; para el primero, los meses de agosto a diciembre son los que tienen mayor presencia del patógeno por la presencia de época de lluvias y el porcentaje de humedad relativa que también aumentó considerablemente en promedio hasta 85 %

en estos meses. Para minador de hoja se logra identificar que durante los meses de febrero hasta junio se observa mayor incidencia de este problema, esto porque esta plaga tiende a aumentar su presencia cuando la temperatura incrementó hasta 25°C aproximadamente. El uso de mapas temáticos puede ayudar a la toma de decisiones más oportuna, eficaz y óptima para el manejo y gestión sustentable de dichos problemas y más que se presentan en el cultivo y en la zona.

Palabras clave: Incidencia, *Mycena citricolor*, *Leucoptera coffeella*, Sistema de Información Geográfica.

Abbreviations used: SIG (Sistemas de Información Geográfica) y GPS (Sistemas de posicionamiento global).

Introduction

Los sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas de posicionamiento global (GPS) son herramientas geoespaciales avanzadas que se utilizan eficazmente en el mapeo de los recursos de la tierra y la planificación del uso de la tierra agrícola. La integración de datos espaciales y su análisis combinado podría realizarse a través de un SIG, para realizar análisis complejos y sistemas de apoyo a la toma de decisiones para una gestión eficaz de los recursos naturales (Reddy *et al.*, 2018)

Los SIG se utilizan para evaluar coberturas vegetales de ecosistemas, inventarios forestales y dinámica del medio biótico y abiótico. El análisis digital de imágenes y su representación en mapas temáticos está directamente relacionado con enfoques paramétricos; sin embargo, a pesar de las ventajas particulares, éstas técnicas individuales o en conjunto están limitadas a expresar diferencias entre objetos que comparten características similares (Bautista *et al.*, 2018).

En México, el café es un producto predilecto por la población ya que tiene un comportamiento exponencial en el ámbito comercial; se da en alturas entre 1000 y 1300 metros sobre el nivel del mar (SAGARPA, 2017). El cultivo de café concentró un valor en su producción anual para el año 2023 de \$34,986,565 millones de pesos (SIAP, 2023). Sin embargo, como todo cultivo, tiene la presencia de diferentes patógenos, tales como: Ojo de gallo (*Mycena citricolor*) y Minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*) que afectan la rentabilidad del cultivo y requieren de aplicación de medidas de control más óptimas y específicas (CEDRSSA, 2019)

Los efectos benéficos de la agricultura de precisión (AP) aplicada a la sanidad de los cultivos incluyen el manejo más oportuno de plagas y enfermedades, la disminución de costos, los riesgos de operaciones de control químico, permiten acelerar la productividad de los cultivos, lo que se relaciona con la calidad del producto y hace que esta práctica sea más afín a la sostenibilidad (Landau *et al.*, 2014; Planas, 2018).

Materials and methods

Área de estudio

La investigación se realizó durante el año 2023 en el municipio de Amatepec, Estado de México; el cual se encuentra localizado a 1800 msnm, presenta una precipitación de 1100 a 2000 mm, una temperatura media anual de 22°C y humedad relativa promedio de 58.7%.

Muestreo

Se realizaron muestreos quincenales, tanto para roya como para ojo de gallo, en 3 parcelas de media hectárea durante el año 2023, éstas se dividieron en cuadrantes de 10 x 10 m, obteniendo 50 cuadrantes en total, que fueron delimitados con listones. Se seleccionaron aleatoriamente 4 plantas por cuadrante dando un total de 200 plantas por parcela, las cuales se georreferenciaron con un Sistema de Posicionamiento Global (dGPS) (modelo Trimble® SPS361, Trimble, Dayton, Estados Unidos).

Cada planta seleccionada se dividió por estratos (alto, medio y bajo), en la que se contabilizaron 12 hojas por cada uno, teniendo en total 36 hojas por planta; se registró el número de hojas con presencia y/o ausencia de cada problema fitosanitario, basándose en la guía de síntomas y daños del café del Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria del SENASICA (2024).

Mapas temáticos

Se realizaron 36 mapas temáticos con promedio mensual, que muestran la incidencia de *L. coffeella* y *M. citricolor* en las tres parcelas muestreadas. Estos mapas forman parte del desarrollo de un Sistema de Información Geográfica, el cual se trabajó mediante el programa Quantum GIS o QGIS versión 3.24 Tisler que funciona como herramienta principal para el procesamiento de datos y posibilitar el manejo de ficheros de distintas fuentes (Shekhar y Xiong, 2017).

Results

A partir de los datos obtenidos de los muestreos realizados durante el año 2023, se presentan los siguientes resultados.

En la Figura 1 se muestran las temperaturas promedio durante el año 2023 (Meteoblue, 2025) teniendo las temperaturas más altas durante los meses de abril a junio y con menores temperaturas durante los meses de enero, noviembre y diciembre.

Se elaboraron 36 mapas temáticos para las tres parcelas muestreadas en cada uno de los problemas fitosanitarios, teniendo en total 72 mapas temáticos que muestran la incidencia de dichos problemas durante el año que se llevó a cabo la investigación.

En las Figuras 2, 3 y 4, se identifica la incidencia de *Mycena citricolor* durante 2023, se observa en cada uno de los meses la presencia de esta enfermedad teniendo que a partir del mes de agosto hasta diciembre, la incidencia de la enfermedad aumentó considerablemente en comparación con el primer semestre del año; ya que esta enfermedad aumenta su incidencia y se hace más evidente en épocas

lluviosas y con un porcentaje de humedad relativa más alto, tal cual se muestra en el Figura 1 que durante el segundo semestre del año muestreado esta variable presentó valores entre el 80 y 90 %. Sin embargo se puede identificar que la parcela 1 tuvo una incidencia menor en comparación con las parcelas 2 y 3 (Figuras, 2, 3 y 4) ya que la cantidad de hojas/árbol con presencia de la enfermedad en la primer parcela es menor, observando puntos rojos separados bien identificados; para las dos parcelas restantes se visualiza que la cantidad de hojas/árbol con incidencia del patógeno es en agregados de varios árboles de café.

En las figuras 5, 6 y 7 se observa la incidencia de *Leucoptera coffeella* para 2023, esta plaga es uno de los problemas que presenta mayor importancia por el daño que causa, y se le da mayor atención por el impacto que genera en el cultivo.

Durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio se puede identificar la presencia de la plaga en puntos de agregación en toda la parcela (Figura 5) disminuyendo para los meses de julio, agosto y septiembre, ya que estos insectos se presentan en mayor cantidad cuando las temperaturas son más altas y cuando se empiezan a presentar lluvias decremanta su incidencia, tal como se observa en la Figura 1 que para los meses de primavera las temperaturas oscilaron entre los 20 y 25°C, y para los meses de verano se mantuvieron entre los 18 y 20°C.

Para las parcelas 2 y 3 (Figuras 6 y 7) se presenta una incidencia mayor bien marcada para los meses de abril, mayo y junio, donde se puede tener de 20 a 40 insectos por hoja/árbol de café en ciertos puntos de agregación identificados, manteniendo así la presencia de la plaga en las parcelas durante estos meses y disminuyendo para los siguientes, esto por el inicio de la temporada de lluvias.

Discussion

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) trabajan con datos espaciales para generar mapas temáticos, para lo cual se realiza la captura, almacenamiento y despliegue de información mediante diferentes procesos operacionales; por tal motivo se convierte en una herramienta útil para la toma de decisiones (Bautista *et al.*, 2018); tal es el caso en la presente investigación que al elaborar mapas temáticos de incidencia de ciertos problemas fitosanitarios, se pueden tomar decisiones más precisas y oportunas en el manejo y control de estos problemas.

El café es una planta que tiene un alto valor de interés económico para nuestro país, ya que somos los principales productores de café orgánico en el mundo (La Jornada, 2018).

La incidencia mayor de minador de la hoja fue evidente en los meses de primavera, ya que para

los siguientes meses tiende a disminuir, esto por el ciclo de vida del insecto, debido a que las poblaciones tienden a reducir su ciclo reproductivo en la época de otoño-invierno y para los meses cálidos aumentan en respuesta al incremento de temperatura que es un factor primordial para su ciclo reproductivo (Constantino *et al.*, 2013).

La aplicación de técnicas para modelizar la distribución espacial de plagas y enfermedades es una manera eficaz para determinar su incidencia en diferentes cultivos (Barrera *et al.*, 2023). Además el análisis digital de imágenes, como los mapas temáticos, está directamente relacionado con enfoques paramétricos que consideran un clasificador por cada componente, por ejemplo, suelos, temperature, vegetación, o en la clasificación de las tierras con base en sus características físicas, químicas o estructurales (Borrás *et al.*, 2017).

De acuerdo con Figueroa *et al.* (2024) el uso de los Sistemas de Información Geográfica son una alternativa eficiente y precisa que permite la toma de decisiones oportuna en el área agrícola. Se puede ofrecer una agricultura más productiva con un nivel de riesgo menor y una planeación certera de los programas de expansión del cultivo, en este caso, de aguacate en el sur del Estado de México; buscando una producción en ambientes que provean condiciones que satisfagan los requerimientos agroecológicos de las plantas.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Authors' contributions: **Alfredo Ruiz-Orta (Author 1):** Conceptualization, Data curation, Investigation, Project administration, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **José Francisco Ramírez-Dávila (Author 2):** Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Supervision, validation, Writing – review & editing. **Juan Campos-Alanís (Author 3):** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Methodology, Resources, Software, Supervision, Validation, Writing – review & editing. **Francisco Gutiérrez-Rodríguez (Author 4):** Conceptualization, Formal analysis, Methodology, Supervision, validation, Writing – review & editing.

Funding: The authors received no specific funding for this work.

References

Barrera-Rojas, A., Ramírez-Dávila, J.F., Pérez-López, D. de J., Rubí-Arriaga, M. & Pino-Miranda, E. (2023) Comportamiento espacial del minador de hoja, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) en cafetales de Temascaltepec, Estado de México, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 49(2), e12192.

Bautista CEA, Gutiérrez CEV, Ordaz CVM, Gutiérrez CMC y Cajuste BL. (2018). Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 261-273.

Borrás, J, Delegido J, Pezzola A, Pereira M, Morassi G & Camps-Valls G. 2017. Land use classification from sentinel-2 imagery. *Rev. Teledetección* 48: 55-66.

Constantino, L.M., Flores, J.C., Benavides, P. & Bacca, R. (2013). Minador de las hojas del cafeto: Una plaga potencial por efectos del cambio climático [Avances técnicos 478]. Centro Nacional de Investigadores del Café (Cenicafé). <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt04091.pdf>

Figuroa-Figuroa, D.K., Ramírez-Dávila, J.F., Antonio-Némiga, X. & Serrato-Cuevas, R. (2024). Modelo espacial de áreas potenciales para plantaciones de aguacate en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(5), e3515.

Landau, E.C., Guimaraes, D. & Hirsch, A. (2014). Uso de sistema de informaciones geográficas para espacialización de datos del área de producción agrícola. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/280098376_Uso_de_Sistema_de_Informaciones_Geograficas_para_espacializacion_de_datos_del_area_de_produccion_agricola

La Jornada, Periódico. 2018. <http://www.jornada.com.mx/ultimas/2018/05/21/mexico-principal-productorde-cafes-organicos-en-el-mundo-6058.html>. (Consulta: enero 25, 2025).

Planas de Martí, S. (2018). AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y PROTECCIÓN DE CULTIVOS. *Revista de Ingeniería*, 1(47), 10-19.

Reddy, GPO, Ramamurthy, V., Singh, SK. (2018) Aplicaciones integradas de teledetección, SIG y GPS en la planificación del uso de tierras agrícolas. En: Reddy, G., Singh, S. (eds) *Tecnologías geoespaciales en el mapeo, monitoreo y gestión de recursos de tierras*. Geotecnologías y medio ambiente, vol. 21. Springer, Cham.

Shekhar, S. y Xiong, H. (2017). Enciclopedia de SIG. Medios de Ciencia y Negocios de Springer.

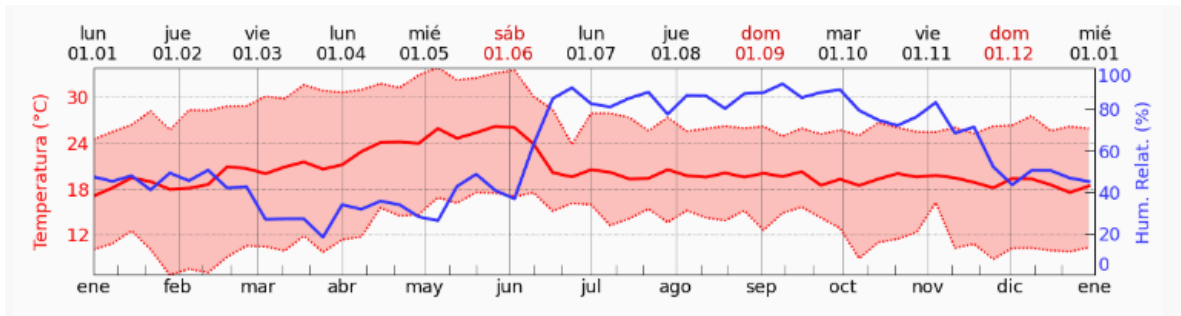


Figura 1. Gráfica de temperaturas promedio para 2023 en Amatepec, Estado de México.

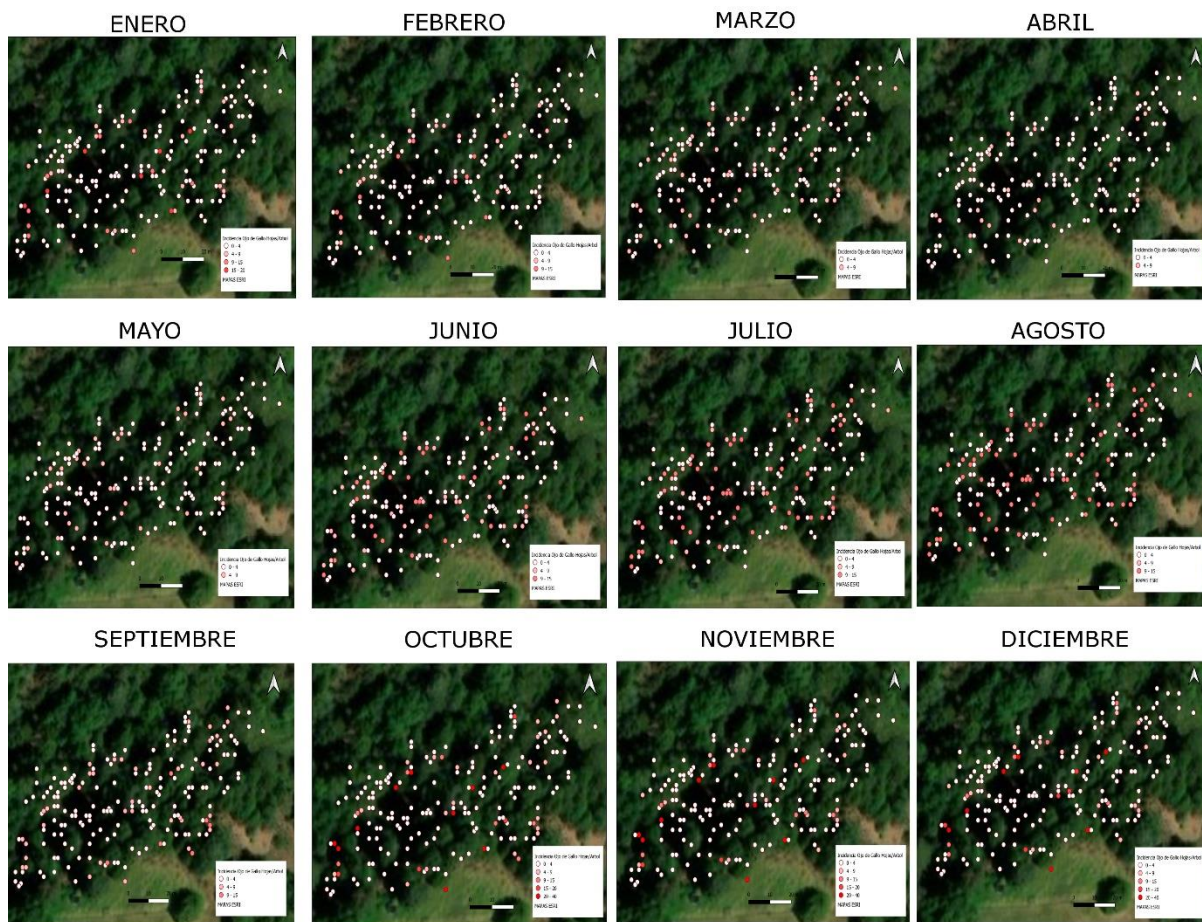


Figura 2. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de Gallo (*Mycena citricolor*) para parcela 1 en Amatepec, Estado de México.

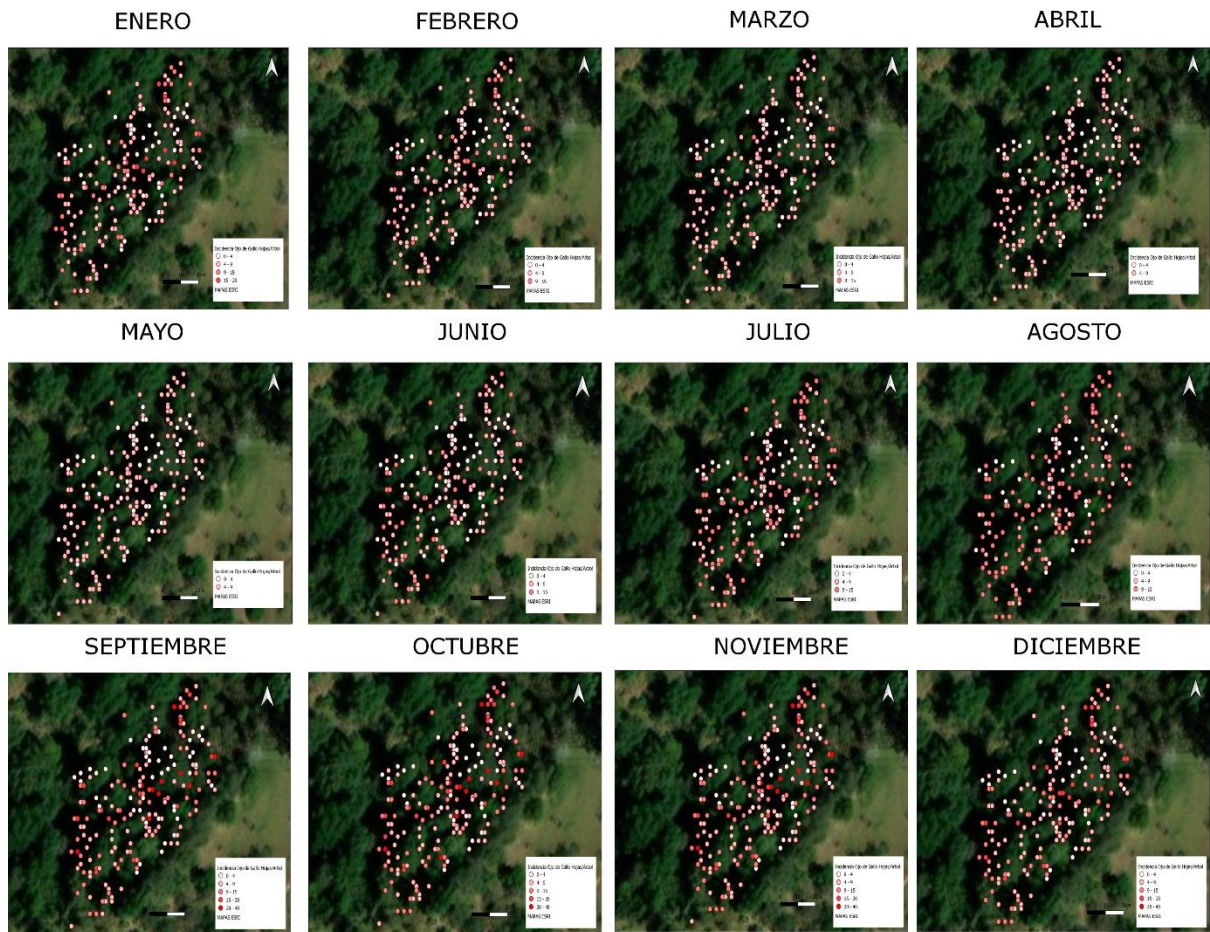


Figura 3. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de Gallo (*Mycena citricolor*) para parcela 2 en Amatepec, Estado de México.

