



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS  
NATURALES**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS POBLACIONES DE ROYA DEL  
CAFÉ (*Hemileia Vastatrix*) EN CAFETALES DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

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

**PRESENTA**

**M.C. AURELIO PÉREZ CONSTANTINO**

El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 13 de octubre de 2023.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS  
NATURALES**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS POBLACIONES DE ROYA DEL  
CAFÉ (*Hemileia Vastatrix*) EN CAFETALES DEL ESTADO DE MÉXICO**

**TESIS**

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

**PRESENTA**

**M.C. AURELIO PÉREZ CONSTANTINO**

**COMITÉ DE TUTORES**

**Dr. José Francisco Ramírez Dávila**

**Dra. Delfina de Jesús Pérez López**

**Dr. Francisco Gutiérrez Rodríguez**

El Cerrillo, Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 16 de octubre de 2023.

## INDICE

---

### Contenido

RESUMEN .....	7
ABSTRAC .....	8
AGRADECIMIENTOS .....	9
I. INTRODUCCION.....	11
II. REVISION DE LITERATURA .....	17
2.1 Origen del café .....	17
2.2 Descripción botánica .....	18
2.2.1 Características generales .....	19
2.2.2 Altura y Hábitat .....	19
2.3 Especies Principales .....	20
2.4 Fenología y desarrollo del café .....	20
2.5 Importancia del cultivo .....	21
2.6 Limitantes para el cultivo de café .....	22
2.6.1 Plagas y Enfermedades del Café.....	23
2.7.1 Clasificación taxonómica de <i>Hemileia vastatrix</i> .....	25
2.7.2 Hospedantes y su distribución nacional .....	25
2.7.3 Ciclo biológico de la roya del café.....	25
2.7.4 Importancia económica.....	27
2.7.5 Síntomas y Signos .....	28
2.7.6 Daños .....	29

2.7.7	Manejo y control.....	30
2.8	Estadística espacial.....	31
2.8.1	Geoestadística .....	32
2.8.2	Fases de un Estudio Geoestadístico .....	33
2.8.3	Análisis exploratorio .....	33
2.8.4	Estimación del Semivariograma Experimental .....	33
2.8.5	Estimación de los parámetros del modelo del semivariograma .....	35
2.8.6	Kriging.....	36
2.8.7	Proceso de validación cruzada .....	37
2.8.8	Nivel de dependencia espacial .....	38
2.8.9	Elaboración de mapas.....	39
III.	JUSTIFICACIÓN .....	40
IV.	HIPÓTESIS .....	¡Error! Marcador no definido.
V.	OBJETIVOS .....	42
VI.	MATERIALES Y METODOS .....	43
6.1	Descripción del área de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
6.2	Trabajo de gabinete.....	43
6.3	Diseño del experimento. ....	43
6.4	Infestación .....	44
6.5	Análisis e interpretación de los datos.....	44
VII.	RESULTADOS.....	1
VIII.	DISCUSION GENERAL .....	54
IX.	CONCLUSIONES.....	60
X.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	62

**ANEXOS ..... 68**

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Morfología del fruto de Coffea.....	11
<b>Figura 2.</b> Fenología del cultivo del café durante el ciclo 2017 en el Estado de México .....	12
<b>Figura 3.</b> Ciclo de vida (patogénesis) de la roya del cafeto ( <i>H. vastatrix</i> ).....	16
<b>Figura 4.</b> Escala para evaluar severidad de roya en hoja. Créditos: DGSV-Sinavef- Lanref. ....	20
<b>Figura 5.</b> A) Síntomas en el envés de la hoja y b) Síntomas en el haz.....	20
<b>Figura 4.</b> Modelos teóricos del semivariograma .....	20

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Clasificación taxonómica general de <i>Hemileia vastatrix</i> .....	14
<b>Cuadro 2.</b> Parámetros de semivariogramas, semivariogramas y mapas de infestación de Temascaltepec.....	99
<b>Cuadro 3.</b> Superficie Infestada de Temascaltepec.....	134
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros de semivariogramas, semivariogramas y mapas de infestación de Amatepec .....	135
<b>Cuadro 5.</b> Superficie Infestada de Amatepec .....	168
<b>Cuadro 6.</b> Parámetros de semivariogramas, semivariogramas y mapas de infestación de Sultepec.....	170
<b>Cuadro 7.</b> Superficie Infestada de Sultepec.....	204
<b>Cuadro 8.</b> Ahorro económico y ambiental Temascaltepec.....	206
<b>Cuadro 9.</b> Ahorro económico Amatepec .....	207
<b>Cuadro 10.</b> Ahorro económico Sultepec .....	209

## RESUMEN

Uno de los problemas fitosanitarios más comunes en los países productores de café es la roya, la cual es ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, es una enfermedad muy agresiva que ataca a las hojas de los cafetos de la mayoría de las variedades comerciales pertenecientes a *Coffea arabica* que se cultivan en la mayor parte de las regiones cafetaleras de nuestro país. La roya provoca defoliaciones, puede presentar una reducción en el rendimiento causando pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México. Para poder focalizar las medidas de control, resulta importante conocer la distribución espacial y la dinámica que siguen las enfermedades como la roya del café. La aplicación de métodos geoestadísticos como el SADIE y la estadística espacial facilita ésta labor. Entendiendo como SADIE a una herramienta que permite el análisis de datos ubicados en el espacio en una o dos dimensiones basada en índices de distancia y a la geoestadística como una rama de la estadística que se centra en el análisis de datos espaciales y la modelización de fenómenos tomando en cuenta su ubicación geográfica.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue “Determinar el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en tres municipios productores de café en el Estado de México.” Los mapas elaborados muestran la presencia de centros de agregación, y una distribución ajustada a modelos de tipo esférico, exponencial y gaussiano.

**Palabras clave:** krigado ordinario, agregación, café, Roya

## **ABSTRAC**

One of the most common phytosanitary problems in coffee-producing countries is rust, which is caused by the fungus *Hemileia vastatrix*. It is a very aggressive disease that attacks the leaves of coffee trees of most commercial varieties belonging to *Coffea arabica* that are grown in most of the coffee-growing regions of our country. Rust causes defoliation, it can present a reduction in yield, causing significant economic losses for the productive sector of the State of Mexico. In order to focus control measures, it is important to know the spatial distribution and dynamics of diseases such as coffee rust. The application of geostatistical methods such as SADIE and spatial statistics facilitates this work. Understanding SADIE as a tool that allows the analysis of data located in space in one or two dimensions based on distance indices and geostatistics as a branch of statistics that focuses on the analysis of spatial data and the modeling of phenomena taking take into account your geographical location. For this reason, the objective of this study was “To determine the spatial behavior of coffee rust (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) populations in three coffee-producing municipalities in the State of Mexico.” The maps prepared show the presence of aggregation centers, and a distribution adjusted to spherical, exponential and Gaussian models.

**Keywords:** ordinary kriging, aggregation, coffee, Rust

## 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).

Al respecto, en sintonía con las tendencias actuales de consumo, la presencia de cafés especiales está generando una demanda creciente que se refleja en diversas opciones de comercialización. El mercado de los cafés especiales está estrechamente vinculado a las preferencias de los consumidores, quienes muestran un interés genuino en explorar nuevos productos y experiencias relacionadas con el café. En la categoría de cafés sostenibles se engloban aquellos que incorporan consideraciones ambientales en su producción, como el cultivo bajo sombra o amigable con las aves, la adhesión a prácticas de cultivo orgánico, la promoción del comercio justo y la garantía de la calidad excepcional del grano. Estos factores demuestran cómo el café no solo es una bebida cotidiana, sino que también puede ser una herramienta para promover la responsabilidad social y ambiental en la industria cafetera (García S., B. 2005).

La cafecultura mundial ha estado inmersa en dos crisis (1989-1998 y 1998-2004), ocasionadas por la sobreproducción que provocó la acumulación de reservas de café, además del deterioro de la calidad del grano y la bebida. En la actualidad los precios han mejorado ligeramente, sin embargo la crisis se modifica con las variaciones entre lo que se produce y lo que se compra a nivel mundial (Escamilla, 2005).

En México, junto con el exceso de producción de café, se han impuesto sanciones injustas a los granos por parte de ciertos compradores y empresas multinacionales, que calculan en la

premisa de que el café mexicano carece de calidad. No obstante, investigaciones recientes han evidenciado que en México existen regiones que producen cafés de alto nivel, gracias a factores como la altitud o elevación de las plantaciones (medida en metros sobre el nivel del mar), la presencia de variedades de café tradicionales, prácticas de cultivo bajo sombra diversificada y un enfoque en la recolección de café de origen familiar (Pérez, 2009).

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* Echandi) y mancha de hierro (*Mycosphaerella coffeicola* Cooke J. A Stevens y Wellman) (SENASICA, 2023).

En la actualidad como consecuencia del cambio climático ha habido un incremento de estas plagas y enfermedades que repercuten en la producción y calidad del café, siendo la roya del café el principal problema fitosanitario (MyCoffeeBox.com, 2015 y APS, 2011), esta enfermedad es causada por el hongo *Hemileia vastatrix* y se identificó por primera vez en México en 1981 en la región cafetalera del Soconusco en Tapachula, Chiapas, en este tiempo no hubo daños en la producción debido a que el clima era más estable y a las campañas de prevención que mantuvieron las plantaciones en buen estado (Castillo, 2013). Sin embargo, entre 2010 y 2012 se registraron brotes atípicos del hongo *Hemileia vastatrix* en Centroamérica, principalmente en Guatemala, El Salvador y Nicaragua, ocasionando pérdidas de hasta el 30% en el rendimiento del café (Cristancho et al., 2012).

A diferencia de 1981, en 2012, las condiciones de las huertas de café en México eran desfavorables debido a un mal manejo, abandono parcial o total de las huertas, disminución en la superficie sembrada y la producción de café, como consecuencia de las crisis que ocasiono la baja en los precios del café en el mercado mundial (Aguilar, 2013). En particular el periodo del 2004-2016 mostró una notable desarticulación del Sistema Productivo Café en México (SIAP, 2020; SENASICA, 2018), en este periodo, la roya experimentó un aumento considerable especialmente en la región del Soconusco Chiapas, debido al cambio climático asociado al fenómeno del niño, encontrando huertas avejentadas y falta de manejo agronómico, estas condiciones fitosanitarias similares se repetían en otros países de Centro y Sudamérica, sumando factores como condiciones climáticas atípicas, manejo agronómico deficiente y falta de sistemas de monitoreo y control preventivo, como

respuesta en México, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) en 2013 implementó un programa de vigilancia epidemiológica en los estados de Chiapas, Guerrero y Veracruz (SENASICA, 2018).

En el estado de México, la roya se detectó en 2014, las condiciones de los cafetales eran las idóneas para el desarrollo de la enfermedad: huertas avejentadas y con poco o nulo manejo.

En el 2016 el Comité de Sanidad Vegetal del estado de México (CESAVEM) incorporó el programa de vigilancia en el cultivo del café, con acciones como: monitoreo y control de focos de infestación del hongo.

Como resultado de estas acciones según la Plataforma Epidemiológica del SENASICA, la presencia de *Hemileia vastatrix* ha variado, con una tendencia a la baja entre 2016 y 2018, y de 2018 a 2022 ha habido un aumento en severidad.

Basado en lo anterior, resulta importante la continuidad de los monitores que permitan conocer el comportamiento en severidad y distribución espacial del hongo para desarrollar programas de manejo eficiente y ecológico acorde a las necesidades reales de las huertas de café. Dentro de este marco, resulta esencial emplear técnicas de estadística espacial con el fin de adquirir datos precisos y orientar acciones de control y gestión más específicas (MyCoffeeBox.com, 2015).

El análisis geoestadístico nos ayuda a conocer de manera más exacta el comportamiento espacial de las enfermedades dentro de un área de cultivo, además permite elaborar mapas que muestran de forma gráfica la distribución y conocer su porcentaje de infección a nivel parcela y, realizar aplicaciones en áreas específicas del cultivo. (Isaaks y Srivastava, 1988; Rossi et al., 1992; Sciarretta et al., 2001; Blom y Fleischer, 2001 y Ramírez et al., 2002).

En el marco de esta situación, el SADIE también es una técnica diseñada para identificar el

modelo espacial en datos bidimensionales, proporcionando un índice que indica el grado de agregación, junto con una prueba para evaluar la desviación de la aleatoriedad basada en un algoritmo de atracción. SADIE posibilita la descripción del modelo espacial de una variable específica en la región bajo estudio, identificando principalmente modelos: agregada o aleatorio. Además, permite calcular la contribución de cada punto de muestreo al patrón espacial general (Perry, 1995).

En última instancia, el propósito de este estudio es analizar el patrón espacial de las poblaciones de la roya del café en res municipios productores del Estado de México a través de la geoestadística y SADIE, partiendo de la premisa de que dichas poblaciones se distribuyen en agregados y se dispersan en toda la región de estudio.

## II. REVISION DE LITERATURA

---

### 2.1 Origen del café

El café, esa bebida aromática y estimulante que se ha convertido en una parte esencial de la vida diaria para millones de personas en todo el mundo, tiene un fascinante origen que se remonta a leyendas africanas y ha tejido una historia rica y compleja a lo largo de los siglos. La historia del café comienza en las regiones tropicales 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 morder los frutos rojos de un arbusto. Intrigado, Kaldi probó los granos él mismo 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. En el siglo XV, los cafés comenzaron a surgir en ciudades como Damasco y Estambul, convirtiéndose en centros de actividad social e intelectual. A medida que el café se difundió por Persia, Egipto y finalmente llegó a Europa, se enfrentó a episodios de controversia.

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, el café se convirtió en un pilar económico en 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 y productos de otras partes del mundo. Las primeras plantas de café en México fueron plantadas en la región de Veracruz, una zona propicia para el cultivo del café. Convirtiendo

al estado en la primera región cafetalera del país, y a lo largo de los años, otras áreas con condiciones climáticas adecuadas, como Chiapas y Oaxaca, también se sumaron al cultivo de café. Al paso del tiempo México se consolidó como un productor importante de café en América Latina, y el grano mexicano se hizo apreciado por su sabor y calidad. Hoy en día, México es conocido por sus diversos perfiles de café, que van desde los cafés de altura cultivados en las laderas de las montañas hasta los granos cultivados en las fértiles tierras de Chiapas.

## 2.2 Descripción botánica

REINO	:	Plantae
DIVISIÓN	:	Magnoliophyta
CLASE	:	Magnoliopsida
ORDEN	:	Gentianales
FAMILIA	:	Rubiaceae
SUBFAMILIA	:	Ixoroideae
TRIBU	:	Coffeae
GENERO	:	Coffe (Alvarado & Rojas, 1994)

Los cafetos son arbustos de las regiones tropicales del género *Coffea*, de la familia de los rubiáceos con aproximadamente 100 especies. Tienen hojas persistentes y opuestas y bajo un poco de sombra crecen mejor. Necesitan temperaturas suaves. Comúnmente se cultivan en las regiones tropicales y ecuatoriales, donde siempre es primavera o verano. La época de floración es al comienzo de la temporada de lluvias; sus flores son blancas y perfumadas. Después de ocho o nueve meses aparecen los frutos, que son bayas rojas, brillantes y carnosas que asemejan a las cerezas. Con cada lluvia los cafetos florecen, razón por la cual se pueden encontrar flores, frutos verdes y frutos maduros simultáneamente, por lo que se debe tener mucho cuidado al recoger los frutos (León, 1987).

### 2.2.1 Características generales

**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 1. Morfología de fruto de *Coffea*, tomado y modificado de (Vanegas, 2016).

### 2.2.2 Altura y Hábitat

El café es un arbusto o pequeño árbol que puede alcanzar alturas de 2 a 5 metros, dependiendo de la especie y las condiciones de crecimiento. Prefiere climas tropicales y subtropicales, con temperaturas moderadas y lluvias bien distribuidas. Se cultiva mejor en altitudes entre 600 y 1,600 metros sobre el nivel del mar.

### **2.3 Especies Principales**

*Coffea arabica* (Arábica): Es la especie más cultivada y apreciada por su sabor suave y complejo. Se cultiva en altitudes más elevadas.

*Coffea canephora* (Robusta): Tiene un sabor más fuerte y contiene más cafeína. Se cultiva a altitudes más bajas y es más resistente a enfermedades.

### **2.4 Fenología y desarrollo del café**

La fenología y el desarrollo del café, desde la floración hasta la cosecha, son procesos cruciales que influyen en la calidad y cantidad del producto final. Es importante tener en cuenta que el ciclo de vida del café varía según la especie (arábica o robusta) y las condiciones climáticas y geográficas del lugar de cultivo. Además, el manejo agronómico, la altitud y la temperatura también afectan significativamente el desarrollo del café y sus características finales.

#### **Brote y Floración:**

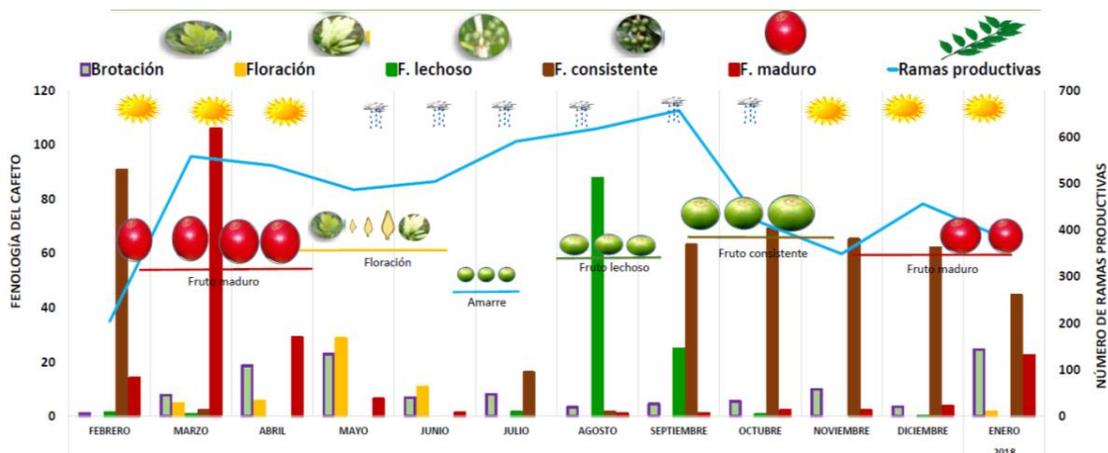
En la fase de brote, las yemas se desarrollan en los nudos de las ramas, la floración es un período crítico que ocurre unas semanas después del brote. Las flores blancas y fragantes aparecen en las axilas de las hojas.

#### **Desarrollo del Fruto:**

Después de la polinización, el ovario de la flor se desarrolla en un fruto, conocido como drupa. El fruto del café toma alrededor de 6-9 meses desde la floración hasta la madurez, pasando por diferentes estadios como son fruto lechoso, fruto consistente y fruto maduro, en este último el color del fruto cambia de verde a rojo o amarillo, dependiendo de la especie.

#### **Cosecha:**

La cosecha es una fase crucial y laboriosa. Los agricultores recolectan los frutos maduros, a menudo de forma selectiva para garantizar una calidad consistente (CENICAFE, 2014).



**Figura 2. Fenología del cultivo del café durante el ciclo 2017, en el Estado de México (SENASICA, 2018).**

## 2.5 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 (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 (FAO, 2022). Hay 15 estados productores de café, siendo Chiapas es el principal estado productor seguido por Veracruz y Puebla (SIAP, 2022).

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.

Además México tiene relevancia por producir café de alta calidad con una diversidad de perfiles de sabor. Desde los cafés 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.

## **2.6 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).

### **2.6.1 Plagas y Enfermedades del Café**

Una plaga agrícola se refiere a la proliferación y propagación no controlada de organismos que causan daño a los cultivos y afectan la producción agrícola. Estos organismos, llamados plagas, pueden incluir insectos, ácaros, nematodos, hongos, bacterias, virus y malezas. Su presencia excesiva puede resultar en pérdidas significativas de rendimiento, calidad y valor de los cultivos (Helmuth, 2000).

Estos problemas fitosanitarios son resultado de desequilibrios en el ecológicos 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) su manejo debe tratarse con técnicas integradas con base en monitoreos para evaluar y decidir el tipo de control o prevención a utilizar (Estrada León, s/f).

La roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) es uno de los problemas fitosanitarios más comunes en los países productores de café, ocasiona defoliaciones y afecta el rendimiento del grano. La broca del café (*Hypothenemus hampei*) es el segundo problema fitosanitario de importancia económica ocasionando la disminución del rendimiento y calidad del grano (Amecafé, 2013). Otras plagas y enfermedades que se presentan en el cultivo son: 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 ojo de gallo (*Mycena citricolor* Berkeley & Curtis), antracnosis (*Colletotrichum kahawae* J. M. Waller & Bridge), requemo (*Phoma costarricensis* Echandi) y mancha de hierro (*Mycosphaerella coffeicola* Cooke J. A. Stevens y Wellman) (SENASICA, 2023).

A nivel nacional el daño varía dependiendo de las condiciones de la huerta, para el estado de México, la roya se detectó oficialmente en el 2016 por el SENASICA, y la broca se reportó en 2016 solo para el municipio de Malinalco, en Sultepec en el 2021 y Amatepec en el 2022.

### **2.7 Roya del café hoja (*Hemileia vastatrix*)**

La principal enfermedad de este cultivo es la roya, ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, se detectó en el estado de México en el año 2016 a través del programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) siendo el año 2016 y 2017 los de mayor severidad, para el año 2022 y 2023 la severidad ha aumentado en algunas zonas del estado debido en gran parte a las condiciones climáticas cambiantes como los causados por fenómenos meteorológicos como el niño. (SENASICA 2016).

### 2.7.1 Clasificación taxonómica de *Hemileia vastatrix*

REINO	:	Hongos (Hongos)
DIVISIÓN	:	Basidiomycota (Basidiomicetos)
CLASE	:	Pucciniomicetos
ORDEN	:	Pucciniales
FAMILIA	:	Pucciniáceas
GÉNERO	:	Hemileia
ESPECIE	:	<i>Hemileia vastatrix</i>

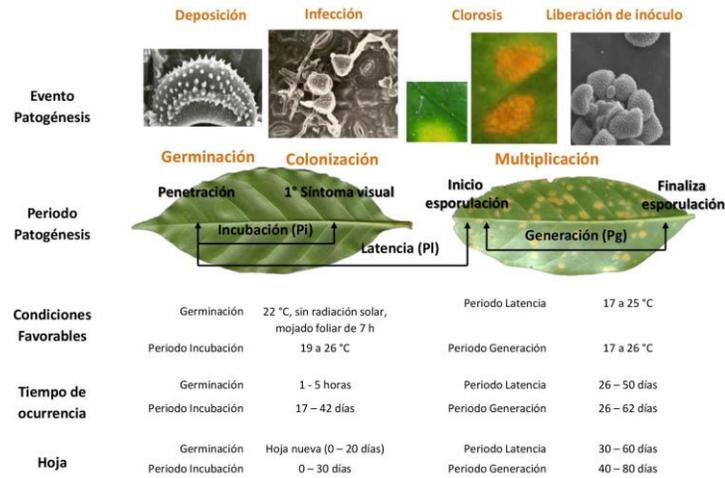
### 2.7.2 Hospedantes y su distribución nacional

La roya del café es parasito obligado de las plantas de café, lo que quiere decir que necesita de hojas vivas para poder vivir. En México, el cultivo del café se distribuye en 15 estados de la república mexicana (Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero, Hidalgo, Nayarit, San Luis Potosí, Jalisco, Colima, Tabasco, México, Querétaro, Morelos y Michoacán), cubriendo una superficie de 737, 376 ha, con un valor de la producción de 5, 593 millones de pesos (SIAP, 2016) en todas se encuentra la roya del café.

### 2.7.3 Ciclo biológico de la roya del café

La roya representa la amenaza más devastadora para los cafetos y tiene una significativa relevancia económica global, ya que induce la caída prematura de las hojas, resultando en la disminución de la capacidad fotosintética y el debilitamiento de los árboles afectados. En casos de infecciones graves, puede llegar a provocar la regresión de ramas e incluso la muerte completa de los cafetos (APS, 2011). Es causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, un hongo parásito obligado, esto significa que depende completamente de la planta de café para su supervivencia y reproducción. La lucha contra esta enfermedad a menudo implica de control y prevención, como el uso de variedades de café resistentes a la roya, prácticas

agrícolas adecuadas y en algunos casos, el uso de fungicidas.



**Figura 3. Ciclo de vida (patogénesis) de la roya del café (*H. vastatrix*). Crédito: Gabriela Calderón, 2012.**

**Formación de Esporas (Urediniosporas):** El ciclo comienza con el proceso infeccioso de la roya del café, con la liberación de esporas llamadas urediniosporas desde las lesiones en la parte inferior de las hojas infectadas. Estas esporas son dispersadas por el viento y el agua y son la forma principal de propagación durante la temporada de lluvias (Ribillas et al., 2011).

**Infección Primaria:** Las urediniosporas germinan y penetran en las células de las hojas del café. Este proceso da inicio a la infección primaria. Para que este proceso suceda la esporulación precisa de la existencia de agua libre durante un mínimo de 6 horas, temperaturas en el rango de 21 a 25 °C y la ausencia de luz. En estas condiciones, la generación del apresorio demanda un lapso de 5,3 a 8,5 horas. Después de que el hongo germina, este penetra las hojas a través de los estomas situadas en el envés de las hojas maduras (Rayner, 1961).

La germinación puede verse afectada por la luz y la evaporación del agua en las hojas, ya que estos factores influyen en el desarrollo de los tubos germinativos.

### **Desarrollo de las Hifas Parasitarias:**

Una vez dentro de las células de la hoja, las urediniosporas germinan, el hongo forma unas estructuras conocidas como haustorios, que establecen contacto con las células de la planta y extraen nutrientes para su desarrollo.

**Formación de Pústulas (Uredias):** Alrededor de treinta días después de la colonización, el hongo alcanza la madurez suficiente se forman pústulas en la parte inferior de las hojas infectadas, son estructuras llamadas soros, encargadas de generar nuevas urediniósporas o el característico polvo amarillo (Rivillas et al., 2011).

**Ciclo repetido:** Las esporas liberadas de las pústulas son llevadas por el viento o el agua a otras plantas de café, reiniciando el ciclo al infectar nuevas hojas.

El intervalo desde la infección hasta la producción de esporas se denomina período de latencia (Rivillas et al., 2011).

**Esporas Sexuales (Teliosporas):** En condiciones específicas, especialmente hacia el final de la temporada de crecimiento, el hongo puede producir esporas sexuales llamadas teliosporas. Estas teliosporas no son tan comunes en la propagación de la enfermedad, pero juegan un papel en la reproducción sexual del hongo (Castro et al., 2009).

#### **2.7.4 Importancia económica**

La roya del café representa una amenaza significativa para la sostenibilidad y la viabilidad económica de la industria cafetera, tanto a nivel de los productores individuales como a nivel nacional e internacional. Su manejo y control son cruciales para mantener la salud de las plantaciones y la estabilidad económica de las comunidades dependientes del café (Thomas, 2019).

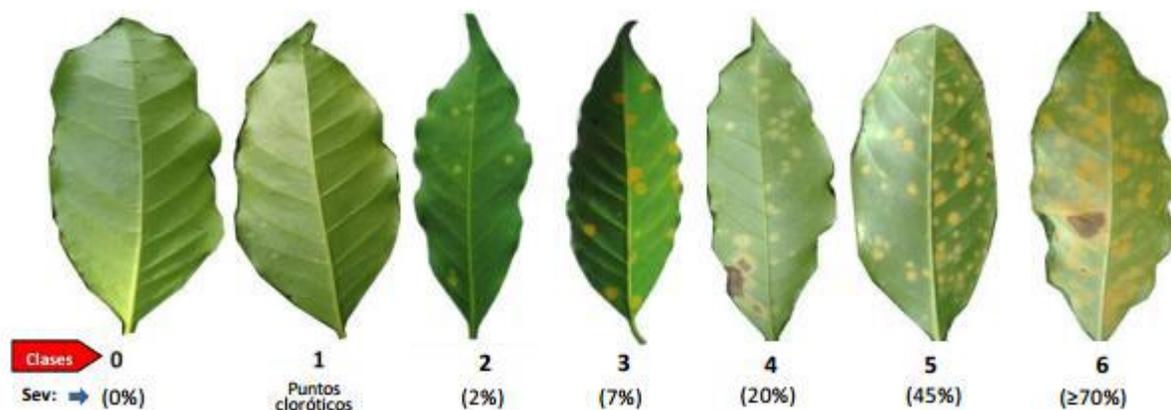
## 2.7.5 Síntomas y Signos

### **Síntomas:**

- **Manchas en las hojas:** Uno de los síntomas más evidentes son las manchas en las hojas, que suelen tener un color amarillo a naranja en las etapas tempranas.
- **Caída prematura de hojas:** La planta afectada tiende a perder sus hojas prematuramente, lo que debilita la planta y afecta su capacidad para realizar la fotosíntesis.
- **Deformación de hojas:** Las hojas afectadas pueden mostrar deformidades, como rizos o distorsiones en la forma natural de la hoja.
- **Reducida capacidad fotosintética:** La presencia de la roya afecta la capacidad de la planta para realizar la fotosíntesis, lo que puede resultar en una disminución del rendimiento y la calidad de los granos de café.

### **Signos:**

- **Pústulas en las hojas:** Son las estructuras características que contienen las esporas del hongo. Estas pústulas tienen un color anaranjado a rojizo y son visibles en la parte inferior de las hojas.
- **Esporas:** La presencia de esporas, conocidas como urediniósporas, es un signo distintivo. Estas esporas son liberadas de las pústulas y contribuyen a la propagación de la enfermedad.
- **Decoloración de las hojas:** Además de las manchas, las hojas afectadas pueden mostrar decoloración general y debilitamiento.

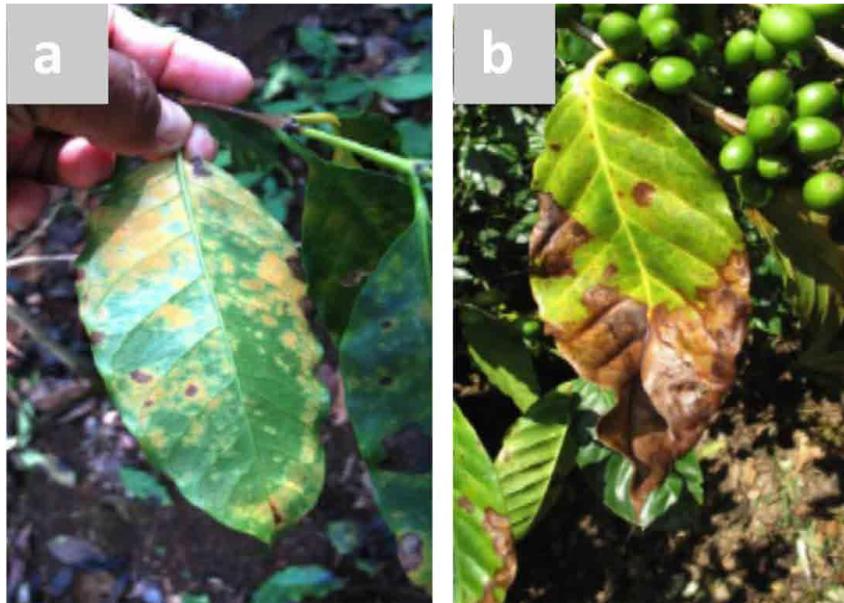


**Figura 4. Escala para evaluar severidad de roya en hoja. Créditos: DGSV-Sinavef-Lanref.**

### 2.7.6 Daños

Daños de gran magnitud, superiores al 60 %, resultan en la pérdida de hojas. Cuando la infección se produce en las fases iniciales, puede ocasionar una disminución en la producción. Sin embargo, si la infección ocurre en etapas más avanzadas, los efectos se manifestarán en los niveles de fructificación en el ciclo de cultivo subsiguiente.

La manifestación inicial de los síntomas se caracteriza por manchas pequeñas de 1-3 mm, translúcidas y de tono amarillo claro. Con el tiempo, estas lesiones aumentan de tamaño y pueden fusionarse con otras para formar extensas áreas con un polvo amarillo profuso (compuesto por esporas) en el envés de las hojas, mientras que en el haz se observan como manchas amarillas. Aunque las lesiones más antiguas pueden necrosarse, la producción de esporas puede continuar en el margen de la lesión (Castro et al., 2009).



**Figura 5. A) Síntomas en el envés de la hoja y b) Síntomas en el haz. Créditos: SINAVEF, 2012.**

### **2.7.7 Manejo y control**

El manejo y control de la roya del café, causado por el hongo *Hemileia vastatrix*, generalmente involucran estrategias integradas que combinan medidas culturales, agronómicas y, en algunos casos, el uso de productos químicos.

**Control genético:** Utilizar variedades de café que sean conocidas por ser resistentes a la roya es una medida preventiva eficaz. Se ha reportado que la variedad “Catimor” presenta resistencia a la roya del café, la cual responde bajo alta presión de inóculo manteniendo un nivel de infección menor al 15% (Moreno y Alvarado, 2000).

**Buena Práctica Agrícola:** Mantener una buena gestión agrícola es esencial. Esto incluye prácticas como la poda para el manejo adecuado de la sombra adecuada con el fin de evitar rangos de temperatura favorables y acumulación de humedad relativa para el desarrollo de la plaga, y además inducirá el incremento de área foliar, y programa nutricional de las plantas (Rivillas et al., 2011). Es importante tener densidades de plantación adecuadas para

impedir la proliferación de múltiples chupones que induzcan autosombreo (Rivillas et al., 2011).

**Monitoreo Constante:** Establecer un programa regular de monitoreo para detectar signos y síntomas de la roya de manera temprana. Esto permite una respuesta rápida y eficaz.

**Manejo de Residuos de Cultivo:** Eliminar y destruir las hojas caídas afectadas por la roya ayuda a reducir la fuente de inóculos del hongo.

**Fungicidas:** En casos de infecciones severas, el uso de fungicidas puede ser necesario. Es importante utilizar productos autorizados y seguir las recomendaciones específicas de aplicación.

**Rotación de Cultivos:** La rotación de cultivos puede ayudar a interrumpir el ciclo de vida del hongo y reducir la presión de enfermedades en áreas específicas.

## **2.8 Estadística espacial**

La estadística espacial es una rama de la estadística que se centra en el análisis de datos geoespaciales, es decir, datos que están vinculados a ubicaciones geográficas específicas. Combina técnicas estadísticas con información geográfica para explorar patrones espaciales, relaciones y variaciones en los datos. Ramírez Dávila et al., 2011 define a la estadística espacial como un análisis que utiliza herramientas estadísticas y que tiene una dimensión espacial, esto refiriéndose a la dimensión propia, al objeto de análisis o a las variables que describen el objeto.

Algunos conceptos claves asociados con la estadística espacial incluyen: La dependencia espacial o auto correlación espacial que examina la relación entre valores de una variable en una ubicación y los valores en ubicaciones cercanas. Puede indicar si hay patrones espaciales, como la tendencia de valores similares a agruparse. Estas técnicas de análisis espacial son relevantes en la Agronomía esto debido a que los métodos de la estadística clásica hacen estudios de distribuciones de organismos que se basa en el uso de

distribuciones estadísticas e índices de dispersión y no llegan a presentar congruencia en la exacta localización espacial de la muestra como si lo hace la geo estadística. La estadística clásica exhibe resultados no deseados, como la incapacidad para distinguir patrones espaciales diversos. Las descripciones de estos patrones están fuertemente influenciadas por el tamaño de las unidades de muestreo y la relación entre los medios y la varianza, y no toman en cuenta toda la información espacial disponible. Este inconveniente ha llevado al uso de diversas ramas de la estadística espacial, siendo una de las más frecuentemente empleadas la Geo estadística. Esta rama ofrece la ventaja de caracterizar la distribución espacial en múltiples escalas y direcciones, además de presentar independencia en la relación entre los medios y la varianza (Maldonado Zamora et al.,2017).

### **2.8.1 Geoestadística**

La Geoestadística es una rama de la estadística espacial que se ocupa del análisis de datos que tienen un componente espacial que incluye métodos y técnicas para analizar y predecir valores de una variable distribuida de manera continua en el espacio (Moral García, 2004).

En el año 2011, Ramírez Dávila y colaboradores señalaron que la Geoestadística es identificada como una disciplina dentro de la estadística espacial. Su característica distintiva reside en el reconocimiento previo de la evaluación espacial entre los datos muestreados, indicando que existe una interdependencia en el espacio de donde se obtienen. Asimismo, se destaca la observación de que las variables espaciales exhiben una estructura específica de continuidad, lo que ha llevado al desarrollo de herramientas matemáticas para el análisis de estas variables interrelacionadas, denominadas variables regionalizadas. La Geoestadística proporciona un marco óptimo para la selección de puntos de muestreo con el fin de minimizar la incertidumbre en las estimaciones. Facilita la evaluación del error asociado a las estimaciones y la determinación de coeficientes ponderadores para los

métodos de extrapolación. Esta disciplina también brinda una forma de caracterizar la continuidad espacial, una característica distintiva fundamental de muchos fenómenos naturales. Además, ofrece adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para aprovechar esta continuidad, según lo señalado por Maldonado Zamora y colaboradores en 2017.

### **2.8.2 Fases de un Estudio Geoestadístico**

La geoestadística engloba un conjunto de herramientas y técnicas diseñadas para analizar y predecir los valores de una variable distribuida de manera continua en el espacio o en el tiempo. Cualquier trabajo geoestadístico debe seguir etapas fundamentales:

- Análisis Exploratorio de los datos.
- Estimación del semivariograma.
- Estimación de los parámetros del modelo del semivariograma
- Krigeado: Interpolación o Estimación Espacial.
- Validación del Modelo Geoestadístico (Ramírez, 2012).

### **2.8.3 Análisis exploratorio**

En esta primera fase se realiza un análisis exploratorio de los datos para comprobar que cumplan con los requisitos o supuestos necesarios para utilizar la estadística espacial: Normalidad de los datos, heterogeneidad de la variable y más de 100 unidades muestréales.

### **2.8.4 Estimación del Semivariograma Experimental**

Una vez que se han obtenido las bases de datos, la siguiente fase implica la creación del semivariograma experimental y su ajuste a modelos teóricos. Este proceso permite explicar la naturaleza del fenómeno bajo estudio. Estos modelos teóricos pueden ser Modelo Esférico, el Modelo Exponencial, el Modelo Gaussiano, el Modelo Logarítmico, el Modelo

Efecto Pepita Puro, el Modelo Efecto Agujero y el Modelo Monómico (Trematerra y Sciarretta en 2002).

**Modelo Esférico:** Es indicativo para fenómenos continuos pero no derivables, alcanza la meseta a una distancia finita. Es de los más empleados cuando se presenta una distribución espacial en agregados.

Este comportamiento es característico de fenómenos que son continuos, o que tienen un conjunto a lo sumo numerable de discontinuidades, aunque no son derivables. En otras palabras, la representación de estos fenómenos puede mostrar cambios bruscos o silenciosos. Se observan fluctuaciones de pequeña amplitud pero alta frecuencia, así como fluctuaciones de amplitud grande pero baja frecuencia. En cuanto a estas últimas, es importante destacar que las amplitudes máximas están vinculadas al valor de la meseta, o más precisamente, a su raíz cuadrada. Del mismo modo, el período máximo (inverso de la frecuencia) será tanto mayor como más extenso sea el alcance del fenómeno.