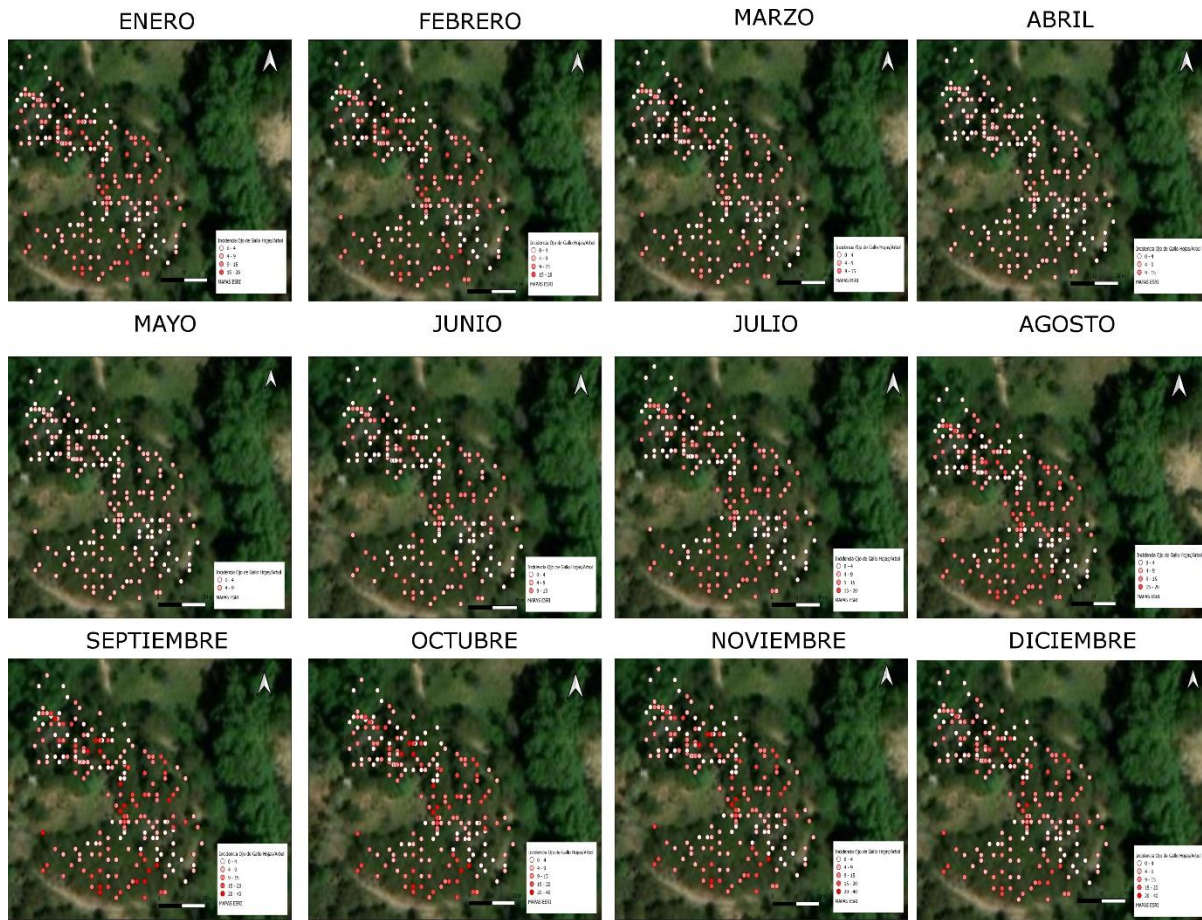


Figura 4. Mapas mensuales de incidencia de Ojo de Gallo (*Mycena citricolor*) para parcela 3 en Amatepec, Estado de México.

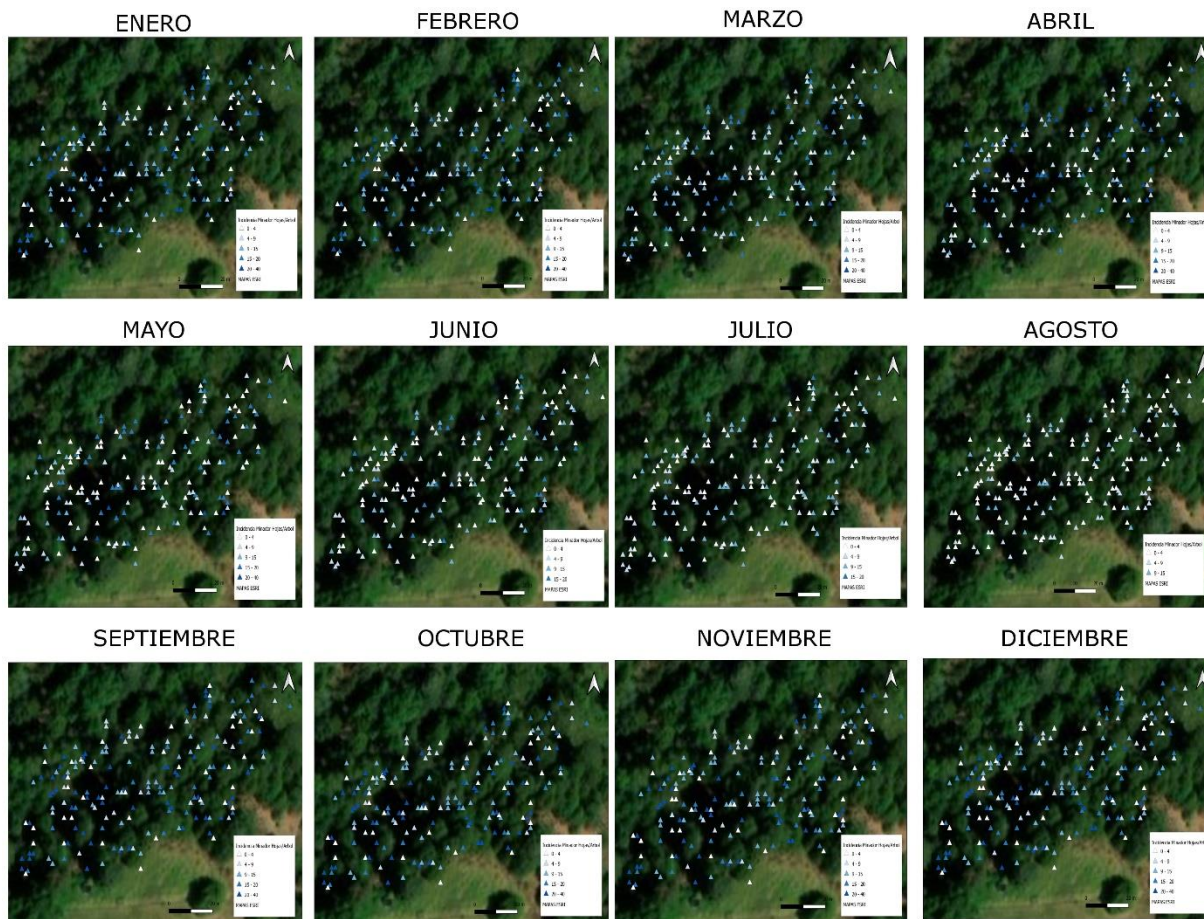


Figura 5. Mapas mensuales de incidencia de Minador de hoja (*Leucoptera coffeella*) para parcela 1 en Amatepec, Estado de México.

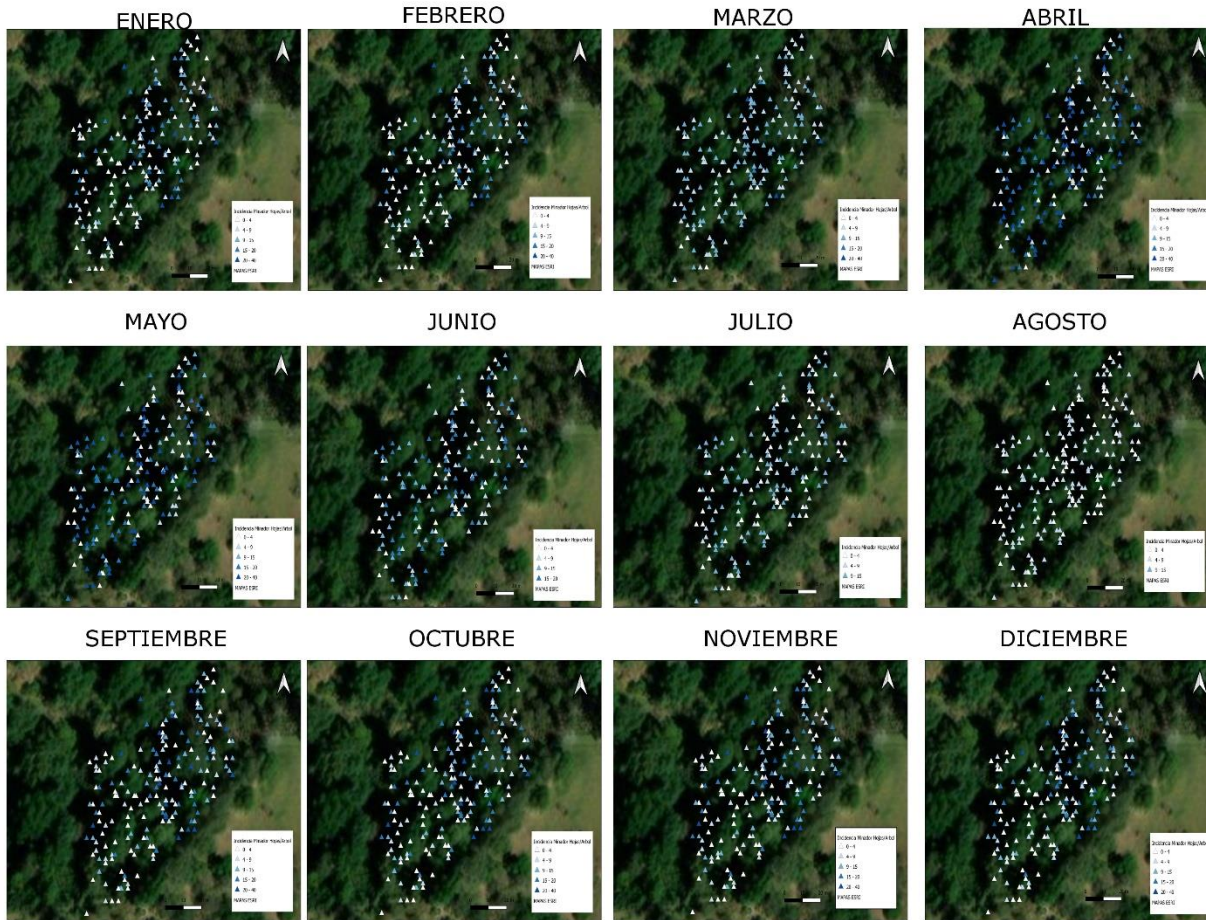


Figura 6. Mapas mensuales de incidencia de Minador de hoja (*Leucoptera coffeella*) para parcela 2 en Amatepec, Estado de México.

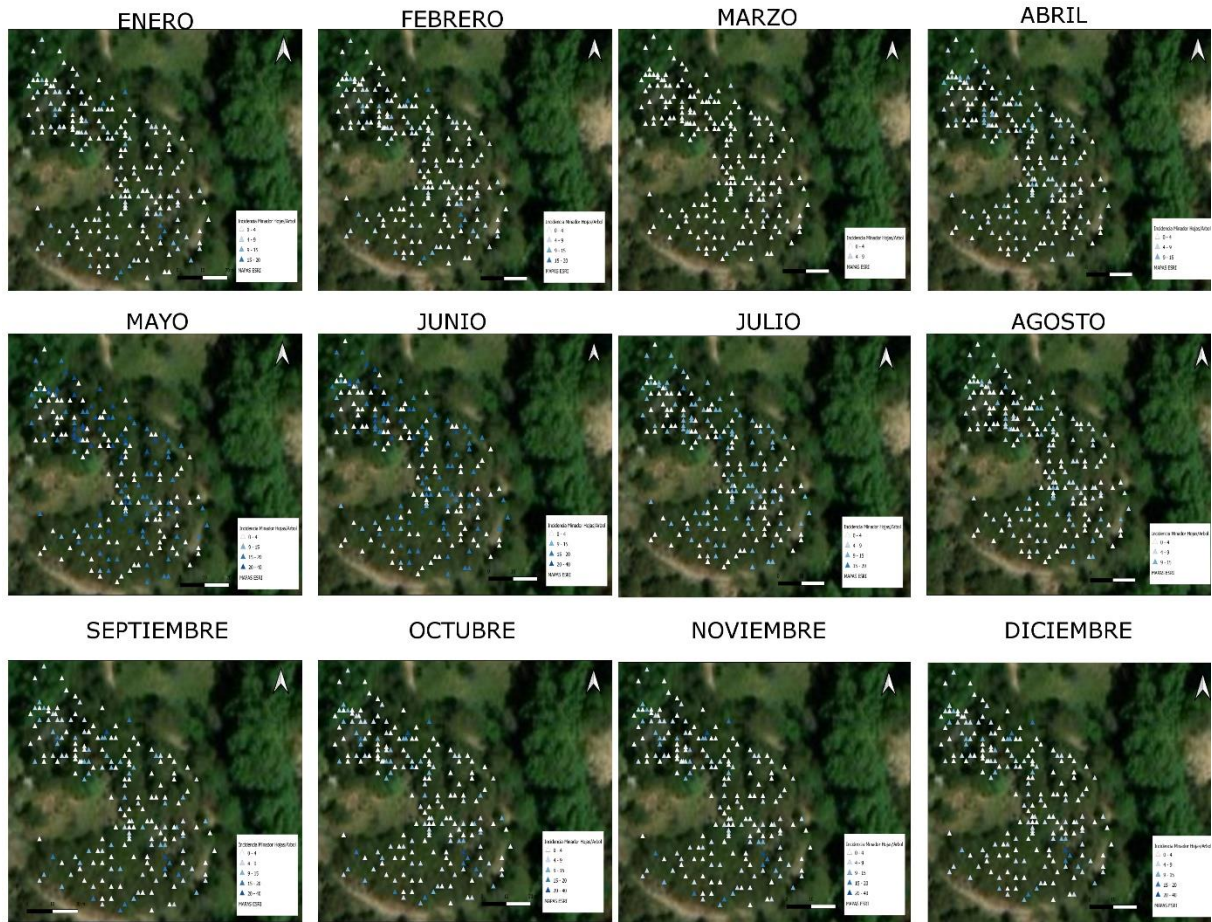


Figura 7. Mapas mensuales de incidencia de Minador de hoja (*Leucoptera coffeella*) para parcela 3 en Amatepec, Estado de México.

7.3 Se envió un artículo que se desprendió de la investigación, pero que no se encuentra dentro de los objetivos del trabajo, el cual lleva por título “Analysis of the spatial association of fumagina (*Capnodium spp.*) and green scale (*Coccus viridis*)”, publicado en la Revista Agrociencia.

ANALYSIS OF THE SPATIAL ASSOCIATION OF FUMAGINA (*Capnodium spp.*) AND GREEN SCALE (*Coccus viridis*) IN COFFEE IN SULTEPEC, MEXICO

Alfredo Ruiz-Orta¹, Atenas Tapia-Rodríguez², Dulce Karen Figueroa-Figueroa³, José Francisco Ramírez-Dávila^{1*}

¹ Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15, El Cerrillo Piedras Blancas S/N, entronque a El Cerrillo, Toluca, Estado de México, Mexico. C. P. 50200.

² Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero. Carretera Federal Toluca-Ixtapan de la Sal km 64.5, Col. La Finca, Villa Guerrero, Estado de México, Mexico. C. P. 51763.

³ Universidad Mexiquense del Bicentenario. Unidad de Estudios Superiores Coatepec Harinas 3. Ejido San Luis, El Reynoso, Coatepec Harinas, Estado de México, México. C. P. 51700.

* Author for correspondence: jframirez@uaemex.mx

The coffee crop (*Coffea arabica* L.) presents phytosanitary problems that can be economically significant if not properly managed, such as green scale (*Coccus viridis*) and fumagina (*Capnodium spp.*). Geostatistics is a tool that allows the producer to make optimal, timely, and accurate decisions for the integrated management of these problems. The objective of the research was to analyze the distribution and spatial association of fumagina and green scale in the coffee crop in Sultepec, State of Mexico, Mexico. During the first semester of 2022, random coffee plots were marked and geo-referenced for sampling. Several methods were used to obtain the spatial distribution of fumagina and green scale. The results showed fits of Gaussian, exponential, and mostly spherical geostatistical models, which represent an aggregate distribution and an association of these problems with each other. The estimation of the infested and infested area for both problems was obtained using the ordinary kriging method, revealing the presence of foci of infection and infestation. In plot three, it was identified that these are maintained and increase as the sampling progresses, finding a high degree of dependence and spatial stability. It is concluded that the populations of green scale and fumagina have an r value of 0.70, indicating a high association and correlation between them, which leads to a spatial distribution and possible management of targeted control of these phytosanitary problems and, in turn, sustainable management of the crop.

Keywords: Coffee culture, *Capnodium spp.*, spatial correlation, spherical model.

INTRODUCTION

Coffee (*Coffea arabica* L.) represents one of Mexico's main agricultural export products, as well as one of the activities that generate employment in the states where it is grown. The cultivated surface of coffee is 710 897.41 ha, with a production value of MXN \$5 210 614, therefore, its importance in the national economy is a fundamental factor

Citation: Ruiz-Orta A, Tapia-Rodríguez A, Figueroa-Figueroa DK, Ramírez-Dávila JF. 2023. Analysis of the spatial association of fumagina (*Capnodium spp.*) and green scale (*Coccus viridis*) in coffee in Sultepec, Mexico. *Agrociencia*. doi.org/10.47163/agrociencia.v57i7.2945

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez Merino

Received: January 11, 2023.
Approved: June 15, 2023.
Published in *Agrociencia*:
November 01, 2023.