**Modelo Gaussiano:** Además, este modelo alcanza su meseta asintóticamente y se utiliza especialmente cuando la distribución espacial se presenta en agregados. Se aplica para representar fenómenos que exhiben características "suaves", es decir, aquellos que son continuos en todos los puntos y derivables en la mayoría de ellos.

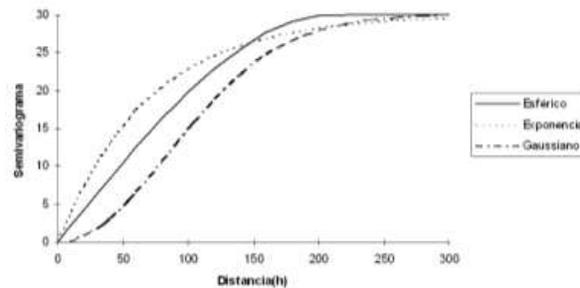
**Modelo Exponencial:** es representativo de fenómenos continuos, alcanza su meseta de forma asintótica. Este modelo es utilizado en casos de una distribución espacial en agregados. También, al igual que el modelo esférico, el semivariograma exponencial es representativo de fenómenos continuos salvo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

**Modelo Logarítmico:** este variograma no está definido en el origen y no tiene meseta.

**Modelo Efecto Pepita Puro:** es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial, o sea puramente aleatorio.

**Modelo Efecto Agujero:** es utilizado para fenómenos con componentes periódicas.

**Modelo Monómico:** estos variogramas no tienen meseta y tienden al infinito. Se utilizan para representar fenómenos no estacionarios (Gallardo A. 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).



**Figura 4. Modelos teóricos del semivariograma.**

### **2.8.5 Estimación de los parámetros del modelo del semivariograma**

El Efecto Pepita (también conocido como Nugget): Aunque por definición el semivariograma es nulo en el origen, en la práctica, las funciones obtenidas pueden mostrar una discontinuidad en el origen. A esta discontinuidad se le denomina efecto de pepita, o en inglés, Nugget effect. Puede determinarse trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extendiéndola hasta que intersecte el eje Y. Si esta intersección se encuentra por debajo de cero, el valor asumido para este efecto es cero, ya que valores negativos de  $\gamma(0)$  Carecen de significado y son poco comunes. El efecto pepita se representa como  $C_0$ . La Meseta (Sill): Es el valor de  $\gamma(h)$  para el cual con el aumento de  $h$  su valor permanece constante, se representa como  $(CT = C + C_0)$  y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea

con la ordenada.

El rango se refiere a la distancia  $h$ , en la cual las variables  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$  se vuelven independientes. Se conoce como alcance y se representa como  $(a)$ , indicando las distancias a las cuales los valores de la variable dejan de estar correlacionados o, en otras palabras, la distancia en la cual el semivariograma alcanza su meseta. El alcance siempre tiene un valor positivo y se puede determinar a través de la intersección de las líneas descritas en los puntos anteriores. La posición de este punto en la abscisa representa una fracción del propio alcance, la cual se describirá más detalladamente en la explicación de los modelos teóricos posteriores.

### **2.8.6 Krigado**

El término "krigado" se refiere al proceso de estimar valores desconocidos en ubicaciones no muestreadas utilizando métodos de interpolación geoespacial, específicamente el método de krigado, implica la utilización de información conocida de puntos de muestreo cercanos para predecir o valores interpolares en ubicaciones donde no se han realizado mediciones. Este enfoque se basa en la idea de que los valores en lugares cercanos en el espacio están más correlacionados que aquellos más distantes. El método de krigado utiliza la información del semivariograma, que describe la variabilidad espacial de la variable de interés, para realizar estas estimaciones ponderadas.

Las características fundamentales que distinguen al krigado como un método de estimación superior a enfoques tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia o la triangulación, son las siguientes:

- Mientras que los métodos convencionales emplean el concepto euclidiano de distancia para calcular los pesos aplicados a cada dato muestral, el krigado considera tanto la distancia como la geometría de la ubicación de las muestras.

- El kriging minimiza la varianza del error esperado, que es la diferencia entre el valor real y el estimado. Dado que el valor real en un punto no muestreado es desconocido, el kriging utiliza un modelo conceptual con una función aleatoria asociada a los valores reales.
- Los métodos geoestadísticos, como el kriging, exhiben una gran flexibilidad para la interpolación. Pueden estimar valores puntuales o en bloques, e incorporar información secundaria relacionada con la variable principal. Estos métodos generan superficies suaves y proporcionan estimaciones de la varianza en todos los puntos, una característica que otros métodos de interpolación no pueden ofrecer (Moral García, 2004).

Se mencionan dos tipos de kriging, sin embargo, existen otros tipos que son utilizados de acuerdo con la naturaleza de cada estudio.

- Kriging Simple: Se utiliza cuando la variable es estacionaria con media y covarianza conocidas.
- Kriging Ordinario: Se utiliza cuando la variable es estacionaria con covarianza conocida y media desconocida.

### **2.8.7 Proceso de validación cruzada**

La validación cruzada en estadística espacial es una técnica utilizada para evaluar la capacidad predictiva y la precisión de modelos espaciales, especialmente en el contexto de interpolación espacial. Esta técnica es esencial para determinar la eficacia de un modelo al predecir valores en ubicaciones no utilizadas durante la construcción del modelo, implica dividir el conjunto de datos espaciales en subconjuntos, generalmente mediante la eliminación de un punto de datos a la vez. Luego, se utiliza el modelo entrenado con el

conjunto restante de datos para predecir el valor en el punto excluido. Este procedimiento se repite para todos los puntos de datos en el conjunto, y se evalúa la precisión comparando las predicciones con los valores reales.

Con este procedimiento no paramétrico, se elimina el valor muestral y se emplea el método de interpolación geostatístico denominado krigado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restante valores muestrales, Los parámetros del modelo a validar (pepita, meseta y rango) se van modificando en un procedimiento de prueba y error hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados, las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación cruzada (Media de los errores de estimación (MEE), Error cuadrático medio (ECM), Error cuadrático medio adimensional (ECMA) (Gallardo A. 2006; Isaaks y Srivastava, 1989 y Hevesi et al., 1992). Además se debe cumplir que la varianza de los errores de estimación debe ser  $\leq$  que la varianza muestral (Samper y Carrera, 1996).

### **2.8.8 Nivel de dependencia espacial**

Cambardella y colaboradores (1994) destacan la necesidad de evaluar la relación entre los datos, enfatizando la importancia de determinar el grado de dependencia espacial. Este grado se calcula al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresar el resultado en porcentaje. Un valor inferior al 25% indica un alto nivel de dependencia espacial, mientras que un rango entre el 26% y el 75% sugiere un nivel moderado de dependencia espacial. Si el resultado es superior al 76%, se considera que el nivel de dependencia espacial es bajo.

### **2.8.9 Índice de distancia SADIE**

La herramienta SADIE es un instrumento diseñado para identificar el modelo espacial en datos bidimensionales, proporcionando un índice que indica el grado de agregación, junto con una prueba para evaluar la desviación de la aleatoriedad basada en un algoritmo de atracción. Este algoritmo incorpora un modelo biológico que simula la dispersión de individuos desde un origen, asignándole a cada uno un territorio dinámico. En 1995, su creador, Perry amplió el uso del índice de distancia para la regularidad ( $Ia$ ) con el fin de analizar la estructura espacial de las poblaciones de insectos. Además, introdujo dos diagramas de diagnóstico para facilitar la interpretación y un nuevo índice, el índice  $Ja$ , que estimaba el número de focos de agrupamiento en una población. SADIE posibilita la descripción del modelo espacial de una variable específica en la región bajo estudio, identificando principalmente modelos: agregada o aleatorio. Además, permite calcular la contribución de cada punto de muestreo al patrón espacial general (Perry, 1995).

### **2.8.10 Elaboración de mapas**

Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes se validan con el método geoestadístico denominado Krigeado Ordinario se procede a elaborar mapas de densidad poblaciones con software como Surfer 16.

### 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 comprender la distribución espacial de la enfermedad en los parcelas de café en el Estado de México que serán fundamentales para identificar zonas de infestación y facilitará la implementación de estrategias de control adecuadas. En este sentido es necesario conocer la distribución y técnicas de Estadística Espacial, como Geoestadística y SADIE cobran importancia.

Por lo que es de suma importancia entender la distribución espacial de *Hemileia vastatrix* 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 distribución espacial y densidad de esta roya se vuelve esencial. Esto 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**

---

Las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio.

## V. OBJETIVOS

---

### Objetivo General

- Determinar el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en tres municipios productores de café en el Estado de México.

### Objetivos Específicos

- Obtener la distribución espacial de *Hemileia vastatrix*, utilización de técnicas geoestadísticas y SADIE.
- Elaborar mapas de la distribución espacial de la población de roya (*Hemileia vastatrix*) mediante la técnica del Krigado.
- Determinar la existencia de estabilidad espacio-temporal de las poblaciones de la roya del café
- Determinar los ahorros económicos de las medidas de control químico para zonas específicas de infestación con relación a una aplicación uniforme

## **VI. MATERIALES Y METODOS**

---

### **6.1 Descripción del área de estudio**

El presente trabajo se realizó durante el periodo comprendido entre marzo y agosto del año 2020 en tres municipios del estado de México (Amatepec, Sultepec y Temascaltepec) de clima templado y una temperatura media de entre 21 y 23 °C (Cardoso, 1999).

### **6.2 Trabajo de gabinete**

El trabajo de gabinete consistió en revisión documental sobre manejo y fenología del cultivo de café, ciclo biológico de la roya del café.

Además de manuales y artículos científicos relacionados con estadística espacial y particularmente.

### **6.3 Diseño del experimento.**

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 higuera, 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 realizó la medición de factores climáticos (temperatura y humedad relativa) mediante un sensor climático Datta Loggers HOBO Pro V2 que se colocó un sensor en el estrato medio de un árbol de café situado en la parte media de la parcela (Senasica 2018), para identificar variaciones micro climáticas que pudieran explicar el comportamiento de *Hemileia vastatrix*.

#### **6.4 Infestación**

Durante dos años, de septiembre de 2020 a agosto de 2021, se realizaron muestreos cada catorce días en 12 hojas por estrato (bajo, medio y alto), 3 hojas por rama por punto cardinal (norte, sur, este y oeste) registrando datos de incidencia de roya usando la escala de severidad e incidencia del SENASICA para detectar presencia o ausencia.

#### **6.5 Análisis e interpretación de los datos**

Los datos de muestreo (georreferenciación y muestreo), fueron concentrados en bases de datos por fecha de muestreo para su análisis.

**Estadística clásica:** Con la finalidad de realizar una comparación de los resultados en el análisis de datos de muestreo de la estadística espacial con la estadística no espacial (clásica), se utilizaron los siguientes métodos generales de estadística clásica que sirven para establecer la distribución espacial de los organismos: Los índices que se usaron son los Índices de Dispersión (índice de dispersión y el Índice de Green), así como las distribuciones estadísticas (Binomial Negativa y Poisson).

## **Análisis Geoestadístico**

### **Análisis Exploratorio de Datos**

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para comprobar que cumplan con los requisitos o supuestos necesarios para utilizar la estadística espacial: Normalidad de los datos, heterogeneidad de la variable y más de 100 unidades muestréales.

La variable presento una base de heterogeneidad, se utilizaron 200 unidades muestréales por parcela y se corrobora la normalidad de los datos utilizando la prueba de Curtosis y el coeficiente de asimetría, cumpliendo así con las condiciones necesarias para trabajar con estadística espacial (Chilés y Delfiner, 1999. Fernández, 2003).

La auto correlación espacial se analizó mediante variogramas (semivariogramas). Partiendo de los datos de muestreo de roya (% de roya) más la ubicación precisa de la planta hospedera, se estimó de forma empírica el semivariograma subyacente y se calculó los parámetros del modelo del semivariograma (efecto pepita, meseta y rango) con el programa variowin, además se realizaron mapas de incidencia a partir de la técnica conocida como kriging con el programa surfer 16 (software para análisis de datos espaciales en 2D. Spring Verlag, Nueva York; USA.) y el WinGslib 2002 (Maldonado et al., 2017).

**Estimación del Semivariograma Experimental:** Para cada fecha de muestreo se realizó un semivariograma experimental, se estimó sobre la base de los datos referidos a la incidencia de roya con el programan variowin 2.2. El semivariograma experimental correspondiente a cada muestreo se realizó empleando empleó el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Análisis in 2D. Spring Verlag, New Cork, USA) y el WinGslib 2002.

**Estimación de los parámetros del modelo de Semivariograma:** Una vez estimado el correspondiente semivariograma experimental se ajustaron a semivariogramas usando el software Variowin 2.0, entendiéndose como semivariogramas teóricos una expresión analítica sencilla que se emplean para representar semivariogramas reales (Gallardo A. 2006.). Los modelos teóricos a los que se buscó ajustar los semivariogramas experimentales fueron Modelo Esférico, Modelo Exponencial, Modelo Gaussiano, Modelo Logarítmico, Modelo Efecto Pepita Puro, Modelo Efecto Agujero, Modelo Monómico que son los más comunes según (Gallardo A. 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).

**Validación:** Los modelos se validaron ajustando a los semivariogramas experimentales con el procedimiento denominado validación cruzada (IICA, 2014; Gallardo A. 2006). Con este procedimiento no paramétrico, se eliminó un valor muestral y se empleó el método de interpolación geoestadístico denominado krigado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restante valores muestrales, este proceso se efectuó sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación cruzada (Media de los errores de estimación (MEE), Error cuadrático medio (ECM), Error cuadrático medio adimensional (ECMA) (Gallardo A. 2006; Isaaks y Srivastava, 1989 y Hevesi et al., 1992).

**Nivel de dependencia espacial:** Se calculó el nivel de dependencia espacial dividiendo el efecto pepita entre la meseta (valor en el cual el modelo alcanza el rango) con el fin de conocer el grado de relación entre los datos, el resultado según la formula se expresa en porcentaje y compara con el siguiente criterio: menor de 25 % el nivel de dependencia espacial es alta, entre 26 y 75 % el nivel de dependencia espacial es moderado y mayor del 76 % el nivel de dependencia es bajo (IICA, 2014; López-Granados et al., 2002), es decir

entre más grande sea el valor del resultado el nivel de incidencia de roya de una planta dependerá más del nivel de incidencia que conformen un foco de infección.

**Índice de distancia SADIE;** El objetivo de SADIE es establecer el modelo espacial de una población muestreada midiendo la distancia a la cual pueden desplazarse los individuos de la muestra observada. En el presente trabajo se utilizó el índice basado en la distancia para la regularidad  $Ia$  y el índice  $Ja$ , basado en la distancia del agrupamiento (Perry 1995a, 1995b, Dungan et al. 2002) para establecer el modelo de distribución de las poblaciones en cada una de las localidades de estudio.

**Estimación de los índices  $Ia$  y  $Ja$ :** Mediante las inspecciones realizadas en el terreno, que involucraron unidades de muestreo específicas, se procedió a contar las hojas que presentaban signos de roya en cada árbol que fue muestreado. Cada uno de estos árboles fue tratado como un individuo, siendo representados por el índice  $Ia$ , que varía de uno por unidad de muestreo. Es relevante mencionar que se contaban con las coordenadas bidimensionales  $(xi, yi)$  de cada una de estas unidades de muestreo, junto con la cantidad de individuos, identificados como  $Ni$ . El índice  $Ia$ , que evalúa la regularidad en la distribución espacial, se basa en la distancia mínima ( $D$ ) que los individuos dentro de la muestra podrían haber sido desplazados entre unidades de muestreo, de manera que todas las unidades tuvieran un número idéntico de individuos.  $Ia$  se obtiene al dividir  $D$  entre la distancia media aritmética de la regularidad en muestras aleatorias, denotadas como  $Ea$ . En situaciones donde  $Ia > 1$ , se considera que la muestra presenta una distribución agregada, mientras que  $Ia = 1$  indica una distribución espacialmente aleatoria y, finalmente,  $Ia < 1$  señala una distribución regular. Se llevaron a cabo 2000 aleatorizaciones para calcular los valores correspondientes de los índices. Por otro lado, se utiliza el índice  $Ja$ , centrado en el agrupamiento espacial, que se basa en la distancia mínima ( $C$ ) que los individuos de la

muestra deben haber recorrido para agruparse en una unidad. *Ja* se calcula al comparar esta distancia con la distancia media de agrupamiento en muestras aleatorias, denominada *Fa*. Valores de *Ja* mayores que 1 indican una muestra con un patrón agregado, mientras que *Ja* igual a 1 representa una distribución espacialmente aleatoria. Si *Ja* es menor que 1, se considera que la muestra presenta una distribución regular. Este índice, *Ja*, se emplea no solo para corroborar los resultados obtenidos con *Ia*, sino también para discernir entre patrones espaciales que presentan un único agrupamiento importante (donde sus valores superan significativamente 1) y aquellos que muestran dos o más agrupamientos, en los cuales los valores de *Ja* no difieren de manera significativa de 1 o incluso son inferiores. Para determinar la significación en relación a 1, se utiliza la probabilidad respectiva (*Qa*) (Perry 1997, Perry y Dixon 2002).

**Elaboración de mapas:** Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes se validaron, con el método geoestadístico denominado Krigado Ordinario se elaboraron los mapas de densidad de las poblaciones de la roya utilizando el programa Surfer 16 y se calculó la superficie infectada.

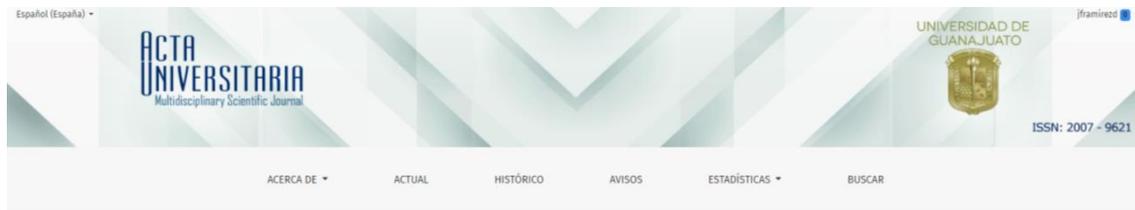
**Ahorro económico y ambiental:** Una de las metas de la agricultura de precisión es dirigir las medidas de control sobre las zonas específicas de infección de enfermedades e insectos plaga, lo cual determinaría un posible ahorro económico y una reducción de la cantidad del volumen de plaguicidas aplicados 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. El cálculo se realizó tomando en cuenta cuatro aplicaciones de cyproconazol para control de roya a un intervalo de 30 días en las fechas que regularmente se aplica en la región.



## VII. RESULTADOS

### 7.1 Artículo

Se publicó el artículo “Comportamiento espacial de la roya del cafeto en Amatepec, estado de México” en la Revista Acta Universitaria.



Vol. 33 (2023)

Comportamiento espacial de roya del cafeto en Amatepec, Estado de México

ARTÍCULOS

<https://doi.org/10.15174/au.2023.3870>

Publicado 2023-08-23

José Francisco Ramírez Dávila\*, Aurelio Pérez-Constantino\*, Francisco Gutiérrez-Rodríguez\*, Delfina de Jesús Pérez-López\*

# Comportamiento espacial de roya del cafeto en Amatepec, Estado de México

Spatial behavior of coffee rust in Amatepec, Estado de México

Aurelio Pérez-Constantino<sup>1</sup>, José Francisco Ramírez-Dávila<sup>1\*</sup>, Francisco Gutiérrez-Rodríguez<sup>1</sup>,  
Delfina de Jesús Pérez-López<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMex. Centro Universitario el Cerrillo. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx.  
Tel. (01 729) 296 55 31 ext. 139.  
jfrd@uaemex.mx\*

\*Autor de correspondencia

## Resumen

El café es un cultivo importante en la economía mundial; sin embargo, la roya ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix* es uno de los problemas fitosanitarios más comunes que limita su producción y llega a causar la muerte de plantas en infecciones altas. Por lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de roya del café para contribuir en el estudio de la dinámica espacial de la roya. El estudio se realizó en Amatepec, Estado de México, de septiembre de 2020 a agosto de 2021. Los muestreos fueron quincenalmente en cuatro parcelas de 0.5 h cada una. A través de la geoestadística se obtuvo una distribución espacial en agregados, modelos esféricos y mapas de distribución con focos de infección, así como una dependencia espacial alta. Se concluye que con este tipo de investigaciones se puede identificar y pronosticar el comportamiento de la roya en cafetales, la relación del ciclo biológico de la enfermedad y la fenología del cultivo dentro del proceso epidemiológico.

**Palabras clave:** *Hemileia vastatrix*; krigeado; agregación; incidencia.

## Abstract

The cultivation of coffee is important in the world economy; however, coffee rust caused by the *Hemileia vastatrix* fungus is one of the most common phytosanitary problems that limits its production and even causes the death of plants in high infections. Therefore, the objective of this study was to establish the spatial behavior of coffee rust populations to contribute to the study of the spatial dynamics of coffee rust. The study was carried out in Amatepec, Estado de Mexico, from September 2020 to August 2021. Samples were collected biweekly in four plots of 0.5 h each. Through geostatistics, it was obtained a spatial distribution in aggregates, spherical models, and distribution maps with infection foci, as well as a high spatial dependence. It is concluded that with this type of research it is possible to identify and forecast the behavior of rust in coffee plantations, the relationship between the biological cycle of the disease, and the phenology of the crop within the epidemiological process.

**Keywords:** *Hemileia vastatrix*; kriging; aggregation; incidence.

Recibido: 08 de mayo de 2023

Aceptado: 24 de julio de 2023

Publicado: 23 de agosto de 2023

**Cómo citar:** Pérez-Constantino, A., Ramírez-Dávila, J. F., Gutiérrez-Rodríguez, F., & Pérez-López, D. J. (2023). Comportamiento espacial de roya del cafeto Amatepec, Estado de México. *Acta Universitaria* 33, e3870. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3870>

## Introducción

México ocupa el décimo lugar como productor de café a nivel mundial, con una producción de 947 092.21 t, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz. Con respecto al Estado de México, este cuenta con una producción de 622.29 t (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022; Sistema de Información Agrícola y Pecuaria [SIAP], 2020). Por otro lado, la roya es la principal enfermedad que ataca al cultivo del café, es ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, el cual ataca a las hojas de los cafetos de todas las variedades comerciales, provocando defoliaciones mayores al 60%, y en daños severos, puede causar la muerte de las plantas (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [Senasica], 2016). Si la infección ocurre en etapas tempranas, se puede presentar una reducción en el rendimiento; al contrario, si se presenta en etapas tardías, el efecto se observará en los niveles de amarre, fecundación de la flor y cuajado de fruto del siguiente ciclo del cultivo (American Phytopathological Society [APS], 2011).

Según datos de la plataforma epidemiológica de la roya del café (PVEF-Cafeto), del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader), en el Estado de México *Hemileia vastatrix* se detectó oficialmente en el año 2016, pero del 2019 a la fecha la severidad de roya en hoja y planta ha ido en aumento, lo que podría resultar en un aumento y surgimiento de nuevos focos de infestación si no se realizan actividades de control (Senasica, 2018).

En temas de manejo fitosanitario, es bien sabido que, para realizar acciones de control más eficientes, es necesario conocer y tomar en cuenta la distribución del patógeno o plaga en la parcela, así como su ciclo biológico con respecto a la fenología del cultivo u hospedante (López *et al.*, 2018). En este contexto, en la presente investigación se analizaron los patrones del comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas, las cuales permitieron la elaboración de mapas de

distribución del patógeno en un espacio continuo.

Por todo lo anterior, el objetivo de este estudio fue establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con métodos geoestadísticos en Amatepec, Estado de México, bajo la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix*) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio.

### **Materiales y métodos**

El presente trabajo se llevó a cabo en la cabecera del municipio de Amatepec, Estado de México. Esta localidad cuenta con un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con una elevación promedio de 1389 m. s. n. m., con una temperatura media anual de 23 °C y una precipitación de 2200 mm (Cardoso, 1999). La duración del estudio fue de un año, de septiembre del 2020 a agosto del 2021.

Se utilizaron cuatro parcelas de café de 0.5 h cada una, con variedades caturra y típica entre 10 y 15 años en un sistema de policultivo tradicional asociado con árboles maderables (Scamilla-Prado, 2018). Su manejo es convencional, con una sombra entre el 40% y 60%, constituida principalmente por cedros, cítricos y algunos encinos. Cada parcela se dividió en cuadrantes de 10 m x 10 m, dando un total de 50 cuadrantes, y en cada uno se seleccionaron cuatro plantas al azar, siendo 200 plantas las que se marcaron con listones de colores y georreferenciaron con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361).

Para realizar el registro de datos, cada árbol fue dividido por estratos (bajo, medio y alto), en cada uno fue seleccionada una rama en dirección a cada punto cardinal y se tomaron tres hojas, dando un total de 36 hojas por café. El muestreo fue cada 14 días, de septiembre de 2020 a agosto del 2021. Se registró el número de hojas que presentaba síntomas de la enfermedad utilizando la escala de severidad del programa de vigilancia epidemiológica en el cultivo del café (Senasica, 2018).

## Medición de factores climáticos

Se realizó la medición de factores climáticos (temperatura y humedad relativa) mediante un sensor climático Datta Loggers HOBO Pro V2. Se colocó un sensor en el estrato medio de un árbol de café situado en la parte media de la parcela (Senasica, 2018) para identificar variaciones micro climáticas que pudieran explicar el comportamiento de *Hemileia vastatrix*.

## Medición de etapas fenológicas del cultivo

Se realizó la medición del estado fenológico en los 200 árboles de cada parcela, se registró el número de árboles con brotes, floración, frutos lechosos, frutos consistentes y frutos maduros cada 14 días, y se hizo un análisis de los datos sumando la totalidad de los frutos de las cuatro parcelas para determinar y delimitar las etapas fenológicas en el área de estudio durante el ciclo de cultivo evaluado.

## Análisis geoestadístico

Para realizar el análisis geoestadístico, se realizó un estudio de los datos verificando la normalidad de los datos mediante la prueba de curtosis y el coeficiente de asimetría (Chilés & Delfiner, 1999); posteriormente, se calculó el semivariograma experimental utilizando el programa Variowin 2.2 (*software* para análisis de datos espaciales en 2D, Springer Verlag, Nueva York, USA) y el WinGslib 2002 (Maldonado *et al.*, 2017). El semivariograma teórico se estimó mediante los siguientes pasos:

### a) Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma

Una vez obtenido el semivariograma experimental, se ajustó a los modelos teóricos más utilizados (gaussiano, exponencial, esférico, logarítmico, efecto pepita puro, efecto agujero y monómico) con el programa Variowin 2.2 (Maldonado *et al.*, 2017). Se obtuvieron los parámetros ajustados para verificar los modelos, como el rango, que es la distancia máxima a la que la variable está asociada; el efecto pepita, que indica el origen del semivariograma; y la meseta, que es el punto máximo de intersección de la variable (Tapia *et al.*, 2020).

### **b) Validación del modelo**

Se realizó la validación de los modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales (Gallardo, 2006), estimando las diferencias entre los valores experimentales y estimados con los estadísticos de validación cruzada (Hevesi *et al.*, 1992; Isaaks & Srivastava, 1989). Los parámetros validados fueron efecto pepita, meseta y rango con el procedimiento de ensayo y error hasta obtener los estadísticos de validación adecuados, empleando el programa Variowin 2.2 (Gallardo, 2006; Isaaks & Srivastava, 1989; Hevesi *et al.*, 1992).

### **c) Nivel de dependencia espacial**

Se dividió el efecto pepita entre la meseta para obtener el nivel de dependencia espacial expresada en porcentajes para conocer el nivel de relación de los datos (Tapia *et al.*, 2020), basándose en el criterio siguiente: un porcentaje menor a 25% indica un nivel de dependencia espacial alta, porcentajes entre 26% y 75% indican nivel de dependencia espacial moderado y un porcentaje mayor a 76% indica que el nivel de dependencia es bajo (Sayad *et al.*, 2017).

### **d) Elaboración de mapas**

Con el método geoestadístico denominado krigado ordinario se procedió a elaborar mapas de densidad de la enfermedad con el programa Surfer 16.0 (SurfaceMappingSystem, Golden Software Inc. 809, 14th Street, Golden, Colorado 80401-1866, USA). Con los mapas obtenidos fue posible calcular la superficie real infestada por la roya del café para cada parcela en las diferentes fechas de muestreo (Maldonado *et al.*, 2017).

## **Resultados**

### **Medición de factores climáticos**

Según los datos registrados en los sensores bioclimáticos, de septiembre a noviembre del año 2020 y de junio a agosto del 2021 se encontraron los meses con mayor porcentaje de humedad, periodo que concuerda con la precipitación, siendo septiembre el que presentó una mayor precipitación (210 mm) y porcentaje de humedad (90%); dicho periodo se encuentra

dentro de la época de lluvias.

A su vez, la temperatura se comportó inversamente proporcional a los porcentajes de humedad y precipitación, ya que de febrero a junio mostró un aumento gradual, siendo mayo el mes con mayor temperatura (31.6 °C).

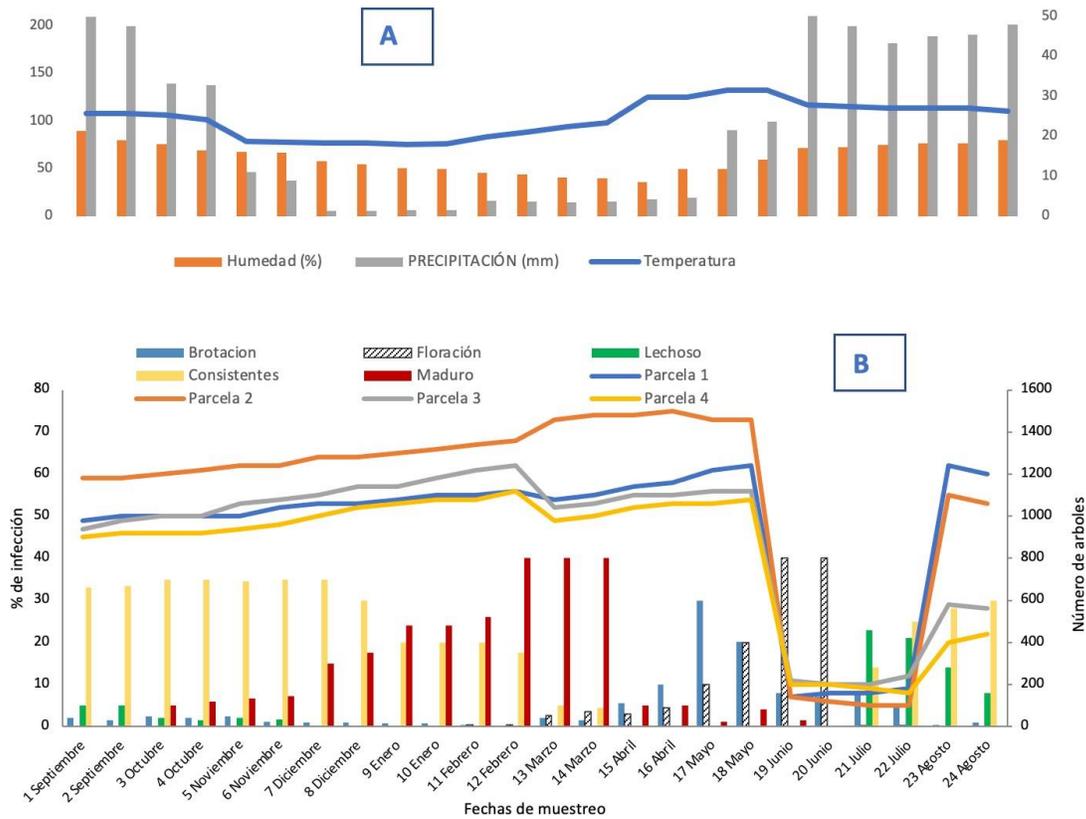


Figura 1. a) Temperatura, precipitación y porcentaje y b) Porcentaje de infección de roya y fenología del cultivo, de septiembre a diciembre de 2020 y de enero a agosto de 2021 en el municipio de Amatepec en el Estado de México, México.  
Fuente: Elaboración propia.

## Medición de etapas fenológicas del cultivo

El registro de datos de roya del café mostró incidencia durante todo el año del muestreo; sin embargo, la severidad fue diferente según la fecha de muestreo, manteniéndose entre el 40% y el 80% de infección de septiembre a mayo (Figura 1).

## Análisis geoestadístico

### Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma

Se obtuvieron 96 semivariogramas teóricos del análisis de los datos de las cuatro parcelas evaluadas, los cuales mostraron una distribución espacial en agregados. Los modelos obtenidos fueron exponencial, gaussiano y

esférico, que fueron validados con los parámetros de validación cruzada, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia y porcentaje de superficie infectada de roya del café en Amatepec.

Parcela	Muestreo	Modelo	Pepita (P)	Meseta (Ms)	Rango	P/Ms	DE	%I	Parcela	Muestreo	Modelo	Pepita (P)	Meseta (Ms)	Rango	P/Ms	DE	%I
1	1	Esférico	0	10.12	20.4	0	alta	55	1	13	Exponencial	0.29	39.48	16.8	0.007345	alta	55
1	2	Esférico	0	10.23	19.2	0	alta	55	1	14	Exponencial	0.29	44.18	19.8	0.006564	alta	55
1	3	Esférico	0	11.6	16.8	0	alta	55	1	15	Gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	55
1	4	Esférico	0	13.16	20.4	0	alta	55	1	16	Gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	55
1	5	Esférico	0	15.64	15.6	0	alta	56	1	17	Gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602	alta	56
1	6	Esférico	0	18.4	18	0	alta	56	1	18	Gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602	alta	56
1	7	Esférico	0	22.62	14.4	0	alta	57	1	19							57
1	8	Esférico	0	23.4	16.8	0	alta	57	1	20							57
1	9	Esférico	0	31.68	18	0	alta	58	1	21							58
1	10	Esférico	0	31.9589	16.992	0	alta	59	1	22							59
1	11	Esférico	0	39.48	16.8	0	alta	59	1	23	Esférico	1	10.45	3.48	0.095694	alta	59
1	12	Esférico	0	44.18	19.8	0	alta	60	1	24	Esférico	1	10.45	3.48	0.095694	alta	60
2	1	Esférico	0	13.16	22.8	0	alta	73	2	13	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	73
2	2	Esférico	0	14.1	16.8	0	alta	73	2	14	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	73
2	3	Esférico	0	14.72	21.6	0	alta	74	2	15	Esférico	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	74
2	4	Esférico	0	17.67	25.196	0	alta	74	2	16	Esférico	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	74
2	5	Esférico	0	20.24	19.2	0	alta	75	2	17	Esférico	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	75
2	6	Esférico	0	20.24	20.4	0	alta	75	2	18	Esférico	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	75
2	7	Esférico	0	26.6	19.2	0	alta	77	2	19							77
2	8	Esférico	0	20.24	19.2	0	alta	77	2	20							77
2	9	Esférico	0	38.8	18	0	alta	78	2	21							78
2	10	Esférico	0	43.5237	19.2	0	alta	80	2	22							80
2	11	Esférico	0	20.02	19.2	0	alta	81	2	23	Exponencial	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	81
2	12	Esférico	0	46.8	21.6	0	alta	82	2	24	Exponencial	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	82
3	1	Esférico	0	11.04	22.8	0	alta	75	3	13	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728	alta	75
3	2	Esférico	0	13.02	26.4	0	alta	75	3	14	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728	alta	75
3	3	Esférico	0	16.4894	24	0	alta	76	3	15	Esférico	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	76
3	4	Esférico	0	17.67	19.8	0	alta	76	3	16	Esférico	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	76
3	5	Esférico	0	24	21.6	0	alta	77	3	17	Exponencial	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	77
3	6	Esférico	0	33.48	22.8	0	alta	77	3	18	Exponencial	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	77
3	7	Esférico	0	41.36	21.6	0	alta	78	3	19							78
3	8	Esférico	0	44.18	19.2	0	alta	79	3	20							79
3	9	Esférico	0	49.92	18	0	alta	79	3	21							79
3	10	Esférico	0	5376	20.4	0	alta	80	3	22							80
3	11	Esférico	0	59.78	18	0	alta	82	3	23	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	82
3	12	Esférico	0	62.08	19.2	0	alta	83	3	24	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	83
4	1	Esférico	0	12.74	24	0	alta	58	4	13	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517	alta	58
4	2	Esférico	0	12.88	24	0	alta	59	4	14	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517	alta	59
4	3	Esférico	0	12.74	20.08	0	alta	59	4	15	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	59
4	4	Esférico	0	14.56	20.8	0	alta	59	4	16	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	59
4	5	Esférico	0	17.1	17.6	0	alta	60	4	17	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	60
4	6	Esférico	0	19.2	21.6	0	alta	60	4	18	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	60
4	7	Esférico	0	21.34	21.6	0	alta	61	4	19							61
4	8	Esférico	0	21.56	16.8	0	alta	62	4	20							62
4	9	Esférico	0	22.08	16	0	alta	62	4	21							62
4	10	Esférico	0	22.95	17.8	0	alta	63	4	22							63
4	11	Esférico	0	23.5	16.4	0	alta	64	4	23	Esférico	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	64
4	12	Esférico	0	24	18.4	0	alta	64	4	24	Esférico	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	64

Nota: %I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café; DE: dependencia espacial; 1: modelo esférico.  
Fuente: Elaboración propia.

Los centros de agregación encontrados son aleatorios y se presentaron como focos de infección. La pepita fue igual a 0 en el primer semestre y de 0.01 a 1 en el segundo semestre de muestreo para todas las parcelas muestreadas. En cuanto al rango, este va de 15.6 a 26.4 en el primer semestre y de entre 2.56 a 20.4 en el segundo semestre.

## Nivel de dependencia espacial

Los valores bajos del efecto pepita divididos entre el valor de la meseta evidenciaron una alta dependencia espacial en todo el año de muestreo.

## Elaboración de mapas

De las cuatro parcelas evaluadas se obtuvieron un total de 94 mapas de incidencia, cada uno permitió visualizar el comportamiento en agregados de la roya con respecto al espacio de muestreo (Figura 2 y 3).