This work is licensed
under a Creative Commons
Attribution-Non-Commercial
4.0 International license.



for the development of programs and projects that promote and support the coffee sector (CEDRSSA, 2019; SIAP, 2021); these programs cover not only economic aspects, but also production and marketing activities, as well as phytosanitary issues, which are promoted by governmental agencies in Mexico.

Coffee, like other crops of economic importance, is not free from phytosanitary problems; therefore, it is necessary to understand and identify pests and diseases in the crop in order to establish management programs that contribute to effective and timely decision-making in order to reduce economic losses for coffee growers. *Hyphotenemus hampei*, also known as the coffee berry borer, *Leucoptera coffeella* (the leaf miner), and scales such as *Selenaspidius articulatus* (articulated scale) and *Coccus viridis* (green scale), are among the pests affecting the coffee crop. In terms of diseases, those considered to have a high impact on the coffee crop are rust, iron spot, anthracnose, and rooster's eye; however, there have been reports of the presence of fumagina, as in the study conducted by González-Vega *et al.* (2007).

Fumagina in coffee is a disease caused by the saprophytic fungus *Capnodium* spp., which appears as black ash on sugary and sticky secretions produced by sucking insects such as aphids and scales, which feed on the sap of the plants and excrete this sweet and sugary secretion, commonly known as honeydew, on which some hymenopterous insects can feed. This fungus develops on branches, leaves, and fruits, covering the leaf area to the point of causing premature senescence and reducing growth as well as the photosynthetic capacity of the plant (González-Vega *et al.*, 2007). The incidence of the disease becomes more prevalent in rainy seasons, and the number of diseased leaves increases considerably. Its presence is always caused by sucking insect attacks. The green coffee scale (*Coccus viridis*) is the most common species in coffee plantations less than two years old. Its foci cover the nerves of the leaves, as well as the petiole and the bark of branches and stems. Adults and nymphs feed on plant sap and excrete honeydew, which leads to fungal growth on the leaf surface and thus reduces photosynthesis. They also introduce toxins that cause plant weakening, leaf drop, and yield reduction if densities are high enough (Fernandes *et al.*, 2011; Ong and Vandermeer, 2014; Gil-Palacio, 2020).

Several studies have reported the presence of fumagina not only in coffee but also in other important crops such as citrus, cocoa, soursop, guava, and mango, among others (Cárdenas-Murillo and Posada-Florez, 2001). Control alternatives for this problem have also been proposed; however, there are no studies in Mexico that show the spatial distribution of this disease and its relationship with the presence of insects such as green scale.

In this regard, it is essential to recognize that in nature, organisms form aggregates or gradients in response to structural characteristics controlled by biotic and abiotic habitat variables, in order to contribute to a better

understanding of the population dynamics of organisms and their relationship with the environment (Gómez-Campo *et al.*, 2010).³

Geostatistics comprises a set of tools and techniques used to analyze and predict the values of a variable that is distributed in space or time in a continuous manner; it can also be defined as statistics related to geographic data, which is why it is also known as spatial statistics (Moral-García, 2004). Therefore, the objective of this work was to determine the distribution and spatial association of fumagina and green scale in the coffee crop in the municipality of Sultepec, State of Mexico, Mexico, as well as to promote targeted control management for these phytosanitary problems, which will allow for sustainable management of the crop in the study area.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The research was conducted in the municipality of Sultepec in the State of Mexico (18° 52' 00'' N, 99° 57' 00'' W, at an altitude of 2396 m) from January to June 2022; the municipality was selected because it has a representative coffee production of 60 ha for the state (SIAP, 2021).

Field work

Four plots of 0.5 ha were selected for coffee cultivation with a mixture of Caturra and Typica coffee varieties under conventional management with a polyculture system, with 40–60 % shade composed of parota, ash, orange, and lemon trees. Each plot was divided into 50 quadrats of 10 x 10 m, with four trees selected from each quadrat and georeferenced with a differential global positioning system (DGPS), for a total sample of 200 trees per plot. Each tree was sampled from four branches to determine the incidence (presence/absence) of green scale and 12 leaves from the same branches to detect the presence or absence of fumagina. From January to June 2022, sampling was done every fourteen days.

Geostatistical Analysis

To process the data obtained on disease incidence and scale in each of the samplings, Variowin 2.0 software (Primavera Verlag, New York, NY, USA) was used. Experimental semivariograms were obtained and fitted to theoretical models, which are usually spherical, exponential, and Gaussian, and then validated using the cross-validation method (Tapia-Rodríguez *et al.*, 2020). Furthermore, the semivariogram parameters were determined: sill, range or reach, and nugget effect.

Level of spatial dependence

The level of spatial dependence of each phytosanitary problem was determined by dividing the nugget effect by the sill, with the result expressed as a percentage. The level of spatial dependence is considered high if it is less than 25 %, moderate if it is between 26 and 75 %, and low if it is greater than 76 % (Rivera-Martínez *et al.*, 2020).

Kriging mapping and infected and infested surfaces

After adjusting the semivariograms, data interpolation was carried out using ordinary Kriging to visualize the spatial distribution patterns of the disease and the pathogen

over time; the estimates obtained were represented in the form of maps for each sampling, using the Surfer 16 program (Surface Mapping System, Golden Software Inc., New York, NY, USA). Similarly, the infested surface of the microorganisms was calculated using the aforementioned program.

Spatial association

To determine the possible spatial association of the phytosanitary problems studied, a correlation analysis of means and a Tukey test at 0.05 % were performed using the Minitab 19 statistical software.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the presence of green scale and fumagina was recorded in plots established with coffee crops in the municipality of Sultepec, State of Mexico, where 48 biweekly samplings were carried out, obtaining a total of 48 incidence maps and 48 semivariograms adjusted to theoretical models for green scale and the same amount for fumagina. For the green scale insect, most of the samplings were adjusted to spherical models (Table 1), except in plot one, where the spatial distribution was adjusted to exponential models in most of the months, presenting spherical models only in the second sampling in March and both samplings in May.

Table 1. Models and parameter values obtained for each semivariogram of the respective samplings of green scales (*Coccus viridis*) (January to June 2022).

Sampling	Mean	Variance	Model	Nugget	Sill	Range	Nugget/ sill	Spatial dependence
Plot 1								
January 1	5.33	485.16	Exponential	0	431.2	12	0	high
January 2	5.50	498.84	Exponential	0	415	13.6	0	high
February 1	5.71	517.37	Exponential	0	436.8	11.6	0	high
February 2	5.93	543.99	Exponential	0	473	13.6	0	high
March 1	8.19	1188.07	Exponential	0	996	13.2	0	high
March 2	9.29	1251.01	Spherical	0	1040	9.6	0	high
April 1	9.76	1302.68	Exponential	0	1144	8.4	0	high
April 2	9.88	1271.01	Exponential	0	1078.96	9.99	0	high
May 1	9.83	1216.23	Spherical	0	974.95	10.08	0	high
May 2	11.60	1400.45	Spherical	0	1105.95	12	0	high
June 1	12.43	1565.32	Exponential	0	1344	13.19	0	high
June 2	13.48	1748.37	Exponential	0	1422	14	0	high
Plot 2								
January 1	2.59	75.38	Spherical	0	60.8	7.6	0	high
January 2	3.12	128.32	Gaussian	0	101.4	6	0	high
February 1	2.37	107.89	Spherical	0	93.5	8.4	0	high
February 2	3.79	1096.71	Spherical	0	160	8.4	0	high
March 1	2.51	114.11	Spherical	0	102	6.8	0	high
March 2	5.98	1139.53	Spherical	0	576	8.4	0	high

Table 1. Continue.

Sampling	Mean	Variance	Model	Nugget	Sill	Range	Nugget/ sill	Spatial dependence
April 1	5.93	1135.89	Spherical	0	660	8.4	0	high
April 2	6.62	1149.91	Gaussian	0	672	6.4	0	high
May 1	6.97	1167.30	Spherical	0	684	9.2	0	high
May 2	7.1	1027.65	Spherical	0	605	8	0	high
June 1	6.65	599.22	Spherical	0	384	8.8	0	high
June 2	7.05	658.25	Spherical	0	415.8	7.6	0	high
				Plot 3				
January 1	8.88	899.50	Spherical	0	774	6.8	0	high
January 2	9.77	1052.51	Spherical	0	913	8	0	high
February 1	12.95	1614.38	Spherical	0	1360	6.39	0	high
February 2	10.66	1545.03	Spherical	0	1344	8	0	high
March 1	10.64	1440.28	Exponential	0	1155	9.2	0	high
March 2	12.46	1569.78	Spherical	0	1264	6.8	0	high
April 1	11.79	1329.11	Spherical	0	1148	7.6	0	high
April 2	11.62	1198.67	Spherical	0	1080	6.8	0	high
May 1	11.87	1223.87	Spherical	0	1092	7.2	0	high
May 2	12.29	1230.37	Spherical	0	1105	7.2	0	high
June 1	12.16	1229.24	Spherical	0	1092	7.2	0	high
June 2	12.67	1283.52	Spherical	0	1092	7.2	0	high
				Plot 4				
January 1	7.92	1293.12	Spherical	0	1597	3.07	0	high
January 2	7.97	1292.53	Gaussian	0	1743	4.05	0	high
February 1	8.39	1428.15	Exponential	0	1560	6.3	0	high
February 2	8.1	1398.45	Exponential	0	915	3.36	0	high
March 1	10.34	1985.66	Spherical	0	1633	4.32	0	high
March 2	10.94	1854.33	Spherical	0	1428	7.6	0	high
April 1	11.57	2224.56	Gaussian	0	1245	5.2	0	high
April 2	9.08	1685.28	Spherical	0	1595	7.6	0	high
May 1	9.70	2026.74	Gaussian	0	896	6	0	high
May 2	9.50	1827.48	Spherical	0	806	4.32	0	high
June 1	9.08	1538.16	Gaussian	0	1368	6.3	0	high
June 2	8.86	1456.86	Spherical	0	1232	6.3	0	high

In plots two and three, the spatial distribution of green was associated with spherical- type patterns for the majority of the sampling months. Biologically, the spherical model adjustment represents that the insect was identified more in certain points than in others, which means that there are defined pest aggregation centers that remain stable in the plots, presenting a strong relationship between them, which agrees with the work done by Martínez-Martínez *et al.* (2021) for armored scale (*Hemiberlesia lataniae*).

It is interesting to note that for plot four, the insect distribution was adjusted not only to spherical models but also to Gaussian and exponential models, showing spherical models in the sampling of January, March, and in the second sampling of April, May, and June. For the rest of the months, the resulting models were exponential in February and Gaussian in the first sampling of January, April, May, and June.

Rivera-Martínez *et al.* (2020) mentioned that the adjustment to the Gaussian model indicates a continuous aggregation behavior within the study area, indicating that the pest will tend to spread, while Martínez-Martínez *et al.* (2021) mentioned that the exponential model, for armed scale in avocado, refers to an aggregate distribution of irregular limits within the plot and that it presents an accelerated growth that later stabilizes. Regarding the geostatistical analysis, it can be observed that a high level of spatial dependence was found on all sampling dates, which indicates the existence of a high spatial relationship between each sampling point.

Among the parameters that define the characteristics of the adjusted models is the range, whose value in meters is indicative of the level of spatial association that exists between the values of incidence. In this case, the range values for green scale in plot one were 8.4 m as a minimum and 13.6 m as a maximum, while for plot two, these values were 6 and 9.2 m. The maximum range values in plots three and four were 9.2 and 7.6 m, respectively, with minimum values of 6.39 and 3.07 m. This range distance indicates the extent to which the sampled data is spatially dependent. Beyond the maximum value of the distance, it was identified that there is such dependence between the population density of the phytosanitary problems in the sampled plots (Ramírez-Dávila, 2012).

As for the sill parameter, the lowest values for the green scale samples were mostly associated with Gaussian-type models, while the highest values were presented by spherical models in the four study plots. Biologically, this parameter associated with the range indicates the point where there is a greater spatial relationship between organisms, as mentioned by Ramírez-Dávila (2012).

The nugget effect is also shown, which for all sampling dates presented values of zero (Table 1), indicating that the sampling scale was appropriate for monitoring the green scale. This is in agreement with Oliver and Webster (1998), who suggest that having zero values for the nugget not only demonstrates that the sampling error was minimal, but also indicates that the adjusted models provide 98 % reliability. In the case of fumagina, the spatial distribution was adjusted to exponential, spherical, and Gaussian models in the four plots sampled; however, there is a certain predominance of spherical models, especially in the samples taken in plot three (Table 2).

The minimum range value for plot one was 4.07 m, associated with a Gaussian model in the second sampling in March and May, respectively, while the maximum range in this plot was 9.03 m, associated with an exponential model for the first sampling in April. For plot two, the maximum value was 5.1 m and the minimum was 3.14 m, with the latter associated with a Gaussian model and the maximum value again associated with an exponential model. Plots three and

four had maximum fumagina distribution range values of 5.16 and 3.29 m, respectively, with minimum values of 3.52 and 2.42m. The range values found express that the validity of the adjusted models extends to reasonable distances in terms of explaining the aggregation phenomenon of the disease (Solares-Alonso *et al.*, 2011), applying in the same way for green scale in this study.

Table 2. Models and parameter values obtained for each semivariogram of the respective fumagina (*Capnodium* spp.) sampling (January to June 2022).

Sampling	Mean	Variance	Model	Nugget	Sill	Range	Nugget/ sill	Spatial dependence
Plot 1								
January 1	2.32	31.22	Spherical	0	66.64	5.1	0	high
January 2	2.40	33.92	Spherical	0	65.7	5.78	0	high
February 1	2.54	39.64	Gaussian	0	73.91	4.2	0	high
February 2	2.62	44.03	Spherical	0	70.17	6.01	0	high
March 1	3.27	49.35	Gaussian	0	58.22	4.07	0	high
March 2	4.01	72.40	Spherical	0	51	5.78	0	high
April 1	3.86	70.61	Exponential	0	41.36	9.03	0	high
April 2	3.67	59.54	Spherical	0	69.91	5.59	0	high
May 1	4.005	67.89	Gaussian	0	26.24	4.41	0	high
May 2	4.16	76.07	Gaussian	0	28.56	4.07	0	high
June 1	4.42	84.10	Spherical	0	48.5	5.77	0	high
June 2	4.61	87.19	Gaussian	0	33.6	4.42	0	high
Plot 2								
January 1	2.07	25.36	Spherical	0	56.32	4.9	0	high
January 2	2.16	28.41	Spherical	0	26.35	4.55	0	high
February 1	2.23	31.07	Gaussian	0	54.28	4.08	0	high
February 2	2.35	37.35	Spherical	0	13.76	4.2	0	high
March 1	1.33	3.67	Gaussian	0	38.70	4.55	0	high
March 2	1.81	15.29	Spherical	0	41.6	4.2	0	high
April 1	2.77	49.06	Gaussian	0	62.09	4.19	0	high
April 2	2.97	51.45	Exponential	0	30.78	4.55	0	high
May 1	3.50	63.32	Gaussian	0	20.8	4.08	0	high
May 2	3.77	68.65	Exponential	0	23.49	5.1	0	high
June 1	3.76	59.19	Gaussian	0	2.51	3.14	0	high
June 2	4.11	70.96	Gaussian	0	58.22	4.55	0	high
Plot 3								
January 1	2.33	30.70	Spherical	0	56.07	5.09	0	high
January 2	2.48	35.55	Spherical	0	58.5	5.1	0	high
February 1	2.60	40.14	Spherical	0	52.16	5.04	0	high
February 2	2.68	46.32	Spherical	0	42.29	4.16	0	high
March 1	3.46	63.27	Spherical	0	52.92	3.84	0	high
March 2	3.58	64.77	Gaussian	0	51.33	4.16	0	high
April 1	3.53	62.47	Spherical	0	63.95	5.10	0	high
April 2	3.66	58.54	Gaussian	0	72.09	4.42	0	high
May 1	4.24	78.51	Exponential	0	27.9	5.11	0	high
May 2	4.3	77.58	Gaussian	0	27.9	3.52	0	high
June 1	4.39	80.67	Spherical	0	36.8	4.47	0	high
June 2	4.65	88.90	Exponential	0	69.51	4.48	0	high
Plot 4								
January 1	2.11	20.17	Spherical	0	24.32	3.29	0	high
January 2	2.27	23.78	Spherical	0	45.36	2.85	0	high
February 1	2.38	27.09	Gaussian	0	54.81	2.42	0	high
February 2	2.5	31.61	Gaussian	0	30.78	2.64	0	high
March 1	2.83	37.41	Exponential	0	64.3	2.71	0	high

Table 2. Continue

Sampling	Mean	Variance	Model	Nugget	Sill	Range	Nugget/ sill	Spatial dependence
March 2	3.13	46.66	Exponential	0	66.5	2.64	0	high
April 1	3.6	69.59	Gaussian	0	57.6	2.42	0	high
April 2	3.68	70.05	Spherical	0	51.85	2.63	0	high
May 1	3.57	63.19	Gaussian	0	16.38	2.64	0	high
May 2	3.55	60.88	Gaussian	0	20.16	2.64	0	high
June 1	3.39	53.29	Spherical	0	21.33	3.08	0	high
June 2	3.72	63.71	Spherical	0	41.83	3.08	0	high

The values for the sill were 2.51 as a minimum in plot two and 73.91 in plot one; likewise, the nugget effect also presented, as for green scale, values of zero, indicating a minimum sampling error. The creation of semivariogram-based density maps is another important tool in the spatial analysis of agricultural pests and diseases. For the 48 samplings in this study, infestation and infection maps were created, which graphically depict the behavior of the pest and disease analyzed within the study area. These maps were obtained through the ordinary kriging method, to estimate the percentages of infested and infected areas, as well as the values associated with unsampled points.

Density maps have been useful tools in studies of pest and disease behavior in agricultural crops, such as the study conducted by Quiñones-Valdez *et al.* (2015), who carried out spatial distribution and mapping of thrips infestations in gladiolus; as well as that reported by Jiménez-Carrillo *et al.* (2013) in the cultivation of husk tomato, who determined that the pests formed aggregation centers.