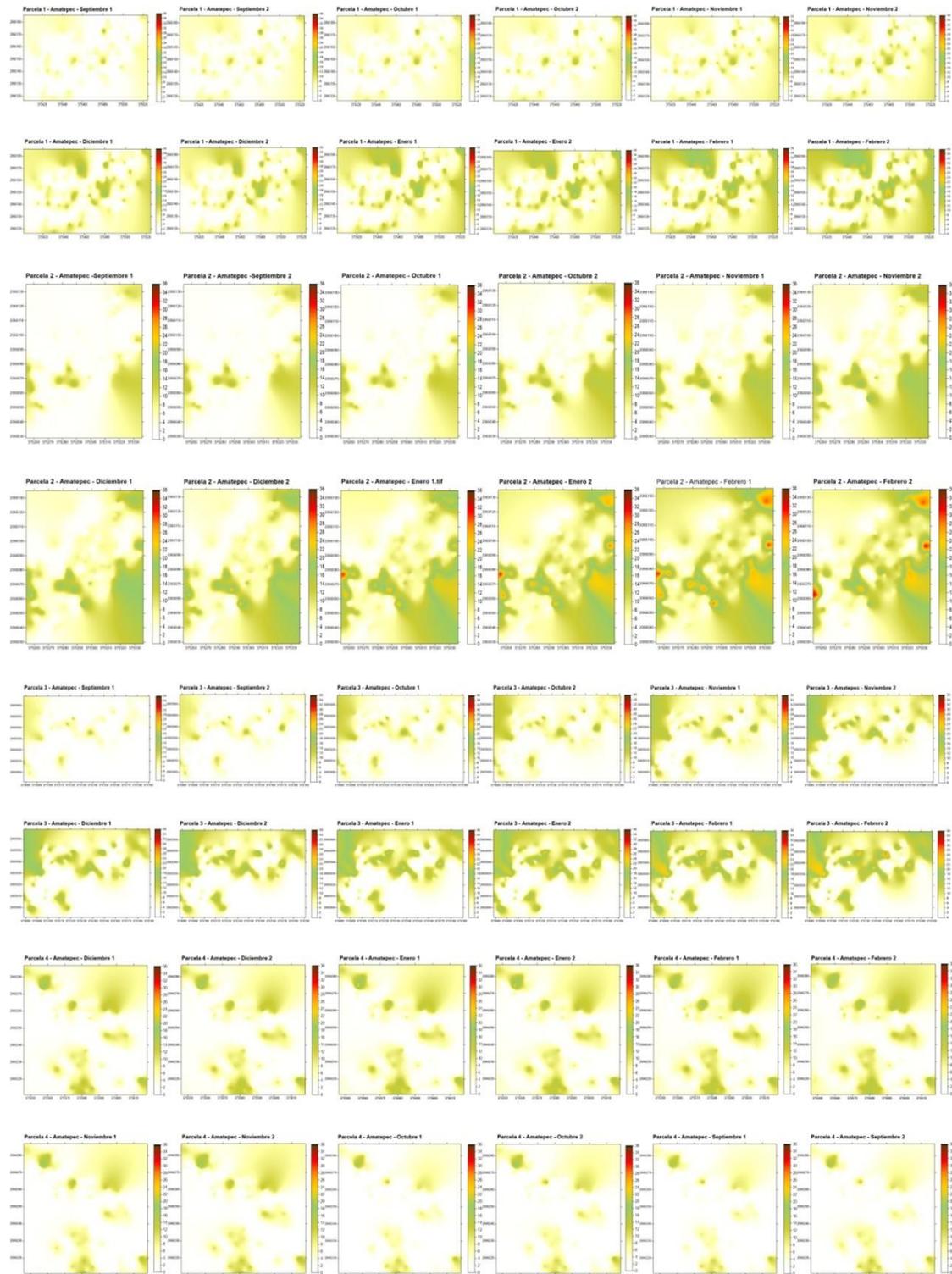


Figura 2. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Amatepec (septiembre de 2020–febrero de 2021), Estado de México, México.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Amatepec (marzo de 2020–agosto de 2021), Estado de México, México.  
Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de superficie infectada va del 55% al 83% en el año de muestreo: se mostró con crecimiento ascendente de septiembre a febrero, luego se mantuvo con ligeras alteraciones hasta el mes de mayo y después se muestra un descenso evidente hasta julio.

## Discusión

Es necesario analizar los factores climáticos medidos en el presente trabajo, partiendo desde la importancia que estos tienen en el triángulo epidemiológico de una enfermedad, el cual, según Mora *et al.* (2021), se compone de tres factores: uno es el hospedante susceptible, que en este caso es la planta de café; uno más es el patógeno agresivo, que es la roya; y finalmente están las condiciones favorables, que son todos los factores abióticos que favorecen el desarrollo de una enfermedad (suelo, manejo, variedad, clima). Para este caso particular, nos referimos a las condiciones climáticas existentes en el medio. Para la roya del café, temperaturas entre los 20 °C-22 °C y una humedad relativa mayor al 90% en ausencia de luz generan las condiciones inductivas u horas favorables; por lo tanto, a los meses con mayor cantidad de horas favorables se les conoce como meses inductivos (Mora *et al.*, 2021; Mora *et al.*, 2014; Senasica, 2018).

En este sentido, los meses más inductivos fueron de septiembre a noviembre de 2020 y de junio a agosto del 2021, lo que concuerda con lo reportado para el Estado de México por el programa de vigilancia epidemiológica del cultivo del café (Senasica, 2018). Sin embargo, López *et al.* (2018) y Mora *et al.* (2021) describen al proceso epidemiológico de la roya como resultado de la interacción de las variedades del huésped con el manejo agronómico, la sanidad vegetal, el patógeno y el clima; es decir, el desarrollo y disseminación de la enfermedad es un fenómeno multifactorial y no depende exclusivamente de factores climáticos, por lo que es de importancia comprender el proceso epidemiológico de la enfermedad y cómo se desarrolla durante el ciclo fenológico del café.

Con los resultados fenológicos obtenidos se puede inferir que el ciclo epidemiológico de la enfermedad se detiene en el periodo de cosecha, que va de enero a mayo, y es una vez empezado el periodo de lluvias que la incidencia baja significativamente, probablemente por la defoliación de los cafetos y por el lavado y transporte de las esporas en las hojas causado por las precipitaciones. Esto pudo derivar en el inicio de varios

ciclos epidemiológicos de la enfermedad, lo que concuerda con Kushalapa & Eskes (1989), quienes 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 que permite su germinación.

Al respecto, Porras (2000) dice que es importante analizar la incidencia y severidad de la enfermedad según las fluctuaciones del clima durante el ciclo de cultivo. De esta forma se pueden identificar las etapas críticas de la enfermedad, pronosticar su comportamiento epidémico mediante alertas o detección temprana y planear un manejo fitosanitario adecuado para la prevención de daños potenciales y combate de focos de infección.

Los resultados en la estimación de los parámetros del modelo de semivariograma indican que las agregaciones de *Hemileia vastatrix* se presentan en mayor cantidad en ciertas áreas de las parcelas con respecto al resto de puntos considerados en el muestreo. Autores como Espinoza-Zúñiga *et al.* (2019) señalan que las áreas de infestación son focos de infección específicas, desde donde el hongo causante de la roya genera el inóculo que se dispersa al resto de las parcelas aledañas, lo cual también concuerda con lo encontrado por Johnson *et al.* (2007), quienes determinaron patrones ajustados de tipo esféricos en la distribución de *Puccinia melanocephala*, indicando que el inóculo del patógeno se distribuye desde un foco de infección mostrando centros de agregación. Por otro lado, Sánchez *et al.* (2015) encontraron comportamientos agregados asociados a un modelo esférico en carbón de la espiga del maíz, indicando que existen focos de la enfermedad que se dispersa desde un punto nodal.

En otro punto, la aleatoriedad de los focos de infección o centros de agregación de la enfermedad podría deberse a la diseminación o arrastre de las esporas del hongo por factores ambientales como el viento y la lluvia, o por factores humanos como el mismo caficultor, quien puede transportar inóculo en la ropa o herramienta de trabajo de una planta a otra y de una parcela a otra. Esto lo observaron Mora *et al.*

(2015), quienes indicaron que las esporas de la roya se diseminan y entran en latencia hasta presentarse las condiciones inductivas que permitan su germinación.

Además, la presencia de patrones agregados en ciertas zonas específicas de la parcela y en otras no indican que las interacciones entre los patógenos, el medio y el huésped forman condiciones micro climáticas, como las horas favorables que completan el triángulo epidemiológico de la enfermedad en ciertas zonas de la parcela (Tannure *et al.*, 2013). Esto concuerda con un estudio realizado por Mora *et al.* (2015), en donde los autores analizan las “consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la fitosanidad de cultivos tropicales” y afirman que los procesos biológicos como patogénesis, sobrevivencia y dispersión son multifactoriales y no dependen solo de la presencia del patógeno o de las condiciones climáticas, sino de una suma de estos factores y otros más, como la genética del hospedante, las características fisiográficas del medio y el manejo agrícola (entre otras causas probables para la formación de centros de agregación y que forman parte del proceso epidemiológico de la enfermedad).

Con respecto a los parámetros ajustados para verificar los modelos, los valores del efecto pepita y los rangos de valores pequeños, Ramírez & Porcayo (2010) dicen que los valores bajos del efecto pepita afirman que no hubo errores de muestreo y que la escala que se utilizó en el levantamiento de datos de la roya del café fue correcta, y además muestran un alto nivel de agregación de la incidencia del patógeno causante de la enfermedad.

En los resultados encontrados en este estudio se mostró una dependencia espacial alta, con lo cual se supone que las poblaciones de roya dependen entre sí y su nivel de agregación es alto (Cárdenas *et al.*, 2017; Rossi *et al.*, 1992). Esto permite conjeturar que las poblaciones del patógeno tienen una fuerte correlación influenciada directamente por diversos factores, como las condiciones climáticas y micro climáticas presentes en el área de estudio. Así mismo, Espinoza-Zúñiga *et al.* (2019) indican que conocer la dependencia espacial es necesaria para poder determinar los procesos epidemiológicos de las

enfermedades en campo.

Los mapas obtenidos en el muestreo por cuadrantes expusieron que las poblaciones de *Hemileia vastatrix* se encuentran en centros de agregación en lugares específicos de la parcela, lo que comprueba la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix*) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio. La menor presencia fue al inicio del muestreo en el mes de septiembre y octubre y la mayor fue al final en el mes de enero y febrero.

Esta técnica ha sido utilizada en diferentes trabajos con otros problemas fitosanitarios, como el estudio de la distribución del gusano soldado en el Estado de México, realizado por Esquivel & Jasso (2014), o el estudio de la distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: *Cicadellidae*) en un viñedo en Andalucía, desarrollado por Ramírez & Porcayo (2008).

La presencia sobre la superficie plantada es heterogénea y se presenta en la mayor parte de la parcela; la acumulación de hojas con roya en los árboles evidencia los centros de agregación que generalmente están ubicados entre el centro y los límites del predio. Según la ficha técnica de la roya del café elaborado por el Senasica (2016) para el programa de vigilancia en el cultivo del café, el periodo de germinación y/o generación de esporas va desde los 26 a los 60 días. Una vez iniciado el ciclo, esto coincide con lo mostrado en los mapas, en donde el mes uno de muestreo fue el de menor presencia de roya (probablemente se iniciaron uno o varios ciclos), y en los siguientes meses la presencia del hongo fue progresiva, siendo los últimos muestreos los de mayor presencia, a excepción de la parcela uno, en donde los focos de infestación se mantuvieron homogéneos en cuanto a severidad en todos los muestreos.

La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en los mapas coincide con lo descrito por Mora *et al.* (2015), quienes describen el crecimiento de la roya en focos de infestación. Estos focos o centros de agregación sirven como fuentes y reservorios de inóculo. Cabe señalar que en la

época de lluvia (septiembre y agosto de 2020 y mayo a julio de 2021) los centros de agregación en los mapas fueron de poca intensidad debido al transporte del inóculo, esto aunado a la humedad residual, el aumento de temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido nuevo en la planta generan condiciones óptimas que marcan el inicio de nuevos ciclos de la enfermedad, creando focos de infección y el crecimiento o fortalecimiento de los ya existentes, como lo muestra la escala de colores en los mapas. Esto concuerda con lo encontrado por Coria-Contreras *et al.* (2014), quienes estudiaron la producción de inóculo de la roya del café y los factores asociados a su distribución y patogénesis.

Además, debido a la naturaleza policíclica del patógeno y su tendencia al establecimiento en focos localizados en áreas muy específicas, la intensidad de daño puede ser variable entre parcelas dentro de una misma región de control (Coria-Contreras *et al.*, 2014). También fue evidente el progreso de la incidencia de *Hemileia vastatrix* en el tiempo con la aparición de nuevos focos en los mapas, lo que permitió ver la intensidad de la roya en algunas áreas de la parcela, por lo que de manera práctica, tomando en cuenta también el porcentaje de infestación, se pueden dirigir las estrategias de control de la roya de forma más precisa a las áreas con altos niveles de incidencia, reduciendo así los reservorios de inóculo que inician la propagación con el inicio de las lluvias o la cosecha del café. Esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra para la aplicación, así también se disminuiría el impacto ambiental debido a que el químico que se aplique sería menor.

Incorporar la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad es útil para identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales como podas de café, podas de sombra, deshierbe o abonado, con la finalidad de reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento del hongo de la roya (Santana *et al.*, 2015), justificando así el uso de las técnicas de la agricultura de precisión como una herramienta que permite mantener o reducir los daños causados por la enfermedad en los cafetales del Estado de México (Tapia *et al.*, 2020).

## Conclusiones

La distribución espacial se ajustó al modelo esférico, aseverando que la enfermedad de la roya del café se comportó en forma de agregados o en focos de infección. Los focos fueron específicos en las parcelas desde donde crecen o disminuyen parcialmente debido a las condiciones climáticas que se presentan en las unidades experimentales. Este análisis geoestadístico demostró ser un método eficiente para determinar el comportamiento espacial agregado de las poblaciones de roya, indicando que existe una alta dependencia espacial entre las poblaciones de la enfermedad.

De esta forma, la estadística espacial permite identificar zonas de incidencia de plagas y enfermedades en zonas de cultivo. Esto hace más sencillo la creación de planes de manejo y control de fenómenos fitosanitarios con enfoque focalizado y dirigido de actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de precisión, la cual recomienda al productor el control a través del manejo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infestación y puede reducir significativamente la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y el daño ambiental. De esta forma se puede encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, ya que se satisface una necesidad del presente sin comprometer los medios para cubrir las necesidades en el futuro. Sumado a esto, los beneficios a la salud se harán evidentes debido a que el riesgo de residuos de pesticidas en el grano será eventualmente menor. Sumar la agricultura de precisión a actividades de control fitosanitario resultará en la obtención de alimentos más inocuos, sostenibles y amigables con el medio ambiente.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero otorgado por la Universidad Autónoma del Estado de México mediante el proyecto de investigación con clave 5098/2020SF.

## Conflicto de interés

No se cuenta con conflicto de interés.

## Referencias

- American Phytopathological Society (APS). (2011). *Coffee rust*.  
<https://www.apsnet.org/edcenter/disandpath/fungalbasidio/pdlessons/Pages/CoffeeRust.aspx>
- Cardoso, S. A. (1999). *Amatepec. Monografía Municipal* (1ª ed.). Instituto Mexiquense de la Cultura.  
[https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=406](https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=406)
- Cárdenas, N. J., Darghan, A., Sosa, M. D., & Rodríguez, A. (2017). Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 22(2), 209-220. doi: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Chilés, J. P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118136188>
- Coria-Contreras, J., Mora-Aguilera, G., Martínez-Bolaños, M., Guzmán-Deheza, A., Acevedo-Sánchez, G., & Flores-Sánchez, J. (2014). Epidemiología de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32, 43-53.  
<https://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento322014.html>
- Espinoza-Zúñiga, P., Ramírez-Dávila, J. F., Cibrián-Tovar, D., Villanueva-Morales, A., Cibrián-Llenderal, V. D., Figueroa-Figueroa, D. K., & Rivera-Martínez, R. (2019). Modelación de la distribución espacial del muérdago (Santalales: Loranthaceae) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan, México. *Bosque (Valdivia)*, 40(1), 17-28. doi: <https://doi.org/10.4067/s0717-92002019000100017>
- Esquivel, V., & Jasso, 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://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n6/v5n6a2.pdf>
- Gallardo, A. (2006). Geostadística. *Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 3, 1-11. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://fjferreer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Geoestadistica.pdf>
- Hevesi, J. A., Istok, J. D., & Flint, A. L. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 31(7), 661-676.  
doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0661:PEIMTU>2.0.CO;2)
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.
- Johnson, R. M., Grisham, M. P., & Richard, E. P. (2007). Relationship between sugarcane rust severity and soil properties in Louisiana. *Phytopathology*, 97, 748-755. doi: <https://doi.org/10.1094/PHTO-97-6-0748>
- López, J. M., Marín-Ramírez, G., Gaitán, A., & Ángel, C. A. (2018). *Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya del café* [Avance técnico No. 498]. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4244>
- Maldonado, F. I., Lara, A. V., Ramírez, J. F., Acosta, A. D., Rivera, R., & Tapia, A. (2017). Mapeo de la distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en parcelas comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec Harinas, Estado de México. *Ecosistemas* 26(2), 52-60. doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Mora, G., Acevedo, G., Calderón, G., Flores, J., Domínguez, S., Baker, P., & González, R. (2014). Epidemiological considerations of climate change on tropical crops health. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32(2), 147-167. [https://rmf.smf.org.mx/Vol\\_32\\_2\\_2014.html](https://rmf.smf.org.mx/Vol_32_2_2014.html)
- Mora, G., Acevedo, G., Contreras, J., González, R., López, A., & Javier, M. A. (2015). Alertas tempranas para el manejo de focos de roya del café en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 62-70.  
[https://rmf.smf.org.mx/Vol\\_33\\_2\\_2015.html](https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html)
- Mora, G., Acevedo, G., Guzmán, E., Flores, O. E., Coria, J. J., Mendoza, C., Martínez, V. I., López, A., González, R., & Javier, M. A. (2021). Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en

roya del café. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(3), 452-492. doi:  
<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). [Datos de seguridad alimentaria]. Fao.org. <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Porras, A. (2000). *Evaluación de la actividad in vitro del género Hypocrea contra 2 hongos fitopatógenos de importancia agrícola (Fusarium sp. y Mycena citricolor)* [Tesis]. Cartago.
- Ramírez, J. F., & Porcayo, E. (2008). Distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología*, 34(2), 169-175. [www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-04882008000200006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-04882008000200006&script=sci_arttext)
- Ramírez, J. F., & Porcayo, E. (2010). Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque (Valdivia)*, 31(1), 28-38. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000100004>
- Rossi, R. E., Mulla, D. J., Journel, A. G., & Franz, E. H., (1992). Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 62(2), 277-314. doi: <https://doi.org/10.2307/2937096>
- Santana, B., Acevedo, G., Coria, J. J., Mora, G., González, R., & López, A. (2015). CALCULA-HF v1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 119. [https://rmf.smf.org.mx/Vol\\_33\\_2\\_2015.html](https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html)
- Sayad, E., Boshkar, E., & Gholami, S. (2017). Different role of host and habitat features in determining spatial distribution of mistletoe infection. *Forest Ecology and Management*, 384, 323-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.012>
- Sánchez, J. R., Ramírez, J. F., González, A., & de León, C. (2015). Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1467-1480. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342015000700004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000700004)
- Scamilla-Prado, S. (2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*, 11(4), 80-86. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/274>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica). (2016). *Roya del café Hemileia vastatrix Berkeley & Broome* [Ficha Técnica No. 40]. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafe/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafe.pdf>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica). (2018). *Manual Técnico Operativo 2018 para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en el Cultivo del Café*. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafe/Estrategia%20operativa/ManualOperativoRoyaCafe.pdf>
- Sistema de Información Agrícola y Pecuario (SIAP). (2020). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)
- Tapia, A., Ramírez, J. F., Salgado, M. L., Castañeda, Á., Maldonado, F. I., & Lara, 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>
- Tannure, C. L., Mazza, S. M., & Giménez, L. I. (2013). Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*). *Revista Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE*, 1(4).

1  
2

7.2 Se envió el artículo “Comportamiento espacial de la roya del cafeto en Sultepec, estado de México” en la Revista Acta Agrícola y Pecuaria, el cual está en estatus de aceptado.



FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ACTA AGRÍCOLA Y PECUARIA

26 de octubre de 2023  
Carta de aceptación de manuscrito

Dr. José Francisco Ramírez-Dávila  
Facultad de Ciencias Agrícolas  
Universidad Autónoma del Estado de México  
PRESENTE

Por medio de esta misiva le comento que el manuscrito “Comportamiento espacial de la roya del cafeto en Sultepec Estado de México”, del cual funge como autor de correspondencia, ha sido aceptado para su publicación en Acta Agrícola y Pecuaria en la sección de Artículos Científicos.

El manuscrito será publicado en línea en el volumen 9 de 2023 y estará libre para su consulta y descarga en el portal de la revista: aap.uaem.mx

Sin más por el momento, reciba cordial saludo.

Dr. Víctor López Martínez Editor

Av. Universidad 1001 Col. Chambi, Comarca, Morelos, México, 62209. Tel: (0771) 2317046. aap@uaem.mx, aap.uaem.mx, @uaem  
UAEM  
Una universidad de excelencia  
ESTADÍSTICA 2013-2019

3

4  
5

6  
7 **COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE ROYA DEL CAFETO EN SULTEPEC ESTADO DE**  
8 **MÉXICO**  
9 **COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE ROYA AMARILLA**  
10 **SPATIAL BEHAVIOR OF COFFEE RUST IN SULTEPEC STATE OF MEXICO**  
11

12 **Resumen**

13 El cultivo del café es uno de los productos más importantes en la economía mundial; la roya (*Hemileia*  
14 *vastatrix*) es uno de los problemas fitosanitarios más comunes que limita la producción del cultivo, reduce el  
15 rendimiento, y en infecciones altas causa la muerte de las plantas; por lo anterior el presente estudio tuvo como  
16 objetivo establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café para contribuir en el  
17 estudio de la dinámica espacial de la roya. El estudio se realizó en Sultepec Estado de México, de septiembre  
18 2020 a febrero del 2021; los muestreos fueron quincenalmente en seis parcelas. Se obtuvo una distribución  
19 espacial en agregados, modelos esféricos, mapas de distribución con focos de infección y una dependencia  
20 espacial alta. Concluyendo que la Geoestadística puede identificar y pronosticar el comportamiento, la relación  
21 del ciclo biológico de la enfermedad y la fenología del cultivo dentro del proceso epidemiológico.

22 **Palabras clave:** *Hemileia vastatrix*, Roya amarilla, agregación, focos, incidencia.

23 **Summary**

24 Coffee cultivation is one of the most important products in the world economy; Rust (*Hemileia vastatrix*) is one  
25 of the most common phytosanitary problems that limits crop production, reduces yield, and in high infections  
26 causes plant death; Therefore, the present study aimed to establish the spatial behavior of coffee rust populations  
27 to contribute to the study of the spatial dynamics of the rust. The study was carried out in Sultepec State of  
28 Mexico, from September 2020 to February 2021; Sampling was done biweekly in six plots. A spatial distribution  
29 was obtained in aggregates, spherical models, distribution maps with infection foci and a high spatial  
30 dependence. Concluding that Geostatistics can identify and predict the behavior, the relationship of the  
31 biological cycle of the disease and the phenology of the crop within the epidemiological process.

32 **Keywords:** *Hemileia vastatrix*, Yellow rust, aggregation, foci, incidence.

33 **Introducción**

34 México es un importante productor de café, este grano es uno de los más demandados a nivel mundial. A nivel  
35 nacional se producen 953,682.9 toneladas, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz; con respecto al  
36 Estado de México se cuenta con una producción de 622.29 toneladas (SIAP 2020). La roya, es la principal  
37 enfermedad que ataca al cultivo del café; es ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, la cual ataca a las hojas  
38 de los cafetos de todas las variedades comerciales, provocando defoliaciones mayores al 60 %, en daños severos  
39 puede causar la muerte de las plantas. Si la infección ocurre en etapas tempranas se puede presentar una  
40 reducción en el rendimiento, si se presenta en etapas tardías el efecto se observará en los niveles de amarre de  
41 fruto del siguiente ciclo del cultivo (Aps 2011). Según datos de la Plataforma epidemiológica de la Roya del  
42 Cafeto (PVEF-Cafeto), del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) en  
43 el Estado de México *Hemileia vastatrix* se detectó oficialmente en el año 2016, pero del 2019 a la fecha la  
44 severidad de roya en hoja y planta ha ido en aumento, lo que podría resultar en un aumento y surgimiento de  
45 nuevos focos de infestación si no se realizan las actividades de control (SENASICA 2019). En temas de manejo  
46 fitosanitario, es bien sabido que para realizar acciones de control más eficiente, es necesario conocer y tomar en  
47 cuenta la distribución del patógeno o plaga en la parcela, así también su ciclo biológico con respecto a la  
48 fenología del cultivo u hospedante (López et al. 2018). En este contexto, en el presente trabajo se analizaron los  
49 patrones del comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) mediante la  
50 aplicación de técnicas geoestadísticas, las cuales permitieron la elaboración de mapas de distribución del  
51 patógeno en un espacio continuo (Ramirez 2012). Por todo lo anterior, el objetivo fue establecer el  
52 comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con métodos  
53 Geoestadísticos en Sultepec estado de México municipio productor de café, bajo la hipótesis de que las  
54 poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix*) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por  
55 toda el área de estudio.

56

57 **Materiales y métodos**

58 El estudio se realizó en el municipio de Sultepec (Localidad: Rincón del Cristo) del Estado de México, entre  
59 septiembre del 2020 y febrero del 2021; esta localidad cuenta con un clima semi cálido subhúmedo con lluvias  
60 en verano, con una elevación promedio de 1,236 msnm con una temperatura media anual de 21 °C (Joaquín  
61 1999).

62 Se utilizaron seis unidades experimentales (UE) de 0.5 hectáreas cada una. Las variedades de café presentes  
63 fueron caturra y typica en edad productiva con un sistema de policultivo tradicional asociado con plátano,  
64 mandarina, naranja y mango (Sánchez 2018), su manejo es convencional con una sombra entre el 40 y 60 %.

65 Para el muestreo las UE se dividieron en cuadrantes de 10m x10m para tener 50 cuadrantes por UE, de cada uno  
66 se seleccionaron cuatro árboles al azar, para tener 200 árboles que se marcaron y georreferenciaron con un  
67 sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361).

68 Para la toma de datos, cada árbol se dividió en estrato bajo, medio y alto, en cada uno de estos se seleccionó una  
69 rama por punto cardinal tomando tres hojas, dando un total de 36 hojas por cafeto. Posteriormente se registró el  
70 número de hojas que presentaba síntomas de la enfermedad basado en la escala diseñada por el SENASICA para  
71 el programa de café (SENASICA 2019).

72 El registro de la incidencia de la roya (número de hojas con roya) se realizó cada 14 días de septiembre de 2020  
73 a febrero del año 2021. Los datos del muestreo, fueron concentrados en bases de datos por fecha para su análisis  
74 de distribución espacial con el método de Geoestadística.

75 **Medición de factores climáticos.** Con el objetivo de contribuir a explicar el comportamiento espacial del hongo  
76 *Hemileia vastatrix*, se colocó un sensor climático Datta Logers HOBO Pro V2 en la parte media de la parcela  
77 sujetándolo al estrato medio de un cafeto, estos registraron datos de temperatura y humedad relativa, y se  
78 sacaron las medias, mínimas y las máximas de temperatura y humedad relativa (SENASICA 2019).

79 **Análisis geoestadístico.** Una vez verificada la normalidad de los datos con la prueba de Curtosis y el  
80 coeficiente de asimetría (Chilés y Delfiner 1999), se estimó el semivariograma experimental con el programa  
81 Variowin 2.2 (software para análisis de datos espaciales en 2D. Spring Verlag, Nueva York; USA.) Y el  
82 WinGslib 2002 (Maldonado et al. 2017), este análisis se hizo con los siguientes tres pasos.

83 **Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma.** Definiendo como semivariogramas teóricos  
84 una expresión analítica sencilla que se emplean para representar semivariogramas reales, los semivariogramas  
85 experimentales se ajustaron a modelos teóricos preestablecidos gaussiano, exponencial, esférico, logarítmico,  
86 efecto pepita puro, efecto agujero y monómico (Maldonado et al. 2016), usando también el programa Variowin  
87 2.0.

88 **Validación del modelo.** Con el procedimiento de validación cruzada se realizó la validación de los modelos  
89 ajustados a los semivariogramas experimentales (Gallardo 2006). Este procedimiento no paramétrico, elimina un  
90 valor muestral y emplea el método de interpolación denominado krigado, junto con el modelo de  
91 semivariograma a validar, esto se efectuó sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre  
92 los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación  
93 cruzada: Media de los errores de estimación (MEE), Error cuadrático medio (ECM), Error cuadrático medio  
94 adimensional (ECMA). Estos estadísticos determinan la validación del modelo ajustado (Gallardo 2006; Isaaks y  
95 Srivastava 1989; Hevesi et al. 1992).

96 **Nivel de dependencia espacial.** El nivel de dependencia espacial se obtuvo de dividir el efecto pepita entre la  
97 meseta para conocer el grado al que están relacionado los datos. El resultado es expresado en porcentaje,  
98 tomando en cuenta el siguiente criterio: un porcentaje menor del 25 % indica un nivel de dependencia espacial  
99 alta, porcentajes entre 26 y 75 % indican nivel de dependencia espacial moderado y mayor del 76 % el nivel de  
100 dependencia es bajo (Sayad et al. 2017).

101 **Elaboración de mapas.** Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes se validaron, con el  
102 método geoestadístico denominado Krigado Ordinario se elaboraron los mapas de densidad de las poblaciones  
103 de roya para cada muestreo en las respectivas parcelas de estudio, utilizando el programa Surfer 16. Con los  
104 mapas elaborados fue posible además, calcular la superficie real infestada por la roya del café (Maldonado et al.  
105 2017).

106

107 **Resultados y discusión**

108 Todas las Unidades Experimentales tuvieron presencia de roya. Se obtuvieron mediciones de factores climáticos  
109 “humedad relativa y temperatura” en los seis meses de muestreo, se comprobó la normalidad de los datos para  
110 poder realizar la modelización y elaboración de mapas de la enfermedad, se calculó el porcentaje de infección  
111 para cada UE muestreadas, determinando la distribución espacial de roya.

112 **Medición de factores climáticos.** Para explicar la influencia de los factores climáticos medidos, es necesario  
113 partir del triángulo de una enfermedad, el cual consta de tres factores: hospedante susceptible, patógeno agresivo  
114 y condiciones favorables. En el caso de la roya del cafeto, el hospedante es la planta de café, el patógeno es el  
115 hongo *Hemileia vastatrix* y las condiciones favorables se refieren a los factores abióticos que favorecen el  
116 desarrollo de una enfermedad (suelo, manejo, variedad, clima). En roya las condiciones inductivas son  
117 temperaturas entre los 20-22 °C con una humedad relativa mayor al 90 % en ausencia de luz; a la suma de estas  
118 condiciones por día, se le llama horas favorables (Mora et al. 2021; SENASICA 2018). De acuerdo a los datos  
119 registrados en los sensores climáticos los meses con mayor humedad relativa fueron de septiembre a noviembre  
120 correspondientes a la temporada de lluvias, con respecto al aumento de temperatura esta se dio a partir del mes  
121 de diciembre, una vez concluido el periodo de lluvias; las temperaturas se registran con máximas en el mes de  
122 febrero y mínimas en el mes de enero con 31.31 y 11.98 °C respectivamente, los porcentajes más altos de  
123 humedad alcanzaron un 100 % en los meses de octubre a noviembre, no obstante el mes que presento el  
124 porcentaje de menor humedad fue el mes de febrero con 21.84 %; los meses más inductivos en donde se  
125 presentaron las horas favorables para la germinación de la roya fue de septiembre a noviembre (Cuadro 1). Los  
126 datos obtenidos concuerda con lo reportado en el Estado de México, por el programa de vigilancia  
127 epidemiológica del cultivo del cafeto en el 2017 (SENASICA 2018).

128 Según López (2018) y Mora (2021) el proceso epidemiológico de la roya resulta de la interacción de las  
129 variedades del huésped con el manejo agronómico, la sanidad vegetal, el patógeno y el clima, es decir el  
130 desarrollo y diseminación de la roya es multifactorial y no depende exclusivamente de factores climáticos; por  
131 otra parte Porras (2000) indica que es importante analizar la incidencia y severidad de la enfermedad según las  
132 fluctuaciones de factores climáticos en el tiempo, esto para identificar las etapas críticas del patógeno,  
133 pronosticar su comportamiento epidémico y prevenir el daño potencial mediante el uso de alerta o detección  
134 temprana.

135 **Análisis geoestadístico.**

136 **Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma.** Derivado de los datos obtenidos en los 12  
137 muestreos en las seis UE, se realizaron 72 semivariogramas teóricos que evidenciaron una distribución espacial  
138 en agregados, los modelos obtenidos en su totalidad fueron de tipo esférico los cuales se ratificaron mediante los  
139 parámetros de validación cruzada (Cuadro 2), lo que indica que las agregaciones de *Hemileia vastatrix* se  
140 presentan en mayor cantidad en ciertas áreas de la UE con respecto al resto de puntos considerados en el  
141 muestreo; Espinoza et al. (2019) señala que las áreas de infestación, son focos de infección específicas, desde  
142 donde el hongo causante de la roya genera el inoculo que se dispersa al resto de las parcelas aledañas lo cual  
143 concuerda con lo encontrado por Johnson et al. (2007) quien determinó patrones ajustados de tipo esféricos en  
144 la distribución de *Puccinia melanocephala*, indicando que el inoculo del patógeno se distribuye desde un foco de  
145 infección mostrando centros de agregación, por otro lado Sánchez et al. (2015) encontró comportamientos  
146 agregados asociados a un modelo esférico en carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*), indicando  
147 que existen focos de la enfermedad que se dispersa desde un punto nodal.

148 Por otro lado, los centros de agregación son aleatorios y se presentan como focos de infestación dentro de la UE,  
149 esto podría ser como resultado de la diseminación o arrastre de las esporas del hongo por factores ambientales  
150 como el viento y la lluvia, o por factores humanos como el mismo caficultor que puede transportar inoculo en la  
151 ropa o herramienta de trabajo de una planta a otra y de una UE a otra; esto lo observó Mora et al. (2015) quien  
152 indicó que las esporas de la roya se diseminan y entran en latencia hasta presentarse las condiciones inductivas  
153 que permitan su germinación. Además, la presencia de patrones agregados en ciertas zonas específicas de la UE  
154 y en otras, no indica que las interacciones entre los patógenos, el medio y el huésped forman condiciones  
155 microclimáticas como las horas favorables que completan el triángulo epidemiológico de la enfermedad en  
156 ciertas zonas de la UE (Tannure et al. 2013). Esto concuerda con un estudio realizado por Mora et al. (2015), en  
157 donde analizan las “consideraciones epidemiológicas del cambio climático en la Fitosanidad de cultivos

158 tropicales” y afirma que los procesos biológicos como patogénesis, sobrevivencia y dispersión, son  
159 multifactoriales y no dependen solo de la presencia del patógeno o de las condiciones climáticas, sino a una  
160 suma de estos factores y otros más como la genética del hospedante, las características fisiográficas del medio, el  
161 manejo agrícola, entre otras causas probables para la formación de centros de agregación, y forman parte del  
162 proceso epidemiológico de la enfermedad.

163 Con respecto a los parámetros ajustados para verificar los modelos, Tapia Rodríguez (2020) menciona que el  
164 rango es la distancia máxima a la que la variable está asociada, el efecto pepita indica el origen del  
165 semivariograma y la meseta que es el punto máximo de intersección de la variable. En este trabajo se presentó  
166 una pepita igual a cero en todos los muestreos; con respecto al rango este va entre los 11.8 m y 40.6 m, que de  
167 acuerdo con Ramírez et al. (2012), los valores bajos del efecto pepita afirman que no hubo errores de muestreo y  
168 la escala que se utilizó fue correcta para el levantamiento de datos de la roya del café, además muestran un alto  
169 nivel de agregación de la incidencia del patógeno causante de la enfermedad.

170 **Nivel de dependencia espacial.** El nivel de dependencia espacial se obtiene dividiendo el efecto pepita entre  
171 meseta, y el resultado se expresa en porcentaje (Tapia et al. 2020). En los resultados los valores de cero del  
172 efecto pepita divididos entre el valor de la meseta indicaron una alta dependencia espacial en todas las fechas de  
173 muestreo, con lo cual se supone que las poblaciones de roya dependen entre si y su nivel de agregación es alto  
174 (Cárdenas 2017; Rossi et al. 1992). Esto permite suponer que las poblaciones del patógeno tienen una fuerte  
175 correlación influenciada directamente por diversos factores, como las condiciones climáticas y microclimáticas  
176 presentes en el área de estudio (Porrás 2000), así mismo Espinoza et al. (2019) indicaron que conocer la  
177 dependencia espacial es necesaria para poder determinar los procesos epidemiológicos de las enfermedades en  
178 campo.

179 **Elaboración de mapas.** En todos los casos se realizaron mapas de incidencia de la enfermedad con la técnica de  
180 krigado ordinario, obteniendo 72 mapas en total, lo que permitió la visualización de la presencia de la  
181 infestación del hongo. Los mapas obtenidos en el muestreo por cuadrantes expusieron que las poblaciones de  
182 *Hemileia vastatrix* se encuentran en centros de agregación (Figura 1y 2). En lo que respecta a las superficies  
183 infestadas, todas las UE muestreadas mostraron un intervalo que va del 55 % al 83 % en las fechas de muestreo  
184 entre septiembre y febrero, con un crecimiento de la infestación ascendente, siendo septiembre el mes con menos  
185 incidencia y febrero el que reporta mayor presencia o superficie con roya (Cuadro 2). Esta técnica ha sido  
186 utilizada en diferentes trabajos con otros problemas fitosanitarios como el estudio de la distribución del gusano  
187 soldado en el Estado de México por Esquivel y Jasso (2014) y Ramírez y Porcayo (2008) con la Distribución  
188 espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica* (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España.

189 Aunque la presencia del hongo sobre la superficie plantada es heterogénea y se presenta en la mayor parte de la  
190 UE, la acumulación de hojas con roya en los árboles evidencian los centros de agregación que generalmente  
191 están ubicados entre el centro y los límites del predio. Según el manual operativo del programa de vigilancia en  
192 café 2019 del SENASICA (2019), el periodo de germinación y/o generación de esporas va desde los 26 a los 60  
193 días una vez iniciado el ciclo, esto coincide con los mostrado en los mapas, en donde el mes uno de muestreo fue  
194 el de menor presencia de la roya, donde probablemente se iniciaron uno o varios ciclos, y en los siguientes  
195 meses la presencia del hongo fue progresiva, siendo los últimos los de mayor presencia con mayor generación de  
196 esporas como inóculo que entrará en latencia o infectará a otras hojas o plantas a excepción de la UE uno, en  
197 donde los focos de infestación se mantuvieron homogéneos en cuanto a severidad en todos los muestreos.

198 La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en los mapas coincide por lo descrito por Mora (2015), quien  
199 describe el crecimiento de la roya en focos de infestación; estos focos o centros de agregación que sirven como  
200 fuentes y reservorios de inóculo. Cabe señalar que en la época de lluvia (septiembre y agosto) hubo poca  
201 presencia de roya, lo que podría deberse a que la precipitación lava las esporas visibles de la roya, pero también  
202 transporta el inóculo a las hojas y plantas aledañas. Con la salida de la lluvia, la humedad residual, el aumento de  
203 temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido nuevo en la planta en los días y meses siguientes, se  
204 crean las condiciones inductivas óptimas para el surgimiento de focos nuevos y el crecimiento o fortalecimiento  
205 de los ya existentes, como lo muestra la escala de colores en los mapas. Esto concuerda con lo encontrado por  
206 Coria et al. (2014), quienes estudiaron la producción de inóculo de la roya del café y los factores asociados a su  
207 distribución y patogénesis.

208 Además, debido a la naturaleza policíclica del patógeno y su tendencia al establecimiento en focos localizados

209 en áreas muy específicas, la intensidad de daño puede ser variable entre parcelas dentro de una misma región de  
210 control (Coria et al. 2014), también fue evidente el progreso de la incidencia de *Hemileia vastatrix* en el tiempo  
211 con la aparición de nuevos focos de infestación en los mapas, que permitieron ver la intensidad de la roya en  
212 algunas áreas de la UE. Por lo que, de manera práctica tomando en cuenta también el porcentaje de infestación  
213 se pueden dirigir las estrategias de control de la roya de forma más precisa a las áreas con altos niveles de  
214 incidencia, reduciendo así los reservorios de inóculo que inician la propagación con el inicio de las lluvias o la  
215 cosecha del café. Esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra  
216 para la aplicación, así también se disminuirá el impacto ambiental debido a que el químico que se aplique será  
217 menor. Incorporando la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad; también es útil para  
218 identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales como podas de café, podas de sombra,  
219 deshierbe, con la finalidad de reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento  
220 del hongo de la roya (Santana et al. 2015), justificando así el uso de las técnicas de la agricultura de precisión  
221 como una herramienta que permite mantener o reducir los daños causados por la enfermedad en los cafetales del  
222 Estado de México (Rodríguez et al. 2020).

223  
224  
225  
226  
227

228 **Conclusiones**

229 La distribución espacial se ajustó al modelo esférico; aseverando que la enfermedad de la roya del café se  
230 comportó en forma de agregados, o focos de infección, estos fueron específicos en las parcelas desde donde  
231 crecen o disminuyen parcialmente, debido a las condiciones climáticas que se presentan en las unidades  
232 experimentales. De esta forma la estadística espacial permite identificar zonas de incidencia de plagas y  
233 enfermedades en zonas de cultivo, esto hace más sencillo la creación de planes de manejo y control de  
234 fenómenos fitosanitarios. Este análisis geoestadístico demostró ser un método eficiente para determinar el  
235 comportamiento espacial agregado de las poblaciones de roya, indicando que existe una alta dependencia  
236 espacial entre las poblaciones de la enfermedad.

237 Un enfoque focalizado y dirigido de estas actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de  
238 precisión a través del manejo solo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infestación, es capaz de  
239 reducir significativamente la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y el daño  
240 ambiental. De esta forma se pueden encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, ya que se  
241 satisface una necesidad del presente sin comprometer los medios para cubrir las necesidades en el futuro,  
242 sumado a esto, los beneficios a la salud se harán evidentes debido a que el riesgo de residuos de plaguicidas en el  
243 grano será eventualmente menor. Sumar la agricultura de precisión a actividades de control fitosanitario resultara  
244 en la obtención de alimentos más inocuos, sostenibles y amigable con el medio ambiente.

245 **Agradecimientos**

246 Se agradece el apoyo financiero otorgado por la Universidad Autónoma del Estado de México mediante el  
247 proyecto de investigación con clave 5098/2020SF.

248

249 **Literatura citada**

- 250 Aps 2011. The American Phytopathological Society. Coffee rust (*Hemileia vastatrix*):  
251 <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>.
- 252 Cárdenas-Pardo NJ, Darghan A, Sosa-Rico MD, Rodríguez A. (2017). Análisis espacial de la incidencia de  
253 enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia.  
254 Acta Biológica Colombiana 22(2): 209-220.  
255 <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>.
- 256 Coria-Contreras J, Mora-Aguilera G, Martínez-Bolaños M, Guzmán-Deheza A, Acevedo-Sánchez G y Flores-  
257 Sánchez J. 2014. Epidemiología de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Soconusco, Chiapas. Revista  
258 Mexicana de Fitopatología 32(S): 43-53.
- 259 Chilés JP y Delfiner P. 1999. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons, Nueva York. P.  
260 695-670.  
261 <https://books.google.es/books?id=tZl07WdjYHgC&lpg=PP1&dq=Chil%C3%A9s%2C%20J.%20P.%20y%20Delfiner%2C%20P.%201999.%20Geostatistics%3A%20Modeling%20spatial%20uncertainty.%20John%20Wiley%20%26%20Sons%2C%20Nueva%20York.%20Pp.695&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- 265 Espinoza-Zúñiga P, Ramírez-Dávila JF, Cibrián-Tovar D, Villanueva-Morales A, Cibrián-Llenderal VD,  
266 Figueroa-Figueroa DK, Rivera-Martínez R. 2019. Modelación de la distribución espacial del muérdago  
267 (Santalales: Loranthaceae) en las áreas verdes de la delegación Tlalpan, México. Bosque (Valdivia)  
268 40(1): 17-28.  
269 <https://doi.org/10.4067/s0717-92002019000100017>
- 270 Esquivel HV, Jasso GY. 2014. Distribución espacial y mapeo de gusano soldado en seis localidades del Estado de  
271 México, en el año 2011. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5(6): 923-935.
- 272 Gallardo A. 2006. Geostadística. Departamento de Ecología y Biología Animal. Facultad de Biología, Campus de  
273 Lagoas-Marcosende, Universidad de Vigo, 36310 Vigo. Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y  
274 Naturales, Universidad Pablo de Olavide. Ecosistemas.  
275 [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id\\_Categoría=1&tipo=portada](http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id_Categoría=1&tipo=portada)
- 276 Hevesi J, Istok J, Flint A. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics.  
277 Part. I. Structural analysis. Journal of Applied Meteorology 31(7): 661-680.  
278 <https://www.jstor.org/stable/26186580>
- 279 Isaaks EH, y Srivastava RM. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, Nueva York  
280 P.561.
- 281 Johnson RM, Grisham MP, Richard EP Jr. 2007. Relationship between sugarcane rust severity and soil properties  
282 in Louisiana. Phytopathology 97:748-755.  
283 <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-6-0748>
- 284 Joaquín S. 1999. Monografía de Sultepec. Instituto Mexiquense de Cultura, Asociación Mexiquense de Cronistas  
285 Municipales, A.C. Toluca, Estado de México, México. 112 p.  
286 [https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=520](https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=520)
- 287 López JM., Marín-Ramírez G, Gaitán A, Ángel CA. 2018. Diagrama de Área Estándar para la estimación visual  
288 de severidad de roya del cafeto. CENICAFE. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4244>
- 289 Maldonado FI, Ramirez JF, Lara AV, Acosta DA, Rivera R, Rodríguez TA. 2017. Mapeo de la distribución  
290 espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en parcelas comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec  
291 Harinas, Estado de México. Ecosistemas 26(2): 52-60.  
292 <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- 293 Maldonado-Zamora FI, Ramírez-Dávila JF, Rubí Arriaga M, Némiga XA, Lara-Díaz, AV. 2016. Distribución  
294 espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. Revista Mexicana de Ciencias  
295 Agrícolas 7(4): 845-856.
- 296 Mora AA, Sánchez G, Guzmán HE, Flores CO, Coria CJ, Mendoza R, Coral MBV, López BA, González GR,  
297 Javier LM. 2021. Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en roya del  
298 cafeto. Revista Mexicana de Fitopatología 39(3): 452-492. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>
- 299 Mora AG, Acevedo SG, Contreras J, González GR, López BA, López JM. 2015. Alertas tempranas para el manejo

300 de focos de roya del cafeto en México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33 (S): 62-70

301 Mora AG, Acevedo SG, Calderón EG, Flores SJ, Domínguez MS, Baker P, González GR. 2014. Epidemiological  
302 considerations of climate change on tropical crops health. *Revista mexicana de fitopatología* 32(2): 147-  
303 167. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092014000200147&lng=](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092014000200147&lng=es&tlng=en)  
304 [es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092014000200147&lng=es&tlng=en).

305 Porras A. 2000. Evaluación de la actividad in vitro del género *Hypocrea* contra 2 hongos fitopatógenos de  
306 importancia agrícola (*Fusarium sp.* y *Mycena citricolor*). Tesis Bach. Cartago, CR. ITCR. 97p.

307 Ramírez, J. F., Porcayo-Camargo, E., & Sánchez, J. R. (2013). Modelización de la distribución espacial de  
308 *Bactericera cockerelli* Sulc.(Hemiptera: Triozidae) en *Solanum tuberosum* L.(Solanales: Solanaceae).  
309 *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 45(2): 13-27.

310 Ramírez-Dávila JF, & Porcayo-Camargo E. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago  
311 enano (*Arceuthobium sp.*) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque*  
312 (Valdivia) 31(1): 28-38.

313 Ramírez-Dávila JF, Porcayo-Camargo E. 2008. Distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca lybica*  
314 (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología* 34(2):  
315 169-175.

316 Rodríguez AT, Ramírez-Dávila JF, Siclán MLS, Vildózola AC, Zamora FIM, Díaz AVL. (2020). Distribución  
317 espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México,  
318 México. *Revista argentina de microbiología* 52(1): 72-81.

319 Rossi R, Mulla J, Journel G, Franz H. 1992. Geostatistical Tools for Modeling and interpreting Ecological Spatial  
320 Dependence. *Ecological Monographs* 62: 277-314.  
321 <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/2937096>

322 Sayad E, Boshkar E, Gholami S. 2017. Different role of host and habitat features in determining spatial  
323 distribution of mist- letoe infection. *Forest Ecology and Management* 384: 323- 330. DOI:  
324 10.1016/j.foreco.2016.11.012

325 Santana-Peñaloza B, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras JJ., Mora-Aguilera G, González-Gómez R, López-  
326 Buenfil A. 2015. CALCULA-HF v1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido  
327 a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33(S): 119.

328 Sánchez-Hernández S. 2018. Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de  
329 Veracruz, México. *Agroproductividad* 11(4): 80-86.

330 Sánchez-Pale, J. R., Ramírez-Dávila, J. F., González-Huerta, A., & de León, C. (2015). Patrón espacial del carbón  
331 de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista mMexicana de Ciencias*  
332 *Agrícolas* 6(7): 1467-1480.

333 [SENASICA] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. 2019. [cited 2022 Diciembre  
334 22]. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica>

335 [SENASICA] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. 2018. [cited 2022 Diciembre  
336 22]. Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica>

337 [SIAP] Sistema de Información Agrícola y Pecuario. 2020. Anuario estadístico de la producción agrícola. [cited  
338 2022 Diciembre 22]. Disponible en: [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx).

339 Syrjala E. 1996. A statistical test for a difference between the spatial distributions of two populations. *Ecology*. 77  
340 (1): 75-80.

341 Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Salgado-Siclán ML, Castañeda-Vildózola Á, Maldonado-Zamora FI,  
342 Lara-Díaz AV. 2020. Spatial distribution of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) in  
343 avocado in the State of Mexico, Mexico | Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum*  
344 *gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología*  
345 52(1);, 72–81

346 Tannure CL, Mazza SM, Giménez LI. 2013. Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de  
347 *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*).  
348

349 **Cuadro 1. Temperatura y humedad relativa en el periodo de estudio septiembre de 2020 a febrero de 2021**  
 350 **en el municipio de Sultepec en el Estado de México, México.**

Muestreo	Temp, °C	HR, %	Temp Max °C	Temp Min °C	HR Max %	HR Min %
Sep.1(1)	20.49	94.74	28.07	15.68	98.51	62.07
Sep.2(2)	19.60	95.94	25.45	15.34	98.55	72.39
Oct.1(3)	20.11	89.80	27.01	14.07	98.72	59.68
Oct.2(4)	20.27	94.48	27.09	15.58	100.00	59.51
Nov.1(5)	20.10	91.25	26.72	15.37	100.00	64.89
Nov.2(6)	20.53	90.84	26.50	15.15	100.00	63.07
Dic.1(7)	19.87	79.47	26.55	13.86	98.19	42.09
Dic.2(8)	19.09	73.38	26.45	13.16	95.62	37.06
Ene.1(9)	19.53	62.76	29.54	11.98	94.70	29.90
Ene.2(10)	20.04	56.68	28.87	12.34	93.79	24.55
Feb.1(11)	20.27	62.34	28.94	12.10	99.52	31.26
Feb.2(12)	23.44	51.07	31.31	15.51	82.09	21.84

351 Temp= Temperatura; HR= Humedad relativa; Temp Max= Temperatura máxima; Temp Min= Temperatura  
 352 mínima; HR Max= Humedad relativa Máxima; HR Min= Humedad relativa mínima

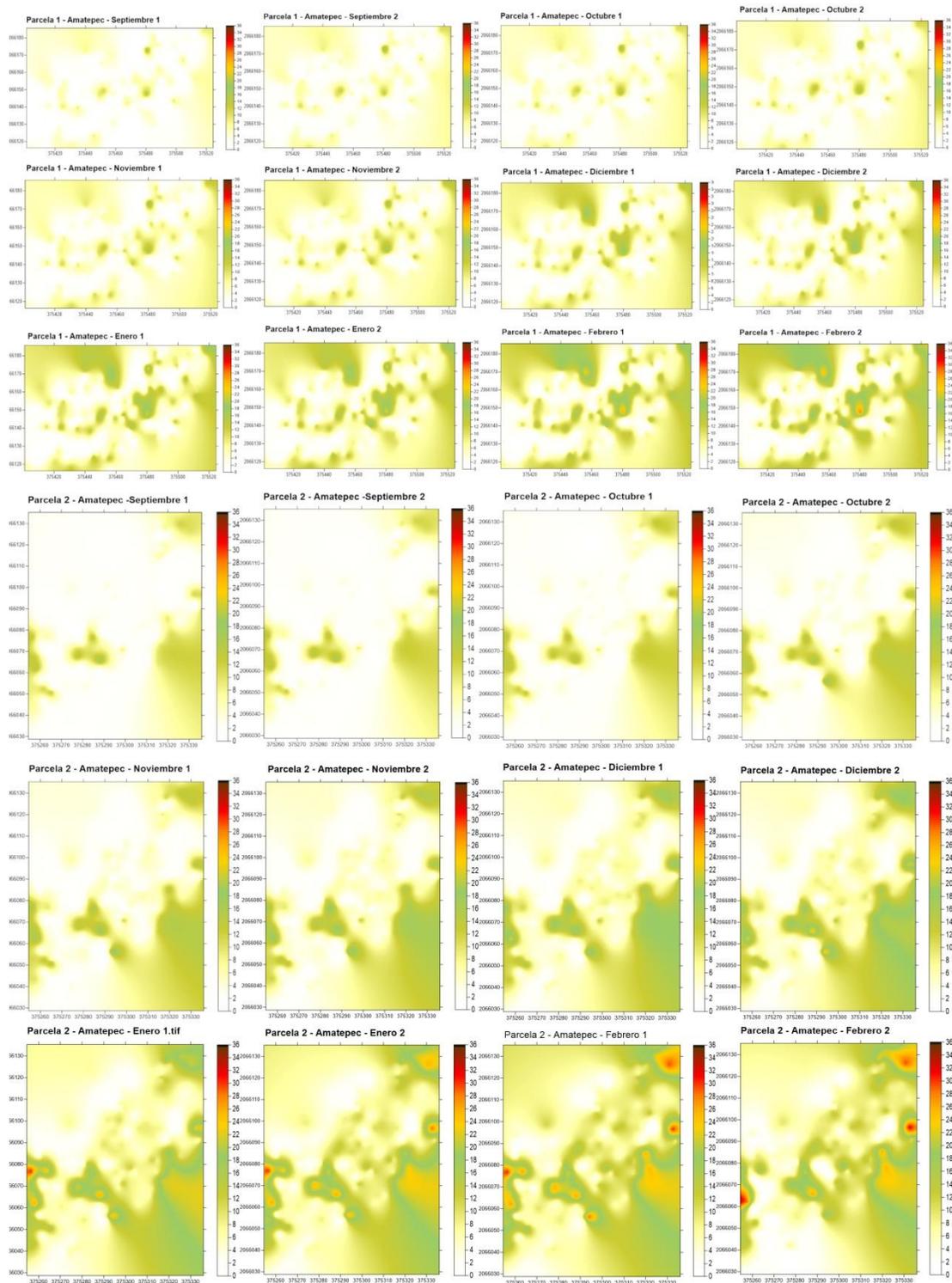
353  
 354

355 **Cuadro 2. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia y porcentaje de**  
 356 **superficie infectada de roya del café en Sultepec.**

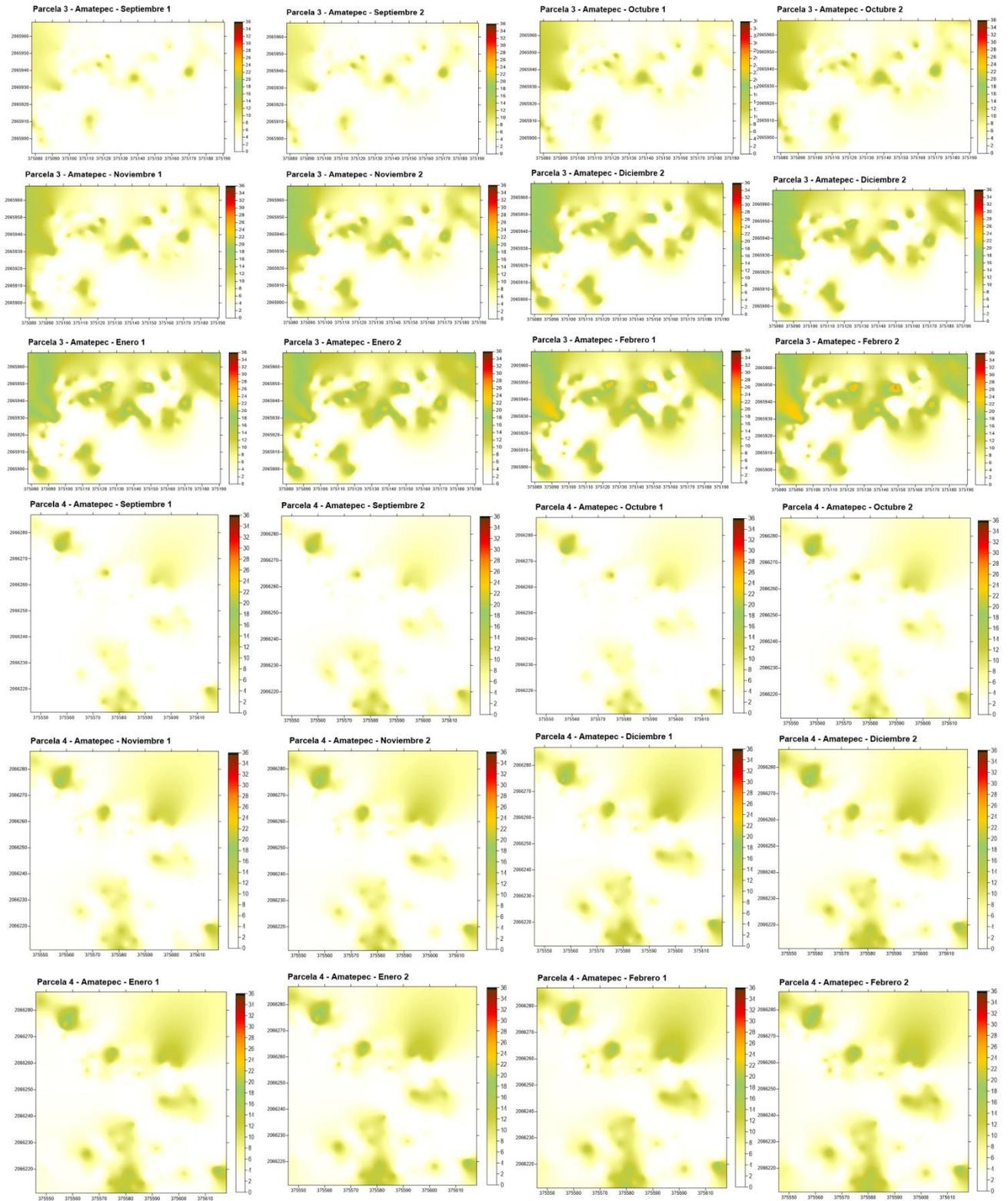
UE	muestreo	modelo	pepita	meseta	rango	pep/mes	DE.	%I	UE	muestreo	Modelo	pepita	meseta	rango	pep/mes	DE	%I
1	sep-1 (1)	1	0	17.86	19.2	0	alta	55	2	sep-1 (1)	1	0	4.15	22.5	0	alta	73
1	sep-2 (2)	1	0	24.59	19.2	0	alta	55	2	sep-2 (2)	1	0	9.31	15	0	alta	73
1	oct-1 (3)	1	0	30.30	19.2	0	alta	55	2	oct-1 (3)	1	0	12.69	13.5	0	alta	74
1	oct-2 (4)	1	0	32.50	18.0	0	alta	55	2	oct-2 (4)	1	0	16.79	18	0	alta	74
1	nov-1 (5)	1	0	34.92	19.2	0	alta	56	2	nov-1 (5)	1	0	17.19	19	0	alta	75
1	nov-2 (6)	1	0	34.90	19.2	0	alta	56	2	nov-2 (6)	1	0	22.20	19.95	0	alta	75
1	dic-1 (7)	1	0	38.95	21.6	0	alta	57	2	dic-1 (7)	1	0	12.74	22.5	0	alta	77
1	dic-2 (8)	1	0	41.00	21.0	0	alta	57	2	dic-2 (8)	1	0	16.74	16.2	0	alta	77
1	ene-1 (9)	1	0	43.60	22.8	0	alta	58	2	ene-1 (9)	1	0	13.44	24	0	alta	78
1	ene-2 (10)	1	0	44.80	21.6	0	alta	59	2	ene-2 (10)	1	0	15.90	16	0	alta	80
1	feb-1 (11)	1	0	47.04	22.4	0	alta	59	2	feb-1 (11)	1	0	17.90	19.9	0	alta	81
1	feb-2 (12)	1	0	49.92	20.4	0	alta	60	2	feb-2 (12)	1	0	60.80	16	0	alta	82
3	sep-1 (1)	1	0	16.49	14	0	alta	75	4	sep-1 (1)	1	0	10.45	14.06	0	alta	58
3	sep-2 (2)	1	0	26.88	33.6	0	alta	75	4	sep-2 (2)	1	0	14.72	11.84	0	alta	59
3	oct-1 (3)	1	0	27.16	22.8	0	alta	76	4	oct-1 (3)	1	0	20.8	15.4	0	alta	59
3	oct-2 (4)	1	0	28.80	24	0	alta	76	4	oct-2 (4)	1	0	28.5	24.64	0	alta	59
3	nov-1 (5)	1	0	44.10	26.4	0	alta	77	4	nov-1 (5)	1	0	29.14	25.41	0	alta	60
3	nov-2 (6)	1	0	49.10	20.4	0	alta	77	4	nov-2 (6)	1	0	44.16	24.64	0	alta	60
3	dic-1 (7)	1	0	65.20	22.8	0	alta	78	4	dic-1 (7)	1	0	64.2	18.48	0	alta	61
3	dic-2 (8)	1	0	70.56	22.8	0	alta	79	4	dic-2 (8)	1	0	64.02	14.8	0	alta	62
3	ene-1 (9)	1	0	69.84	20.4	0	alta	79	4	ene-1 (9)	1	0	88.35	13.32	0	alta	62
3	ene-2 (10)	1	0	91.00	17.2	0	alta	80	4	ene-2 (10)	1	0	90.24	13.32	0	alta	63
3	feb-1 (11)	1	0	90.20	16.8	0	alta	82	4	feb-1 (11)	1	0	112.8	12.58	0	alta	64
3	feb-2 (12)	1	0	99.00	15.6	0	alta	83	4	feb-2 (12)	1	0	119.6	15.4	0	alta	64
5	sep-1 (1)	1	0	21.84	27.596	0	alta	61	6	sep-1 (1)	1	0	12.3	31.9	0	alta	71
5	sep-2 (2)	1	0	29.76	25.5	0	alta	61	6	sep-2 (2)	1	0	12.32	31.9	0	alta	72
5	oct-1 (3)	1	0	43.70	22.5	0	alta	62	6	oct-1 (3)	1	0	18.8	31.9	0	alta	72
5	oct-2 (4)	1	0	64.90	24	0	alta	62	6	oct-2 (4)	1	0	23.25	40.6	0	alta	73
5	nov-1 (5)	1	0	82.00	25.5	0	alta	62	6	nov-1 (5)	1	0	31.28	34.8	0	alta	74
5	nov-2 (6)	1	0	87.42	24	0	alta	63	6	nov-2 (6)	1	0	39.06	37.7	0	alta	75

UE	muestreo	modelo	pepita	meseta	rango	pep/mes	DE.	%I	UE	muestreo	Modelo	pepita	meseta	rango	pep/mes	DE	%I
5	dic-1 (7)	1	0	53.80	25.5	0	alta	63	6	dic-1 (7)	1	0	41.85	31.9	0	alta	75
5	dic-2 (8)	1	0	72.80	15.4	0	alta	64	6	dic-2 (8)	1	0	47.43	31.9	0	alta	76
5	ene-1 (9)	1	0	68.82	21	0	alta	64	6	ene-1 (9)	1	0	53.58	34.8	0	alta	76
5	ene-2 (10)	1	0	77.42	18	0	alta	65	6	ene-2 (10)	1	0	47	31.9	0	alta	77
5	feb-1 (11)	1	0	85.00	18	0	alta	66	6	feb-1 (11)	1	0	51.7	26.1	0	alta	78
5	feb-2 (12)	1	0	84.64	18	0	alta	66	6	feb-2 (12)	1	0	50.76	26.1	0	alta	79

357 \* % I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café. DE: dependencia espacial; 1: modelo esférico



**Figura 1. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café parcela 1 y 2 en Sultepec, Estado de México, México.**



**Figura 2. Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café parcela 3 y 4 en Sultepec, Estado de México, México.**

### 7.3 Se envió el artículo “Distribución espacial de la roya del café usando SADIE en Sultepec, Estado de México en la revista Ecosistemas y recursos agropecuarios.

Rv: [ERA] Nueva notificación de Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

Municipio de Toluca, Estado de México, México  
Código Postal 50200  
Tel./Fax: 01 (722) 2 96 55 29 / 2 96 55 31  
Ext. 60425 y 60380

De: Dr Efraín de la Cruz Lázaro <editorera1@ujat.mx>

Enviado: viernes, 27 de octubre de 2023 14:01

Para: Jose Francisco Ramirez Davila <jframirez@uaemex.mx>

Asunto: [ERA] Nueva notificación de Ecosistemas y Recursos Agropecuarios

Ha recibido una nueva notificación de Ecosistemas y Recursos Agropecuarios:

Ha sido añadido a la conversación titulada "No adecuado a la guía para autores" que hace referencia al envío "la DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA ROYA DEL CAFETO USANDO SADIE EN SULTEPEC, ESTADO DE MÉXICO."

Enlace: <https://era.ujat.mx/index.php/rera/authorDashboard/submission/3930>

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro

Ecosistemas y Recursos Agropecuarios <http://era.ujat.mx>

## Distribución espacial de la roya del cafeto usando sadie en sultepec, estado de México

### Spatial distribution of coffee rust using sadie in sultepec, state of México

Distribución espacial de *Hemileia vastatrix*

**Aurelio-Pérez-Constantino<sup>1</sup>, José-Francisco-Ramírez-Dávila<sup>1\*</sup>, Fidel-Lara-Vázquez<sup>1</sup>, Atenas-Tapia-Rodríguez<sup>2</sup>, Dulce-Karen-Figueroa-Figueroa<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Cerrillo Piedras Blancas s/n km 15 Carr. Toluca - Ixtlahuaca, entronque al Cerrillo, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50200, México. <sup>2</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de Villa Guerrero, <sup>3</sup>Universidad Mexiquense del Bicentenario, UES Coatepec Harinas, Estado de México. \*Autor de correspondencia: [jframirez@uaemex.mx](mailto:jframirez@uaemex.mx)

#### RESUMEN

El grano del café es uno de los cultivos más importantes de la económica mundial, y como en todos los cultivos, este también enfrenta problemas fitosanitarios que amenazan y limitan su producción y pueden ser la causa de pérdidas insostenibles. La roya del cafeto es la enfermedad más agresiva del cultivo, afecta el rendimiento y en infecciones altas causa la muerte de las plantas provocando pérdidas económicas importantes en las regiones cafetaleras. En este sentido, el presente trabajo estudia la dinámica espacial de la roya, importante para su manejo fitosanitario en el estado de México. Se realizó en el municipio de Sultepec, estado de México, México. Los muestreos se realizaron quincenalmente de septiembre del 2019 a agosto del 2020; seleccionando cuatro parcelas y 200 cafetos (*Coffe arábica*) variedades Típica y Caturra, al azar por parcela, estos se marcaron y georreferenciaron geográficamente. Con los datos se realizaron mapas de infestación mediante la técnica del krigeado para conocer la agregación de *Hemileia vastatrix*, con el método del SADIE (Análisis espacial por índices de distancia) se calcularon los índices  $I_a$  y  $J_a$ , así como sus respectivas probabilidades, también se calculó la estabilidad espacial y temporal a corto plazo con el índice  $I_m$ , los mapas arrojaron que existe estabilidad espacial y temporal en el año de muestreos y los índices  $I_a$  y  $J_a$  indicaron que si existe agregación dentro del cultivo.

**Palabras Clave:** *HEMILEIA VASTATRIX*, enfermedad, krigado, agregación, infección.

### **ABSTRAC**

The coffee bean is one of the most important crops in the world economy, and like all crops, it also faces phytosanitary problems that threaten and limit its production and can be the cause of unsustainable losses. Coffee rust is the most aggressive disease of the crop, it affects yield and in high infections it causes the death of plants, causing significant economic losses in coffee-growing regions. In this sense, the present work studies the spatial dynamics of rust, important for its phytosanitary management in the state of Mexico. It was carried out in the municipality of Sultepec, state of Mexico, Mexico. Sampling was carried out biweekly from September 2019 to August 2020; selecting four plots and 200 coffee trees (*Coffea arabica*) Típica and Caturra varieties, randomly per plot, these were marked and geographically georeferenced. With the data, infestation maps were made using the kriging technique to know the aggregation of *Hemileia vastatrix*, with the SADIE method (Spatial analysis by distance indices) the indices  $I_a$  and  $J_a$ , as well as their respective probabilities, were also calculated. The short-term spatial and temporal stability was calculated with the  $I_m$  index, the maps showed that there is spatial and temporal stability in the sampling year and the  $I_a$  and  $J_a$  indices indicated that there is aggregation within the crop.

**Key words.** *HEMILEIA VASTATRIX*, disease, kriging, aggregation, infection.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo del café en México ocupa el sexto lugar en superficie sembrada a nivel nacional según datos del SIAP (2022) y el décimo como productor de café a nivel mundial (FAO 2022, SIAP 2022). El estado con mayor producción es Chiapas, seguido de Veracruz; por su parte el estado de México ocupa el décimo lugar con una superficie sembrada de 531.46 ha (SIAP 2022), el grano de esta entidad destaca por su calidad en taza que incluso ha permitido a algunos productores de la región obtener resultados relevantes en el certamen de taza de excelencia nacional, con lo que su perspectiva comercial se ha incrementado significativamente (Cup of excelente 2018, 2019, 2021, González 2019). La principal enfermedad de este cultivo es la roya ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, este provoca daños en las hojas de todas las variedades comerciales del café, llegando a provocar defoliaciones por arriba del 60%, cuando la severidad del daño es alta llega a ocasionar la muerte de las plantas (SENASICA 2016). Si el hongo ataca en etapas fenológicas tempranas provoca la reducción del rendimiento y etapas tardías reduce el nivel de amarre de ciclos posteriores (Aps 2011). Esta enfermedad se detectó en el estado de México en el año 2016 a través del programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria del Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) siendo el año 2016 y 2017 los de mayor severidad. Según datos de la Plataforma epidemiológica de la Roya del Cafeto (PVEF-Cafeto) SENASICA, la tendencia se mantuvo a la baja hasta el 2019, año a partir del cual la roya ha tenido tendencia a la alta.

Para un manejo regional eficiente de este problema fitosanitario es necesario conocer la distribución del patógeno en la parcela o región, así también su ciclo biológico y cómo se comporta y distribuye respecto a la fenología del cultivo u hospedante (López *et al.* 2018). Es necesario conocer que los organismos en el medio se forman agregaciones en consecuencia a características estructurales controladas por variables bióticas y abióticas que presentan los hábitats (Gómez *et al.* 2022).

Es por esto que en este trabajo de investigación, se analizó el comportamiento espacial de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) mediante el SADIE y la elaboración de mapas de distribución del patógeno. El objetivo fue establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de *Hemileia vastatrix* con SADIE en Sultepec Estado de

México, bajo la hipótesis de que las poblaciones de roya (*H. vastatrix*) presentan una distribución en agregados y están dispersos por toda el área de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el municipio de Sultepec (Localidad: Rincón del Cristo) del Estado de México, entre septiembre del 2020 y febrero del 2021; esta localidad cuenta con un clima semi cálido subhúmedo con lluvias en verano, con una elevación promedio de 1,236 msnm con una temperatura media anual de 21 °C (Joaquín 1999). Se utilizaron cuatro parcelas experimentales de 0.5 hectáreas cada una. Las variedades de café presentes fueron caturra y típica en edad productiva con un sistema de policultivo tradicional asociado con plátano, mandarina, naranja y mango (Scamilla 2018), su manejo es convencional, sin uso de agroquímicos, con una sombra entre el 40 y 60%. Para el muestreo las parcelas se dividieron y delimitaron en cuadrantes de 10m x10m para tener 50 cuadrantes por parcela, de cada uno se seleccionaron cuatro árboles al azar, para tener 200 árboles que se marcaron y georreferenciaron con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS, modelo Trimble SPS361); para la toma de datos de cada árbol se dividió en estrato bajo, medio y alto, en cada uno de estos se seleccionó una rama por punto cardinal tomando tres hojas, dando un total de 36 hojas por cafeto. Posteriormente se registró el número de hojas que presentaba síntomas de la enfermedad basado en la escala diseñada por el SENASICA para el programa de café (SENASICA 2018). El registro de la incidencia de la roya (número de hojas con roya) se realizó cada 14 días de septiembre de 2019 a agosto del año 2020. Los datos del muestreo, fueron concentrados en bases de datos por fecha para su análisis de distribución espacial con el método SADIE. Se corroboró la normalidad de los datos mediante el coeficiente de variabilidad y la prueba de Curtosis.

**Medición de factores climáticos.** Se realizó la medición de factores climáticos (temperatura y humedad relativa) mediante un sensor climático Datta Logers HOBO Pro V2. Se colocó un sensor en el estrato medio de un árbol de café situado en la parte media de la parcela (Senasica 2018), para identificar variaciones micro climáticas que pudieran explicar el comportamiento de *Hemileia vastatrix*.

**Fenología del cultivo.** Para identificar el avance de las etapas fenológicas del cultivo, cada 14 días se

registró el número de árboles con brotes, floración, frutos lechosos, frutos consistentes y frutos maduro, para su análisis se sumó los datos de las parcelas muestreadas para delimitar las etapas fenológicas en la región de trabajo durante el ciclo de cultivo.

**Análisis espacial por índices de distancia (SADIE).** El objetivo de SADIE es establecer el modelo espacial de una población muestreada midiendo la distancia a la cual pueden desplazarse los individuos de la muestra observada. En el presente trabajo se utilizarán el índice basado en la distancia para la regularidad  $I_a$  y el índice  $J_a$ , basado en la distancia del agrupamiento (Perry 1995a, 1995b, Dungan *et al.* 2002) para establecer el modelo de distribución de las poblaciones en cada una de las localidades de estudio.

**Estimación de los índices  $I_a$  y  $J_a$ .** Mediante las inspecciones realizadas en el terreno, que involucraron unidades de muestreo específicas, se procedió a contar las hojas que presentaban signos de roya en cada árbol que fue muestreado. Cada uno de estos árboles fue tratado como un individuo, siendo representados por el índice  $i$ , que varía de 1 por unidad de muestreo. Es relevante mencionar que se contaban con las coordenadas bidimensionales ( $x_i$ ,  $y_i$ ) de cada una de estas unidades de muestreo, junto con la cantidad de individuos, identificados como  $N_i$ . El índice  $I_a$ , que evalúa la regularidad en la distribución espacial, se basa en la distancia mínima ( $D$ ) que los individuos dentro de la muestra podrían haber sido desplazados entre unidades de muestreo, de manera que todas las unidades tuvieran un número idéntico de individuos.  $I_a$  se obtiene al dividir  $D$  entre la distancia media aritmética de la regularidad en muestras aleatorias, denotadas como  $E_a$ . En situaciones donde  $I_a > 1$ , se considera que la muestra presenta una distribución agregada, mientras que  $I_a = 1$  indica una distribución espacialmente aleatoria y, finalmente,  $I_a < 1$  señala una distribución regular. Se llevaron a cabo 2000 aleatorizaciones para calcular los valores correspondientes de los índices. Por otro lado, se utiliza el índice  $J_a$ , centrado en el agrupamiento espacial, que se basa en la distancia mínima ( $C$ ) que los individuos de la muestra deben haber recorrido para agruparse en una unidad.  $J_a$  se calcula al comparar esta distancia con la distancia media de agrupamiento en muestras aleatorias, denominada  $F_a$ . Valores de  $J_a$  mayores que 1 indican una muestra con un patrón agregado, mientras que  $J_a$  igual a 1 representa una distribución espacialmente aleatoria. Si  $J_a$  es menor que 1, se considera que la muestra presenta una distribución

regular. Este índice,  $J_a$ , se emplea no solo para corroborar los resultados obtenidos con la, sino también para discernir entre patrones espaciales que presentan un único agrupamiento importante (donde sus valores superan significativamente 1) y aquellos que muestran dos o más agrupamientos, en los cuales los valores de  $J_a$  no difieren de manera significativa de 1 o incluso son inferiores. Para determinar la significación en relación a 1, se utiliza la probabilidad respectiva ( $Q_a$ ) (Perry 1997, Perry y Dixon 2002).

Las estimaciones derivadas de los índices del Sistema de Análisis Espacial de Datos Ecológicos (SADIE) se visualizaron cartográficamente mediante el uso del programa Surfer 9.0. Se llevó a cabo un análisis de regresión simple con el propósito de determinar si existe una relación significativa entre los valores de la y  $J_a$ , considerando los muestreos realizados en cada localidad experimental. El software empleado para calcular los valores y las probabilidades asociadas a ambos índices fue el SADIE 1.22...

**Estimación de la superficie (mapas).** Para tal efecto se empleó el Krigeado ordinario. Este es una técnica de interpolación que permite la estimación no sesgada de puntos no muestreados. Una vez obtenido el Krigeado se elaboraron los mapas de densidad utilizando el programa Surfer 16.0 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA).

**Superficie infectada.** Se determinó la superficie infectada para conocer en donde realmente existía la presencia de la enfermedad dentro de las parcelas de estudio, a través de los mapas elaborados, utilizando para ello el programa Surfer 16.0. (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA). Se relacionó la infección con las condiciones climáticas de la zona de estudio.