In the present work, through the maps generated, the presence of at least four green scale aggregation centers was detected in plot one (Figure 1), which coincided with a high population density and were maintained over time during the months of sampling. The green scale aggregation centers correspond to the aggregation centers formed by fumagina, although in this case, the disease has about six aggregation centers that remained stable during most of the sampling. For plot two (Figure 2), the green scale showed well-defined infestation foci during the first five samples, but the foci dissipated in the remaining samples, though they remained constant as population density in the aggregation centers increased. Likewise, in the particular case of fumagina, more than six aggregation centers were observed, which were not only maintained over time, but also increased after the first sampling in April, reaching a maximum of twelve well-defined aggregation centers. The presence of three aggregation centers formed by the presence of green scale is clearly observed in plot 3 (Figure 3), and this behavior is maintained throughout the twelve samplings carried out. In the case of fumagina, the centers of aggregation are

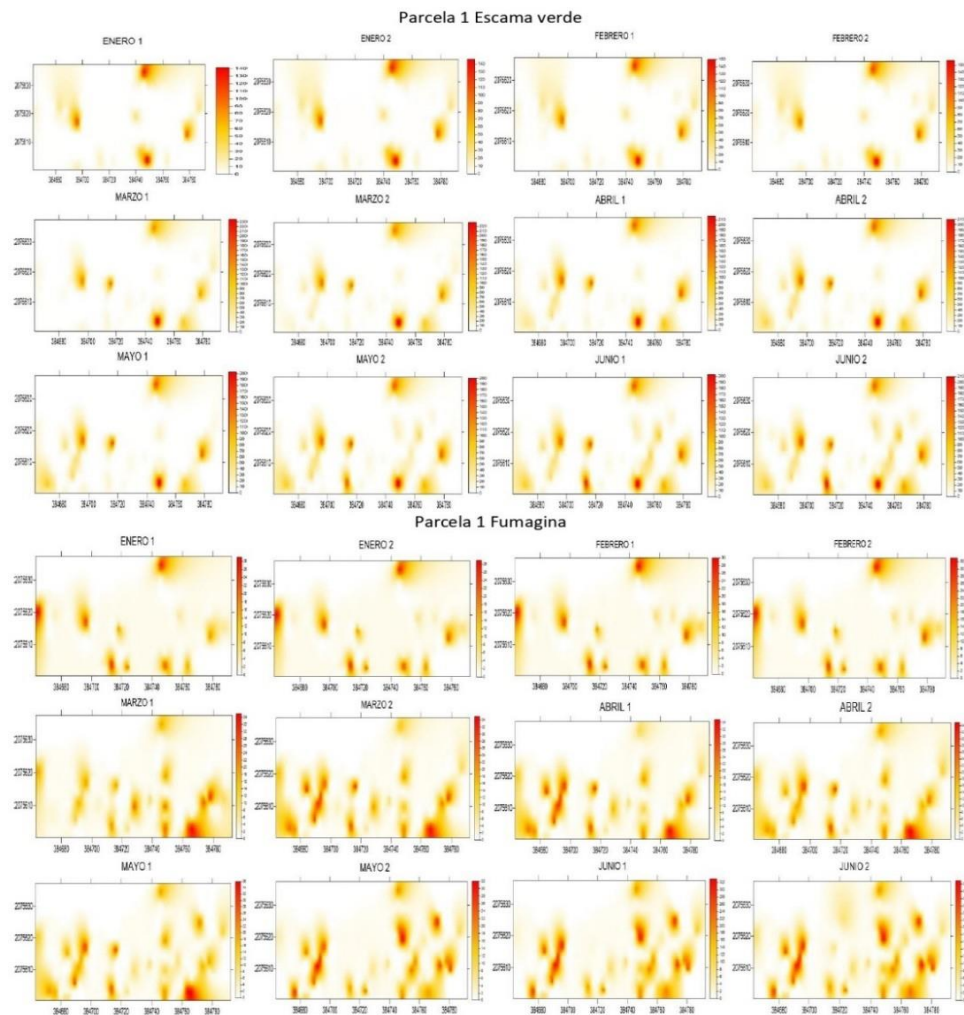


Figure 1. Biweekly maps of density and spatial distribution of green scale (*Coccus viridis*) and fumagina (*Capnodium* spp.) for Plot 1 (January to June 2022). *1: First two weeks of the month; 2: second two weeks of the month.

maintained and grow as the disease is sampled, indicating not only stability but also corroborating the level of spatial dependence.

In the case of plot 4 (Figure 4), the presence of two aggregation centers was identified, which were maintained throughout the sampling period. On the other hand, fumagina demonstrated the presence of more than four aggregation centers from the start of the sampling, as well as the presence of the disease in 80 % of the sampling area.

Density maps can be very useful in an integrated pest and disease management program for coffee cultivation, since it is possible to direct control measures towards the specific points of infestation and infection shown in the respective map, as

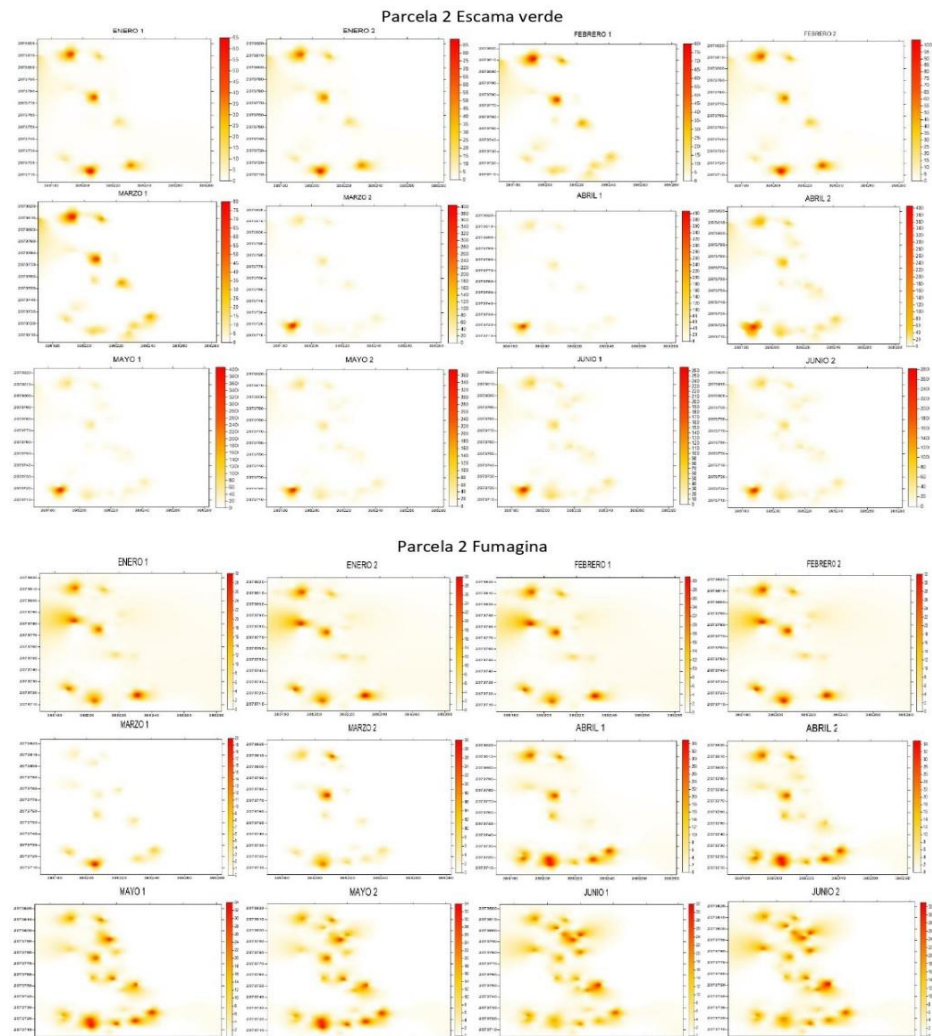


Figure 2. Biweekly maps of density and spatial distribution of green scale (*Coccus viridis*) and fumagina (*Capnodium* spp.) for Plot 2 (January to June 2022). *1: First two weeks of the month; 2: second two weeks of the month.

reported by Moral-García (2004). For a better spatial analysis of pests and diseases in agricultural crops, it is important to determine the level of infestation and infection in the study areas, which allows us to know exactly how the area is and thus determine appropriate control and prevention actions.

In the present work, the infested area was determined for the 48 green scale samples (Table 3), finding infestation percentages higher than 70 % in most of the samples taken. Works such as Esquivel-Higuera and Jasso-García (2015) also show pest

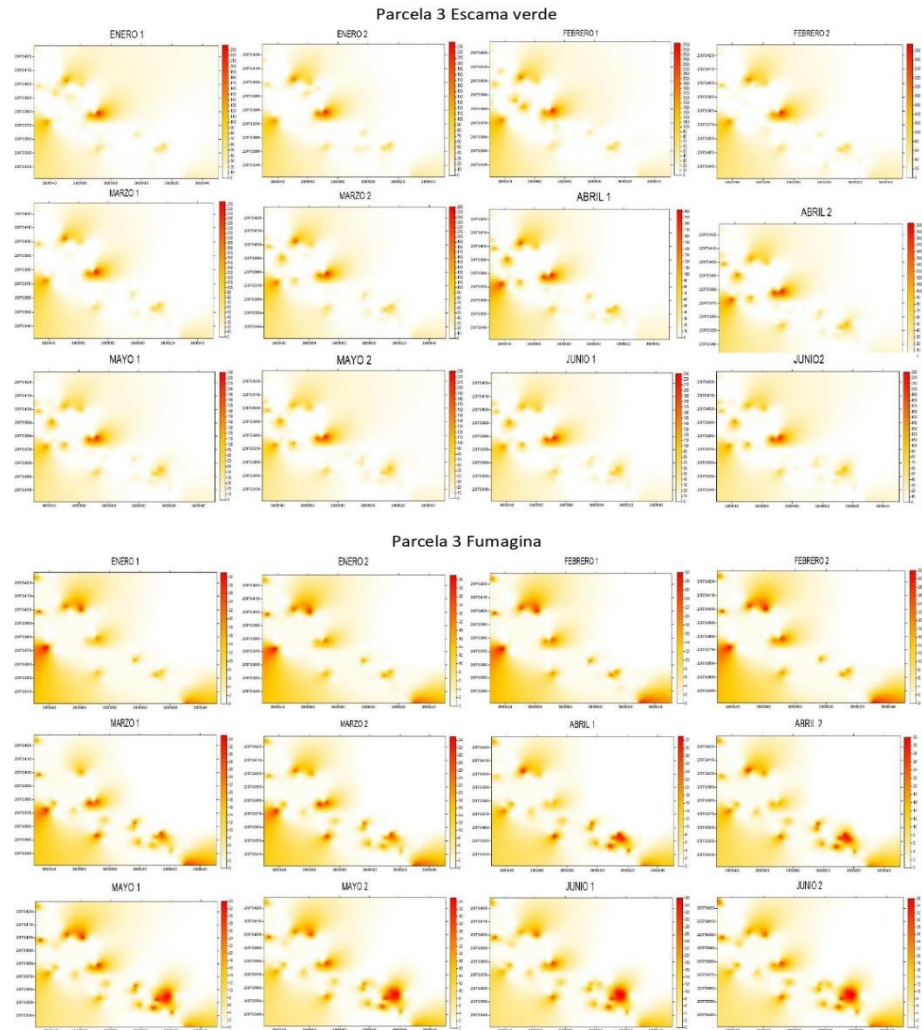


Figure 3. Biweekly maps of density and spatial distribution of green scale and fumagina for Plot 3 (January to June 2022). *1: First two weeks of the month; 2: second two weeks of the month.

Table 3. Correlation of means and Tukey’s test between populations of green scale (*Coccus viridis*) and fumagina (*Capnodium* spp.).

Plot	Correlation (r)	p value
1	0.977	0.000
2	0.807	0.002
3	0.649	0.022
4	0.57	0.050
General value	0.706	0.000

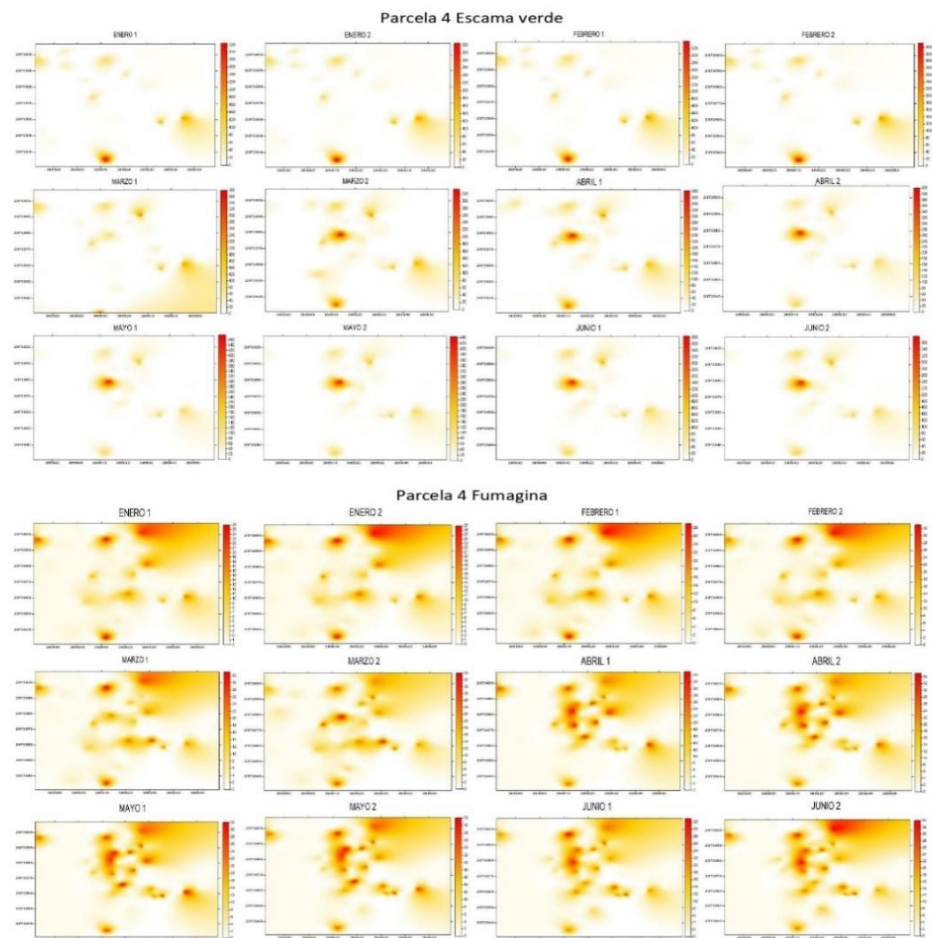


Figure 4. Biweekly maps of density and spatial distribution of green scale (*Coccus viridis*) and fumagina (*Capnodium* spp.) for Plot 4 (January to June 2022). *1: First two weeks of the month; 2: second two weeks of the month.

infestation percentages in plots where there is no relationship between the percentage and the density of infestation.

The months with the highest percentages of infestation are May and June in plot three, where infestation exceeds 70 %. In the remaining plots, the percentages remained between 59 and 70 %. This is consistent with the higher and lower densities of population fluctuation of the pest within the study area. It should be noted that the percentage of infestation is not directly related to the population density of the pest, as very high levels of infestation can occur at low densities that do not exceed the pest's economic threshold. In the case of fumagina, the infection percentages exceed 80 % for plot four, while for plots one, two, and three, the minimum percentage is 65 % and the maximum is 75 %.

The correlation analysis of means to determine the possible spatial association of the phytosanitary problems studied yielded a r value of 0.97 for plot one, 0.80 for plot two, 0.64 for plot three, and 0.57 for plot four (Table 3). The overall value of r for the four plots was 0.70, implying that there is a strong relationship between both phytosanitary problems. This coincides with Martínez-Ortega *et al.* (2009), who state that values close to 1 present a strong positive correlation, as well as that mentioned by Gil-Palacio (2020) and González-Vega *et al.* (2007), who indicate that the presence of *Capnodium* spp. is directly caused by *C. viridis*. The spatial behavior of pests and diseases suggests that they can be managed, and therefore this is of great help in the use of control methods directed towards the centers of aggregation, thus avoiding widespread applications and having significant economic savings in the application of chemicals or alternative methods, which leads to a lower local, national, and international environmental impact (Schodko and O'keeffe, 1989; Bautista *et al.*, 2013; Rivera-Martínez *et al.*, 2022).

CONCLUSIONS

The phytosanitary problems of green scale caused by the insect (*Coccus viridis* L.) and fumagina (*Capnodium* spp.) mostly presented a spatial distribution that adjusted to spherical type models, which allows explaining a high degree of spatial dependence and a spatial behavior with associated and related aggregation centers. The populations of these problems were discovered to be closely related to one another, indicating that one is biologically dependent on the other. This will allow producers in this sector to manage their operations more effectively, potentially reducing chemicals, costs, and environmental impact in the region.

REFERENCES

- Bautista LG, Cardona JA, Soto A. 2013. Spatial distribution of *Collaria scenica* (Hemiptera: miridae) and *Hortensia similis* (Hemiptera: Cicadellidae) in Andean Valleys. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural* 17 (2): 75–84.
- Cárdenas-Murillo R, Posada-Florez FJ. 2001. Los insectos y otros habitantes de cafetales y platanales. Centro Nacional de Investigaciones de Café: Chinchiná, Colombia. 250 p.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria). 2019. Investigación interna, comercio internacional, el caso de México. Ciudad de México, México. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/94Caf%C3%A9%20Producci%C3%B3n%20y%20Consumo.pdf> (Retrieved: October 2022).
- Esquivel-Higuera V, Jasso-García Y. 2014. Distribución espacial y mapeo de gusano soldado en seis localidades del Estado de México, en el año 2011. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (6): 923–935. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i6.879>
- Fernandes FL, Picanço MC, Gontijo PC, de Sena Fernandes ME, Pereira EJJ, Semeão AA. 2011. Induced responses of *Coffea arabica* to attack of *Coccus viridis* stimulate locomotion of the herbivore. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 139: 120–127. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2011.01113.x>

- Gil-Palacio Z. 2020. Servicios ecosistémicos en el cultivo del café. In Benavides-Machado P, Góngora CE. (eds.), El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano. Cenicafé: Bogotá, Colombia, pp: 186–203. http://doi.org/10.38141/10791/0001_8
- Gómez-Campo K, Rueda M, García-Valencia C. 2010. Distribución espacial, abundancia y relación con características del hábitat del caracol pala *Eustrombus gigas* (Linnaeus) (Mollusca: Strombidae) en el archipiélago Nuestra Señora del Rosario, caribe colombiano. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 39 (1): 137–159. <http://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.1.146>
- González-Vega ME, Hernández-Rodríguez A, Barrios-Alonso LM, Velázquez-del Valle MG, Hernández-Lauzardo AN. 2007. Efecto antagónico de un producto biológico obtenido de *Burkholderia cepacia* Palleroni & Holmes Contra *Capnodium* spp. en plántulas de café (*Coffea canephora* P.) crecidas *in vitro* e *in vivo*. Revista Mexicana de Fitopatología 25 (2): 120–126.
- Jiménez-Carrillo R, Ramírez-Dávila J, Sánchez-Pale J, Salgado-Siclán M, Laguna CA. 2013. Modelización espacial de *Frankiniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) en tomate de cáscara por medio de técnicas geoestadísticas. Revista Colombiana de Entomología 39 (2): 183–192. <https://doi.org/10.25100/socolen.v39i2.8232>
- Martínez-Martínez N, Ramírez-Dávila JF, Mejía-Carranza J, Vera-Nogues S. 2021. Comportamiento espacial de *Hemiberlesia lataniae* (Signoret) en aguacate “Hass” en el Estado de México. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 13 (1): 33–52. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.01.005>
- Martínez-Ortega R, Tuya-Pendás L, Martínez-Ortega M, Pérez-Abreu A, Cánovas A. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman: caracterización. Revista Habanera de Ciencias Médicas 8 (2): 1–19.
- Moral-García F. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales: Ecosistemas 13 (1): 78–86.
- Oliver M, Webster R. 1998. How geostatistics can help you. Soil Use and Management 7 (4): 206–217. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1991.tb00876.x>
- Ong WT, Vandermeer HJ. 2014. Antagonism between two natural enemies improves biological control of a coffee pest: The importance of dominance hierarches. Biological Control 76: 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.06.002>
- Quiñones-Valdez R, Sánchez-Pale JR, Pedraza-Esquivel A, Catañeda-Vildozola A, Gutiérrez-Ibañez AT, Ramírez-Dávila JF. 2015. Análisis espacial de *Thrips* spp. (Thysanoptera) en el cultivo de gladiolo en la región sureste del Estado de México, México. Southwestern Entomologist 40 (2): 397–408. <https://doi.org/10.3958/059.040.0213>
- Ramírez-Dávila JF. 2012. Geoestadística, principios básicos, aplicaciones y limitaciones. Universidad Autónoma del Estado de México: Toluca, México. 135 p.
- Rivera-Martínez R, Ramírez-Dávila JF, Martínez-Quiroz M, González-Huerta A. 2020. Spatial modeling of *Bactericera cockerelli* Sulc nymphs on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) using of geostatistical techniques. Biotecnia 22 (1): 142–152. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Rivera-Martínez R, Ramírez-Dávila JF, Tapia-Rodríguez A, Figueroa-Figueroa DK, Acosta-Guadarrama A, Serrato-Cuevas R. 2022. Comportamiento espacial del barrenador de la rama en aguacate utilizando el método del SADIE en el Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13 (2): 247–259. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2728>

- Schodko DJ, O'keeffe LE. 1989. Geostatistical description of the distribution of *Lygus hesperus* (Heteroptera: Miridae) in lentils. *Journal of Economic Entomology* 82 (5): 1277–1288. <https://doi.org/10.1093/jee/82.5.1277>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/> (Retrieved: October 2022)
- Solares-Alonso V, Ramírez-Dávila JF, Sánchez-Pale JR. 2011. Distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en el cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.). *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle* 12 (2): 1–12.
- Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Salgado-Siclan M, Castañeda-Vildozola A, Maldonado- Zamora FI, Lara-Díaz AV. 2020. Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporoides* Penz) en aguacate en el Estado de México. *Revista Argentina de Microbiología* 52 (1): 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>

7.3 Otros resultados

18

7.3.1 Identificación de la presencia de problemas fitosanitarios del café en campo

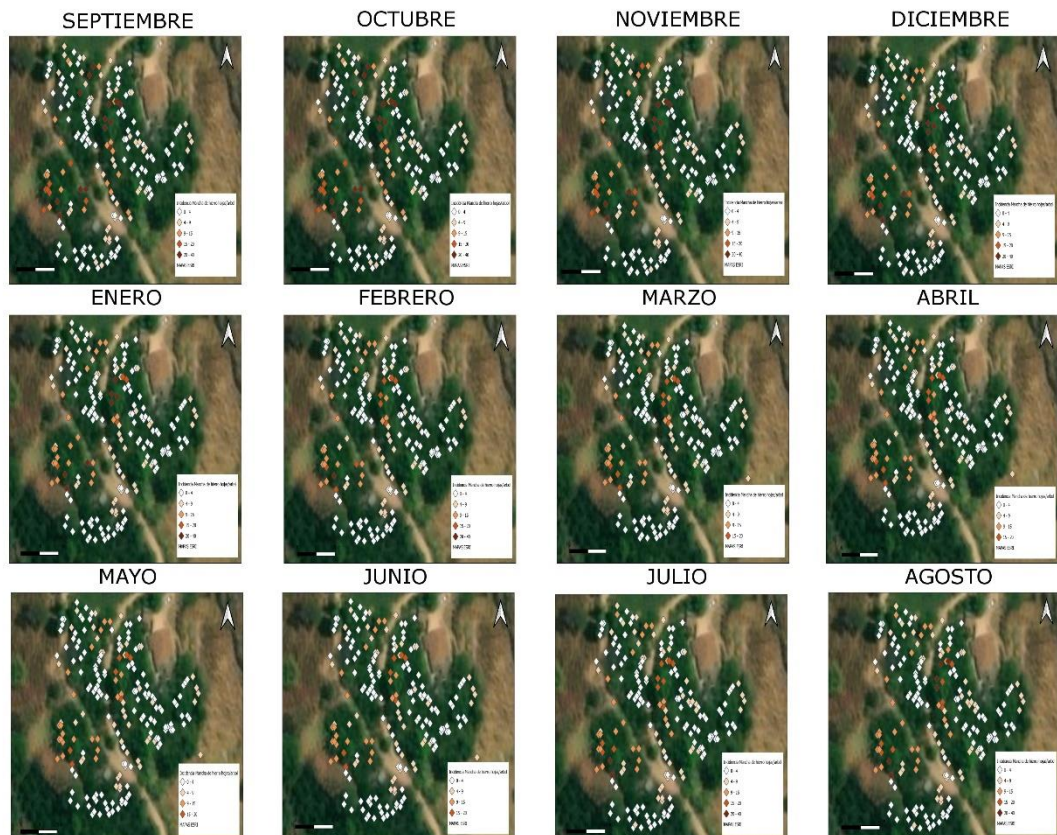
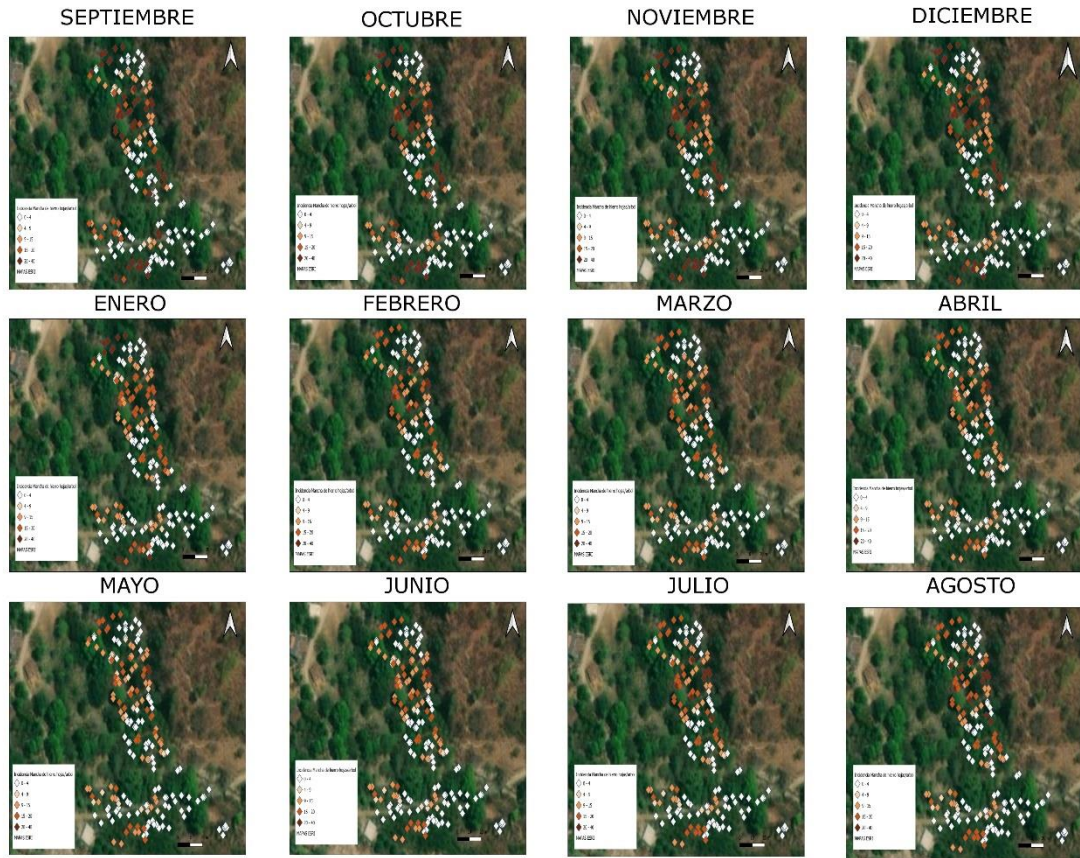
Para el muestreo realizado en las zonas productoras de café seleccionadas, se logró identificar la presencia de la roya del café, minador de la hoja, ojo de gallo y mancha de hierro en los tres municipios muestreados, Amatepec, Sultepec y Temascaltepec, lo que indica que la presencia de estos problemas se encuentra en todo el estado; la afectación a las plantas varió en tiempo, clima y altura, pero se concentraron en el estrato bajo de los árboles de café, lo cual se explica debido al autosombreo por la mayor cantidad de hojas presentes.

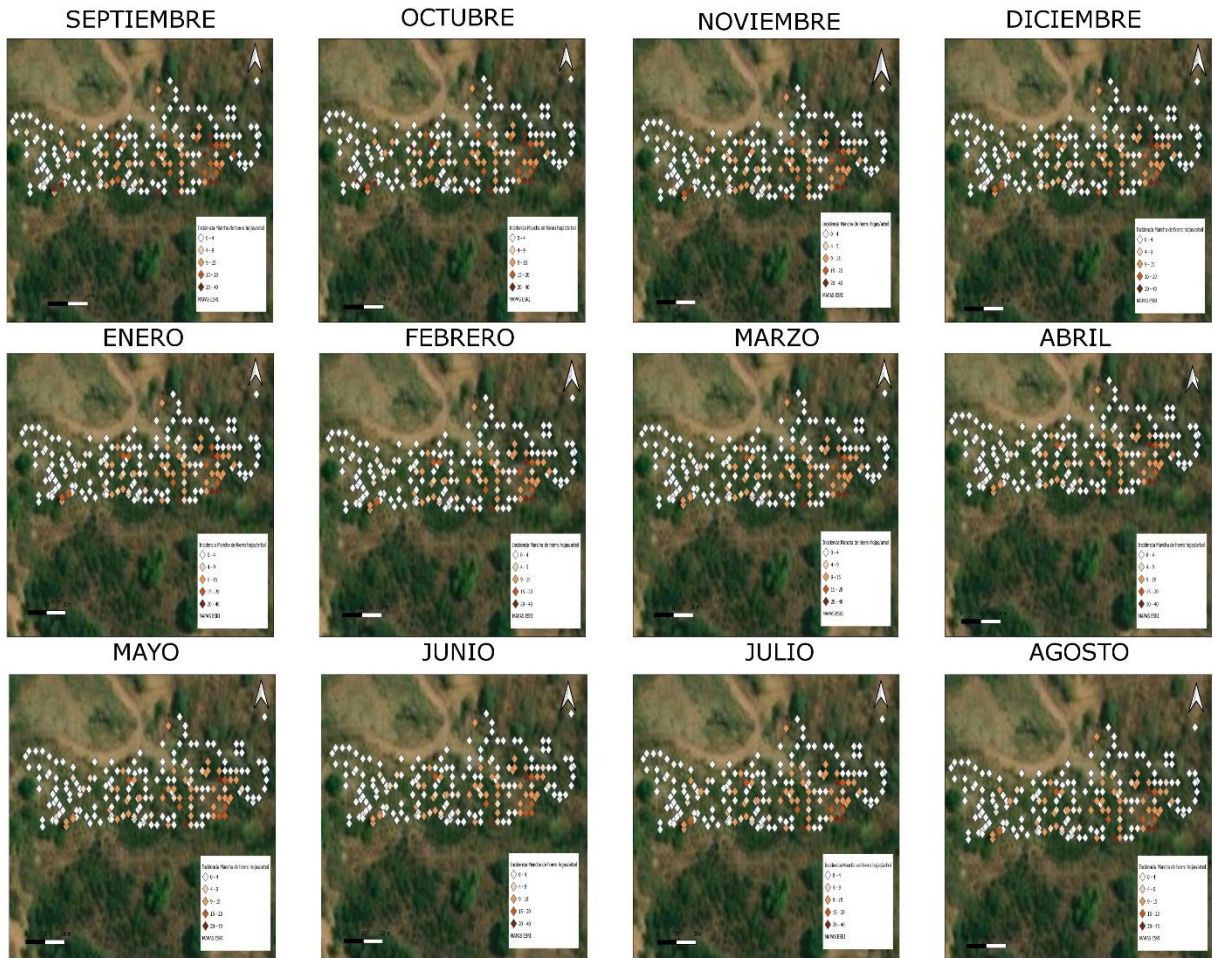
7.3.2 Elaboración de mapas temáticos

Para la elaboración de los mapas temáticos que darán vida al SIG, se utilizó el software de licencia libre QGIS versión 3.24 Tisler, herramienta principal para el procesamiento de datos. Se muestrearon 3 parcelas del municipio de Amatepec, Sultepec y Temascaltepec durante el año 2022 y 2023, muestreando 200 árboles por parcela y evaluando cada 15 días la incidencia de cada uno de los problemas fitosanitarios. Posteriormente se crearon las bases de datos en Excel, se estandarizaron y finalmente se introdujeron todos los datos a QGIS para crear los mapas temáticos, que en teoría, es la información que nutrirá al SIG para la toma de decisiones más oportuna, eficaz y eficiente para los productores del cultivo de café en el Estado de México.

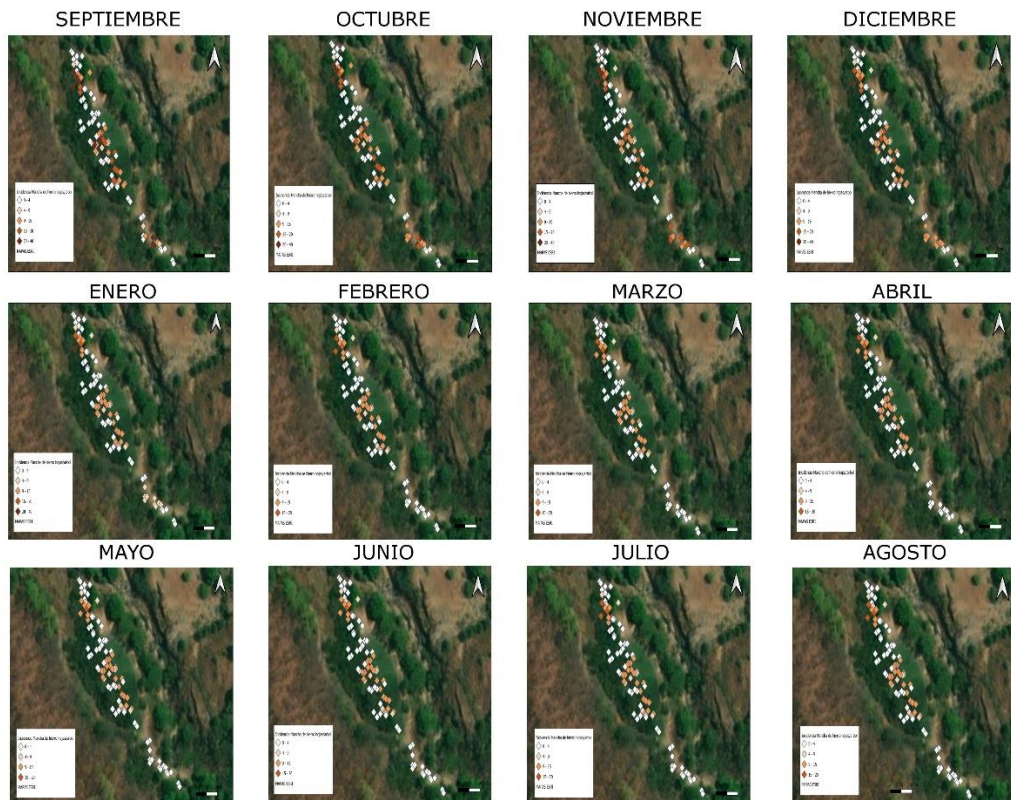
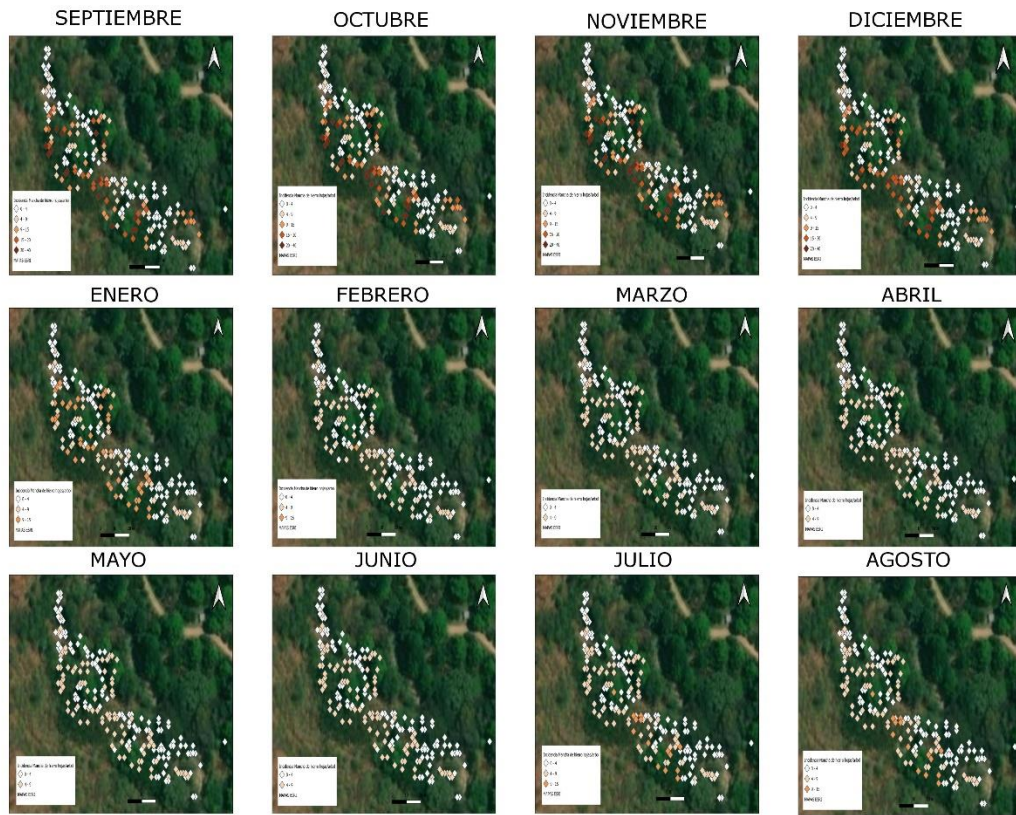
Finalmente se crearon 12 mapas de incidencia de promedio mensual para el año de muestreo, para cada una de las parcelas muestreadas por municipio y por problema fitosanitario; teniendo en total de alrededor de 432 mapas temáticos para la creación del SIG.