## RESULTADOS

**Medición de factores climáticos.** Los datos de los sensores climáticos, los meses entre septiembre y noviembre del año 2020 y entre junio y agosto del 2021 se encontraron los meses con porcentaje de humedad alto concordando con la precipitación, el mes de septiembre fue el mes con mayor precipitación (210 mm) y porcentaje de humedad (90%), este periodo corresponde a la época de lluvias. A su vez, la temperatura fue baja en los meses con precipitación, siendo inversamente proporcional a los porcentajes de humedad y precipitación, ya que de febrero a

junio mostró un aumento gradual, siendo mayo el mes con mayor temperatura media (31.6 °C) (Figura 1).

**Medición de etapas Fenológicas del cultivo.** Los datos de roya del café mostraron presencia de la enfermedad durante todo el año del muestreo, la severidad en la parcela estuvo entre el 42% y el 78% de infección de septiembre a mayo (Figura 1).

**Análisis espacial por índices de distancia (SADIE).** Con el análisis de los datos se realizó la modelización espacial y el mapeo de las poblaciones de *Hemileia vastatrix*. Los valores máximos de hojas con presencia de roya por árbol se detectaron en los meses de febrero y marzo, y los meses con menor presencia de roya en hojas por árbol fue junio y julio.

Los resultados obtenidos con la aplicación de los índices del SADIE para la parcela uno mostraron los valores comprendidos entre 1.27 el más bajo y 1.74 el más alto, para la parcela dos el valor más bajo fue de 1.29 y el más alto de 1.73, en la parcela tres el valor más alto es de 1.75 y el más bajo de 1.29, la parcela cuatro 1.77 el más alto y el más bajo de 1.30, (Tabla 1).

En todos los casos el índice  $I_a$  fue significativamente mayor a uno, esto con respecto a su probabilidad  $P_a$ , lo que indica una distribución espacial agregada de *Hemileia vastatrix* en el cultivo de café en todos los muestreos realizados para las seis parcelas.

En cuanto al índice  $J_a$  los valores en las parcelas uno fueron de 1.04 el más bajo y de 1.21 el más alto, mientras que en la parcela dos se obtuvo un valor mínimo de 1.03 y un máximo de 1.20, en la parcela tres fue de 1.08 el menor y de 1.21 el mayor, en cuanto a la parcela cuatro el máximo fue de 1.19 y el menor de 1.04 (Tabla 1).

Este índice ( $J_a$ ) en todos los muestreos de las cuatro parcelas evaluadas no fue significativamente mayor a uno, esto tomando en cuenta su probabilidad  $Q_a$ , este resultado confirma la agregación encontrada por el índice  $I_a$  y además al tener datos que no fueron significativamente mayores a uno, permite determinar que la distribución espacial del hongo de la roya dentro de las parcelas de café se concentra en más de un centro de agregación (Tabla 1).

**Estimación de la superficie (mapas).** De las cuatro parcelas evaluadas se obtuvieron un total de 94 mapas de incidencia, cada uno permitió visualizar el comportamiento en agregados de la roya con respecto al espacio de

muestreo (Figura 2 y 3). Los mapas evidenciaron que las poblaciones de adultos de *Hemileia vastatrix* se ubicaron en centros de agregación; es decir, su localización se encuentra en puntos específicos, dentro de las parcelas. En todas las parcelas, los mapas que van de septiembre a Febrero mostraron focos de infección que van creciendo en tamaño y concentración según la escala de incidencia de los mapas y de marzo a julio fue descendente hasta desaparecer, en el mes de agosto se presentó una nueva formación de los focos de infección.

**Superficie infestada.** El porcentaje de superficie infectada va del 55% al 83% en el año de muestreo, se mostró con crecimiento ascendente de septiembre a febrero, luego se mantuvo con reducciones ligeras hasta el mes de mayo, y después se muestra un descenso evidente hasta julio con un ligero crecimiento en agosto. Las tendencias en las cuatro parcelas evaluadas son similares, siendo la parcela 1 la que presentó el porcentaje de infección más alto en el mes de abril. Estos porcentajes de infestación son importantes para determinar el grado de infección de la enfermedad en las parcelas de café y de esta manera tomar las acciones necesarias para realizar un manejo de la enfermedad y según los meses en los que se tiene mayor o menor porcentaje de infestación se deben aplicar las diferentes medidas de control que ayuden a bajar las poblaciones de la enfermedad (Figura 1, 2 y 3).

## DISCUSIÓN

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 café (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 inoculo 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 °C 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 krigeado 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.

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 un 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).

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. En consecuencia de la adopción de prácticas agrícolas que minimizan la dependencia de agroquímicos, reduce el impacto ambiental y garantizan la inocuidad de los alimentos genera una agricultura sostenible que beneficie a las generaciones futuras.

### **CONCLUSIÓN**

Las técnicas de geo estadísticas y el análisis SADIE permitieron identificar la distribución espacial en agregados de la roya del café, algunos puntos de agregación en la parcela se mantienen durante el ciclo de cultivo y otros aparecen de forma aleatoria, creciendo o disminuyendo hacia las áreas colindantes durante el ciclo fenológico del café debido a las condiciones climáticas que se presentan en las áreas muestreadas.

Conocer con exactitud la superficie infectada y distribución de la enfermedad permite conocer el proceso epidemiológico de la misma es ayuda a la creación de planes de manejo y control de fenómenos fitosanitarios con enfoque focalizado y dirigido de actividades de control de roya como lo propone la agricultura de precisión al recomendar al productor el control a través del manejo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infestación y así aminorar la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y ambiental.

De esta forma se puede encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, ya que se satisface una necesidad del presente sin comprometer los medios para cubrir las necesidades en el futuro. Sumado a esto, los beneficios a la salud se harán evidentes debido a que el riesgo de residuos de pesticidas en el grano será eventualmente menor. Sumar la agricultura de precisión a actividades de control fitosanitario resultará en la obtención de alimentos más inocuos, sostenibles y amigables con el medio ambiente.

### **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar los estudios de Posgrado. A los productores de café del municipio de Sultepec por su disposición y colaboración para poder realizar la

investigación.

## LITERATURA CITADA

Acosta AD, Ramírez JF, Rivera R, Figueroa DK, Lara AV, Maldonado FI, Tapia A (2017) Distribución espacial de *Trips* spp. (Thysanoptera) y evaluación de su control mediante el depredador *Amblyseius swirskii* en el cultivo de aguacate en México. *Southwestern Entomologist* 42: 435-447.

Alexander CJ, Holland JM, Winder L, Wolley C and Perry JN. (2005). Performance of sampling strategies in the presence of known spatial patterns. *Annals of Applied Biology*. 146(3):361-370. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040129.x>.

American Phytopathological Society (APS). (2011). *Coffee rust*. Fecha de consulta 01 de octubre de 2023. <https://www.apsnet.org/edcenter/disandpath/fungalbasidio/pdlessons/Pages/CoffeeRust.aspx>

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

Cardoso SA. (1999). Sultepec [Monografía Municipal]. Instituto Mexiquense de la Cultura. Primera Edición. Toluca, Estado de México. [https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=406](https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=406). Fecha de consulta 02 de septiembre de 2023.

Conrad KF, Perry JN, Woiwod IP and Alexander CJ (2006). Large scale temporal changes in spatial pattern during declines of abundance and occupancy in common moth. *J. Insect. Conservation*. 10(1):53-64.

Coria-Contreras J, Mora-Aguilera G, Martínez-Bolaños M, Guzmán-Deheza A, Acevedo-Sánchez G, & Flores-Sánchez J. (2014). Epidemiología de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32, 43-53.  
<https://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento322014.html>

Cup of Excellence. (2021). Ganadores Nacionales. Fecha de consulta 18 de octubre de 2023.

<https://cupofexcellence.org/mexico-2021/>.

Cup of Excellence. (2019). Ganadores Nacionales. Fecha de consulta 18 de octubre de 2023.

<https://cupofexcellence.org/mexico-2019/>.

Cup of Excellence. (2018). Ganadores Nacionales. Fecha de consulta 18 de octubre de 2023.

<https://cupofexcellence.org/mexico-2018/>.

Del Puerto A, Suárez S, Palacio D, (2014). Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud (en línea). Revista Cubana de Higiene y Epidemiología 52(3):372- 387.

Dungan JL, Perry JN, Dale MRT, Legendre P, Citron-Pousty S, Fortin MJ, Jakomulska A, Miriti M y Rosenberg MS . (2002). A balanced view of scaling in spatial statistical analysis. *Ecography* 25: 626-640.

González-Razo FDJ, Sangerman-Jarquín DM, Rebollar-Rebollar S, Omaña-Silvestre JM, Hernández-Martínez J, & Morales-Hernández JL. (2019). El proceso de comercialización del café en el sur del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1195-1206.

Gómez ALS, Hernández EO, Ahumada CAE, Herrera RR, Martínez MTDJS, Ramírez EN, & Drouaillet BE. (2022). Principales enfermedades del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de campo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(1), 4190-4210. DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i1.1793](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1793)

Granados-Montero M. (2015). Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en cafeto bajo sistemas agroforestales en Costa Rica. 256.

Joaquín S. (1999). Monografía de Sultepec. Instituto Mexiquense de Cultura, Asociación Mexiquense de Cronistas Municipales, A.C. Toluca, Estado de México, México. 112.

[https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo\\_editorial&table\\_id=520](https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=520). [Fecha revisión: 18 marzo 2022].

Kushalapa AC and Eskes AR (1989). Advances in coffee rust research. *Annual Review of Phytopathology*. 27:503-531.

López JM, Marín-Ramírez G, Gaitán A, & Ángel, CA. (2018). *Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya del cafeto* [Avance técnico No. 498]. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé). <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4244>

- López HA. (2001). Estrategias integradas para el control de enfermedades de las plantas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 54(1 y 2), 1251-1273.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24365/24969>
- Mora G, Acevedo G, Contreras J, González R, López A, & Javier MA. (2015). Alertas tempranas para el manejo de focos de roya del cafeto en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 62-70.  
[https://rmf.smf.org.mx/Vol\\_33\\_2\\_2015.html](https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html)
- Mora G, Acevedo G, Guzmán E, Flores OE, Coria JJ, Mendoza C, Martínez VI, López A, González R, & Javier MA. (2021). Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en roya del cafeto. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(3), 452-492. DOI: <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2104-6>
- Moran M. (2020). Importancia de la Agricultura Limpia para la producción de alimentos inocuos.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). [*Datos de seguridad alimentaria*]. Fecha de consulta 18 de septiembre de 2023. Fao.org. <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Perry J, (1995). Spatial aspects of animal and plant distribution in patchy farmland habitats. In *Ecology and Integrated Farming Systems*. 221 – 242 Pp.
- Perry J. (1995b). Spatial Analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology* 64: 303 -314
- Perry J. (1997). Spatial association for counts of two species. *Acta Jutlandica* 72: 149-169.
- Perry J and . Dixon P. (2002). A new method for measuring spatial association in ecological count data. *Ecoscience* 9: 133-141.
- Ramírez-Dávila J, & Porcayo-Camargo E. (2009). Comportamiento espacial de las larvas del mosquito verde *Jacobiasca lybica* , en un viñedo de secano en Andalucía, España. *CIENCIA Ergo-Sum*, 16(2), 164–170.
- Ramírez-Dávila JF, Solares-Alonso VM, Figueroa-Figueroa DK, & Sánchez-Pale JR. (2013). Comportamiento espacial de trips (Insecta: Thysanoptera), en plantaciones comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.) en Zitácuaro, Michoacán, México. *Acta zoológica mexicana*, 29(3), 545-562.
- Ramírez JF, & González AJL. (2007). Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano

- (Arceuthobium sp.) en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. *Geografía Agrícola*. 38(1):19-32.
- Reay FP. (2012). Distribución espacial del escarabajo de la hoja del cereal (Coleoptera: Chrysomelidae) en el trigo. *Entomol. Amb.* 39(1):1943-1952.
- Rivera-Martínez R, Ramírez-Dávila JF, Tapia-Rodríguez A, Figueroa-Figueroa DK, Acosta-Guadarrama AD, & 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.
- Rivillas C, & Castro Á. (2011). Ojo de gallo o gotera del cafeto. *Cenicafe*, 24.  
[www.cenicafe.org/es/publications/bot037.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/bot037.pdf)
- Santana B, Acevedo G, Coria JJ, Mora G, González R, & López A. (2015). CALCULA-HF v1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 119.  
[https://rmf.smf.org.mx/Vol\\_33\\_2\\_2015.html](https://rmf.smf.org.mx/Vol_33_2_2015.html)
- Soler-Jiménez ED, & Molano-Carrera R. (2021). Comprensión problema de contaminación ambiental por uso de agroquímicos a través de la educación ambiental. *Pensamiento y Acción*, (30), 53-68.
- Scamilla-Prado S. (2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*, 11(4), 80-86. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/274>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (Senasica). (2016). *Roya del cafeto Hemileia vastatrix Berkeley & Broome* [Ficha Técnica No. 40].  
<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafeto.pdf>
- Senasica (2018). Manual Técnico Operativo 2018 para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en el Cultivo del Cafeto.  
Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria.

<https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Estrategia%20operativa/ManualOperativoRoyaCafeto.pdf>

Silveira-Gramont MI, Aldana-Madrid ML, Piri-Santana J, Valenzuela-Quintanar AI, Jasa-Silveira, G, & Rodríguez-Olibarria G. (2018). Plaguicidas agrícolas: un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades rurales en el estado de Sonora, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(1), 7-21.

Sistema de Información Agrícola y Pecuario (SIAP). (2022). *Anuario estadístico de la producción agrícola*.  
[www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx)

Tapia A, Ramírez JF, Salgado ML, Castañeda Á, Maldonado FI, & Lara AV. (2020). Distribución espacial de antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz) en aguacate en el Estado de México, México. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(1), 72-81.

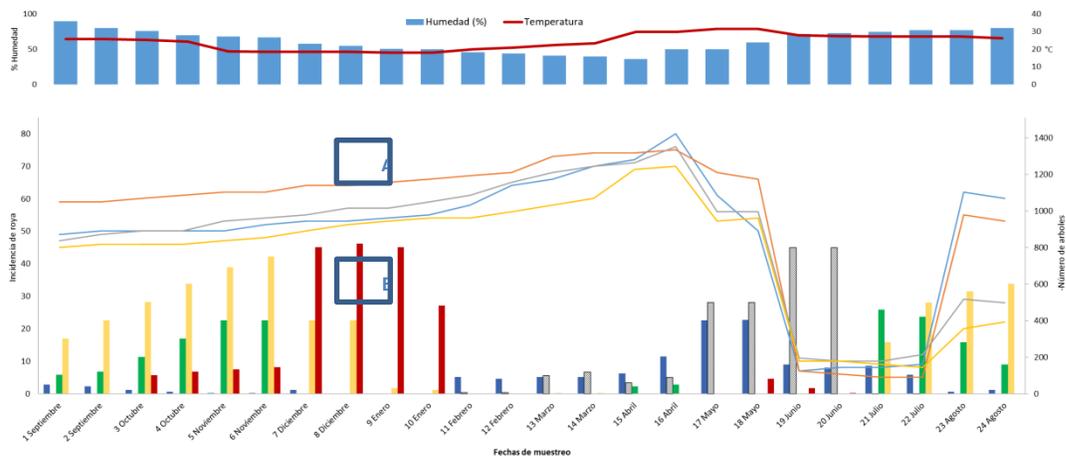
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2019.07.004>

Waller JM, Bigger M, y Hillocks RJ. (2007). *Coffee Pests, Diseases and Their Management*. Cabi International Series. 434 p.

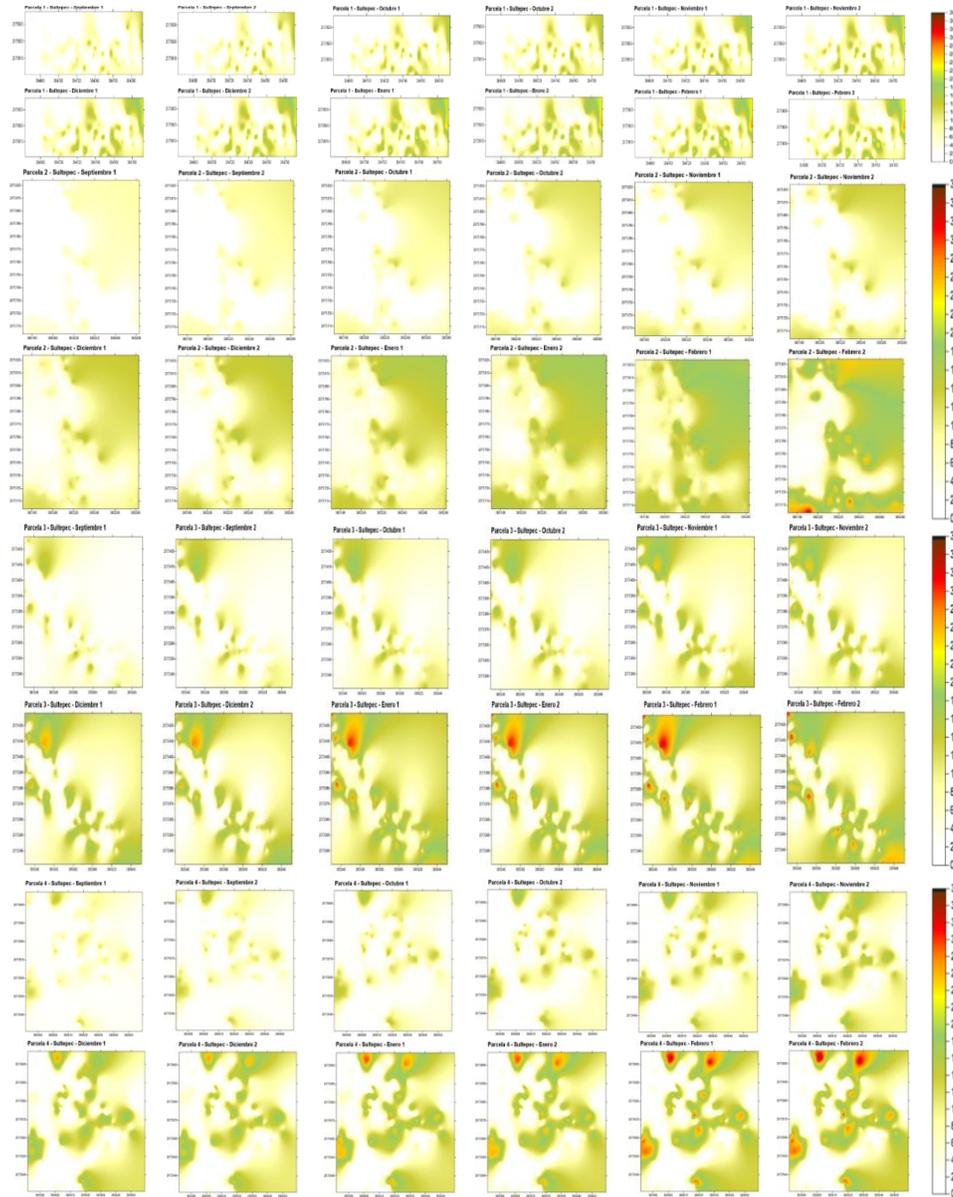
Winder L., Alexander CJ, Holland JM, Symondson WO, Perry JN, and Wolley C. (2005). Predatory activity and spatial pattern: the response of generalist carabids to their aphid prey. *J. Animal Ecol.* 77(1):443-454.

**Tabla 1.** Valor de los índices la y Ja y sus respectivas probabilidades Pa y Qa en las poblaciones de Roya del café (*Hemileia vastatrix*).

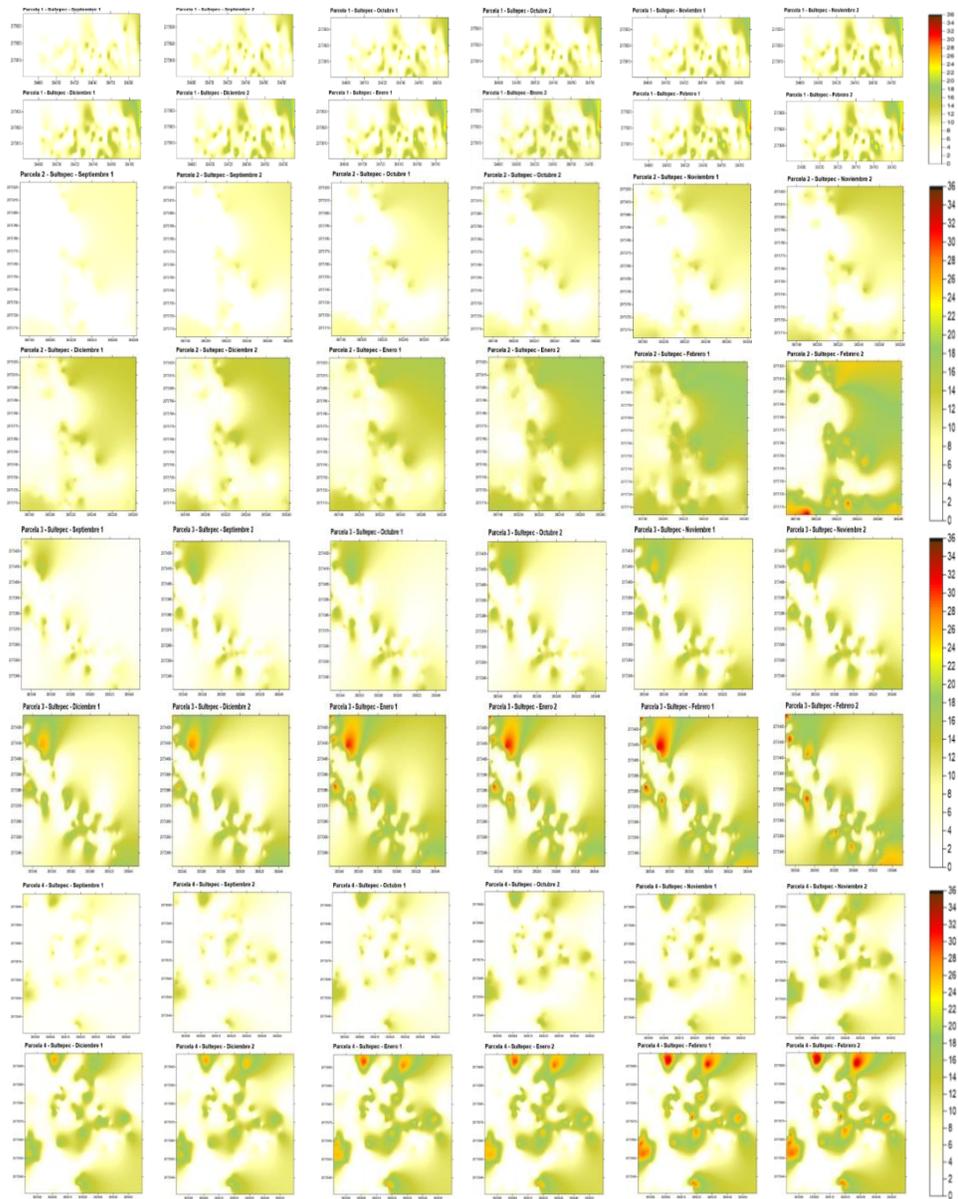
Muestreo	Parcela 1				Parcela 2				Parcela 3				Parcela 4			
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	
ep-01	1.36	0.005s	1.04	0.261ns	1.45	0.002s	1.08	0.238ns	1.31	0.010s	1.09	0.327ns	1.37	0.018s	1.04	0.272ns
ep-02	1.29	0.017s	.17	0.148ns	1.31	0.010s	1.20	0.163ns	1.36	0.014s	1.21	0.218ns	1.62	0.009s	1.10	0.148ns
ct-01	1.48	0.015s	1.09	0.287ns	1.61	0.015s	1.15	0.213ns	1.30	0.003s	1.04	0.305ns	1.76	0.013s	1.17	0.172ns
ct-02	1.42	0.011s	1.06	0.162ns	1.34	0.004s	1.05	0.135ns	1.48	0.017s	1.14	0.182ns	1.48	0.006s	1.11	0.260ns
ov-01	1.33	0.007s	1.11	0.257ns	1.40	0.013s	1.20	0.292ns	1.61	0.013s	1.11	0.237ns	1.59	0.008s	1.08	0.139ns
ov-02	1.59	0.009s	1.14	0.302ns	1.29	0.012s	1.03	0.173ns	1.75	0.004s	1.03	0.195ns	1.42	0.015s	1.05	0.244ns
ic-01	1.52	0.013s	1.21	0.130ns	1.73	0.008s	1.08	0.229ns	1.45	0.005s	1.17	0.342ns	1.55	0.003s	1.15	0.228ns
ic-02	1.63	0.002s	1.13	0.280ns	1.68	0.014s	1.19	0.151ns	1.69	0.008s	1.13	0.168ns	1.30	0.014s	1.06	0.296ns
ne-01	1.40	0.005s	1.11	0.342ns	1.44	0.006s	1.13	0.335ns	1.35	0.016s	1.07	0.359ns	1.52	0.011s	1.09	0.167ns
ne-02	1.68	0.004s	1.20	0.201ns	1.33	0.003s	1.13	0.250ns	1.60	0.013s	1.19	0.147ns	1.64	0.013s	1.16	0.321ns
eb-01	1.55	0.011s	1.08	0.365ns	1.65	0.011s	1.07	0.195ns	1.57	0.006s	1.08	0.373ns	1.35	0.017s	1.11	0.291ns
eb-02	1.70	0.010s	1.16	0.336ns	1.58	0.003s	1.11	0.281ns	.67	0.002s	1.06	0.281ns	1.66	0.015s	1.04	0.153ns
ar-01	1.54	0.009s	1.08	0.271ns	1.53	0.014s	1.17	0.249ns	1.38	0.012s	1.16	0.361ns	1.31	0.010s	1.16	0.318ns
ar-02	1.72	0.013s	1.10	0.251ns	1.37	0.009s	1.11	0.181ns	1.49	0.011s	1.11	0.320ns	1.70	0.007s	1.08	0.278ns
br-01	1.50	0.002s	1.05	0.333n	1.47	0.015s	1.10	0.263ns	1.56	0.016s	1.13	0.130ns	1.68	0.009s	1.19	0.297ns
br-02	1.66	0.008s	1.18	0.353ns	1.71	0.005s	1.20	0.141ns	1.32	0.009s	1.05	0.189ns	1.77	0.011s	1.05	0.136ns
ay-01	1.35	0.012s	1.15	0.291ns	1.55	0.012s	1.04	0.306ns	1.59	0.010s	1.16	0.242ns	1.45	0.004s	1.14	0.390ns
ay-02	1.61	0.014s	1.19	0.139ns	1.53	0.002s	1.10	0.221ns	1.52	0.018s	1.20	0.207ns	1.72	0.003s	1.18	0.186ns
un-01	1.38	0.003s	1.21	0.311ns	1.66	0.011s	1.16	0.154ns	1.57	0.002s	1.06	0.173ns	1.57	0.012s	1.13	0.347ns
un-02	1.74	0.010s	1.12	0.233ns	1.70	0.009s	1.18	0.261ns	1.34	0.007s	.08	0.351ns	1.32	0.014s	1.12	0.239ns
ul-01	1.41	0.016s	1.18	0.269ns	1.30	0.016s	1.05	0.168ns	1.29	0.018s	1.15	0.318ns	1.65	0.010s	1.13	0.155ns
ul-02	1.27	0.003s	1.10	0.155ns	1.42	0.013s	1.12	0.145ns	1.63	0.015s	1.18	0.337ns	1.40	0.002s	1.07	0.287ns
go-01	1.45	0.012s	1.07	0.322ns	1.63	0.017s	1.06	0.311ns	1.43	0.011s	1.10	0.161ns	1.65	0.016s	1.12	0.145ns
go-02	1.30	0.006s	1.13	0.184ns	1.32	0.007s	1.14	0.249ns	1.33	0.005s	1.12	0.229ns	1.49	0.005s	1.13	0.199ns



**Figura 1.** a) Temperatura, precipitación y porcentaje y b) Porcentaje de infección de roya y fenología del cultivo, de septiembre a diciembre de 2020 y de enero a agosto de 2021 en el municipio de Sultepec el Estado de México, México. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.** Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Sultepec (septiembre del 2020 – febrero de 2021), Estado de México, México. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Mapas de superficie infectada con roya en el cultivo del café en Sultepec (marzo de 2020 – agosto de 2021), Estado de México, México. Fuente: Elaboración propia.

## 7.4 Capitulo

También se registró el capítulo “Comportamiento de las poblaciones de roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en parcelas de Amatepec, Estado de México”, el cual está publicado en el libro “Café mexiquense. Producción, mercado y política pública.”

Close | Previous Next

Re: Publicación del libro "Café mexiquense. Producción, mercado y política pública"



PROGRAMA\_LIBRO\_CAFÉ.docx  
14 KB

2 attachments (165 KB) Save all to OneDrive Download all

Apreciables autoras y autores,

A partir de la publicación de la obra editorial "**Café mexiquense. Producción, mercado y política pública**" en la que participaron con sus valiosas contribuciones, nos permitimos informarles que el próximo **viernes 6 de octubre de 2023** se llevará a cabo la presentación del libro a las **11 horas** (se adjunta programa). El evento tendrá como sede la **Unidad Académica Profesional UAEMéx de Tejupilco, Estado de México** ubicada en Domicilio Conocido Rincón de Aguirre Tejupilco, México. C. P. 51412 (se adjunta enlace de ubicación).

Esperamos contar con la presencia de distintos actores involucrados con la cafecultura mexiquense como es el caso técnicos, representantes de instituciones públicas, productores de café y académicos. Por tal motivo, consideramos valiosa su asistencia.

Ante cualquier duda relacionada con la presente invitación pueden escribir al correo **Criverar@uamex.mx** o comunicarse al teléfono **7151639878**.

ATENTAMENTE

Francisco Herrera Tapia  
Martín Rubí Arriaga  
Celso Rodrigo Rivera Rojo

Coordinadores

## **Comportamiento de las poblaciones de roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en parcelas de Amatepec, Estado de México.**

Aurelio Pérez Constantino<sup>1</sup>, José Francisco Ramírez Dávila\*<sup>2</sup>, Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>3</sup>, Delfina de Jesús Pérez López<sup>3</sup>, Martha Deniss Urtado Nader<sup>1</sup>, Dulce Karen Figueroa Figueroa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de doctorado del Programa en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca–Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139 Ce: aperezc023@alumno.uaemex.mx.

<sup>2</sup>Profesor-Investigador responsable del laboratorio de Entomología de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca–Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139 Ce: jfrd@uaemex.mx.

<sup>3</sup> Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca–Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139.

<sup>4</sup> Profesora de la Universidad Mexiquense del Bicentenario, UES Coatepec Harinas, Estado de México, dulce.figueroa@umb.mx, Orcid: 0000-0002-1482-5295

**RESUMEN.** - Uno de los problemas fitosanitarios más comunes en los países productores de café es la roya, la cual es ocasionada por el hongo *Hemileia vastatrix*, es una enfermedad muy agresiva que ataca a las hojas de los cafetos de la mayoría de las variedades comerciales pertenecientes a *Coffea arabica* que se cultivan en la mayor parte de las regiones cafetaleras de nuestro país. La roya provoca defoliaciones, puede presentar una reducción en el rendimiento causando pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México. Para poder focalizar las medidas de control, resulta importante conocer la distribución espacial y la dinámica que siguen las enfermedades como la roya del café. La aplicación de métodos geoestadísticos facilita ésta labor. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue “establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en un municipio productor de café en el Estado de México” Los mapas elaborados muestran la presencia de centros de agregación, y una distribución ajustada a modelos de tipo esférico, exponencial y gaussiano.

**Palabras clave:** krigeado ordinario, agregación, café, Roya

## **INTRODUCCIÓN**

Dentro de estas entidades productoras, el Estado de México cuenta con aproximadamente 549.06 ha sembradas de café de las cuales se obtiene una producción de 622.29 toneladas, distribuidos en ocho municipios de la entidad, en donde está presente la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), estos municipios son catalogados como “Zonas bajo control fitosanitario” por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SIAP, 2020).

## 1.1. Antecedentes.

La roya del cafeto es uno de los problemas fitosanitarios más comunes en el cultivo del café (APS, 2011), es causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, fue encontrada por primera vez en México en 1981 en la región cafetalera del municipio de Tapachula, Chiapas, en esta época no reporto daños considerables a la producción, el clima era más estable y varios años atrás se hicieron campañas de prevención, se mantuvo en buen estado las plantaciones y el rendimiento y la Roya no tuvo los efectos negativos que se pronosticaban (Castillo, 2013). Pero para el periodo comprendido entre el año 2010-2012, se comenzaron a detectar y reportar brotes atípicos de *Hemileia vastatrix* en algunos países de Centroamérica, principalmente en Guatemala, El Salvador, Nicaragua, etc., según Cristancho et al., 2012 los incrementos en la incidencia de la enfermedad ocasionaron pérdidas de hasta un 30% en el rendimiento.

Para el 2012 las condiciones de los cafetales en México eran diferentes y poco favorables en comparación con 1981, había un mal manejo de los cafetales y abandono total o parcial de las huertas todo como consecuencia del descenso en los precios causado por el exceso de oferta de café en el mercado mundial que según Aguilar, 2013 fue una caída permanente, con ligeras recuperaciones, desde abril de 1997 hasta el 2002. Lo anterior sumado al poco apoyo de los gobiernos causo del 2004 al 2016 provocó una disminución en superficie sembrada y producción de café (Siap, 2020) evidenciando una notable desarticulación de todo el Sistema Productivo Café en México (Senasica, 2018). En este año hubo aumento en la incidencia de la roya, principalmente en la región del Soconusco y Chiapas como consecuencia del cambio climático causado por el fenómeno del niño, a la llegada de la enfermedad el hongo encontró huertas avejentadas, poco manejo agronómico y poca inversión gubernamental, lo anterior genero la necesidad de generar y desarrollar información en temas de producción y fitosanidad en el sector cafetalero.

En este mismo año el SENASICA, ANACAFE y diversos sectores de investigación, realizaron un diagnóstico para conocer de la condición regional epidémica de la roya en el estado de Chiapas, derivado de lo anterior se pudo concluir lo siguiente: a) La situación fitosanitaria del café es similar a la que ocurre en otros países de Centroamérica y Sudamérica, b) La condición atípica es debido a condiciones climáticas (incremento acumulado de precipitación en zonas entre los 800-1,000 msnm), c) Manejo agronómico no adecuado del cultivo por parte del sector productivo (variedades, regulación de sombra, manejo de tejido, edad de las plantaciones, fertilización, control de malezas), d) ausencia de sistemas de monitoreo de enfermedades y control preventivo y d) desconocimiento de la fenología del cultivo en los últimos años (SENASICA, 2018).

Como resultado de la detección de las necesidades del sector cafetalero, a partir del 2013 el SENASICA a través de la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV) diseñó y puso en marcha en Chiapas, Guerrero

y Veracruz un programa de vigilancia epidemiológica como elemento para la toma de decisiones fitosanitarias basado en el seguimiento de la epidemiología de la roya a través del tiempo permitiendo delimitar focos regionales de infección y control de roya (SENASICA, 2018).

En el año 2014 se detectó presencia la roya del cafeto en el estado de México, las condiciones de los cafetales eran igual o peor que el resto del país: huertas en su mayoría avejentadas o con poco manejo, además de productores con poco conocimiento del cultivo que en su mayoría solo acudían a la huerta en época de cosecha. En 2016 a través del Comité de Sanidad Vegetal se incorporó en las acciones de vigilancia y control de la roya del café. Resultado de este programa de vigilancia según la Plataforma epidemiológica de la Roya del Cafeto del SENASICA en la entidad, *Hemileia vastatrix* ha sido cambiante con tendencia a la baja, del año 2016 año con mayor severidad al 2018, pero en 2019 a la fecha las condiciones han ido a la alta debido a un aumento en severidad de roya en hoja y planta, lo que representó mayor disponibilidad de inoculo para el ciclo 2021, lo que podría resultar en un aumento en severidad y surgimiento de nuevos focos de infestación si no se realizan las actividades de control y si las condiciones regionales de la roya del cafeto se mantienen. Estas condiciones son generalizadas a nivel estado y/o municipio. Esto implica que zonas a nivel predio y planta no son representadas o difieren de las condiciones expresadas de forma regional, y que tengan una distribución espacial, incidencia y densidad mayor o menor de la roya.

Con lo mencionado, es de gran relevancia conocer distribución espacial de *Hemileia vastatrix* con el objetivo de elaborar programas de manejo integrado pertinentes y ecológicos, por lo que el desarrollo exacto y eficiente de métodos de muestreo y de valoraciones de riesgo se vuelve indispensable (Acevedo et al, 2016), para contar con estudios de distribución espacial y densidad más específicos que permitan obtener información precisa que ayude a realizar acciones de control y manejo de la roya más localizados, de tal manera que se puedan dirigir no solo las acciones de control químico sino también, las acciones de manejo cultural y preventivo durante el tiempo y el espacio del cultivo. Los métodos de la estadística espacial son una opción para conocer y determinar las zonas con grados de infestación que requieran un control inmediato, ya que los estudios geoestadísticos tienen en cuenta la naturaleza bidimensional de la distribución de los organismos a través de su localización espacial (Ramírez y Porcayo 2010), así también detectar posibles preferencias en su estructura de agregación y detectar zonas que no presenten infestación. Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en un municipio productor de café en el Estado de México con la metodología de la Geoestadística, bajo la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) presentan una distribución en agregados y se encuentran

dispersas por toda el área de estudio.

### 1.1.Importancia de la roya del cafeto.

#### *Impacto económico de la plaga.*

El cultivo de café es de gran importancia como producto agrícola en el comercio internacional y nacional, en el caso específico del estado de México es una fuente generadora de empleos en toda su cadena productiva, una disminución en el rendimiento o un encarecimiento en los costos de producción por la roya significa un gran impacto en la economía de los productores y comerciantes del aromático cuyas economías dependen directo o indirectamente del café (APS, 2011).

La roya del cafeto está ampliamente distribuida en la mayoría de los países con producción de café (EPPO, 2014). Es la enfermedad de mayor importancia económica y la más destructiva del cultivo en el mundo ya que provoca la caída temprana del follaje afectando la fotosíntesis, debilita la planta y en condiciones de infección alta llega a causar la muerte de ramas e incluso de los arboles (APS, 2011). Las variaciones en las condiciones climáticas derivado del calentamiento global, y un manejo poco adecuado del cultivo como uso de variedades susceptibles, mala nutrición, ausencia de podas y el mal manejo fitosanitario han generado un comportamiento inusual de la enfermedad tanto en estado de México como en todas las regiones cafetaleras del mundo (Cristancho et al., 2012). Este comportamiento atípico del hongo se traduce en una mayor incidencia y severidad de la enfermedad que ha afectado y continúa afectando en Estado de México a 546.06 ha de café que para el ciclo con una producción de 622.29 ton con un valor de \$4, 826,680.20, una mínima reducción en estos valores representa un gran impacto para la economía local y regional (tabla 1) (SIAP, 2020).

Tabla 1: Datos del cierre agrícola 2020 del SIAP 2020; elaboración propia con datos del SIAP.