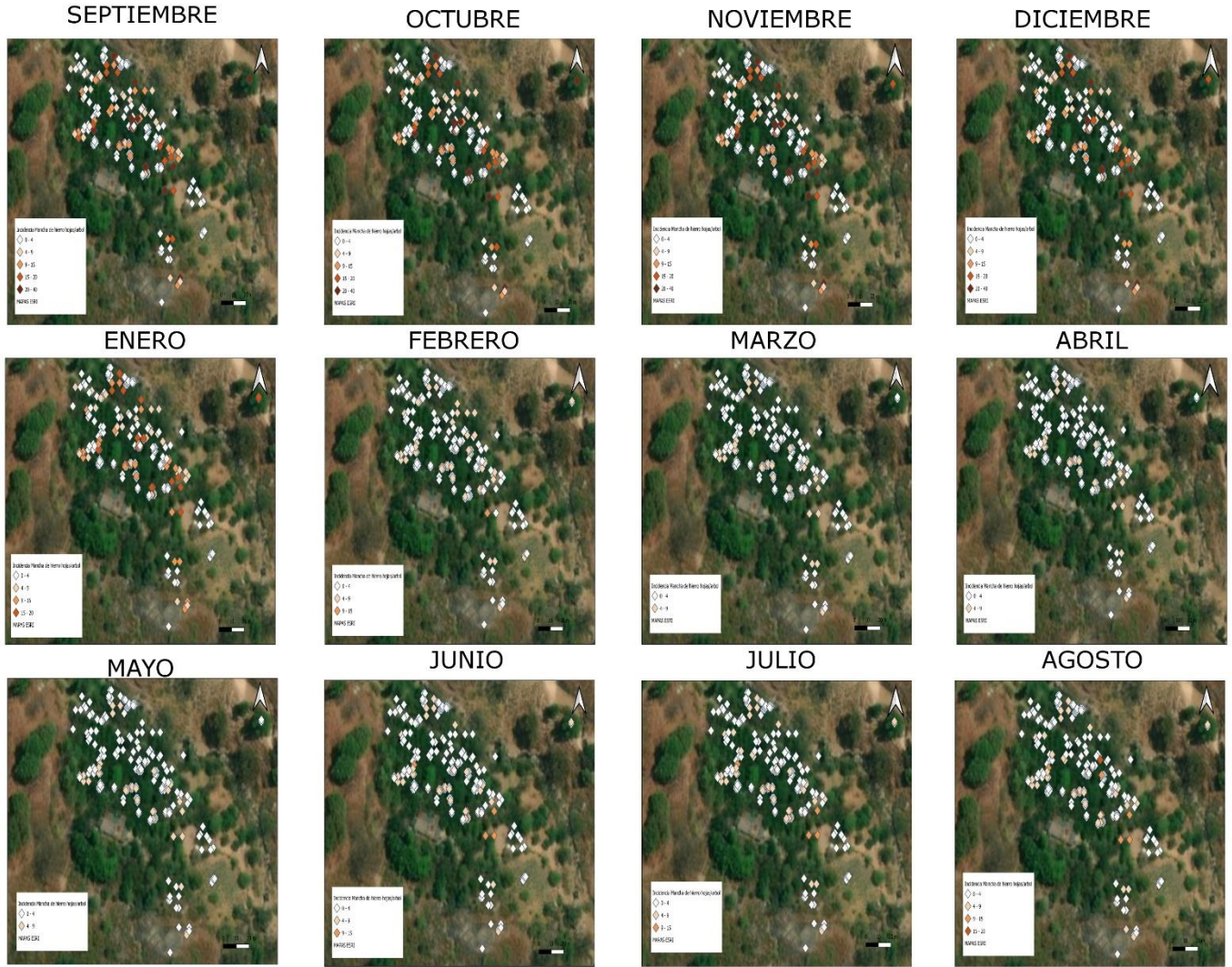
MAPAS TEMÁTICOS DE MANCHA DE HIERRO (*Mycosphaerella coffeicola*) PARA PARCELAS DE SULTEPEC, ESTADO DE MÉXICO



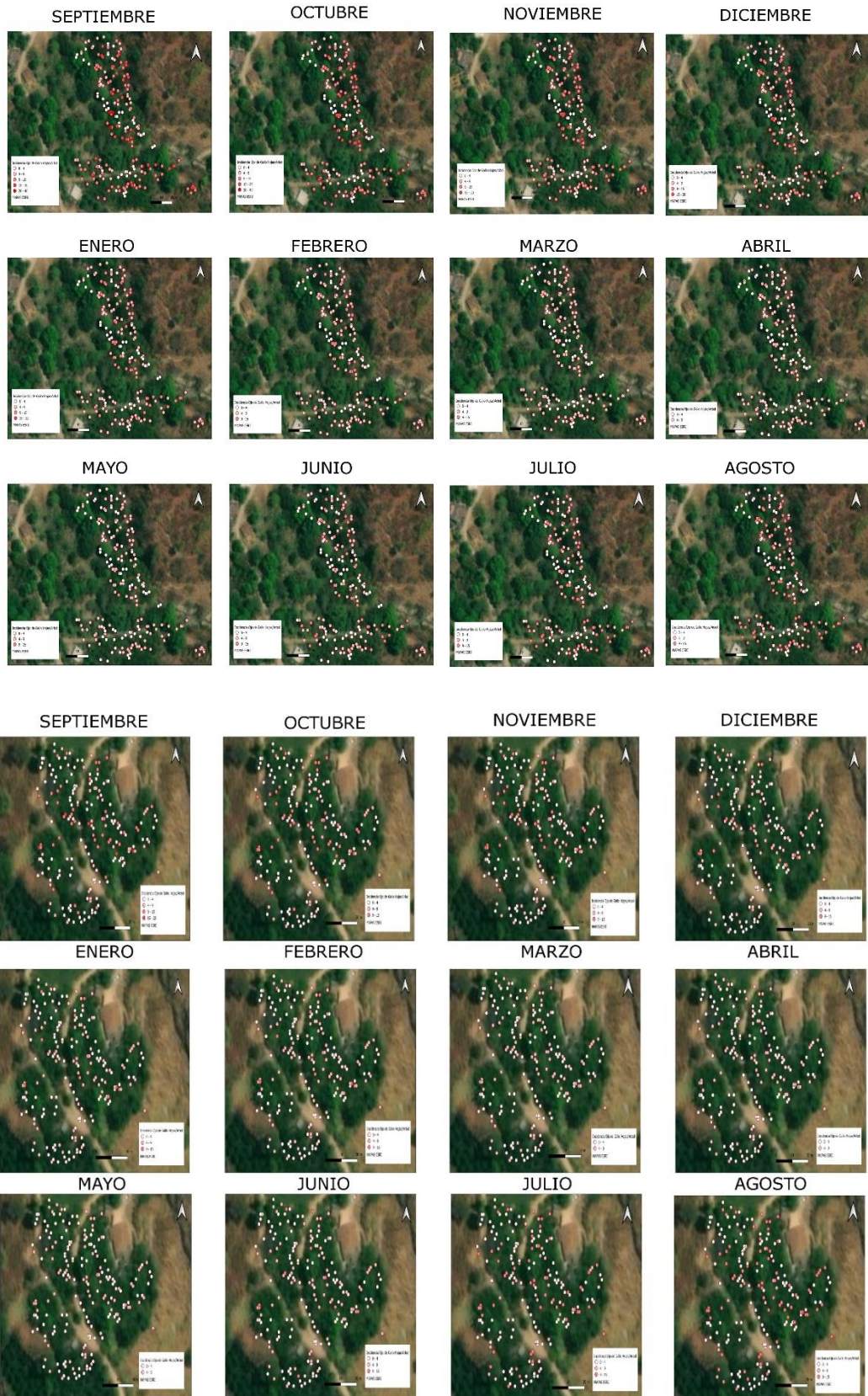


MAPAS TEMÁTICOS DE MANCHA DE HIERRO (*Mycosphaerella coffeicola*) PARA PARCELAS DE TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MÉXICO





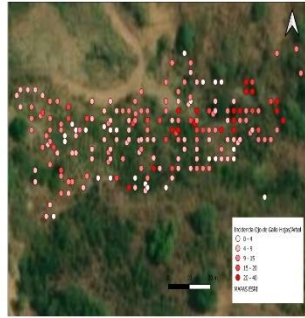
MAPAS TEMÁTICOS DE OJO DE GALLO (*Mycena citricolor*) PARA PARCELAS DE SULTEPEC, ESTADO DE MÉXICO



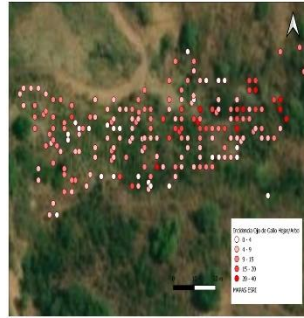
SEPTIEMBRE



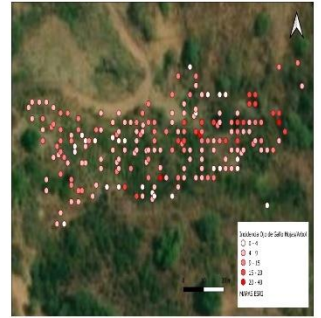
OCTUBRE



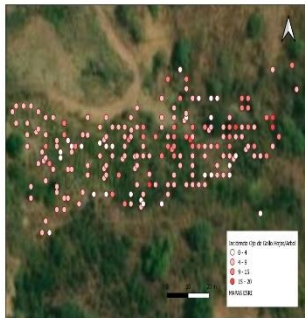
NOVIEMBRE



DICIEMBRE



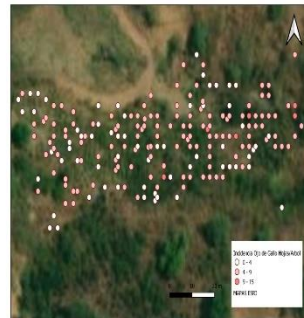
ENERO



FEBRERO



MARZO



ABRIL



MAYO



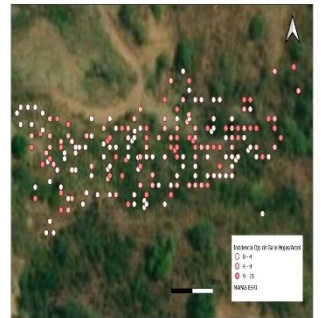
JUNIO



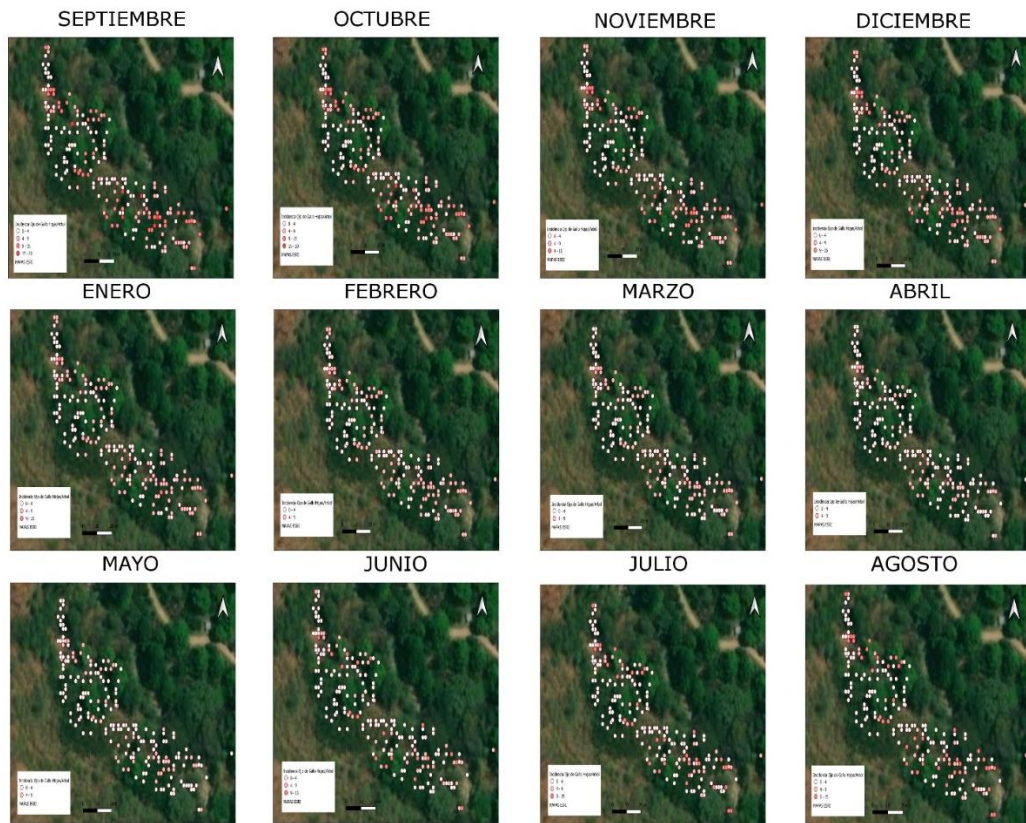
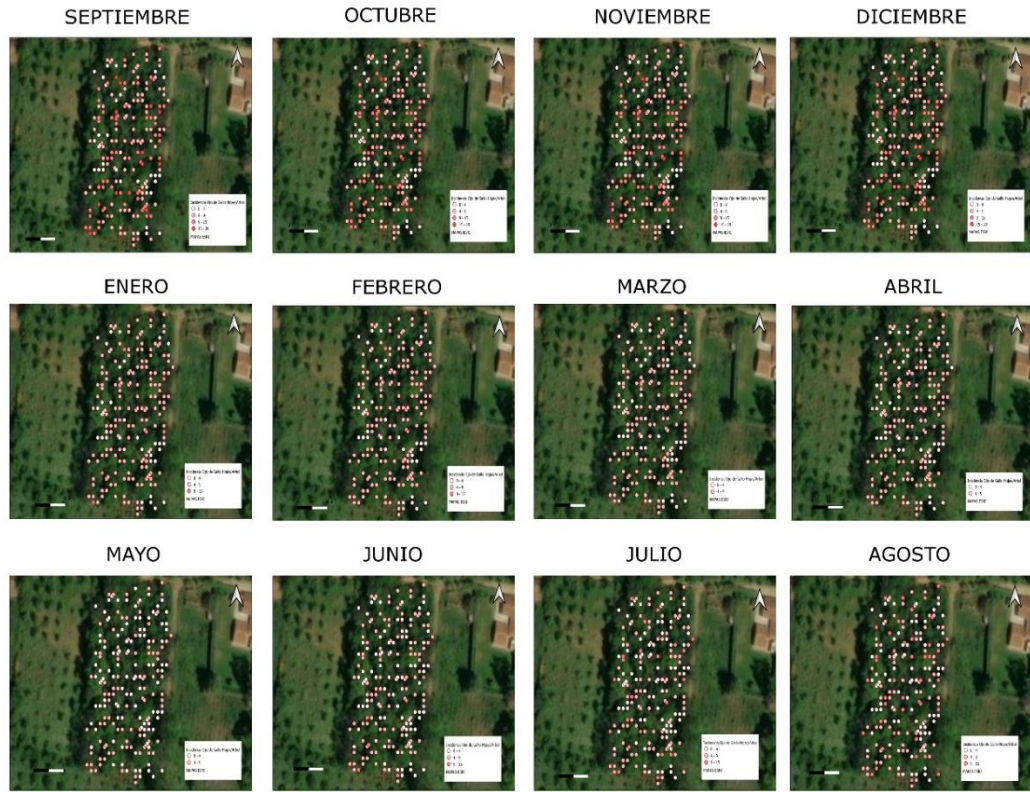
JULIO