Municipio	Unidad de Medida	Cultivo	Sup. Sembrada (ha)	Volumen de la producción (ton)	Valor de la producción (\$)	Destino de la producción
San Simón de Guerrero	Tonelada	Café cereza	19	14.03	\$109,306.50	
Temascaltepec	Tonelada	Café cereza	47.5	47.84	\$367,766.40	
Tejupilco	Tonelada	Café cereza	16.36	10.63	\$68,882.40	
Amatepec	Tonelada	Café cereza	338.2	393.18	\$3,597,597.00	Europa (Lituania),
Tlatlaya	Tonelada	Café cereza	34	21.32	\$176,956.00	Asia (Japón),
Ocuilan	Tonelada	Café cereza	14	29.33	\$108,044.30	Ciudad de México,
Sultepec	Tonelada	Café cereza	60	72.6	\$274,428.00	Mercado local.
Malinalco	Tonelada	Café cereza	20	33.36	\$123,699.60	
<b>Total</b>			<b>549.06</b>	<b>622.29</b>	<b>\$4,826,680.20</b>	

### *Ciclo biológico*

La infección de la roya comienza con la aparición de síntomas en el envés de la hoja, se empiezan a observar puntos cloróticos del grosor de un alfiler estas se convierten en manchas pálidas que van aumentando en tamaño conforme avanza el tiempo hasta llegar a unirse hasta formar las manchas amarillas o naranjas con presencia de esporas en forma de polvo amarillo característico de la enfermedad (Rivillas *et al.*, 2011).

Se requieren ciertas condiciones necesarias para que las esporas germinen, estas son: seis horas con presencia de agua libre en las hojas, la temperatura ambiental tiene que estar entre los 21-25 °C y sombra. Después que las esporas de *Hemileia vastatrix* germinan, el hongo entra en las hojas las hojas a través de las estomas de las hojas maduras. Después de esto el hongo genera haustorios, que son las estructuras que extraen nutrientes de las células de la planta, en promedio treinta días después de la colonización se empiezan a generar los soros o estructuras encargadas para producir nuevas urediniósporas para generar un nuevo ciclo (Rayner, 1961).

En Estado de México, según el SENASICA basado en muestreos realizados en el ciclo de cultivo 2017, las condiciones inductivas mencionadas se generan entre el mes de mayo y el mes de noviembre, durante este periodo se presentan varios ciclos de la enfermedad que generan inoculo que con ayuda de las condiciones climáticas como la lluvia son transportados a otra planta u otra parcela formando focos de infección.

## II. MÉTODOLOGÍA

### 2.1. Materiales y métodos.

El presente trabajo se realizó durante dos años, en el periodo comprendido entre septiembre de 2020 y agosto de 2022 los municipios de Amatepec (Localidad: Amatepec) del Estado de México, que tiene una altitud promedio de 1389 msnm, clima templado y una temperatura media de 23°C (Cardoso, 1999).

El área de estudio fueron seis parcelas de 0.5 hectáreas, con un sistema de policultivo tradicional con una mezcla de variedades de café caturra y típica de manejo convencional, entre 40 y 60% de sombra compuesta de árboles de parota, fresnos, naranjas y limones y especie semi leñosas como la higuera, 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 (DGPS) 4 árboles 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 catorce días en 12 hojas por estrato registrado datos de incidencia de roya usando la escala de severidad e incidencia del SENASICA para detectar presencia o ausencia.

#### *Factores Climáticos*

Se colocó un sensor climático dataloggers HOBO Pro V2 que registro datos de temperatura y humedad relativa en la parcela más central, con el objetivo de contribuir a explicar el comportamiento espacial del hongo *Hemileia vastatrix*, el sensor registró datos cada media hora, y se sacaron las medias, mínimas y las máximas de temperatura y humedad relativa.

#### *Análisis de datos.*

Los datos de muestreo (georreferenciación y muestreo), fueron concentrados en bases de datos por fecha de muestreo para su análisis.

#### *Estadística clásica.*

Con la finalidad de realizar una comparación de los resultados en el análisis de datos de muestreo de la estadística espacial con la estadística no espacial (clásica), se utilizaron los siguientes métodos generales de estadística clásica que sirven para establecer la distribución espacial de los organismos:

Las distribuciones estadísticas y los índices de dispersión. Los índices que se usaron son los Índices de Dispersión (índice de dispersión y el Índice de Green), así como las distribuciones estadísticas (Binomial

Negativa y Poisson).

#### *Análisis Geoestadístico*

##### *Análisis Exploratorio de Datos*

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para comprobar que cumplan con los requisitos o supuestos necesarios para utilizar la estadística espacial: Normalidad de los datos, heterogeneidad de la variable y más de 100 unidades muestréales.

La variable presento una base de heterogeneidad, se utilizaron 200 unidades muestréales por parcela y se corroboró la normalidad de los datos utilizando la prueba de Curtosis y el coeficiente de asimetría, cumpliendo así con las condiciones necesarias para trabajar con estadística espacial (Chilés y Delfiner, 1999. Fernández, 2003).

La auto correlación espacial se analizó mediante variogramas (semivariogramas). Partiendo de los datos de muestreo de roya (% de roya) más la ubicación precisa de la planta hospedera, se estimó de forma empírica el semivariograma subyacente y se calculó los parámetros del modelo del semivariograma (efecto pepita, meseta y rango) con el programa variowin, además se realizaron mapas de incidencia a partir de la técnica conocida como kriging con el programa surfer 16 (software para análisis de datos espaciales en 2D. Spring Verlag, Nueva York; USA.) y el WinGslib 2002 (Maldonado *et al.*, 2017).

##### *Estimación del Semivariograma Experimental*

Para cada fecha de muestreo se realizó un semivariograma experimental, se estimó sobre la base de los datos referidos a la incidencia de roya con el programan variowin 2.2.

El semivariograma experimental correspondiente a cada muestreo se realizó empleando empleó el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Análisis in 2D. Spring Verlag, New Cork, USA) y el WinGslib 2002.

##### *Estimación de los parámetros del modelo de Semivariograma*

Una vez estimado el correspondiente semivariograma experimental se ajustaron a semivariogramas usando el software Variowin 2.0, entendiéndose como semivariogramas teóricos una expresión analítica sencilla que se emplean para representar semivariogramas reales (Gallardo A. 2006.). Los modelos teóricos a los que se buscó ajustar los semivariogramas experimentales fueron Modelo Esférico, Modelo Exponencial, Modelo Gaussiano, Modelo Logarítmico, Modelo Efecto Pepita Puro, Modelo Efecto Agujero, Modelo Monómico que son los más comunes según (Gallardo A. 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).

Modelo Esférico: Es indicativo para fenómenos para fenómenos continuos pero no derivables, alcanza la meseta a una distancia finita. Modelo Exponencial: es representativos de fenómenos continuos, alcanza su meseta de forma asintótica. Modelo Gaussiano: alcanza su meseta asintóticamente. Se emplea para

representar fenómenos continuos en todos sus puntos, pero derivables. Modelo Logarítmico: este variograma no está definido en el origen y no tiene meseta. Modelo Efecto Pepita Puro: es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial, o sea puramente aleatorio. Modelo Efecto Agujero: es utilizado para fenómenos con componentes periódicas. Modelo Monómico: estos variogramas no tienen meseta y tienden al infinito. Se utilizan para representar fenómenos no estacionarios (Gallardo A. 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).

#### *Validación*

Los modelos se validaron ajustando a los semivariogramas experimentales con el procedimiento denominado validación cruzada (IICA, 2014; Gallardo A. 2006). Con este procedimiento no paramétrico, se eliminó un valor muestral y se empleó el método de interpolación geoestadístico denominado krigado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restantes valores muestrales, este proceso se efectuó sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación cruzada (Media de los errores de estimación (MEE), Error cuadrático medio (ECM), Error cuadrático medio adimensional (ECMA) (Gallardo A. 2006; Isaaks y Srivastava, 1989 y Hevesi et al., 1992).

#### *Nivel de dependencia espacial*

Se calculó el nivel de dependencia espacial dividiendo el efecto pepita entre la meseta (valor en el cual el modelo alcanza el rango) con el fin de conocer el grado de relación entre los datos, el resultado según la fórmula se expresa en porcentaje y compara con el siguiente criterio: menor de 25 % el nivel de dependencia espacial es alta, entre 26 y 75 % el nivel de dependencia espacial es moderado y mayor del 76 % el nivel de dependencia es bajo (IICA, 2014; López-Granados et al., 2002), es decir entre más grande sea el valor del resultado el nivel de incidencia de roya de una planta dependerá más del nivel de incidencia que conformen un foco de infección.

#### *Elaboración de mapas*

Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes se validaron, con el método geoestadístico denominado Krigado Ordinario se elaboraron los mapas de densidad de las poblaciones de la roya utilizando el programa Surfer 16 y se calculó la superficie infectada.

#### *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. El cálculo se realizó tomando en cuenta cuatro aplicaciones de cyproconazol para control de roya a un intervalo de 30 días en las fechas que regularmente se aplica en la región.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### *Factores Climáticos*

De acuerdo a los datos registrados en los sensores climáticos se puede decir que los meses con mayor humedad relativa del periodo de evaluación fue de mayo a agosto, que corresponde a la temporada de lluvia, por su lado la temperatura presento un alza en los meses correspondientes al periodo de secas (Figura 1). Esto concuerda con la figura 2, ya que las horas favorables probablemente se presentaron en los meses de mayor humedad junio a agosto y según la figura 2, son los meses en los que no se detectó roya o esporas sobre las hojas de café debido al arrastre de estas a otras plantas para empezar un nuevo ciclo en cuanto las condiciones óptimas se presenten (Coria *et al*, 2014).

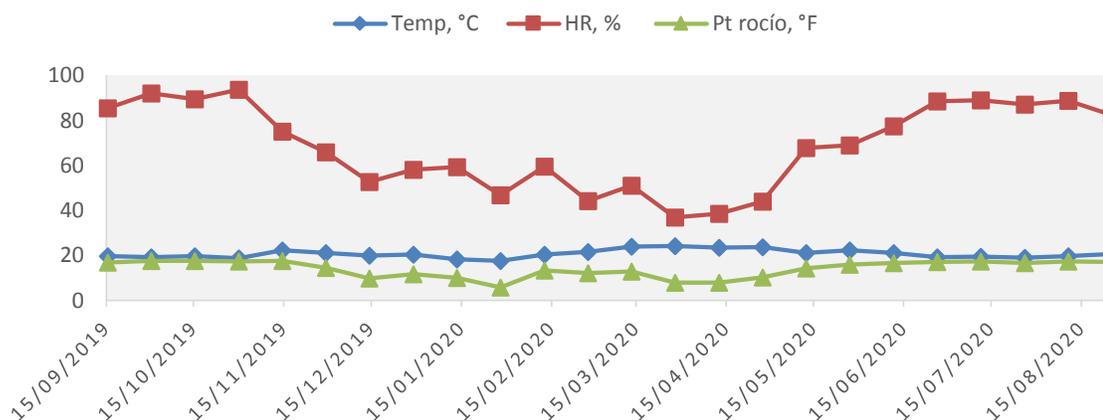


Figura 1. Datos climáticos de Amatepec, elaboración propia con datos recolectados con el sensor climático dattalogers HOBO Pro V2. en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021.

#### *Estadística clásica.*

Basado en las siguientes premisas: a) índice de dispersión con un valor mayor a uno es un comportamiento en agregados y con valores menores es aleatorio y, b) Índice de Green con un valor mayor a cero es una distribución agregada y los iguales a cero son aleatorios, el comportamiento de los datos con el análisis en las pruebas de estadística clásica mostró que la mayoría de los comportamientos de los índices fueron agregados en ambas pruebas (tabla 2).

En la comparación de resultados de las diferentes pruebas de estadística clásica es notable una limitante en éstos métodos en cuanto a la precisión para detectar comportamientos de distribución espacial de roya en el cultivo del café, como sucede el caso de los resultados poisson y binomial negativa en los muestreos correspondientes a junio 2 de la parcela uno; marzo 1, agosto 1 y agosto 2 de la parcela dos; y mayo 2 y junio 1 de la parcela cuatro que se ajustaron tanto a una distribución Binomial Negativa (agregación) como

a una distribución de Poisson (aleatoriedad) (tabla 2).

De igual manera en los índices de Dispersión y Green, en marzo 2, abril 1, junio 1, julio 1, julio2 de la parcela 1; marzo 1, abril 1, junio 1, junio 2 de la parcela 2; abril 2, mayo 1, julio 1, julio2, agosto 1 de la parcela 3; abril 1, mayo 1, junio 1, junio 2, agosto 2 de la parcela 4; abril 1, abril 2, junio 1, agosto 1, de la parcela 5 y abril 2, mayo 1, julio2, agosto 1 de la parcela 6 se ajustan a una distribución agregada en una y aleatoria en la otra (tabla 2).

El valor grande de  $k$  causa que los comportamientos de los datos sean aleatorio y agregado en las pruebas de binomial negativa y poisson para la misma fecha de muestreo, aunque binomial negativa lo detecta como agregado, la agregación es muy débil por lo que poisson lo detecta como aleatorio, por lo que al realizar el ajuste estadístico por máxima verosimilitud, ambos modelos se ajusten a los datos indistintamente (Cole, 1946; Morris, 1954; Southwood, 1978 y Taylor, 1984).

Las pruebas de Green y dispersión detectaron los dos tipos de comportamiento aleatoriedad y agregación para la misma fecha muestreo como por ejemplo en marzo 2 para la parcela 1 índice de dispersión mostro agregación y green aleatoreidad. Demostrando que hay limitantes para evaluar distribuciones en el comportamiento de plagas con estadística clásica, autores como como Ramírez, 2009, también encontraron limitaciones en sus estudios de comportamiento espacial, esto podría deberse a que estas pruebas no toman en cuenta la naturaleza bidimensional de las poblaciones (espacio-tiempo), por lo que la información que se obtiene tiene un límite en el análisis de la variable, así como su aplicación.

Tabla 2. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas de la roya del café, elaboración propia con datos de los muestreos en parcelas de Amatepec en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021.

PARCELA	FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	$k$
parcela 1	marzo 1	2.11s	0.58	NS	S	2.14
	marzo 2	1.65s	0	NA	NA	-
	abril 1	0.65ns	0.31	NS	S	0.96
	abril 2	1.97s	0.96	NS	S	4.19
	mayo 1	2.08s	0.74	NA	NA	-
	mayo 2	1.27s	0.69	NS	S	3.71
	junio 1	1.74s	0	NS	S	2.64
	junio 2	1.82s	0.92	S	S	33.81
	julio 1	0.33ns	0.28	NS	S	4.73
	julio2	0.72ns	0.17	NS	S	0.85
	agosto 1	1.35s	0.70	NS	S	1.26
	agosto 2	1.49s	0.49	NS	S	4.28
	parcela 2	marzo 1	1.63s	0	S	S
marzo 2		1.34s	0.62	NS	S	2.74
abril 1		1.88s	0	NS	S	1.09
abril 2		1.57s	0.37	NS	S	3.43
mayo 1		2.17s	0.41	NS	S	2.59
mayo 2		1.96s	0.86	NS	S	1.92
junio 1		1.48s	0	NS	S	0.68
junio 2		0.29ns	0.59	NS	S	4.16
julio 1		2.05s	0.34	NS	S	3.49
julio2		0.52ns	0.17	NS	S	2.61
agosto 1		2.35s	0.59	S	S	39.73

PARCELA	FECHA	ÍNDICE DE DISPERSIÓN	ÍNDICE DE GREEN	POISSON	BINOMIAL NEGATIVA	k
parcela 3	agosto 2	1.25s	0.18	S	S	35.14
	marzo 1	2.83s	0.94	NS	S	3.65
	marzo 2	2.72s	0.38	NS	S	2.18
	abril 1	2.09s	0.29	NS	S	0.57
	abril 2	1.66s	0	NS	S	1.19
	mayo 1	2.13s	0	NS	S	2.74
	mayo 2	1.90s	0.31	NA	NA	-
	junio 1	2.61s	0.82	NS	S	4.52
	junio 2	2.87s	0.77	NS	S	3.11
	julio 1	0.79ns	0.52	NA	NA	-
	julio2	1.35s	0	NS	S	2.84
	agosto 1	0.44ns	0.34	NS	S	3.68
agosto 2	1.24s	0.15	NS	S	2.13	
parcela 4	marzo 1	1.17	0.21	NS	S	0.13
	marzo 2	2.58	0.96	NA	NA	-
	abril 1	1.29	0	NS	S	3.29
	abril 2	1.60	0.54	NS	S	2.06
	mayo 1	0.57ns	0.79	NS	S	4.28
	mayo 2	1.46	0.63	S	S	32.10
	junio 1	0.44ns	0.51	S	S	38.14
	junio 2	0.31ns	0.28	NS	S	5.05
	julio 1	2.75	0.14	NS	S	3.14
	julio2	2.31	0.29	NS	S	2.37
	agosto 1	1.92	0.46	NS	S	0.59
	agosto 2	2.48	0	NS	S	1.72
marzo 1	1.19	0.53	NS	S	1.84	
parcela 5	marzo 2	2.06	0.40	NA	NA	-
	abril 1	0.34ns	0.18	NS	S	3.67
	abril 2	2.84	0	NS	S	1.32
	mayo 1	1.29	0.79	NS	S	2.66
	mayo 2	2.33	0.35	NS	S	3.75
	junio 1	1.75	0	NS	S	3.07
	junio 2	2.92	0.59	NA	NA	2.45
	julio 1	2.56	0.40	NS	S	1.97
	julio2	1.38	0.25	NS	S	0.53
	agosto 1	0.85ns	0.79	NS	S	2.85
	agosto 2	1.64	0.25	NS	S	3.77
	marzo 1	1.39	0.25	NS	S	2.77
marzo 2	1.55	0.60	NA	NA	-	
abril 1	1.28	0.39	NS	S	1.94	
abril 2	0.62ns	0.86	NS	S	0.36	
mayo 1	2.09	0	NS	S	3.89	
mayo 2	2.48	0.46	NS	S	2.45	
junio 1	1.74	0.25	NS	S	5.13	
junio 2	1.44	0.17	NS	S	2.19	
julio 1	2.39	0.92	NS	S	1.65	
julio2	0.48	0.45	NA	NA	-	
agosto 1	1.57	0	NA	NA	-	
agosto 2	2.88	0.31	NS	S	1.36	

**Nota:** S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada

### Análisis Geoestadístico

Con los datos obtenidos de los muestreos se generó la modelización espacial y derivado de los 12 muestreos por cada una de las 6 parcelas se obtuvieron 72 semivariogramas, los cuales fueron ajustados. Para todas las parcelas en las diferentes fechas de muestreo presento una pepita ligeramente por arriba de cero, rangos entre los 2.6 y 20.4, dependencia espacial alta, se ajustaron a un modelo esférico, exponencial y gaussiano (tabla 3).

En el valor de la pepita entre el valor de la meseta revelo una alta dependencia espacial en todas las fechas de muestreo, lo cual indica alta dependencia entre las poblaciones de roya (Cárdenas, 2017; Rossi et al. 1992). El efecto pepita, además, dice que no se encontró errores de muestreo y que la escala utilizada fue la correcta para el levantamiento de datos de la roya del café y que los modelos ajustados tienen un 98% de

certeza (Oliver y Webster, 1998).

Los centros de agregación vistos en los mapas y los modelos muestran aleatoriedad esto como resultado de la diseminación o transporte de esporas del hongo por factores ambientales como el viento, la lluvia y el productor de una parcela a otra (Mora, 2015), con esto se podría conjeturar que los comportamientos esférico, gaussiano y exponencial son comunes para este periodo de evaluación de la enfermedad, estos tres modelos, indican que las agregaciones de la enfermedad se presentan en mayor cantidad en ciertas zonas de la parcela respecto al resto de puntos considerados en el muestreo. El ajuste al modelo esférico evidencia que en el área de muestreo hay zonas en las que se presenta más la enfermedad respecto al resto de puntos muestreados, por lo tanto, se presentan focos de infestación de la plaga que crecen o se dispersan desde una fuente puntual u origen. El modelo gaussiano muestra que los centros de agregación crecen de forma continua dentro del área de muestreo, con lo que se puede suponer que diversos factores promueven una diseminación más rápida de *Hemilea vastatrix*. El modelo exponencial denota un crecimiento de la enfermedad de forma constante en la parcela (Acosta, 2017).

Tabla 3. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia de roya del café en la parcela 1, elaboración propia con datos de los muestreos en parcelas de Amatepec en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021.

PARCELA	FECHA	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.	
parcela 1	marzo 1	3.935	32.37263819	exponencial	0.29	39.48	16.8	0.007345491	alta	
	marzo 2	3.938	32.37263819	exponencial	0.29	44.18	19.8	0.006564056	alta	
	abril 1	4.885	55.8610804	gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184094	alta	
	abril 2	4.888	55.8610804	gaussiano	0.01	54.32	4.75	0.000184094	alta	
	mayo 1	4.43	30.69859296	gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602151	alta	
	mayo 2	4.43	30.69859296	gaussiano	1	29.76	2.56	0.033602151	alta	
	junio 1	0.43	4.728743719	-	-	-	-	-	-	
	junio 2	0.42	4.728743719	-	-	-	-	-	-	
	julio 1	0.4	4.728743719	-	-	-	-	-	-	
	julio2	0.41	4.728743719	-	-	-	-	-	-	
	agosto 1	2.46	10.84261307	esférico	1	10.45	3.48	0.09569378	alta	
	agosto 2	2.46	10.84261307	esférico	1	10.45	3.48	0.09569378	alta	
	parcela 2	marzo 1	8.84	45.5119598	exponencial	0.01	44.16	16.8	0.000226449	alta
		marzo 2	8.84	45.5119598	exponencial	0.01	44.16	16.8	0.000226449	alta
abril 1		9.715	50.6168593	esférico	0.99	48.45	18	0.020433437	alta	
abril 2		9.72	50.6168593	esférico	0.99	48.45	18	0.020433437	alta	
mayo 1		8.885	51.91133166	esférico	1	46.8	20.4	0.021367521	alta	
mayo 2		8.888	51.91133166	esférico	1	46.8	20.4	0.021367521	alta	
junio 1		0.46	4.330050251	-	-	-	-	-	-	
junio 2		0.48	4.330050251	-	-	-	-	-	-	
julio 1		0.47	4.330050251	-	-	-	-	-	-	
julio2		0.44	4.330050251	-	-	-	-	-	-	
agosto 1		3.04	13.5561809	exponencial	1	13.02	15.39	0.076804916	alta	
agosto 2		3.041	13.5561809	exponencial	1	13.02	15.39	0.076804916	alta	
parcela 3		marzo 1	7.34	61.06974874	exponencial	1	59.78	7.84	0.016728003	alta
		marzo 2	7.38	61.06974874	exponencial	1	59.78	7.84	0.016728003	alta
	abril 1	5.375	43.35113065	esférico	1	40.48	4.76	0.024703557	alta	
	abril 2	5.378	43.35113065	esférico	1	40.48	4.76	0.024703557	alta	
	mayo 1	6.385	52.12741206	exponencial	1	49.92	6.79	0.020032051	alta	
	mayo 2	6.38	52.12741206	exponencial	1	49.92	6.79	0.020032051	alta	
	junio 1	1.05	6.510050251	-	-	-	-	-	-	
	junio 2	1.04	6.510050251	-	-	-	-	-	-	
	julio 1	1.001	6.510050251	-	-	-	-	-	-	
	julio2	1.01	6.510050251	-	-	-	-	-	-	
	agosto 1	2.125	11.71796482	esférico	1	11.16	5.04	0.089605735	alta	
	agosto 2	2.122	11.71796482	esférico	1	11.16	5.04	0.089605735	alta	
	parcela 4	marzo 1	4.715	24.01384422	gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517007	alta
		marzo 2	4.714	24.01384422	gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517007	alta
abril 1		4.155	22.73464824	esférico	0.01	21.62	9.45	0.000462535	alta	
abril 2		4.161	22.73464825	esférico	0.01	21.62	9.45	0.000462535	alta	

PARCELA	FECHA	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.
	mayo 1	3.63	21.63125628	esférico	1	20.68	10.o8	0.048355899	alta
	mayo 2	3.51	21.63125628	esférico	1	20.68	10.o8	0.048355899	alta
	junio 1	0.46	2.621507538	-	-	-	-	-	-
	junio 2	0.44	2.621507538	-	-	-	-	-	-
	julio 1	0.41	2.621507538	-	-	-	-	-	-
	julio2	0.39	2.621507538	-	-	-	-	-	-
	agosto 1	1.975	13.58228643	esférico	1	12.46	8.82	0.080256822	alta
	agosto 2	1.974	13.58228643	esférico	1	12.46	8.82	0.080256822	alta
	marzo 1	5.165	50.11836683	gaussiano	1	43.5	4.2	0.022988506	alta
	marzo 2	5.164	50.11836683	gaussiano	1	43.5	4.2	0.022988506	alta
	abril 1	4.77	46.31748744	esférico	1	42.3	4.2	0.023640662	alta
	abril 2	4.77	46.31748744	esférico	1	42.3	4.2	0.023640662	alta
	mayo 1	4.265	32.90932161	gaussiano	1	30.69	3.92	0.032583904	alta
	mayo 2	4.265	32.90932161	gaussiano	1	30.69	3.92	0.032583904	alta
parcela 5	junio 1	0.181	2.339296482	-	-	-	-	-	-
	junio 2	0.18	2.339296482	-	-	-	-	-	-
	julio 1	0.17	2.339296482	-	-	-	-	-	-
	julio2	0.18	2.339296482	-	-	-	-	-	-
	agosto 1	2.67	24.9759799	gaussiano	1	24.3458	3.64	0.041074847	alta
	agosto 2	2.68	24.9759799	gaussiano	1	24.3458	3.64	0.041074847	alta
	marzo 1	5.1	46.01005025	gaussiano	1	43.7	4,32	0.022883295	alta
	marzo 2	5.11	46.01005025	gaussiano	1	43.7	4,32	0.022883295	alta
	abril 1	4.59	39.73055276	exponencial	1	39.1987	4,32	0.02551105	alta
	abril 2	4.6	39.73055276	exponencial	1	39.1987	4,32	0.02551105	alta
	mayo 1	4.225	29.31092965	gaussiano	1	27.3	5.04	0.036630037	alta
	mayo 2	4.227	29.31092965	gaussiano	1	27.3	5.04	0.036630037	alta
parcela 6	junio 1	3.76	23.56020101	gaussiano	1	21.6	3.84	0.046296296	alta
	junio 2	3.76	23.56020101	gaussiano	1	21.6	3.84	0.046296296	alta
	julio 1	0.63	4.917688442	-	-	-	-	-	-
	julio2	0.54	4.917688442	-	-	-	-	-	-
	agosto 1	2.84	18.02452261	gaussiano	1	17.46	4.8	0.057273769	alta
	agosto 2	2.84	18.02452261	gaussiano	1	17.46	4.8	0.057273769	alta

### Elaboración de mapas y superficie infestada.

Derivado de los 12 muestreos por cada una de las 6 parcelas se obtuvieron 72 mapas de incidencia de la enfermedad y se calculó la superficie infectada, la escala de colores o varemos de los mapas representan las hojas muestreadas con incidencia de roya y va de 0 a 36 hojas. Estos mapas permitieron ver de forma más gráfica la presencia de la infección del hongo y confirmaron que las poblaciones de *Hemileia vastatrix* se encuentran en centros de agregación (Figura 2).

Estos patrones de agregación muestran la interacción entre los patógenos, o entre los patógenos y el medio, aunque suele existir muchas otras causas probables para la formación de centros de agregación, como el ciclo de vida del patógeno, las características fisiográficas del medio, la naturaleza del hospedero, entre otras (Jiménez *et al* 2014; Tannure *et al*, 2013).

La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en los mapas coincide por lo descrito por Mora, 2015 y Jiménez *et al*, 2013 que describieron el crecimiento de la roya en focos de infección. Estos focos o centros de agregación sirvieron como fuentes y reservorios de inóculo, y tuvieron un crecimiento ascendente en los seis meses de muestreo lo cual coincide con lo reportado por SENASICA en ciclos anteriores. Cabe señalar que en la época de lluvia (septiembre y agosto) hubo poca presencia de roya, lo que podría deberse a que la precipitación lava las esporas visibles de la roya, pero también transporta el inóculo a las hojas y

plantas aledañas, y con la salida de la lluvia, la humedad residual el aumento de temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido de nuevo en la planta de los meses siguientes crean las condiciones óptimas para el surgimiento de focos nuevos y el crecimiento o fortalecimiento de los ya existentes como lo muestra la escala de colores en los mapas, esto concuerda con lo encontrado por Jiménez, 2014 y Mendoza, 2015 quienes estudiaron la producción de inoculo de la roya del café y los factores asociados a su distribución y patogénesis.

El estudio espacial permitió determinar localizaciones en el espacio geográfico de las parcelas midiendo fielmente los fenómenos fitosanitarios, el nivel de dependencia y su estabilidad, lo que permite inferir una mayor efectividad en comparación con la estadística clásica que presentó contradicciones, esto coincide con los estudios realizados por Ramírez y Porcayo 2010 de distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.).

De acuerdo a Acevedo y Jiménez et al, 2014 las sumas de las condiciones inductivas necesarias para la germinación del hongo causante de la roya son conocidas como horas favorables y son temperaturas entre los 20 y 22 °C y humedades relativas por arriba del 90%, y, según los datos registrados por los dattalogers, los meses que reunieron estas condiciones son: septiembre, octubre y noviembre, periodo donde se iniciaron ciclos de infección y reinfección, y según el manual operativo del programa de vigilancia en café 2018 del SENASICA, el periodo de germinación y/o generación de esporas va desde los 26 a los 60 días una vez iniciado el ciclo, esto concuerda con los datos encontrados en campo, en donde el mes uno de muestreo fue el de menor presencia de la roya donde probablemente se iniciaron uno o varios ciclos, y en los siguientes meses la presencia del hongo fue progresiva, siendo los últimos los de mayor presencia, ya que mayor generación de esporas y reinfección a otras hojas o plantas fue aumentando.

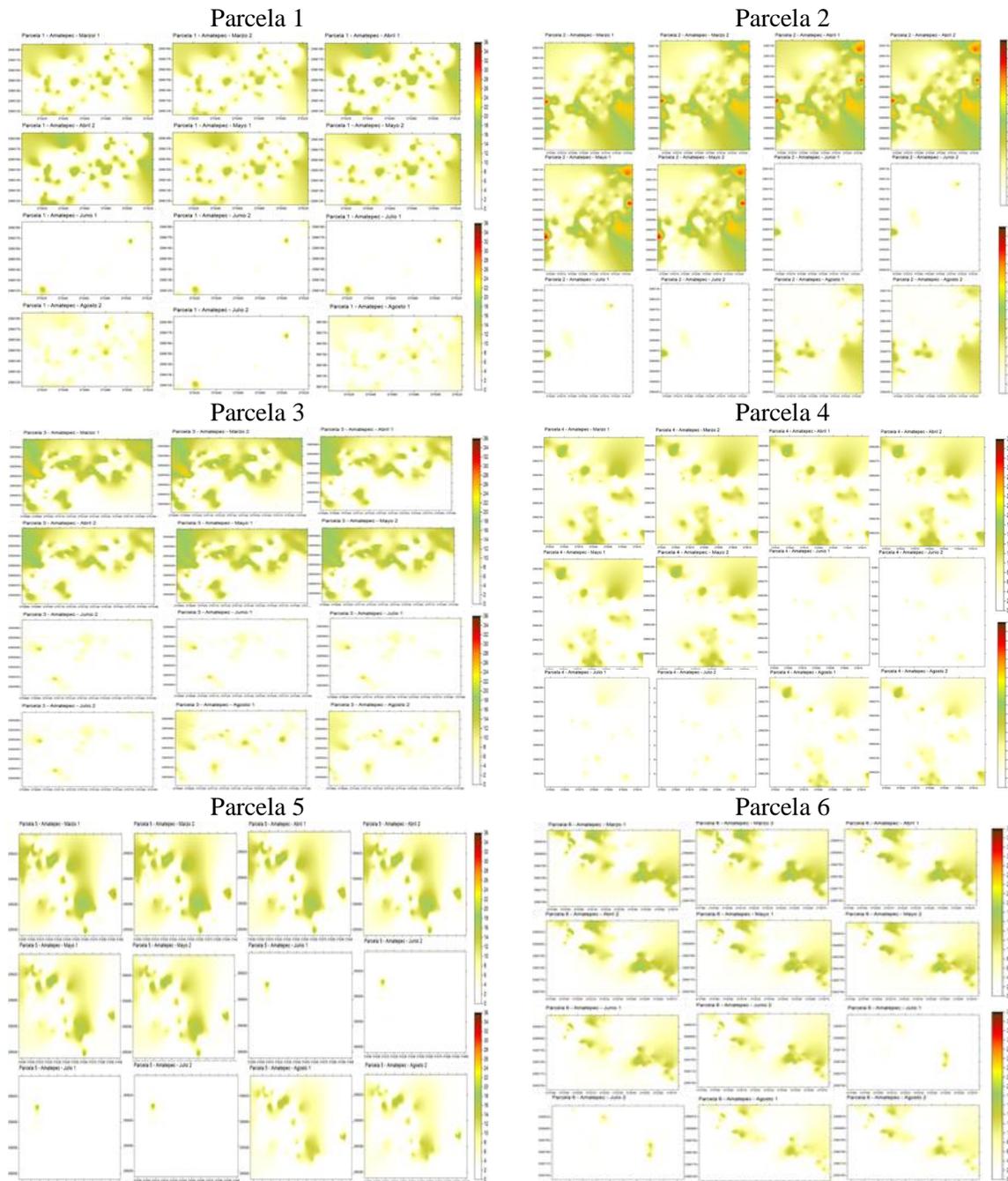


Figura 2. Mapas de incidencias de la roya del café en el municipio de Amatepec, periodo Marzo a agosto de 2022.

En lo que respecta a las superficies infectadas, todas las parcelas muestreadas mostraron un intervalo que va del 4% al 74% en las fechas de muestreo entre marzo y agosto, con un crecimiento de la infección ascendente, y luego un descenso drástico en los meses de lluvia para posteriormente empezar a ascender (tabla 4).

Fue evidente el progreso de la incidencia de *Hemileia vastatrix* en el tiempo con la aparición de nuevos focos en los mapas elaborados a través de las fechas de muestreo, estos mapas de interpolación por Krigin, además permitieron ver los intensidad de la roya en algunas áreas de la parcela, por lo que de manera práctica y tomando en cuenta también el porcentaje de infestación se puede dirigir las estrategias de control de la roya de forma más precisa a las áreas con altos niveles de incidencia reduciendo así los reservorios de inóculo que inician la propagación con el inicio de las lluvias o la cosecha del café, esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra para la aplicación, así también se disminuirá el impacto ambiental debido a que el químico que se aplique será menor. Incorporando la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad, también es útil para identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales como podas de café, podas de sombra, deshierbe, abonado con la finalidad reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento del hongo de la roya (Coria, 2015), justificando así el uso de las técnicas de la agricultura de precisión como una herramienta que permite mantener o reducir los daños causados por la enfermedad en los cafetales del Estado de México (Néstor et al, 2017).

Tabla 4. Porcentaje de superficie infestada por parcela durante el periodo de evaluación.

PARCELA	MUESTREO	SUPERFICIE INFESTADA %	PARCELA	MUESTREO	SUPERFICIE INFESTADA %
parcela 1	marzo 1	54	parcela 2	marzo 1	73
	marzo 2	55		marzo 2	74
	abril 1	57		abril 1	74
	abril 2	58		abril 2	75
	mayo 1	61		mayo 1	73
	mayo 2	62		mayo 2	73
	junio 1	7		junio 1	7
	junio 2	8		junio 2	6
	julio 1	8		julio 1	5
	julio2	9		julio2	5
	agosto 1	62		agosto 1	55
	agosto 2	60		agosto 2	53
parcela 3	marzo 1	52	parcela 4	marzo 1	49
	marzo 2	53		marzo 2	50
	abril 1	55		abril 1	52
	abril 2	55		abril 2	53
	mayo 1	56		mayo 1	53
	mayo 2	56		mayo 2	54
	junio 1	11		junio 1	10
	junio 2	10		junio 2	10
	julio 1	10		julio 1	9
	julio2	12		julio2	8
	agosto 1	29		agosto 1	20
	agosto 2	28		agosto 2	22

parcela 5	marzo 1	55	parcela 6	marzo 1	58
	marzo 2	56		marzo 2	58
	abril 1	57		abril 1	56
	abril 2	58		abril 2	56
	mayo 1	58		mayo 1	57
	mayo 2	59		mayo 2	57
	junio 1	4		junio 1	56
	junio 2	4		junio 2	55
	julio 1	5		julio 1	9
	julio2	5		julio2	9
	agosto 1	27		agosto 1	29
	agosto 2	29		agosto 2	32

*Superficie infestada y ahorro económico.*

En cuanto al ahorro económico y el impacto ambiental, hacer una aplicación tomando en cuenta los mapas de infección se puede ahorrar más de \$600 y 0.5 litros de producto por aplicación, por las cuatro aplicaciones como mínimo que se realizan al año para control de la enfermedad en el estado (tabla 5). Tomando en cuenta que son pequeños productores en su mayoría y que el mercado es reducido, un ahorro de este tamaño se hace significativo, y reduce los costos de producción a través. Además el ahorro ambiental al dejar de tirar producto innecesario se hace notable a corto y mediano plazo reduciendo el riesgo de contaminación de suelo y agua por arrastre de las lluvias y deriva del producto en la aplicación. Un enfoque focalizado y dirigido de estas actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de precisión a través del manejo solo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infección, es capaz de reducir significativamente la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y el daño ambiental, de esta forma se puede encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, sumado a esto los beneficios a la salud se harán evidentes debido a que el riesgo de residualidad de pesticidas en el grano será eventualmente menos, como lo encontrado por Bonilla en 2015 en un estudio de los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay en donde se realizó un análisis económico que evidenció lo conveniente de usar tecnologías y técnicas asociadas a la agricultura de precisión.

Tabla 5. Porcentaje de superficie infestada y ahorro económico y de cyproconazol en cuatro aplicaciones al

Parcela	Muestreo	Superficie infestada %	Costo en agricultura (pesos /ha)		Ahorro (pesos /ha)	fungicida aplicado (l/ha)		Ahorro en fungicida (l/ha)
			Convencional	Precisión		Convencional	Precisión	
parcela 1	Marzo 1	54	825	445.5	379.5	0.5	0.27	0.23
	Junio 1	7	825	57.75	767.25	0.5	0.035	0.465
	Julio 1	8	825	66	759	0.5	0.04	0.46
	Agosto 1	62	825	511.5	313.5	0.5	0.31	0.19
parcela 2	Marzo 1	73	825	602.25	222.75	0.5	0.365	0.135
	Junio 1	7	825	57.75	767.25	0.5	0.035	0.465
	Julio 1	5	825	41.25	783.75	0.5	0.025	0.475
	Agosto 1	55	825	453.75	371.25	0.5	0.275	0.225
parcela 3	Marzo 1	52	825	429	396	0.5	0.26	0.24
	Junio 1	11	825	90.75	734.25	0.5	0.055	0.445
	Julio 1	10	825	82.5	742.5	0.5	0.05	0.45
	Agosto 1	29	825	239.25	585.75	0.5	0.145	0.355
parcela 4	Marzo 1	49	825	404.25	420.75	0.5	0.245	0.255
	Junio 1	10	825	82.5	742.5	0.5	0.05	0.45
	Julio 1	9	825	74.25	750.75	0.5	0.045	0.455
	Agosto 1	20	825	165	660	0.5	0.1	0.4
parcela 5	Marzo 1	55	825	453.75	371.25	0.5	0.275	0.225
	Junio 1	4	825	33	792	0.5	0.02	0.48
	Julio 1	5	825	41.25	783.75	0.5	0.025	0.475
	Agosto 1	27	825	222.75	602.25	0.5	0.135	0.365
parcela 6	Marzo 1	58	825	478.5	346.5	0.5	0.29	0.21
	Junio 1	56	825	462	363	0.5	0.28	0.22
	Julio 1	9	825	74.25	750.75	0.5	0.045	0.455
	Agosto 1	29	825	239.25	585.75	0.5	0.145	0.355

año por parcela con un método convencional y otro considerando los mapas de infección por fecha de

muestreo.