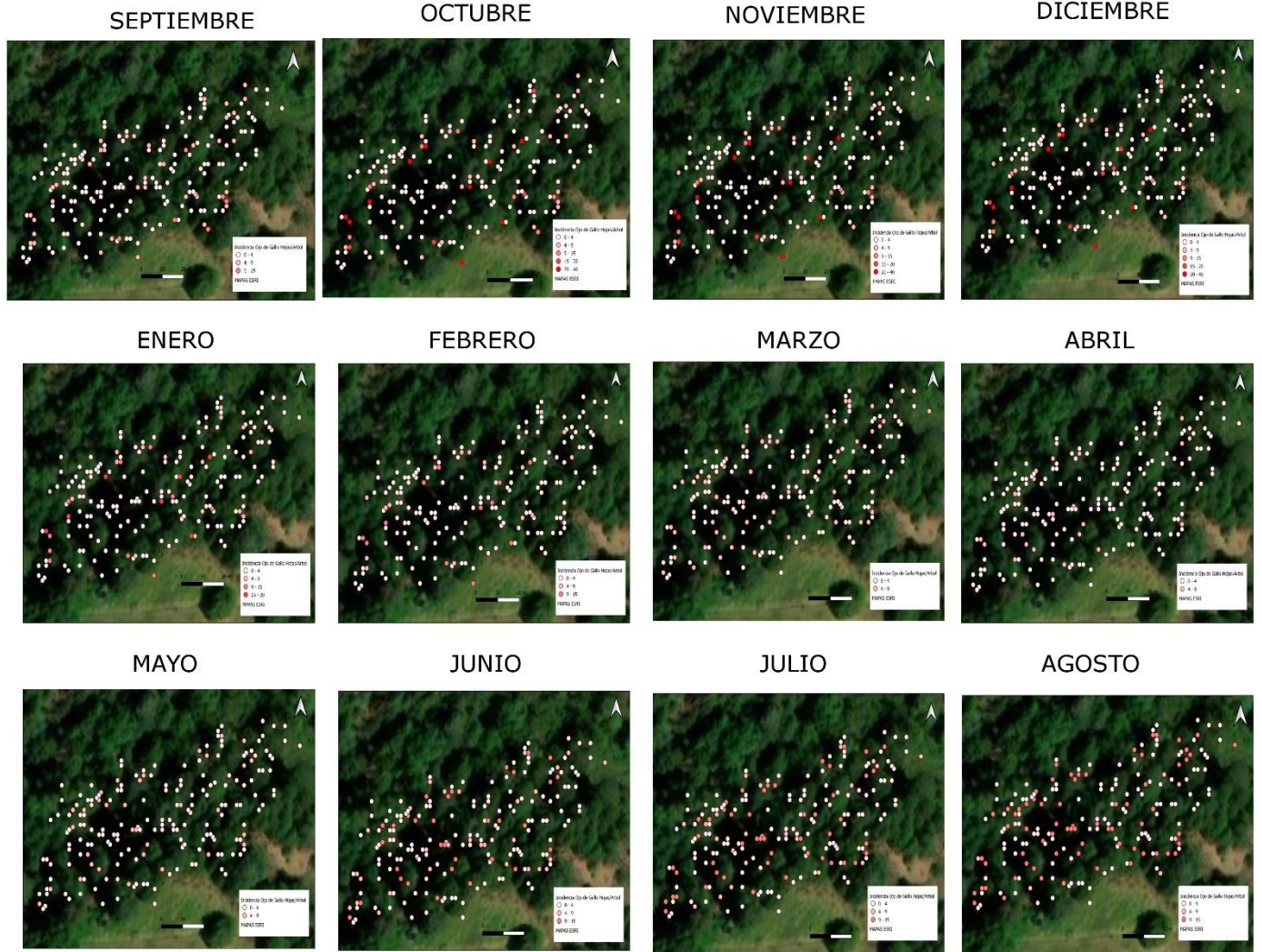


AGOSTO

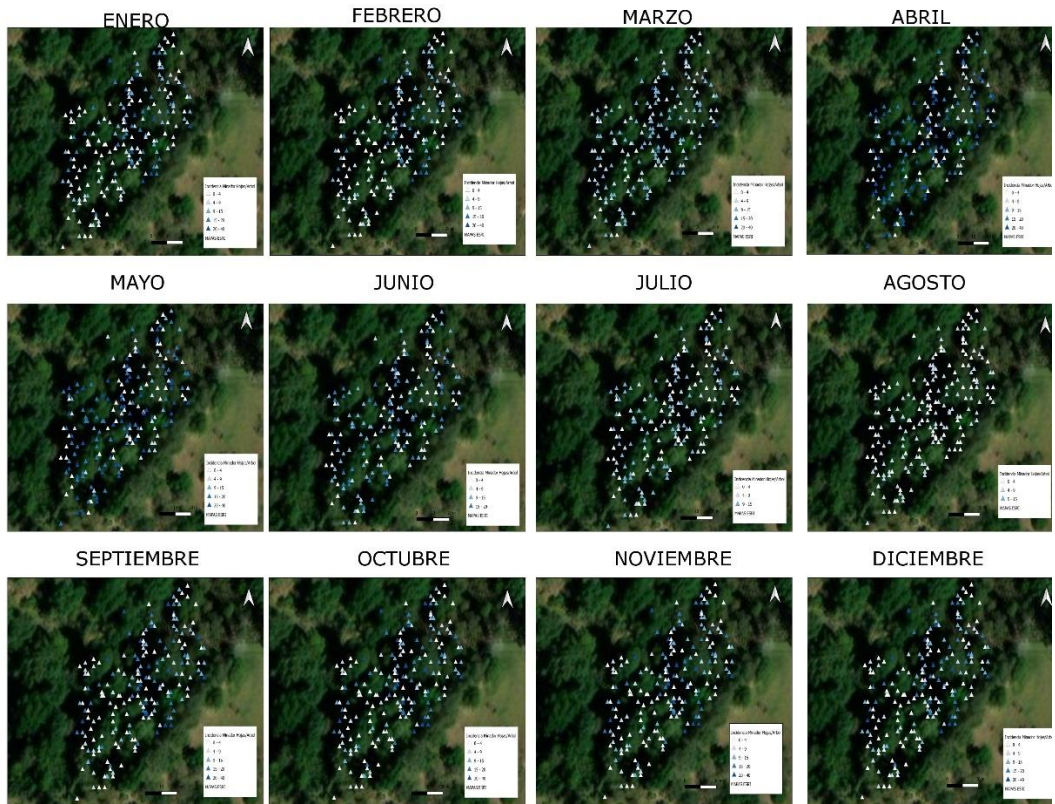
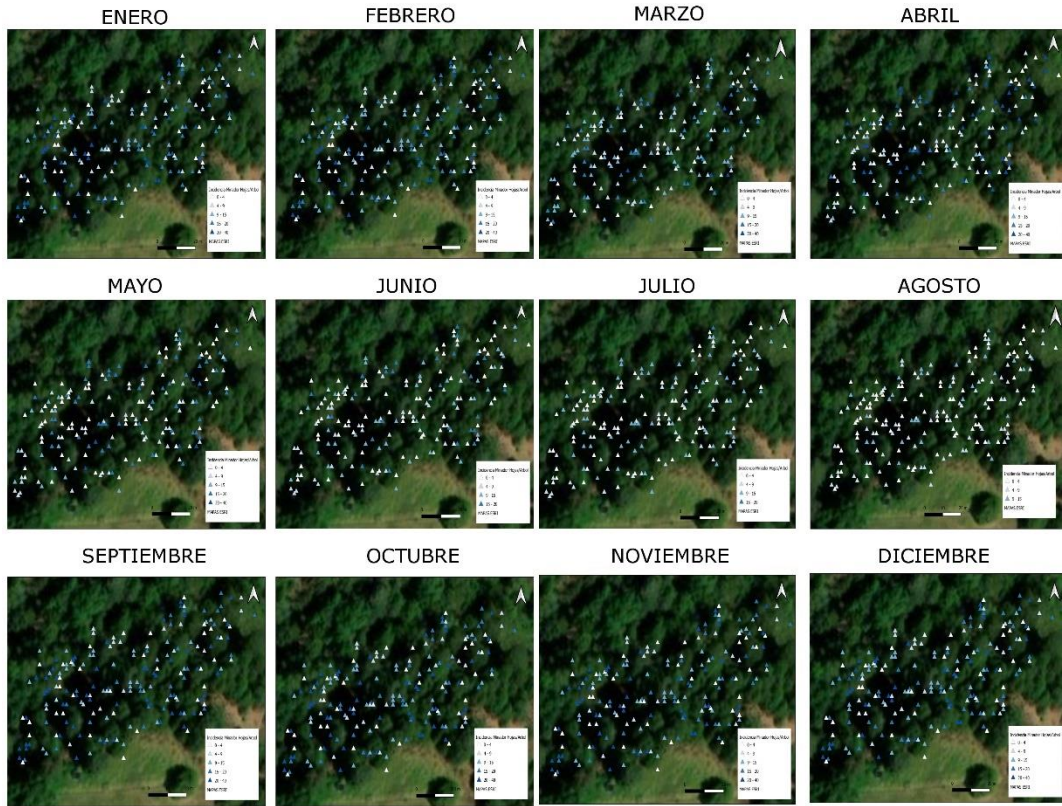


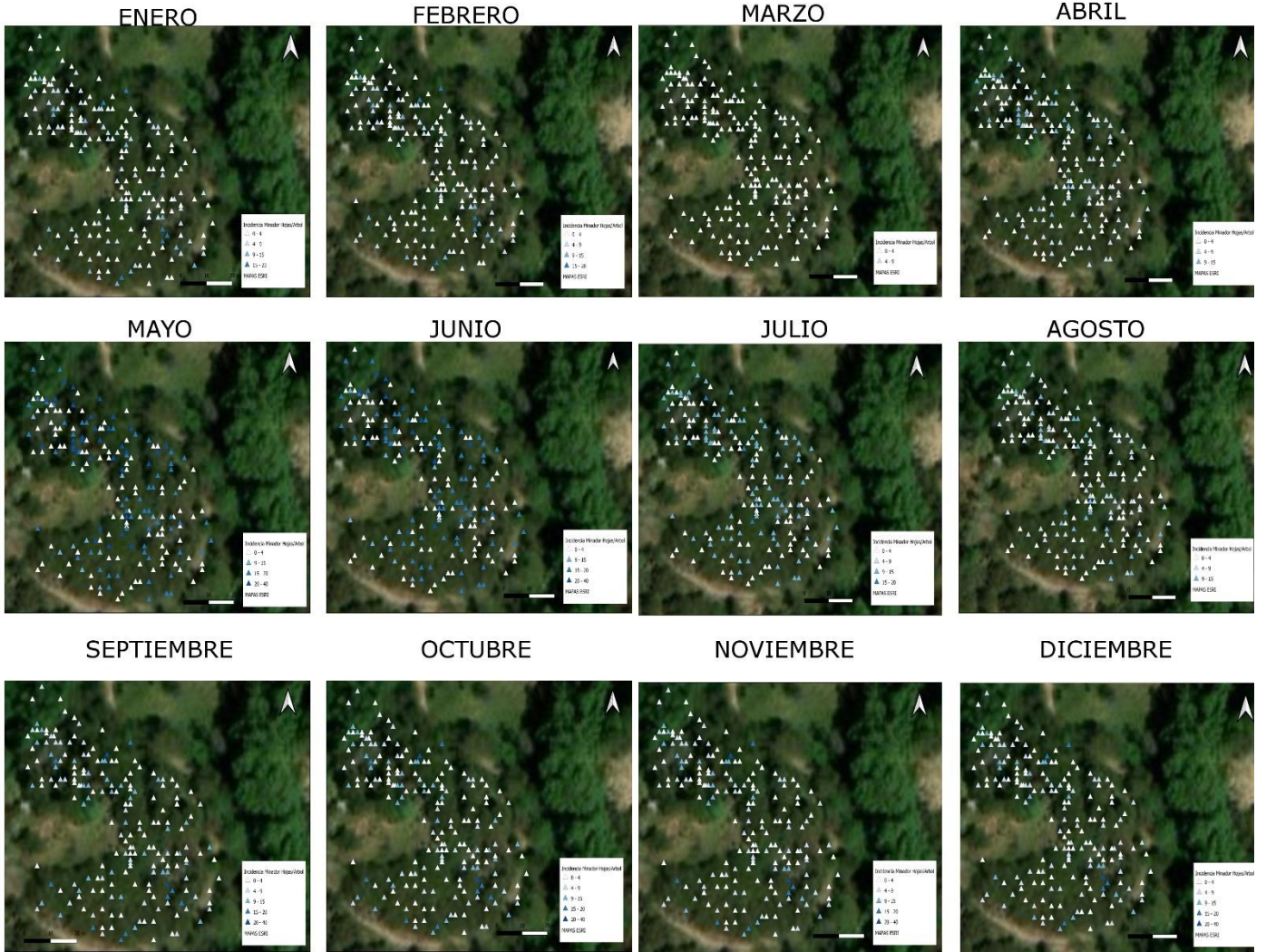
MAPAS TEMÁTICOS DE OJO DE GALLO (*Mycena citricolor*) PARA PARCELAS DE TEMASCALTEPEC, ESTADO DE MÉXICO



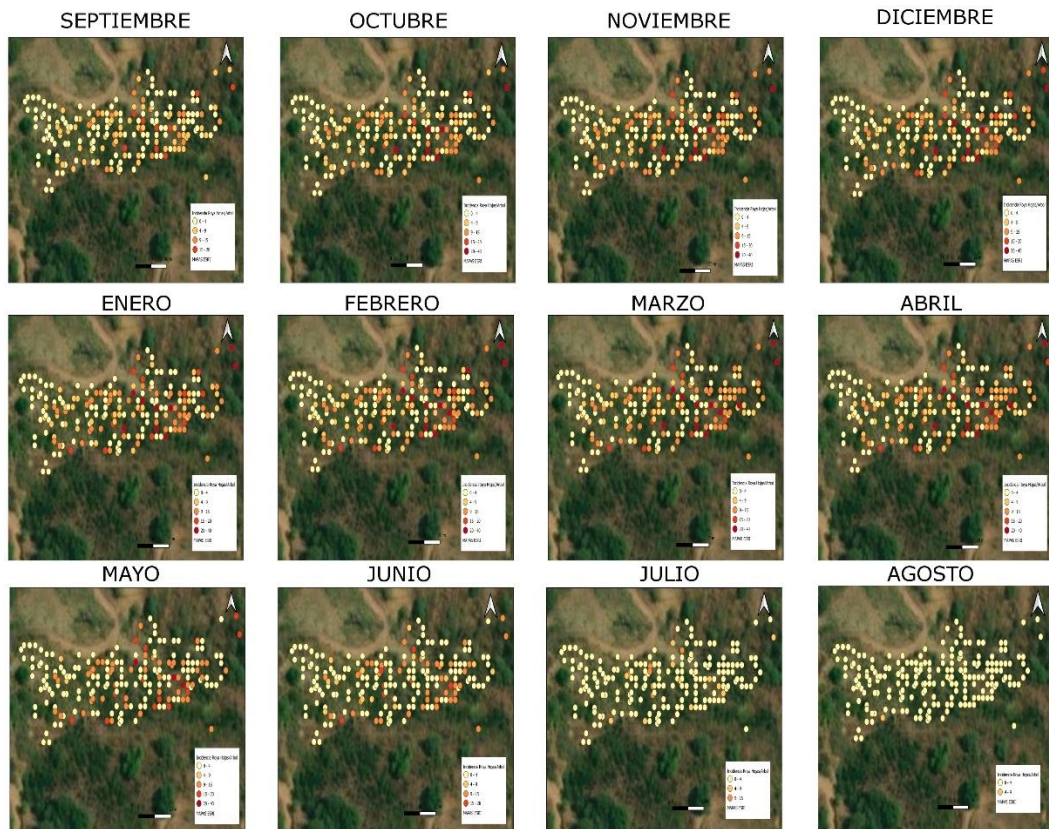
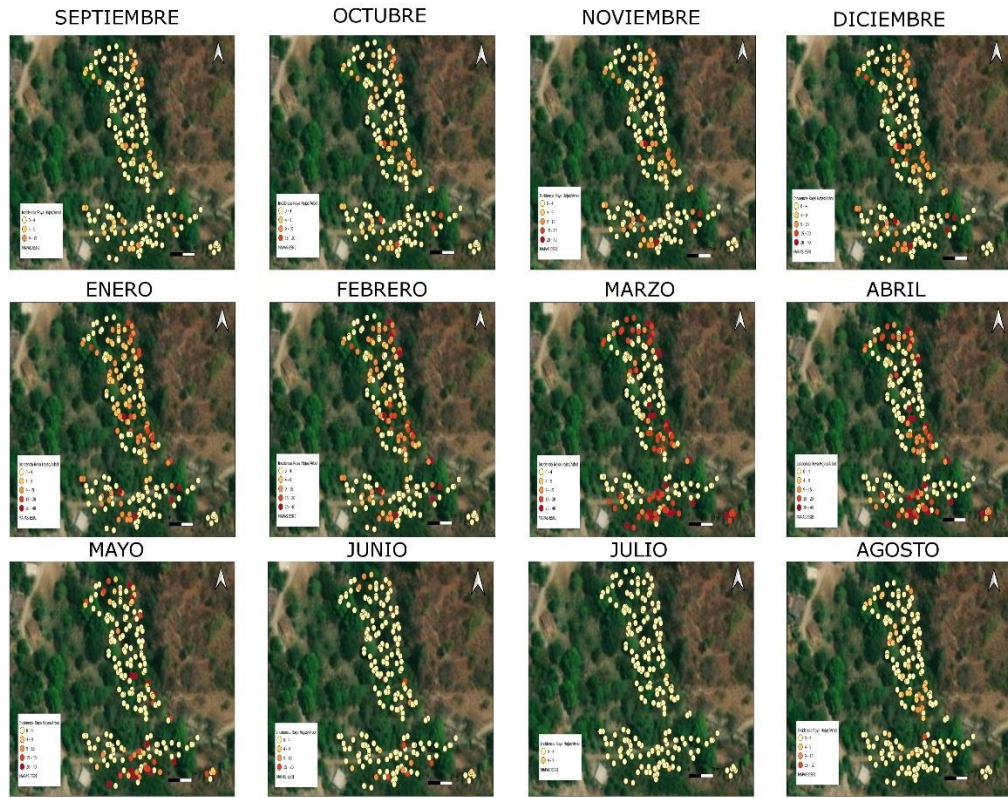


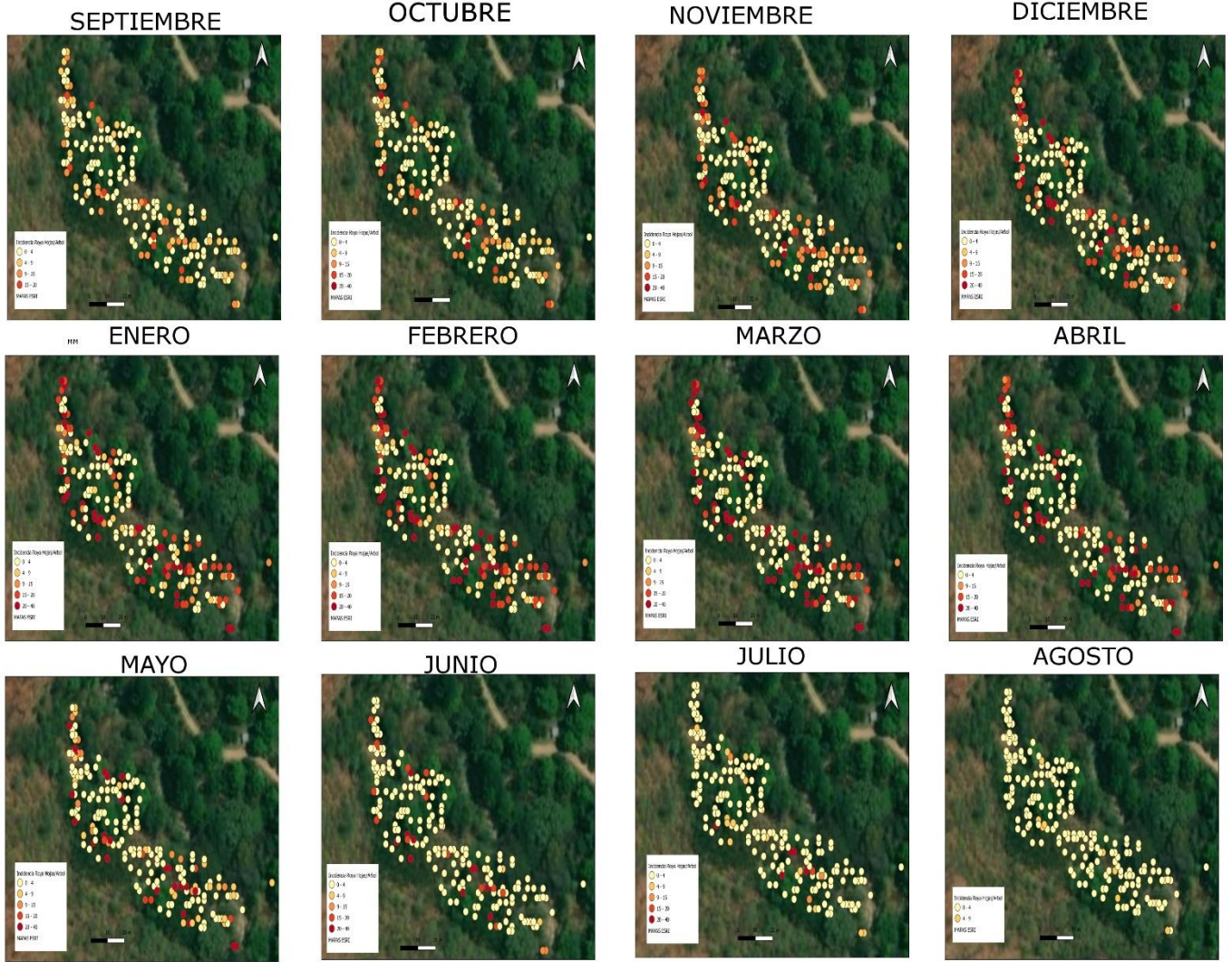
MAPAS TEMÁTICOS DE MINADOR DE LA HOJA (*Leucoptera coffeicola*) PARA PARCELAS DE AMATEPEC, ESTADO DE MÉXICO





MAPAS TEMÁTICOS DE ROYA DEL CAFÉ (*Hemileia Vastatrix*) PARA PARCELAS DE SULTEPEC, ESTADO DE MÉXICO





VIII. DISCUSION GENERAL

El En termino fitopatológicos, el triángulo epidemiológico de una enfermedad se compone de tres factores principales: uno es el hospedante susceptible que para este caso es la planta de café; el patógeno agresivo es la roya; y condiciones favorables refiriéndose a todos los factores abióticos que favorecen el desarrollo de una enfermedad (suelo, manejo, variedad, clima) (Mora et al. 2021). Con respecto a los datos obtenidos, nos referimos a las condiciones climáticas existentes en el medio que pueden favorecer la diseminación del hongo *Hemileia vastatrix*, así como la severidad de la enfermedad, estas son: temperaturas entre los 20°C - 22 °C, humedad relativa mayor al 90% y ausencia de luz las cuales en su conjunto generan las condiciones inductivas u horas favorables; denominando a los meses con mayor cantidad de horas favorables como meses inductivos (Mora et al. 2021, Mora et al. 2014, SENASICA 2018, Santana et al. 2018). Para este caso en particular los meses más inductivos se presentaron de septiembre a noviembre de 2020 y de junio a agosto del 2021, concordando con lo reportado en el Estado de México por el programa de vigilancia epidemiológica del cultivo del cafeto (SENASICA 2018), autores como López et al. (2018) y Mora et al. (2021), explican al proceso epidemiológico de la roya como el resultado de la interacción de las variedades del huésped más el manejo agronómico, la sanidad vegetal, el patógeno y el clima; viendo al desarrollo y diseminación de la enfermedad como un fenómeno multifactorial que no depende exclusivamente de factores climáticos, en este sentido entender el proceso epidemiológico de la enfermedad durante el ciclo fenológico del café se vuelve necesario en el manejo del cultivo, al respecto los datos recabados permiten observar que el periodo de inicio y termino de infección del hongo *Hemileia vastatrix* comprende desde agosto, tres meses después del inicio del periodo de lluvias hasta abril, dos meses después del término de la cosecha del fruto, cabe resaltar que los últimos meses del ciclo la roya se presentaba en

etapa de esporulación, y con el inicio del periodo de lluvias la incidencia se redujo hasta ser nula en junio y julio, esto probablemente se debe al arrastre de las esporas en las hojas, y a la defoliación causado por la precipitación, En este contexto, una elevada severidad en la esporulación al término del ciclo implica una reserva de inóculo que puede derivar en varios ciclos epidemiológicos de la enfermedad cuando las condiciones se presenten (Coria et al 2014), Kushalapa y Eskes (1989) mencionan que *Hemileia vastatrix* requiere condiciones específicas para infectar las hojas de la planta de café, como la salpicadura del agua de lluvia con la que se empieza la dispersión entre hojas y entre plantas, además de la presencia de humedad en el envés de la hoja y de 20 a 22 oC que permite su germinación, al respecto López (2001) y Mora (2015) menciona la importancia de conocer la incidencia y severidad de la enfermedad según los cambios meteorológicos durante el ciclo de cultivo para poder identificar las etapas críticas del patógeno y pronosticar su comportamiento epidémico mediante la detección temprana que permita realizar un manejo fitosanitario adecuado para la reducción o prevención de daños mediante el control de focos de infección.

Con los resultados obtenidos mediante el análisis espacial por índices de distancia (SADIE), fue posible determinar el patrón espacial de tipo agregado en las parcelas de café del municipio de Sultepec, los índices I_a y J_a corroboraron la distribución espacial de las poblaciones de roya. El índice I_a determina una distribución agregada y el índice J_a indica que estos se encuentran en diferentes centros de agregación (Acosta et al. 2001, Ramírez et al. 2013). La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en el SADIE coincide con lo descrito por Mora et al. (2015), quienes describen el crecimiento de la roya en focos de infestación. El SADIE como una metodología para el estudio de la distribución espacial ha demostrado ser de gran utilidad en el estudio de organismos biológicos (Alexander et al. 2005, Winder et al. 2005, Conrad et al. 2006, Ramírez-Dávila y González-Andujar 2007), otros trabajos como

el de Rivera et al. (2022) en aguacate también utilizaron el SADIE encontrando que la distribución espacial de *Copturus aguacatae* dentro de las huertas de aguacatero en los municipios de Donato Guerra y Coatepec Harinas en el Estado de México, se presentó en forma de agregados específicos dentro del cultivo. Reay-Jones (2012), utilizó la misma metodología en *Oulema melanopus* L. (escarabajo de la hoja en trigo) e identificó una distribución espacial en agregados en huevos, larvas y adultos, por su parte Ramírez Dávila & Porcayo Camargo (2009), encontró una distribución espacial agregada de *Arceuthobium* sp. (Muérdago enano) en el nevado de Toluca utilizando el método de índice de distancias SADIE, en estas investigaciones concluyeron que utilizar esta metodología permite determinar el comportamiento espacial de las poblaciones de muérdago.

Por otro lado, los mapas generados a través del krigado ordinario; demuestran que en las diferentes parcelas del municipio de Sultepec las poblaciones de roya están distribuidas en centros de agregación o focos de infección que se conservaron durante todos los muestreos, indicando que la enfermedad está localizada en la región y de igual manera se encuentra constante y latente esperando las condiciones ambientales adecuadas para multiplicarse. De acuerdo a lo anterior podemos observar que, en los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero los puntos de agregación de roya son más pronunciados y disminuyeron a partir del mes de marzo; esto es debido a que la temporada de sequías inicia a finales de diciembre en el municipio. Tapia et al. (2020) realizó un trabajo sobre antracnosis en aguacate y afirma que la presencia de centros de infección presentes en los mapas, son focos de infección a partir de los cuales la enfermedad se desarrolla y se disemina al resto de la parcela o parcelas, otros autores como Cárdenas et al. (2017) en el artículo “Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes cultivos de cacao”, indica que los mapas permiten identificar focos de infección de las enfermedades haciendo de la geo

estadística una herramienta que permite ver y explicar la distribución espacial de las enfermedades en los cultivos y coadyuvar en el diseño de un control integral.

34

En cuanto al porcentaje de infección durante el año de trabajo, este dato en agricultura de precisión permite determinar las áreas con necesidad de manejo (Ramírez-Dávila y Porcayo-Camargo 2009), en los meses de septiembre a Febrero tiene mayor incidencia de infección, debido a los cambios en las condiciones climáticas durante el ciclo fenológico del cultivo que permiten el avance del proceso epidemiológico de la enfermedad; Granados (2015) mencionan que el desarrollo epidemiológico depende de las fluctuaciones de las precipitaciones que permitan una humedad relativa superior al 80%, por lo que en este trabajo se puede inferir que los meses de julio y agosto permitieron acumulación de condiciones óptimas para un crecimiento de la infección de la enfermedad pues una vez que las lluvias inician el número de hojas enfermas y el número de lesiones comienza a aumentar. Según la ficha técnica de la roya del cafeto del SENASICA, 2016 la patogénesis o ciclo de vida de *Hemileia vastatrix* dura un mínimo de 30 días desde la germinación del hongo hasta la generación de unidades infectivas o esporulación, sumado a esto las esporas pueden presentar un periodo de la latencia de 30 a 60 días, por lo que durante un ciclo del cultivo pueden presentarse varios ciclos de la roya aun fuera de la época de lluvia manteniendo o aumentando el porcentaje de infección siempre y cuando se presenten condiciones favorables, al respecto Waller et al. (2007) mencionan que un fuerte rocío puede permitir que la enfermedad continúe su desarrollo, aun durante un período seco, por lo que las diferencias en el porcentaje de infección entre parcelas evaluadas pueden deberse a condiciones específicas como lo son las variaciones en el porcentaje de sombreado resultado del tipo de poda aplicada que puede afectar la humedad relativa y generar condiciones favorable o des favorables para los patógenos, Rivillas y Castro (2011) dicen que los cafetales deben de tener una manejo

adecuado de la estructura arbórea para una distribución racional del sombrero que permita la disponibilidad de radiación solar para los procesos fotosintéticos de las plantas de café sin aumentar la humedad relativa, en este sentido estas condiciones específicas generan microclimas que pueden favorecer o afectar el ciclo biológico de la roya (Granados 2015); por lo que se vuelve importante conocer estos aspectos que nos permiten identificar el proceso epidemiológico de la enfermedad y las condiciones bajo las cuáles el patógeno se desarrolla para diseñar estrategias de manejo preventivo y/o curativo que nos permitan mantener a los problemas fitosanitarios bajo los umbrales económicos reduciendo así las pérdidas económicas. En este tenor autores como López (2001) y López et al (2018) afirman que las estrategias de control de un problema fitosanitario tienen que ser preventivas y con base en un sistema de predicción que permita pronosticar focos de infección de una enfermedad evitando así que alcance el umbral de daño, esto concuerda con lo dicho por Gómez et al. (2022) en su artículo: Principales enfermedades del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de campo, que afirma que para realizar un buen manejo de las enfermedades es necesario diseñar un programa que integre diferentes métodos de control y prevención, y debe estar basado en el monitoreo en las distintas etapas del cultivo para la detección temprana de signos y síntomas de los problemas fitosanitarios, además de prestar atención a las condiciones climáticas favorables para el desarrollo de estas.

Aunado a esto, los agroquímicos, que incluyen pesticidas y fertilizantes químicos, han sido una herramienta valiosa en la producción agrícola al permitir el control de plagas y el aumento de la productividad de los cultivos. Sin embargo, el uso excesivo e indiscriminado de estos productos ha llevado a preocupaciones sobre la contaminación del suelo y del agua, la degradación de los ecosistemas y, lo que es más importante, la presencia de residuos de agroquímicos en los alimentos que llegan a nuestros platos (Silveira-Gramont 2018). De

acuerdo a lo antes mencionado, realizar un manejo integrado que adopte buenas prácticas agrícolas permite un buen manejo de enfermedades, y en consecuencia un uso reducido de agroquímicos (Del Puerto et al. 2014), de ahí la importancia de conocer el porcentaje de infestación y los focos de infección de la enfermedad para detectar los umbrales de acción que permita un control fitosanitario dirigido y prioritario que resulte en un ahorro económico para el productor y una disminución del daño ambiental, como lo dice la organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) quien menciona que el uso de buenas prácticas agrícolas no solo consiste en la aplicación en forma benévola de productos agrícolas alimentarios inocuos y saludables si no que a su vez procura la viabilidad económica y la estabilidad social (Moran 2020).

36

En este contexto, la producción de alimentos siempre ha sido un pilar fundamental de la supervivencia y el bienestar de la humanidad. Sin embargo, en la búsqueda de aumentar los rendimientos y satisfacer la creciente demanda global de alimentos, la agricultura ha recurrido ampliamente a los agroquímicos, lo que ha planteado cuestionamientos sobre la seguridad y la inocuidad de los alimentos que consumimos (Soler-Jiménez et al 2021), por lo que usar estrategias como el SADIE que permitan la reducción de agroquímicos en la agricultura tiene un impacto positivo en la inocuidad de los alimentos que llegan a nuestras mesas.

IX. CONCLUSIONES

37

- Se lograron estandarizar las bases de datos para cada problema fitosanitario muestreado en el periodo comprendido de septiembre 2022 a agosto 2023.
- Se manejó el Software QGIS versión 3.24 Tisler que es la herramienta base para el almacenamiento de los datos georreferenciados y poder crear el Sistema de Información Geográfica.
- Se crearon los mapas temáticos de incidencia de Roya, Ojo de gallo, Minador de la hoja y Mancha de Hierro, problemas de importancia económica del cultivo de café.
- Los mapas generados son útiles para la estimación de la superficie infestada.
- Los mapas pueden resultar útiles para dirigir las medidas de control hacia áreas específicas de infestación, permitiendo la elección del método más adecuado con el objetivo de lograr un ahorro económico y un impacto ambiental mejorado.
- El uso de los Sistemas de Información Geográfica es una alternativa eficiente y precisa que permite la toma de decisiones oportuna en el área agrícola. Se puede ofrecer una agricultura más productiva con un nivel de riesgo menor y una planeación certera de los programas de expansión del cultivo, en este caso, de aguacate en el sur del Estado de México; buscando una producción en ambientes que provean condiciones que satisfagan los requerimientos agroecológicos de las plantas.
- El desarrollo de mapas temáticos de incidencia de diferentes patógenos en parcelas de café, permite la divulgación de la utilidad de las tecnologías para precisar en la mejora de intercambio de la información entre los agricultores, trabajadores extensivos, investigadores y, en cierta medida, a los responsables políticos, lo que permite una toma de decisiones más oportuna, específica y eficaz para el control de

plagas y enfermedades del café, logrando una gestión sustentable del cultivo en la zona.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

39

- Agrios, G. N. (2005). Plant pathology. Academic press.
- Agrobanco. (2012). Manejo integrado de plagas en café. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/011-i-cafe.pdf>
- ANACAFÉ (Asociación Nacional del Café). (2017). Manejo integrado del ojo de gallo. <https://www.anacafe.org/uploads/file/a1cbc30482d447f4863ad8346a2a6665/04-ojo-de-gallo.pdf>
- Baker, P. S., & Barrera, J. F. (1993). A field study of a population of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. (Coleoptera: Scolytidae), in Chiapas, Mexico. Tropical Agriculture, 70(4), 351-355.
- Barrera, J., Perez Quintanilla, J., Pinson Rincón, E., Díaz-Vicente, V. y Rivas Platero, G. G. (2014). Plagas y enfermedades del café: Identificación, bioecología y manejo agroecológico. 1ª Ed. Editorial Ceco. Universidad Autónoma de Chiapas.
- Cristóbal-Martínez, C., Mora-Aguilera, G., Leyva-López, N. E., & Nava-Díaz, C. (2014). Caracterización morfológica y patogénica de *Colletotrichum* spp. asociados a la antracnosis del cafeto (*Coffea arabica* L.) en México. Revista Mexicana de Fitopatología, 32(2), 173-186.
- Diaz Sánchez, K. B. (2022). Manejo integrado de la enfermedad “ojo de pollo” (*Mycena citricolor*) en el cultivo de café (*Coffea arabica*, L), en Ecuador (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2022).
- FAO (2022). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Figueroa, F.D.K, Ramírez, D.J.F., Lara, V.F., Mora, E.M y Galacho, J.F.B. (2023). Distribución espacial de la escama verde y fumagina en cafetales de Amatepec, Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14(4), 847-858. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802023000400419&lng=en&nrm=iso
- Foladori, G. (2022). Agricultura de precisión y su carácter capitalista: la no neutralidad de la tecnología. Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad, 14(28), e2339. <https://doi.org/10.22430/21457778.2339>
- García Túchez, J. W. (2012). Caracterización biológica del hongo *Mycena citricolor* Berk & Curt, con aislamientos obtenidos de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) provenientes de las diferentes zonas cafetaleras de Guatemala, CA (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).


- Giraldo-Jaramillo, M., García, A. Parra, R. (2018). Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the State of São Paulo, Brazil. *J. Econ. Entomol*, 111: 2192-2200.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (2023). Escama verde. INIAP. <https://tecnologia.iniap.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/escamaverde.pdf>
- Jackson, P., Hunter, W. B., & Rohitha, B. H. 2012. "Biology and management of *Coccus viridis* (Green Scale) in coffee." *Journal of Insect Science*, 12(1), 1-12.
- Jiménez Martínez, E. (2016). Plagas de cultivos. 1a ed. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua, 235p.
- Lee, S. J., & Olivares, J. (2024). El futuro de la industria cafetalera.
- Leon, J. (1987). *Botánica de los cultivos tropicales - Jorge León - Google Libros*. Botanicade los cultivos. https://books.google.cl/books?id=bOMNAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Libert, A. and Paz, F. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*, 24: 1-24.
- Molina, D. (2022). Revisión sobre la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) con énfasis en la resistencia mediante antibiosis y antixenosis. *Revista Colombiana de Entomología*, 48(2), e11172. Epub September 19, 2022. <https://doi.org/10.25100/socolen.v48i2.11172>
- NCBI (2024). National Center of Biotechnology Information. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
- Ormeño-Villajos, S. (2023). Introducción sintética a las Enfermedades de las Plantas. Santiago Ormeño Villajos, Madrid. ISBN 978-84-09-50046-8.
- Oropeza Tosca , D. R., Barras Baptista , A., Castillo Romero , F., Guerra Que , Z., & de León de los Santos , B. R. (2023). Análisis del estado del arte de la agricultura de precisión para su aplicación en México. *REVISTA IPSUMTEC*, 6(4), 106–113. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i4.270>
- Pilozo Mantuano, W. J. (2021). Principales enfermedades causantes de la pérdida de rendimientos de los cultivares de café arábigo (*Coffea arábica*) en la Zona del Sur de Manabí (Bachelor's thesis, Jipijapa. UNESUM).

- Pérez-García, C.A., Pérez-Atray, J.J., Hernández-Santana, L., Gustabello-Cogle, R. & Becerra-de Armas, E. (2019). Geographic Information System for sugarcane agriculture in the province of Villa Clara. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 13(2), 30-46.
- Reinoso, G.J.C. & Herrera, G.A.J. (2016). Diseño e implementación de una aplicación SIG para la supervisión y monitoreo de sensores en el campo de la agricultura de precisión. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de los Llanos, Colombia.
- Rivera, M. C., & Wright, E. R. (2020). Apuntes de patología vegetal: fundamentos y prácticas para la salud de las plantas. Editorial Facultad de Agronomía UBA.
- Romero, J. M., & Camilo, J. (2019). Manual de producción sostenible de café en la República Dominicana.
- Rueda, G. D., Constantino C. L.M.; Montoya, E.C., Ortega M.O.E., Gil Z.N y Benavides-Machado, P. (2016). Diagnóstico de *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae) y sus parasitoides en el departamento de Antioquia, Colombia. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 17(1), 101- 112. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-04882016000100002
- Ruiz-Orta, A., Tapia-Rodríguez, A., Karen Figueroa-Figueroa, D., & Francisco Ramírez-Dávila, J. (2023) ANALYSIS OF THE SPATIAL ASSOCIATION OF FUMAGINA (*Capnodium* spp.) AND GREEN SCALE (*Coccus viridis*) IN COFFEE IN SULTEPEC, MEXICO. *Agrociencia*, 57(7).
- SENASICA. (2014). Roya Café CNRF-LANREF. Ficha Técnica No. 55. Minador de la hoja del cafeto. <http://royacafe.lanref.org.mx/Documentos/FTNo50Leucopteracoffeella.pdf>
- SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/>
- Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J. F., Salgado-Siclán, M. L., Castañeda-Vildózola, Á., 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.

Tomlinson, R. 2007. Pensando en el SIG: Planificación del Sistema de Información Geográfica Dirigida a Gerentes. ESRI PRESS.

42

Uva, M. & Campanella, O. (2009, mayo). AP-SIG: un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión [Conferencia]. XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, Buenos Aires, Argentina.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19801>

Vanegas, F. (2016). *COMPOSICIÓN DEL FRUTO DEL CAFÉ* - | *Coffee Media* . Pagina Web.
<https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/06/05/composicion-del-fruto-del-cafe>