## **CONCLUSIONES**

Los métodos no espaciales presentaron serias deficiencias y limitaciones para evaluar la distribución de roya del café, a diferencia del método espacial que permitió determinar perfectamente el tipo de distribución. El análisis geostatístico indicó alta dependencia espacial.

Los índices de dispersión y las distribuciones estadísticas mostraron de manera general un comportamiento agregado de la roya. Los centros de agregación son aleatorios y se presentan como focos de infección dentro de la parcela. Los mapas son una herramienta útil para calcular un ahorro económico basado en la superficie infestada.

Es importante conocer el porcentaje de infección así como la ubicación de los focos de infección y el proceso epidemiológico de la enfermedad, y de esta manera realizar un control dirigido que permita un ahorro económico y menor deterioro al ambiente al reducir la cantidad de químicos a aplicar.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACEVEDO-SÁNCHEZ G. Y MORA-AGUILERA. 2016. Desarrollo de REG-NCafé v1.0 para determinar n-sitios de monitoreo-muestreo regional de Roya del Cafeto en México usando criterio epidemiológicos ponderados. In. 49° Congreso Brasileiro de Fitopatología, 29 agosto – 01 septiembre. Alagoas Maceio. Brasil.
- ACOSTA-GUADARRAMA, A. D., RAMÍREZ-DÁVILA, J. F., RIVERA-MARTÍNEZ, R., FIGUEROA-FIGUEROA, D. K., LARA-DÍAZ, A. V., MALDONADO-ZAMORA, F. I., & TAPIA-RODRÍGUEZ, A. (2017). Distribución Espacial de Trips spp.(Thysanoptera) y Evaluación de su Control Mediante el Depredador *Amblyseius swirskii* en el Cultivo de Aguacate en México. *Southwestern Entomologist*, 42(2), 435-446.
- APS. 2011. The American Phytopathological Society. Coffee rust (*Hemileia vastatrix*). En línea:<http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx>. Fecha de consulta: 08 de septiembre de 2020.
- BONILLA, C., TERRA, J. A., GUTIÉRREZ, L., & ROEL, Á. (2015). Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 112-121.
- COLE, L. 1946. A theory for analyzing contagiously distributed populations. *Ecology*. 27: 329 –341.
- CÁRDENAS PARDO NJ, DARGHAN A, SOSA RICO MD, RODRIGUEZ A. Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta biol. Colomb.* 2017;22(2):209-220. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>.
- CORIA-CONTRERAS, J., MORA-AGUILERA, G., MARTÍNEZ-BOLAÑOS, M., GUZMÁN-DEHEZA, A., ACEVEDO-SÁNCHEZ, G. Y FLORES-SÁNCHEZ, J. 2014. Fluctuación estacional de uredosporas de *Hemileia vastatrix* en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32 (S):42.
- CHILÉS y DELFINER, P. 1999. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons, Nueva York. Pp.695.
- Gallardo A. 2006. Geostadística. Departamento de Ecología y Biología Animal. Facultad de Biología, Campus de Lagoas-Marcosende, Universidad de Vigo, 36310 Vigo. Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide. . *Ecosistemas*. 2006/3 (URL: [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id\\_Categoria=1&tipo=portada](http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id_Categoria=1&tipo=portada))
- HEVESI, J., ISTOK, J. y FLINT, A. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part. I. Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*. 31 (7): 661 – 680.
- ISAAKS, E. H. y SRIVASTAVA, R.M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, Nueva York. Pp.561.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA (IICA), 2014.MANUAL DE DEPRECISIÓN AGRICULTURA, Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., JURADO-EXPÓSITO, M., ATENCIANO, S., GARCÍA-FERRER, A., SÁNCHEZ, M. y GARCÍA-TORRES, L. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil*. 246: 97-105.
- MALDONADO FI, RAMÍREZ JF, LARA AV, ACOSTA DA, RIVERA R Y RODRÍGUEZ TA. 2017. Mapeo de la distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en parcelas comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec Harinas, Estado de México. *Ecosistemas* 26(2): 52-60. <https://doi.org/19.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- MORAL G. F. 2004. Aplicación de la geostadística en las ciencias ambientales. *Revista Ecosistemas*. 13

(1): 78-86.

- MORA-AGUILERA, G., ACEVEDO-SÁNCHEZ G., GLORIA CONTRERAS J., GONZALEZ-GOMEZ R., LÓPEZ-BUENFIL, A. Y JAVIER – LOPEZ, M., A. 2015. Aertas tempranas para el manejo de focos de roya del cafeto en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33 (S): 62
- PERRY, N. y KLUKOWSKY, Z. 1997. Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. VI Conferencia de la sociedad de biometría. Córdoba, España. Pp. 103- 108.
- RAMÍREZ-DÁVILA, J. F., GONZÁLEZ-ANDUJAR, J. L., LÓPEZ, M. A., y OCETE, R. 2005. Modelización y mapeo de la distribución espacial de las ninfas del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergevin & Zanon) (Hemiptera: Cicadellidae) en viñedo. *Bol. San. Veg. Plagas*. 31: 119-132.
- RAMÍREZ-DAVILA, J. F., GONZÁLEZ-ANDUJAR, J. L., OCETE, R. y LÓPEZ, M. A. 2002. Descripción geoestadística de la distribución espacial de los huevos del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae), en viñedo: modelización y mapeo. *Boletín de Sanidad Vegetal Plagas*. 28:235-240.
- ROSSI, R., MULLA, J., JOURNEL, G. & FRANZ, H. 1992. Geostatistical Tools for Modeling and interpreting Ecological Spatial Dependence. *Ecological Monographs*, 62: 277-314.
- SENASICA. 2018. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. <https://www.gob.mx/senasica> (consulta: 2 junio 2018).
- SIAP. 2019. Anuario estadístico de la producción agrícola. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx) (consulta: 17 marzo 2019).
- SYRJALA, E. 1996. A statistical test for a difference between the spatial distributions of two populations. *Ecology*. 77 (1): 75-80.
- TANNURE, C. L., MAZZA, S. M. Y GIMÉNEZ, L.I. Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*).
- TREMATERA, P. Y SCIARRETTA, A. 2002. Spatial distribution of some beetles infesting a feed mill with spatio-temporal dynamics of *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum*. *Journal of Stored Products Research*. 40: 363-377. a arabica

## **7.3 Otros resultados**

### **7.3.1 Identificación de la presencia de la roya 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 en los tres municipios muestreados, lo que indica que la presencia de esta enfermedad está en todo el estado; la afectación a las plantas fue variada, pero se concentró en el estrato bajo, lo cual se explica debido al autosombreado por la mayor cantidad de hojas presentes.

### **7.3.2 Análisis geoestadístico (semivariogramas)**

Para este estudio, se generaron un total de 432 semivariogramas utilizando el software Variowin, reconocido por su alta precisión en el ajuste a modelos teóricos. Estos semivariogramas se basaron en los datos recopilados sobre la infestación de las hojas, los cuales fueron cuantificados en muestreos realizados catorcenalmente durante un año en los tres municipios seleccionados para la investigación. Se identificaron modelos exponenciales y esféricos, siendo el tipo esférico el que se destacó principalmente para explicar la distribución de la plaga en los tres municipios. La validación de estos modelos se llevó a cabo mediante el método de validación cruzada, con estadísticas organizadas en tablas específicas para cada parcela y municipio muestreados, detalladas más adelante. Utilizando el software Surfer 9, se crearon mapas de densidad de las poblaciones de la roya. En estos mapas, se observan áreas destacadas en color rojo, denominadas centros de agregación, que se presumen como los lugares de origen de la infestación.

### **7.3.3 Ahorro económico y ambiental**

Los costos relacionados con la aplicación de fungicidas realizada por los productores

durante dos ciclos de cultivo fueron obtenidos. El gasto promedio por ciclo fue de aproximadamente 3600 pesos por hectárea, aplicando flutriafol como químico curativo y considerando tres aplicaciones por ciclo de cultivo. Se desglosaron los costos económicos y de producto al aplicar solo en las zonas infectadas, utilizando las tablas que detallaban la superficie infestada de cada parcela en cada municipio. Se puede observar el gasto generado por una aplicación tradicional de flutriafol en toda la parcela, con un costo de 3600 pesos. Posteriormente, se muestra el gasto solo en las áreas infestadas, donde varía según el porcentaje de infestación. Este cálculo se llevó a cabo para todas las parcelas en los tres municipios, y los resultados difieren debido a la variabilidad en las condiciones climáticas presentes en las zonas de estudio.



## 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 °C 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 kriging 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 explican la distribución espacial de las enfermedades en los cultivos y coadyuvar en el diseño de un control integral.

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 aspecto 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).

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

---

- Se determinó la relación entre la roya del cafeto la fenología del cultivo y los factores ambientales.
- El ciclo de la roya empieza con el inicio de las lluvias, sin embargo su mayor presencia y severidad fue en los meses de diciembre a marzo, los cuales corresponden a la cosecha y termino de esta,
- La distribución espacial de la roya se determinó en los tres municipios productores de café en el Estado de México.
- La aplicación de estadística espacial, especialmente la Geoestadística, demostró ser una herramienta eficaz para analizar el comportamiento espacial de las poblaciones y el daño causado por *Hemileia vastatrix*.
- Se logró modelar el comportamiento espacial de la roya del café mediante Geoestadística utilizando dos modelos (Esférico y Gaussiano), ambos con un efecto pepita igual a cero o entre cero y 1 en todos los casos.
- Se evidencio un comportamiento en agregados que se lograron ver como focos de infestación en los mapas obtenidos mediante la técnica del krigado.
- Se identificó una alta dependencia espacial.
- Los mapas generados son útiles para la estimación de la superficie infestada y la estabilidad espacio-temporal.
- 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.
- Las técnicas de geo estadísticas y el análisis SADIE permitieron identificar la

distribución espacial en agregados de la roya del café, algunos puntos de agregación en la parcela se mantienen durante el ciclo de cultivo y otros aparecen de forma aleatoria, creciendo o disminuyendo hacia las áreas colindantes durante el ciclo fenológico del café debido a las condiciones climáticas que se presentan en las áreas muestreadas.

## X. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- Alvarado, M., & Rojas, G. (1994). *Cultivo y beneficiado del café - Alvarado Soto Alvarado S.* - Google Libros. Cultivo y beneficiado del café.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=15qrSG-51l4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=taxonomia+del+cafe&ots=Og\\_4v1P65H&sig=NCH7Rr vk\\_BhWO4nbAu0sbNJHx0Q#v=onepage&q=taxonomia del cafe&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=15qrSG-51l4C&oi=fnd&pg=PR7&dq=taxonomia+del+cafe&ots=Og_4v1P65H&sig=NCH7Rr vk_BhWO4nbAu0sbNJHx0Q#v=onepage&q=taxonomia del cafe&f=false)
- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., & Wicke, H. (2002). Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). *Annals of Applied Biology*, 141(1), 19–27.  
<https://doi.org/10.1111/J.1744-7348.2002.TB00191.X>
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501–1511.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (1999). Modeling Spatial Uncertainty. *Geostatistics*.
- David Acosta-Guadarrama, A., Francisco Ramírez-Dávila, J., Rivera-Martínez, R., Figueroa-Figueroa, D. K., Lara-Díaz, A. V., & Maldonado-Zamora, I. (2017). Distribución Espacial de *Trips* spp. (Thysanoptera) y Evaluación de su Control Mediante el Depredador *Amblyseius swirskii* en el Cultivo de Aguacate en México. *Bio One COMPLETE*, 42, 435–446. <https://doi.org/10.3958/059.042.0214>
- Englund, E. J., & Sparks, A. R. (1988). *GEO-EAS (Geostatistical environmental assessment software) user's guide*.

- Enriquez, E.; Bejarano, S.; Vila, V. (1975). Observaciones sobre avispas predadoras de /*Leucoptera coffeella*/ Guer-Men, en el Centro y Sur del Perú. *Revista Peruana de Entomología*, 18(0), 82–83.
- Estrada León, D. (s/f). *Manejo de plagas y enfermedades del café*. Recuperado el 7 de septiembre de 2022, de <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/2303>
- Fernández-Casal, R. (2003). *Geostatística Espacio-Temporal. Modelos Flexibles de Variogramas Anisotropicos no Separables*.
- Hevesi, J. A., Istok, J. D., & Flint, A. L. (1992). Estimación de precipitación en terreno montañoso mediante geoestadística multivariante. Parte I: Análisis Estructural. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31, 661–676.
- Higuera, V. E., & García, Y. J. (2014). Núm. 6 14 de agosto-27 de septiembre. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 923–935.
- Historia del café y su cultivo | Instituto Nacional de la Economía Social | Gobierno |*

- gob.mx.* (s/f). Recuperado el 1 de marzo de 2022, de  
<https://www.gob.mx/inaes/es/articulos/historia-del-cafe-y-su-cultivo?idiom=es>
- Isaaks, E. H., & Srivastava, M. R. (1989). *Applied geostatistics*. *New York* .: *Oxford University Press*, 0(0), 561.
- Jarra, A. Á., Francisco Ramírez-Dávila, J., Rivera Martínez, R., Karen, D., & Figueroa, F. (2021). *Distribucion espacial de (copturus aguacatae) kissinger en el cultivo de aguacate en mexicO*.  
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/111217>
- Jiménez-Martínez, E., & Josué Jarquín, E. (2021). *Universidad Nacional Agraria Plagas de Cultivos. II*.
- José Francisco Ramírez Dávila, Víctor Manuel Solares, Alonso, Dulce KarenFigueroa Figueroa, Jesús Ricardo, & Sánchez Pale1. (2013).  
*comportamiento espacial de trips (insecta: thysanoptera), en plantaciones comerciales de aguacate (persea americana mill.)en zitácuaro, michoacán, méxico*.  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/azm/v29n3/v29n3a7.pdf>
- Leon, J. (1987). *Botánica de los cultivos tropicales - Jorge León - Google Libros*. *Botanica de los cultivos*.  
[https://books.google.cl/books?id=bOMNAQAAlAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cl/books?id=bOMNAQAAlAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Maldonado, F. I., Ramirez, J. F., Lara, A. V., Acosta, D. A., Rivera, R., & Tapia Reyes, A. (2017). Mapeo de la distribución espacial de trips (Insecta:Thysanoptera) en parcelas

- comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec Harinas, Estado de México.  
*Ecosistemas*, 26(2), 52–60. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Maldonado Zamora, F. I., Ramírez Dávila, J. F., Rubí Arriaga, M., Antonio Némiga, X., & Lara Díaz, A. V. (2017). Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(4), 845.  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i4.259>
- Montes r., c., Patiño, o. a., & Cadena, r. a. (2012). Infestación e incidencia de broca, roya y mancha de hierro en cultivo de café del departamento del cauca. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 98–108.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612012000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612012000100012&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Moral García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(0), 78–86.
- MyCoffeeBox.com. (2015). *Enfermedades del café, plagas que amenazan al buen café*. Enfermedades del cafe, plagas que amenazan el buen cafe.  
<https://mycoffeebox.com/enfermedades-del-cafe-plagas-que-amenazan-al-buen-cafe/>
- Nowierski, R. M., & Gutierrez, A. P. (1986). Microhabitat Distribution and Spatial Dispersion Patterns of the Walnut Aphid, *Chromaphis juglandicola* (Homoptera: Aphididae), in California. *Environmental Entomology*, 15(0), 555–561.
- PARRA, J. R. P. (1985). Biología comparada de *Perileucoptera coffeella* (Guérin-Mèneville, 1842) (Lepidoptera, Lyonetiidae) visando ao seu zoneamento ecológico no

- estado de São Paulo. *Revista Brasileira de entomologia*, 29(1), 45–73.
- Pérez-Soto, F., Figueroa-Hernández, E., & Godínez-Montoya, L. (2015). Importancia de la comercialización del café en México. En *Handbook*.
- Perez Alvarez, R., Arguelles Cardenas, J., & Aguilera Garramuño, E. (2010). Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. *Corpoica Ciencias de Tecnologias Agropecuarias*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945028002>
- Ramirez Davila, J. F., Gonzalez Andujar, J. L., Lopez Martinez, M. A., & Ocete, R. (2005). Modelización y mapeo de la distribución espacial de las ninfas del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergevin & Zanon) (Hemiptera, Cicadellidae) en viñedo. *Bol. San. Veg. Plagas*, 31(0), 119–132.
- Ramirez Davila, J. F., Gonzalez Andujar, J. L., Ocete, R., & Lopez Martinez, M. A. (2002). Descripción geoestadística de la distribución espacial de los huevos del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae) en viñedo: modelización y mapeo. *Bol. San. Veg. Plagas*, 28(0), 87–95.
- Rámirez Dávila, J. F., Sánchez Pale, J. R., & De León, C. (2011). Stability of the Temporal Spatial Distribution of Corn Head Smut (*Sporisorium reilianum*) in the State of Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 29, 1–14.
- Ruiz Rivera, N., & Galicia, L. (2016). La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Investigaciones Geograficas*, 89(89), 137–153. <https://doi.org/10.14350/rig.47515>
- Sciarretta, A., Zinni, A., Mazzocchetti, A., & Trematerra, P. (2008). Spatial Analysis of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Male Population in a Mediterranean

Agricultural Landscape in Central Italy. *Environmental Entomology*, 37(2), 382–390.

<https://doi.org/10.1093/EE/37.2.382>

SIAP. (2018). *México, onceavo productor mundial de café* | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | *gob.mx*. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural.

<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es>

Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J. F., Figueroa-Figueroa, D. K., Salgado-Siclan, M.

L., Serrato-Cuevas, R., Tapia-Rodríguez, A., Ramírez-Dávila, J. F., Figueroa-

Figueroa, D. K., Salgado-Siclan, M. L., & Serrato-Cuevas, R. (2020). Análisis

espacial de antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México. *Revista mexicana de fitopatología*, 38(1), 132–145.

<https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1911-1>

Taylor, L. R., & Woiwod, I. P. (1982). Comparative Synoptic Dynamics. I. Relationships

Between Inter- and Intra-Specific Spatial and Temporal Variance/Mean Population

Parameters. *Journal of Animal Ecology*, 51(0), 879–906.

Vanegas-Carrillo, R., Ramírez-Dávila, J. F., Rivera-Martínez, R., Vanegas-Carrillo, R.,

Ramírez-Dávila, J. F., & Rivera-Martínez, R. (2021). Distribución espacial de mosca mexicana de la fruta (*Anastrepha* spp.) (Diptera: Tephritidae) en Michoacán, México.

*Revista Colombiana de Entomología*, 47(1).

Vanegas, F. (2016). *COMPOSICIÓN DEL FRUTO DEL CAFÉ* - | *Coffee Media* .

Página Web. <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/06/05/composicion-del-fruto-del-cafe/>

## ANEXOS

### 1. Análisis Geoestadístico

Cuadro. Parámetros (efecto pepita, rango, media, varianza, pepita/meseta y nivel de dependencia espacial) de los modelos ajustados a los semivariogramas, semivariogramas y mapas de Roya del café Café en Temascaltepec 2020- 2021.

UE	M	Med	Var	Md	P	Ms	R	P/Ms	DE.	%I	UE	M	Med	Var	Md	P	Ms	R	P/Ms	DE.	%I
1	1	2.50	10.84	3	0	10.12	20.4	0	alta	35	2	1	3.04	13.56	3	0	13.16	22.8	0	alta	63
1	2	3.19	10.80	3	0	10.23	19.2	0	alta	35	2	2	3.24	14.56	3	0	14.1	16.8	0	alta	63
1	3	3.32	11.85	3	0	11.6	16.8	0	alta	35	2	3	3.45	15.22	3	0	14.72	21.6	0	alta	64
1	4	3.50	13.89	3	0	13.16	20.4	0	alta	35	2	4	3.95	18.42	3	0	17.67	25.196	0	alta	64
1	5	4.13	17.01	3	0	15.64	15.6	0	alta	36	2	5	4.56	21.15	3	0	20.24	19.2	0	alta	65
1	6	4.47	19.15	3	0	18.4	18	0	alta	36	2	6	5.38	24.19	3	0	20.24	20.4	0	alta	65
1	7	4.96	25.29	3	0	22.62	14.4	0	alta	37	2	7	6.21	27.28	3	0	26.6	19.2	0	alta	67
1	8	5.01	25.41	3	0	23.4	16.8	0	alta	37	2	8	6.72	30.38	3	0	20.24	19.2	0	alta	67
1	9	5.70	32.68	3	0	31.68	18	0	alta	38	2	9	7.90	39.87	3	0	38.8	18	0	alta	68
1	10	6.16	33.39	3	0	31.9589	16.992	0	alta	39	2	10	8.84	45.51	3	0	43.5237	19.2	0	alta	70
1	11	6.56	41.28	3	0	39.48	16.8	0	alta	39	2	11	9.72	50.62	3	0	20.02	19.2	0	alta	71
1	12	7.05	46.23	3	0	44.18	19.8	0	alta	40	2	12	8.89	51.91	3	0	46.8	21.6	0	alta	72
3	1	2.125	11.717965	3	0	11.04	22.8	0	alta	55	4	1	1.98	13.58	3	0	12.74	24	0	alta	48
3	2	2.645	13.747714	3	0	13.02	26.4	0	alta	55	4	2	2.28	14.53	3	0	12.88	24	0	alta	49
3	3	3.475	16.893844	3	0	16.4894	24	0	alta	56	4	3	1.98	13.58	3	0	12.74	20.08	0	alta	49
3	4	4.105	18.255251	3	0	17.67	19.8	0	alta	56	4	4	2.52	15.15	3	0	14.56	20.8	0	alta	49
3	5	4.955	35.349724	3	0	24	21.6	0	alta	57	4	5	3.02	17.58	3	0	17.1	17.6	0	alta	50
3	6	4.495	24.934648	3	0	33.48	22.8	0	alta	57	4	6	3.33	19.36	3	0	19.2	21.6	0	alta	50
3	7	5.375	43.351131	3	0	41.36	21.6	0	alta	58	4	7	3.63	21.63	3	0	21.34	21.6	0	alta	51
3	8	5.595	46.483392	3	0	44.18	19.2	0	alta	59	4	8	4.16	22.73	3	0	21.56	16.8	0	alta	52
3	9	6.385	52.127412	3	0	49.92	18	0	alta	59	4	9	4.16	22.73	3	0	22.08	16	0	alta	52
3	10	6.855	56.024095	3	0	53.76	20.4	0	alta	60	4	10	4.21	23.38	3	0	22.95	17.8	0	alta	53
3	11	7.34	61.069749	3	0	59.78	18	0	alta	62	4	11	4.72	24.01	3	0	23.5	16.4	0	alta	54
3	12	7.91	64.16	3	0	62.08	19.2	0	alta	63	4	12	4.78	24.43	3	0	24	18.4	0	alta	54
5	1			3	0	22.75	17.6	0	alta	41	6	1			3	0	17.46	15.96	0	alta	61
5	2			3	0	26.39	22	0	alta	41	6	2			3	0	19.4	16.8	0	alta	62
5	3			3	0	23.4225	14.197	0	alta	42	6	3			3	0	17.64	18.48	0	alta	62
5	4			3	0	24.99	18.7	0	alta	42	6	4			3	0	18.9	23.52	0	alta	63
5	5			3	0	27	19.8	0	alta	42	6	5			3	0	22.7	22.68	0	alta	64
5	6			3	0	27.49	20.9	0	alta	43	6	6			3	0	23.8	18.48	0	alta	65

5	7			3	0	30	20.9	0	alta	43	6	7			3	0	29.1	21	0	alta	65
5	8			3	0	34.4	19.8	0	alta	44	6	8			3	0	30.08	19.32	0	alta	66
5	9			3	0	43.71	23.1	0	alta	44	6	9			3	0	38.4	17.64	0	alta	66
5	10			3	0	40.92	22	0	alta	45	6	10			3	0	41.8	17.64	0	alta	67
5	11			3	0	46.5	25.3	0	alta	46	6	11			3	0	44.62	24.36	0	alta	68
5	12			3	0	47.52	16.5	0	alta	46	6	12			3	0	45.6	23.52	0	alta	69

-20

1	13	3.94	32.37	1	0.29	39.48	16.8	0.007345	alta	35	2	13	8.84	45.51	1	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	63
1	14	3.94	32.37	1	0.29	44.18	19.8	0.006564	alta	35	2	14	8.84	45.51	1	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	63
1	15	4.89	55.86	2	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	35	2	15	9.72	50.62	3	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	64
1	16	4.89	55.86	2	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	35	2	16	9.72	50.62	3	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	64
1	17	4.43	30.70	2	1	29.76	2.56	0.033602	alta	36	2	17	8.89	51.91	3	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	65
1	18	4.43	30.70	2	1	29.76	2.56	0.033602	alta	36	2	18	8.89	51.91	3	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	65
1	19	0.43	4.73	-	-	-	-	-	-	37	2	19	0.46	4.33	-	-	-	-	-	-	67
1	20	0.42	4.73	-	-	-	-	-	-	37	2	20	0.48	4.33	-	-	-	-	-	-	67
1	21	0.40	4.73	-	-	-	-	-	-	38	2	21	0.47	4.33	-	-	-	-	-	-	68
1	22	0.41	4.73	-	-	-	-	-	-	39	2	22	0.44	4.33	-	-	-	-	-	-	70
1	23	2.46	10.84	3	1	10.45	3.48	0.095694	alta	39	2	23	3.04	13.56	1	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	71
1	24	2.46	10.84	3	1	10.45	3.48	0.095694	alta	40	2	24	3.04	13.56	1	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	72

3	13	7.34	61.069749	1	1	59.78	7.84	0.016728	alta	55	4	13	4.72	24.01	2	1	23.52	7.98	0.042517	alta	48
3	14	7.38	61.069749	1	1	59.78	7.84	0.016728	alta	55	4	14	4.71	24.01	2	1	23.52	7.98	0.042517	alta	49
3	15	5.375	43.351131	3	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	56	4	15	4.16	22.73	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	49
3	16	5.378	43.351131	3	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	56	4	16	4.16	22.73	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	49
3	17	6.385	52.127412	1	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	57	4	17	3.63	21.63	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	50
3	18	6.38	52.127412	1	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	57	4	18	3.51	21.63	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	50
3	19	1.05	6.5100503	-	-	-	-	-	-	58	4	19	0.46	2.62	-	-	-	-	-	-	51
3	20	1.04	6.5100503	-	-	-	-	-	-	59	4	20	0.44	2.62	-	-	-	-	-	-	52
3	21	1.001	6.5100503	-	-	-	-	-	-	59	4	21	0.41	2.62	-	-	-	-	-	-	52
3	22	1.01	6.5100503	-	-	-	-	-	-	60	4	22	0.39	2.62	-	-	-	-	-	-	53
3	23	2.125	11.717965	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	62	4	23	1.98	13.58	3	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	54
3	24	2.122	11.717965	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	63	4	24	1.97	13.58	3	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	54

5	13	5.165	50.118367	2	1	43.5	4.2	0.0229885	alta	41	6	13	5.10	46.01	2	1	43.7	4,32	0.0228833	alta	61
5	14	5.164	50.118367	2	1	43.5	4.2	0.0229885	alta	41	6	14	5.11	46.01	2	1	43.7	4,32	0.0228833	alta	62
5	15	4.77	46.317487	3	1	42.3	4.2	0.0236407	alta	42	6	15	4.59	39.73	1	1	39.1987	4,32	0.0255111	alta	62
5	16	4.77	46.317487	3	1	42.3	4.2	0.0236407	alta	42	6	16	4.60	39.73	1	1	39.1987	4,32	0.0255111	alta	63
5	17	4.265	32.909322	2	1	30.69	3.92	0.0325839	alta	42	6	17	4.23	29.31	2	1	27.3	5.04	0.03663	alta	64
5	18	4.265	32.909322	2	1	30.69	3.92	0.0325839	alta	43	6	18	4.23	29.31	2	1	27.3	5.04	0.03663	alta	65
5	19	0.181	2.3392965	-	-	-	-	-	-	43	6	19	3.76	23.56	2	1	21.6	3.84	0.0462963	alta	65
5	20	0.18	2.3392965	-	-	-	-	-	-	44	6	20	3.76	23.56	2	1	21.6	3.84	0.0462963	alta	66
5	21	0.17	2.3392965	-	-	-	-	-	-	44	6	21	0.63	4.92	-	-	-	-	-	-	66
5	22	0.18	2.3392965	-	-	-	-	-	-	45	6	22	0.54	4.92	-	-	-	-	-	-	67
5	23	2.67	24.97598	2	1	24.3458	3.64	0.0410748	alta	46	6	23	2.84	18.02	2	1	17.46	4.8	0.0572738	alta	68

**Nota: \* % I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café. DE:**

**dependencia espacial; 1: modelo esférico; 2: modelo gaussiano; 3: modelo exponencial**

Cuadro. Parámetros (efecto pepita, rango, media, varianza, pepita/meseta y nivel de dependencia espacial) de los modelos ajustados a los semivariogramas, semivariogramas y mapas de Roya del café Café en Temascaltepec 2021- 2022.

UE	M	Med	Var	Md	P	Ms	R	P/Ms	DE.	%I	UE	M	Med	Var	Md	P	Ms	R	P/Ms	DE.	%I
1	25	2.20	10.24	3	0	10.12	20.4	0	alta	33	2	25	2.74	12.96	3	0	13.16	22.8	0	alta	59
1	26	2.89	10.20	3	0	10.23	19.2	0	alta	33	2	26	2.94	13.96	3	0	14.1	16.8	0	alta	59
1	27	3.02	11.25	3	0	11.6	16.8	0	alta	33	2	27	3.15	14.62	3	0	14.72	21.6	0	alta	60
1	28	3.20	13.29	3	0	13.16	20.4	0	alta	33	2	28	3.65	17.82	3	0	17.67	25.196	0	alta	60
1	29	3.83	16.41	3	0	15.64	15.6	0	alta	34	2	29	4.26	20.55	3	0	20.24	19.2	0	alta	61
1	30	4.17	18.55	3	0	18.4	18	0	alta	34	2	30	5.08	23.59	3	0	20.24	20.4	0	alta	61
1	31	4.66	24.69	3	0	22.62	14.4	0	alta	35	2	31	5.91	26.68	3	0	26.6	19.2	0	alta	63
1	32	4.71	24.81	3	0	23.4	16.8	0	alta	35	2	32	6.42	29.78	3	0	20.24	19.2	0	alta	63
1	33	5.40	32.08	3	0	31.68	18	0	alta	36	2	33	7.60	39.27	3	0	38.8	18	0	alta	64
1	34	5.86	32.79	3	0	31.9589	16.992	0	alta	37	2	34	8.54	44.91	3	0	43.5237	19.2	0	alta	66
1	35	6.26	40.68	3	0	39.48	16.8	0	alta	37	2	35	9.42	50.02	3	0	20.02	19.2	0	alta	67
1	36	6.75	45.63	3	0	44.18	19.8	0	alta	38	2	36	8.59	51.31	3	0	46.8	21.6	0	alta	68
3	25	1.83	11.12	3	0	11.04	22.8	0	alta	53	4	25	1.68	12.98	3	0	12.74	24	0	alta	44
3	26	2.35	13.15	3	0	13.02	26.4	0	alta	53	4	26	1.98	13.93	3	0	12.88	24	0	alta	45
3	27	3.18	16.29	3	0	16.4894	24	0	alta	54	4	27	1.68	12.98	3	0	12.74	20.08	0	alta	45
3	28	3.81	17.66	3	0	17.67	19.8	0	alta	54	4	28	2.22	14.55	3	0	14.56	20.8	0	alta	45
3	29	4.66	34.75	3	0	24	21.6	0	alta	55	4	29	2.72	16.98	3	0	17.1	17.6	0	alta	46
3	30	4.20	24.33	3	0	33.48	22.8	0	alta	55	4	30	3.03	18.76	3	0	19.2	21.6	0	alta	46
3	31	5.08	42.75	3	0	41.36	21.6	0	alta	56	4	31	3.33	21.03	3	0	21.34	21.6	0	alta	47
3	32	5.30	45.88	3	0	44.18	19.2	0	alta	57	4	32	3.86	22.13	3	0	21.56	16.8	0	alta	48
3	33	6.09	51.53	3	0	49.92	18	0	alta	57	4	33	3.86	22.13	3	0	22.08	16	0	alta	48
3	34	6.56	55.42	3	0	5376	20.4	0	alta	58	4	34	3.91	22.78	3	0	22.95	17.8	0	alta	49
3	35	7.04	60.47	3	0	59.78	18	0	alta	60	4	35	4.42	23.41	3	0	23.5	16.4	0	alta	50
3	36	7.61	63.56	3	0	62.08	19.2	0	alta	61	4	36	4.48	23.83	3	0	24	18.4	0	alta	50
5	25			3	0	22.75	17.6	0	alta	39	6	25			3	0	17.46	15.96	0	alta	57
5	26			3	0	26.39	22	0	alta	39	6	26			3	0	19.4	16.8	0	alta	58
5	27			3	0	23.4225	14.197	0	alta	40	6	27			3	0	17.64	18.48	0	alta	58
5	28			3	0	24.99	18.7	0	alta	40	6	28			3	0	18.9	23.52	0	alta	59
5	29			3	0	27	19.8	0	alta	40	6	29			3	0	22.7	22.68	0	alta	60
5	30			3	0	27.49	20.9	0	alta	41	6	30			3	0	23.8	18.48	0	alta	61
5	31			3	0	30	20.9	0	alta	41	6	31			3	0	29.1	21	0	alta	61
5	32			3	0	34.4	19.8	0	alta	42	6	32			3	0	30.08	19.32	0	alta	62
5	33			3	0	43.71	23.1	0	alta	42	6	33			3	0	38.4	17.64	0	alta	62
5	34			3	0	40.92	22	0	alta	43	6	34			3	0	41.8	17.64	0	alta	63
5	35			3	0	46.5	25.3	0	alta	44	6	35			3	0	44.62	24.36	0	alta	64

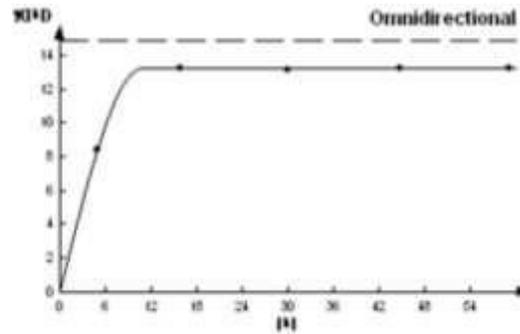
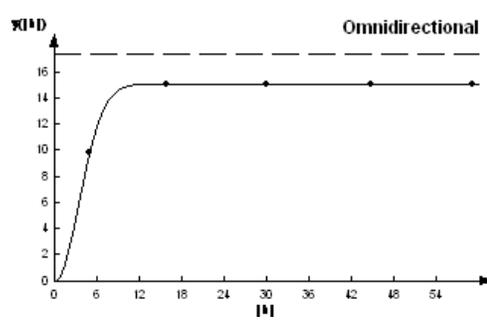
5	36			3	0	47.52	16.5		0	alta	44	6	36			3	0	45.6	23.52		0	alta	65
											-22												-14
1	37	3.64	31.77	1	0.29	39.48	16.8	0.007345	alta	33	2	37	8.54	44.91	1	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	59		
1	38	3.64	31.77	1	0.29	44.18	19.8	0.006564	alta	33	2	38	8.54	44.91	1	0.01	44.16	16.8	0.0002264	alta	59		
1	39	4.59	55.26	2	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	33	2	39	9.42	50.02	3	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	60		
1	40	4.59	55.26	2	0.01	54.32	4.75	0.000184	alta	33	2	40	9.42	50.02	3	0.99	48.45	18	0.0204334	alta	60		
1	41	4.13	30.10	2	1	29.76	2.56	0.033602	alta	34	2	41	8.59	51.31	3	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	61		
1	42	4.13	30.10	2	1	29.76	2.56	0.033602	alta	34	2	42	8.59	51.31	3	1	46.8	20.4	0.0213675	alta	61		
1	43	0.13	4.13	-	-	-	-	-	-	35	2	43	0.16	3.73	-	-	-	-	-	-	-	63	
1	44	0.12	4.13	-	-	-	-	-	-	35	2	44	0.18	3.73	-	-	-	-	-	-	-	63	
1	45	0.10	4.13	-	-	-	-	-	-	36	2	45	0.17	3.73	-	-	-	-	-	-	-	64	
1	46	0.11	4.13	-	-	-	-	-	-	37	2	46	0.14	3.73	-	-	-	-	-	-	-	66	
1	47	2.16	10.24	3	1	10.45	3.48	0.095694	alta	37	2	47	2.74	12.96	1	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	67		
1	48	2.16	10.24	3	1	10.45	3.48	0.095694	alta	38	2	48	2.74	12.96	1	1	13.02	15.39	0.0768049	alta	68		
3	37	7.04	60.47	1	1	59.78	7.84	0.016728	alta	53	4	37	4.42	23.41	2	1	23.52	7.98	0.042517	alta	44		
3	38	7.08	60.47	1	1	59.78	7.84	0.016728	alta	53	4	38	4.41	23.41	2	1	23.52	7.98	0.042517	alta	45		
3	39	5.08	42.75	3	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	54	4	39	3.86	22.13	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	45		
3	40	5.08	42.75	3	1	40.48	4.76	0.0247036	alta	54	4	40	3.86	22.13	3	0.01	21.62	9.45	0.0004625	alta	45		
3	41	6.09	51.53	1	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	55	4	41	3.33	21.03	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	46		
3	42	6.08	51.53	1	1	49.92	6.79	0.0200321	alta	55	4	42	3.21	21.03	3	1	20.68	10.08	0.0483559	alta	46		
3	43	0.75	5.91	-	-	-	-	-	-	56	4	43	0.16	2.02	-	-	-	-	-	-	-	47	
3	44	0.74	5.91	-	-	-	-	-	-	57	4	44	0.14	2.02	-	-	-	-	-	-	-	48	
3	45	0.70	5.91	-	-	-	-	-	-	57	4	45	0.11	2.02	-	-	-	-	-	-	-	48	
3	46	0.71	5.91	-	-	-	-	-	-	58	4	46	0.09	2.02	-	-	-	-	-	-	-	49	
3	47	1.83	11.12	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	60	4	47	1.68	12.98	3	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	50		
3	48	1.82	11.12	3	1	11.16	5.04	0.0896057	alta	61	4	48	1.67	12.98	3	1	12.46	8.82	0.0802568	alta	50		
5	37	4.87	49.52	2	1	43.5	4.2	0.0229885	alta	39	6	37	4.80	45.41	2	1	43.7	4.32	0.0228833	alta	57		
5	38	4.86	49.52	2	1	43.5	4.2	0.0229885	alta	39	6	38	4.81	45.41	2	1	43.7	4.32	0.0228833	alta	58		
5	39	4.47	45.72	3	1	42.3	4.2	0.0236407	alta	40	6	39	4.29	39.13	1	1	39.1987	4.32	0.0255111	alta	58		
5	40	4.47	45.72	3	1	42.3	4.2	0.0236407	alta	40	6	40	4.30	39.13	1	1	39.1987	4.32	0.0255111	alta	59		
5	41	3.97	32.31	2	1	30.69	3.92	0.0325839	alta	40	6	41	3.93	28.71	2	1	27.3	5.04	0.03663	alta	60		
5	42	3.97	32.31	2	1	30.69	3.92	0.0325839	alta	41	6	42	3.93	28.71	2	1	27.3	5.04	0.03663	alta	61		
5	43	0.181	1.74	-	-	-	-	-	-	41	6	43	3.46	22.96	2	1	21.6	3.84	0.0462963	alta	61		
5	44	0.18	1.74	-	-	-	-	-	-	42	6	44	3.46	22.96	2	1	21.6	3.84	0.0462963	alta	62		
5	45	0.17	1.74	-	-	-	-	-	-	42	6	45	0.33	4.32	-	-	-	-	-	-	-	62	
5	46	0.18	1.74	-	-	-	-	-	-	43	6	46	0.24	4.32	-	-	-	-	-	-	-	63	
5	47	2.67	24.38	2	1	24.3458	3.64	0.0410748	alta	44	6	47	2.54	17.42	2	1	17.46	4.8	0.0572738	alta	64		
5	48	2.68	24.38	2	1	24.3458	3.64	0.0410748	alta	44	6	48	2.54	17.42	2	1	17.46	4.8	0.0572738	alta	65		

**Nota: \* % I: Porcentajes de superficie infectada con roya en el cultivo del café. DE:**

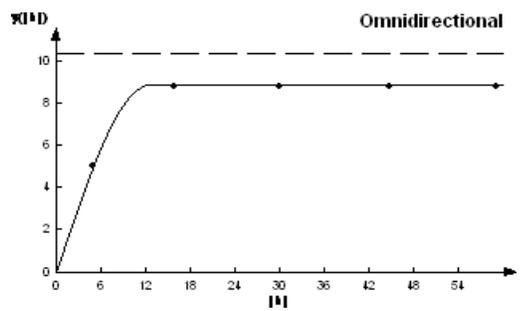
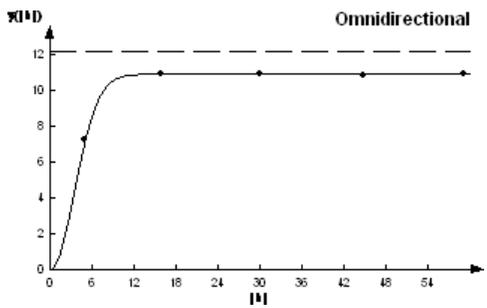
**dependencia espacial; 1: modelo esférico; 2: modelo gaussiano; 3: modelo exponencial**

Semivariogramas y mapas de Roya del café en Café en Temascaltepec de Septiembre 2020 a Agosto 2022.

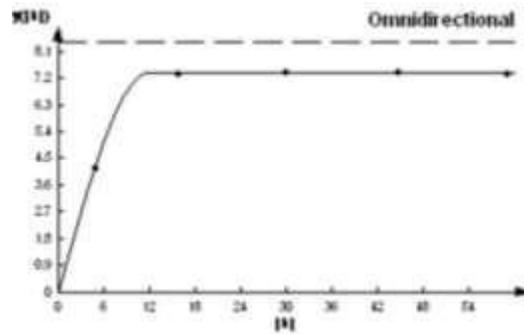
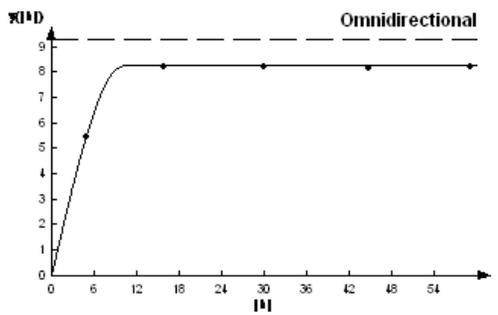
Septiembre 2020



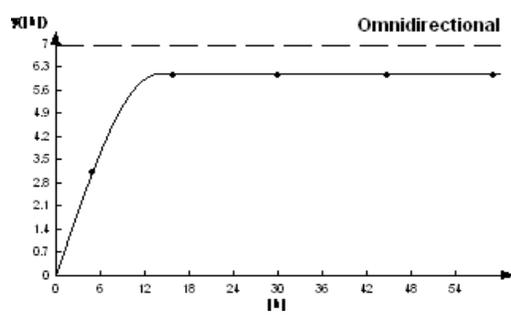
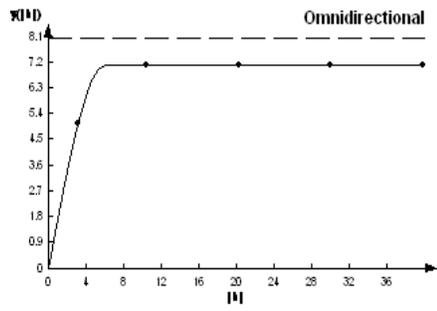
Octubre 2020



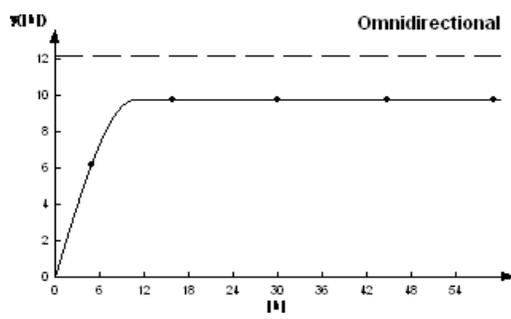
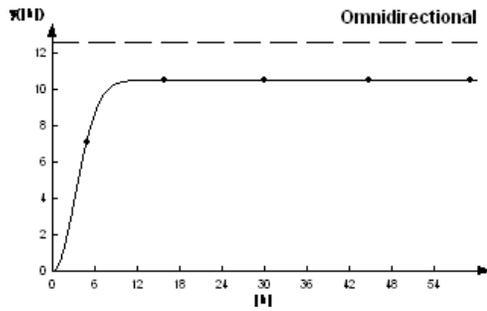
Noviembre 2020



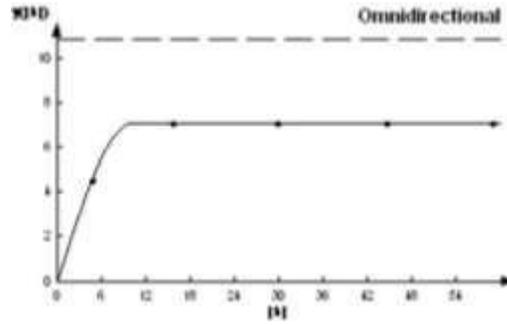
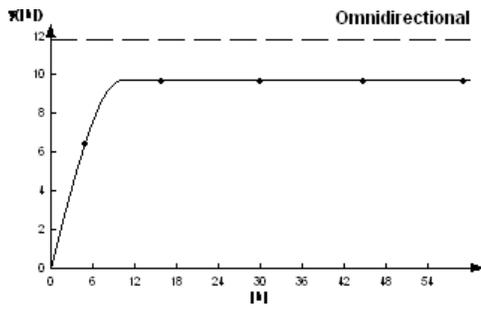
Diciembre 2020



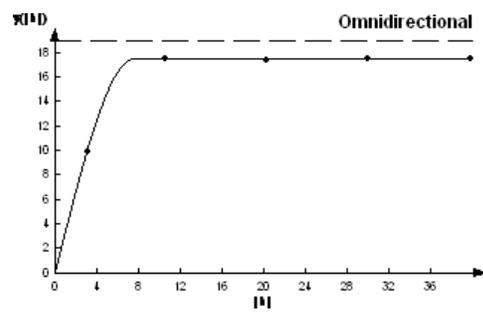
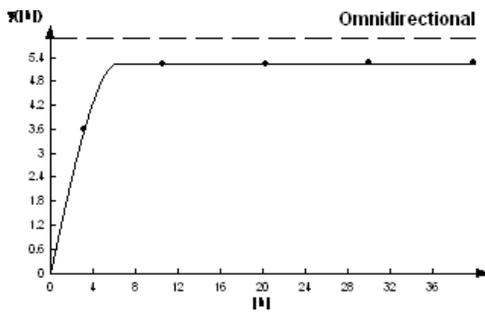
Enero 2021



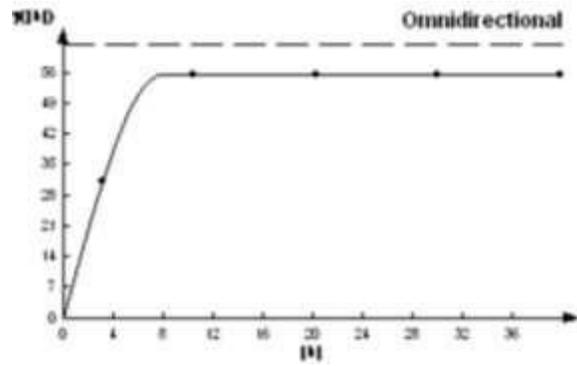
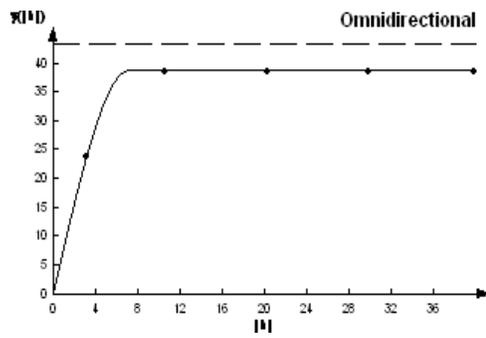
Febrero 2021



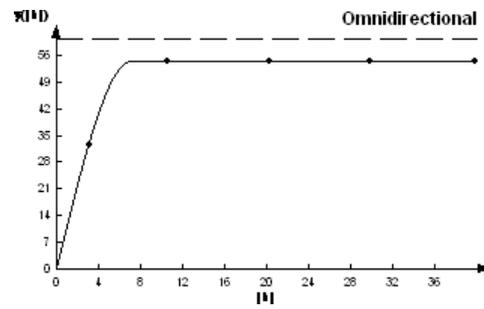
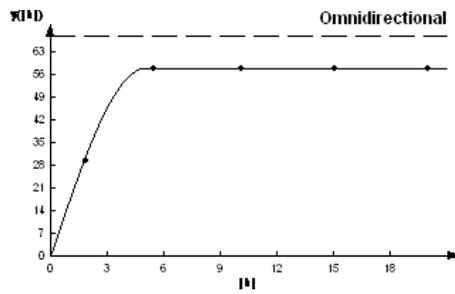
Marzo 2021



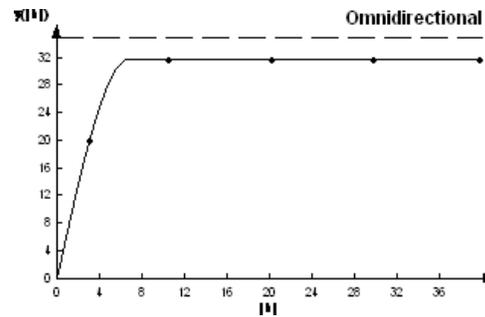
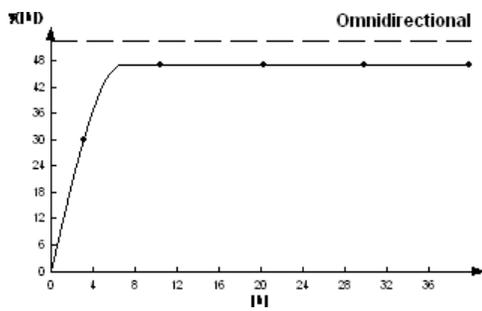
Abril 2021



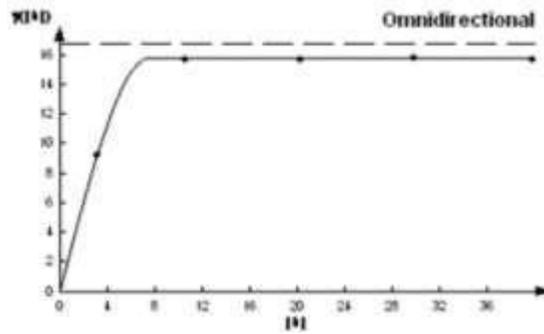
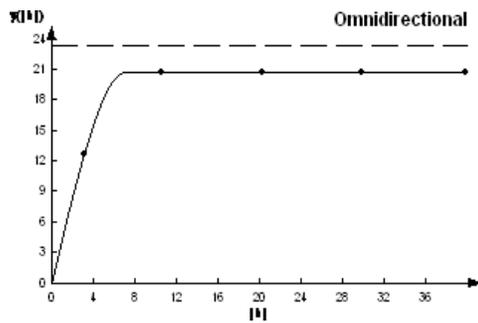
Mayo 2021



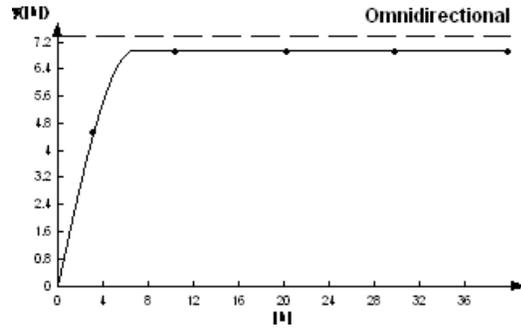
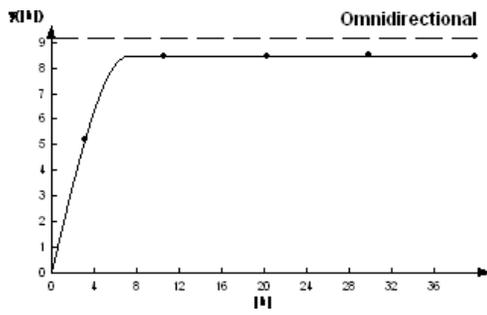
Junio 2021



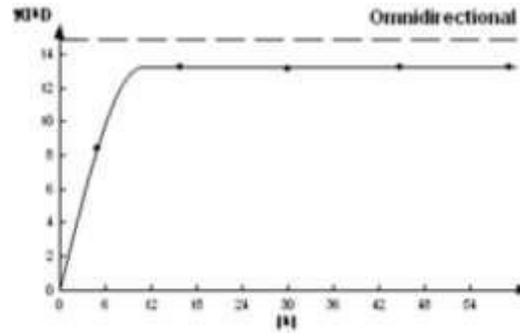
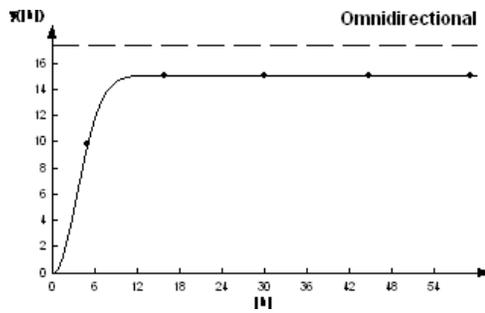
Julio 2021



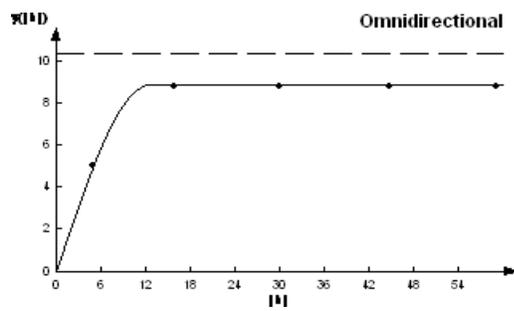
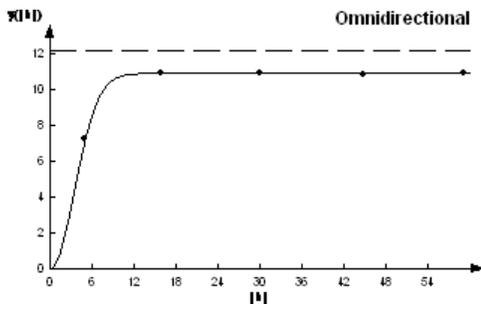
Agosto 2021



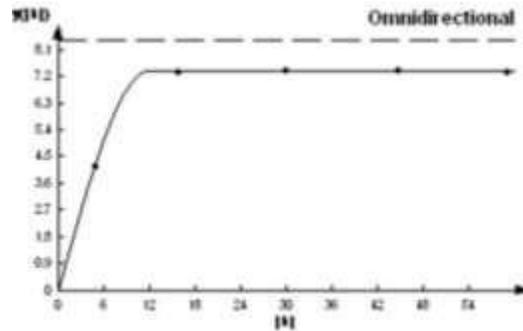
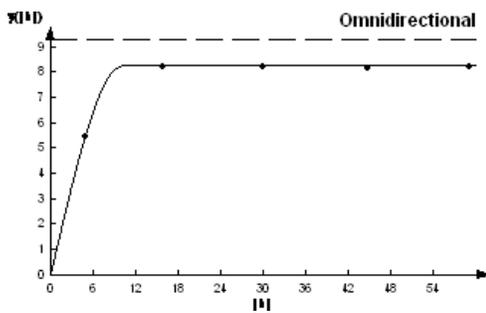
Septiembre 2021



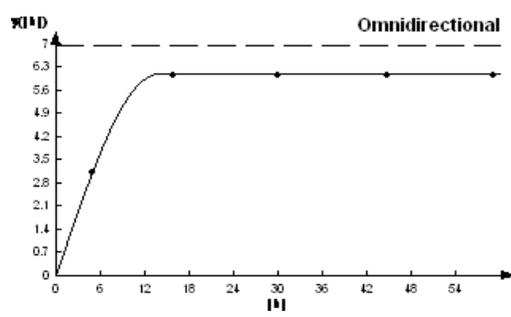
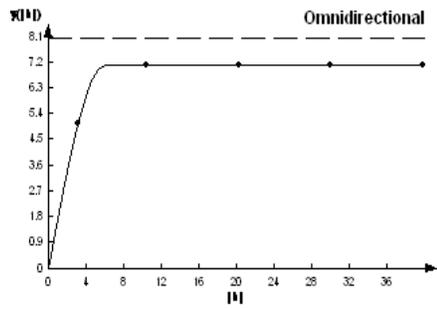
Octubre 2021



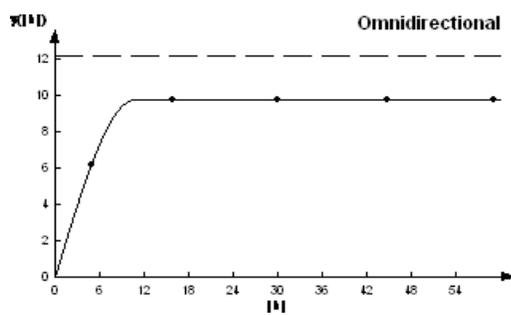
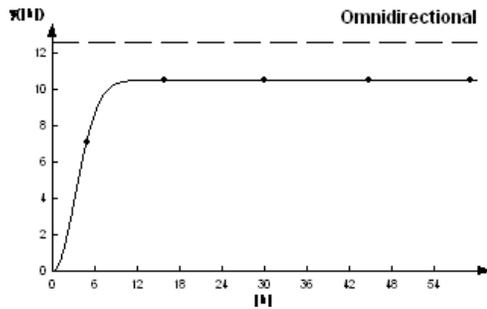
Noviembre 2021



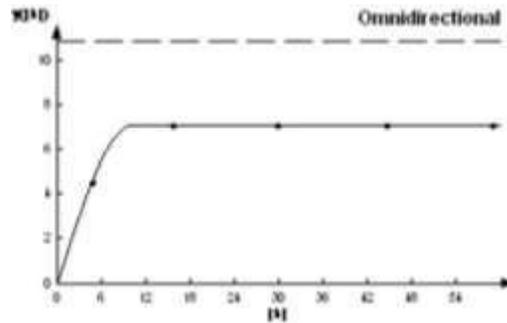
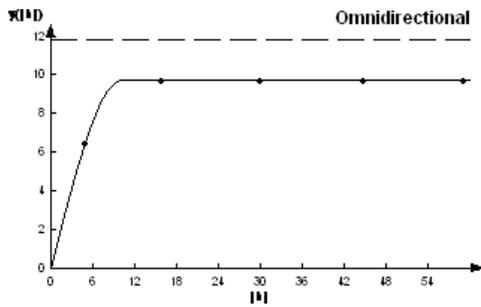
Diciembre 2021



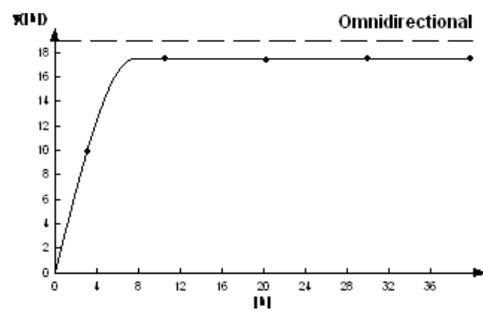
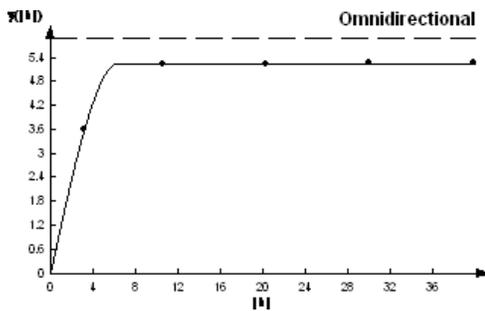
Enero 2022



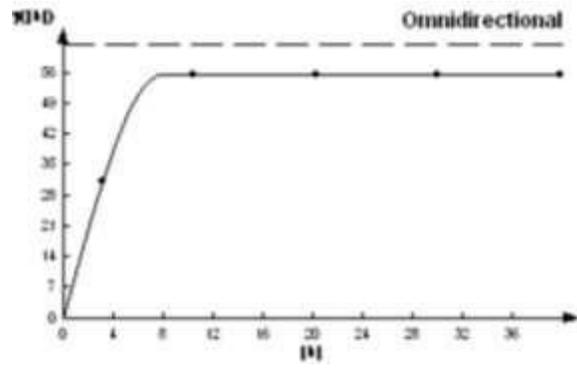
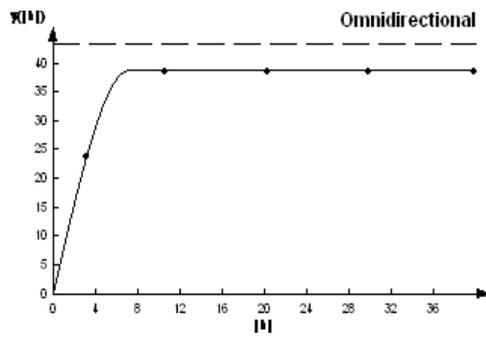
Febrero 2022



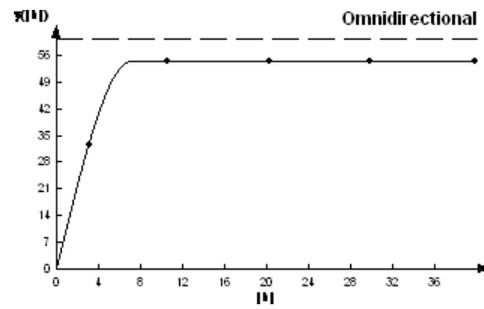
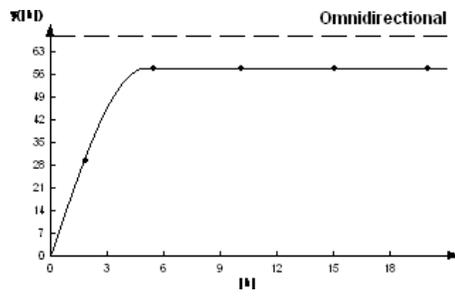
Marzo 2022



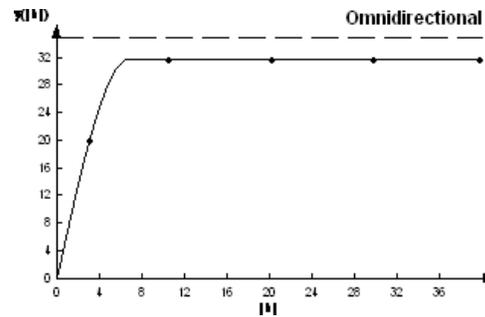
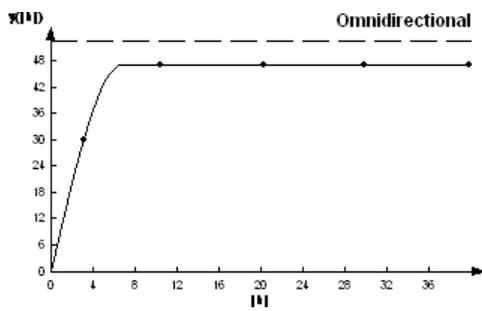
Abril 2022



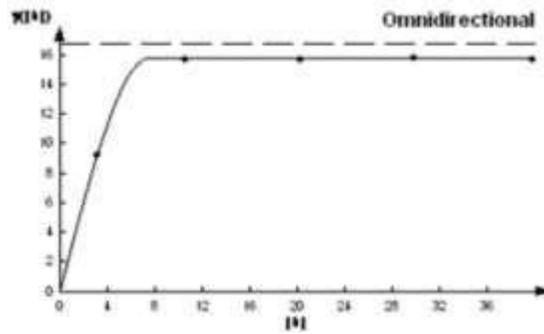
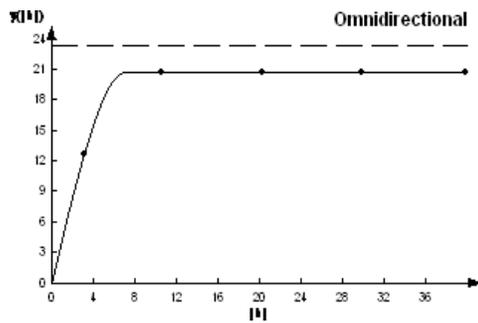
Mayo 2022



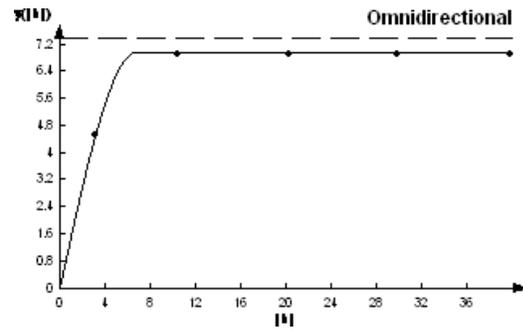
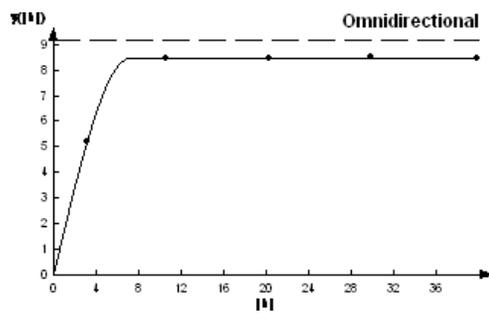
Junio 2022



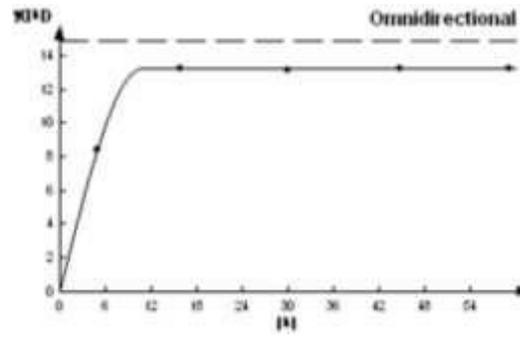
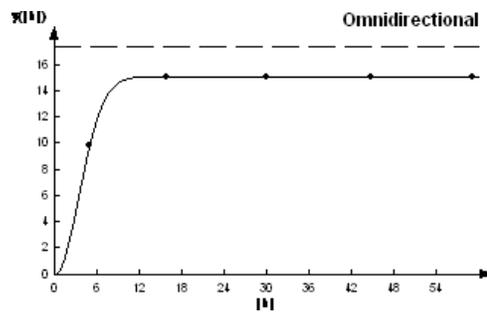
Julio 2022



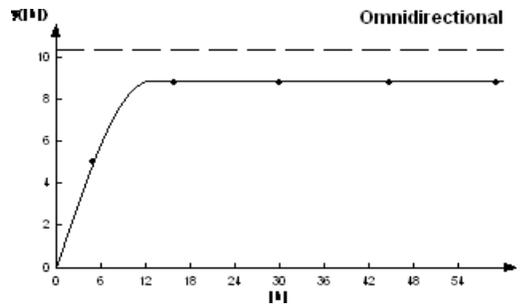
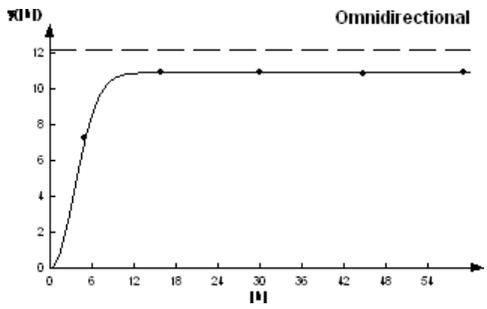
Agosto 2022



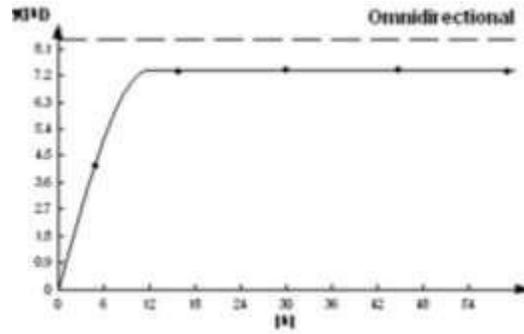
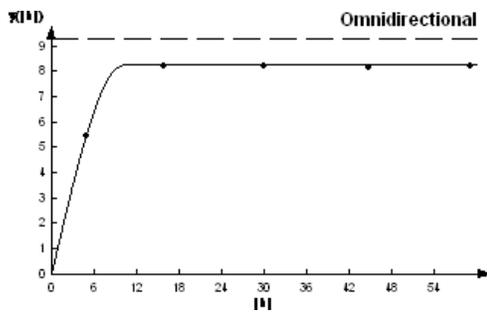
Septiembre 2020



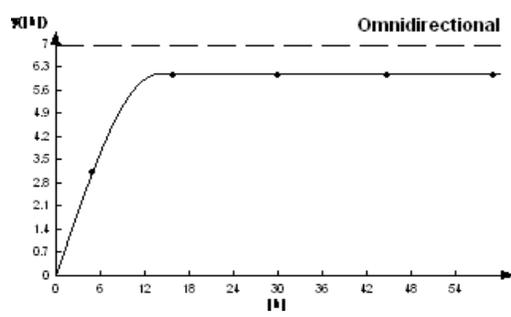
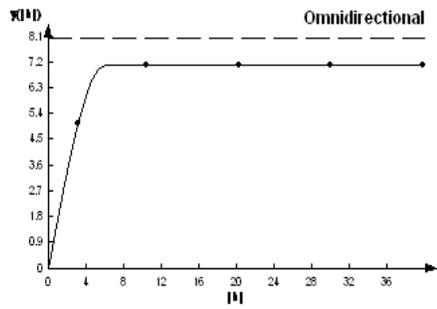
Octubre 2020



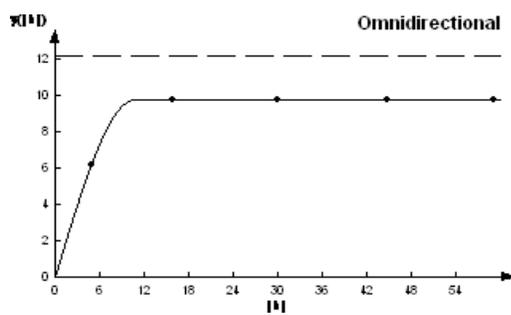
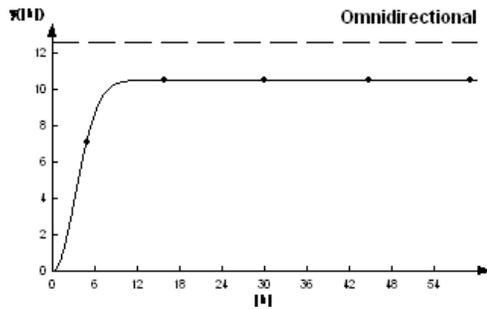
Noviembre 2020



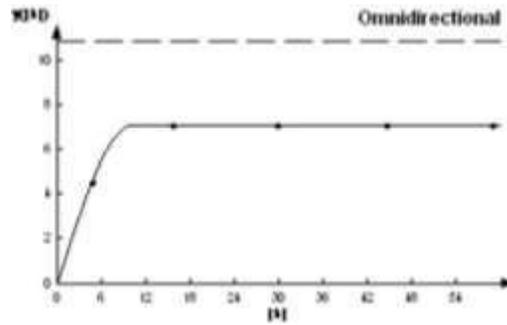
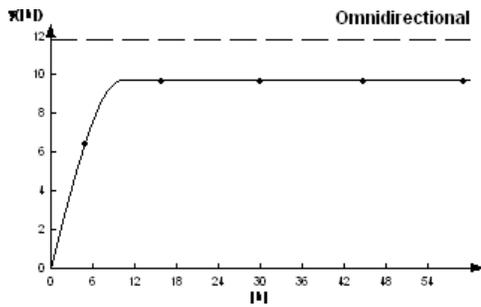
Diciembre 2020



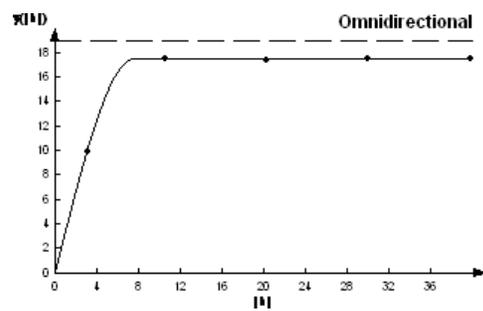
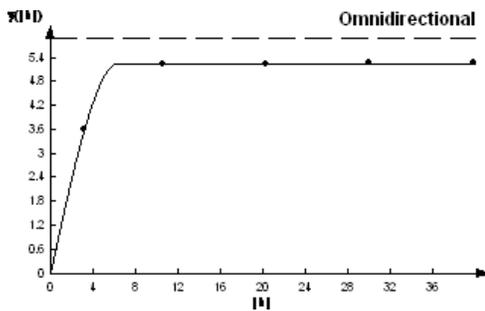
Enero 2021



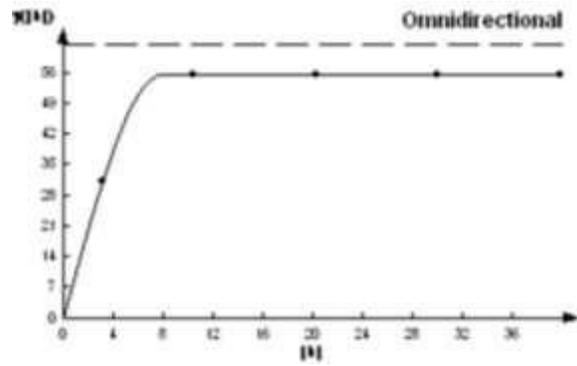
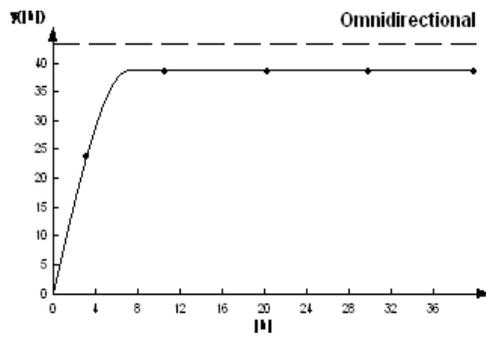
Febrero 2021



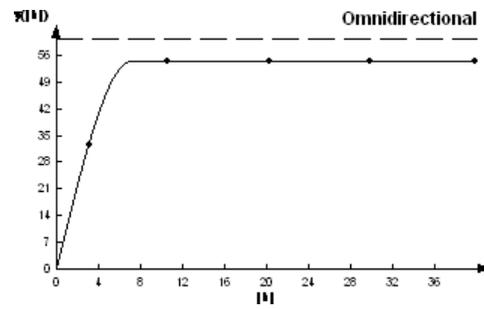
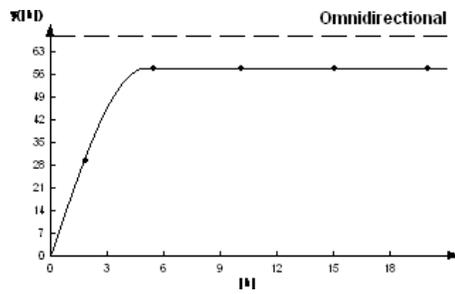
Marzo 2021



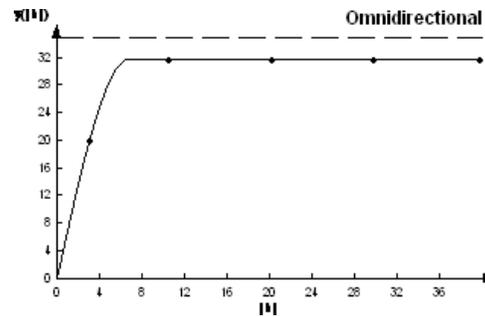
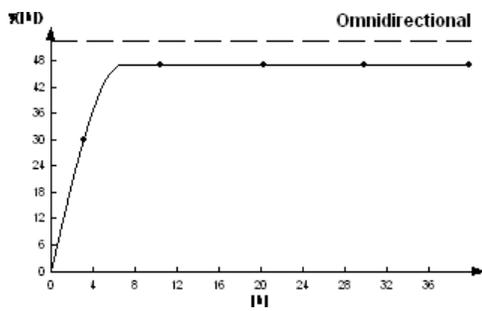
Abril 2021



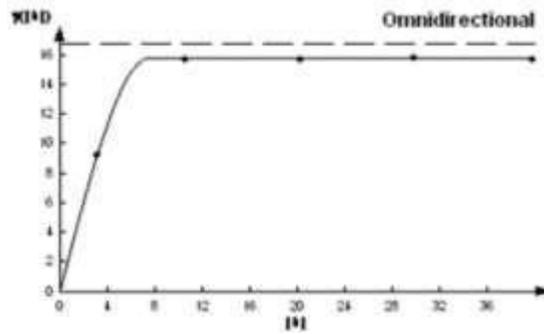
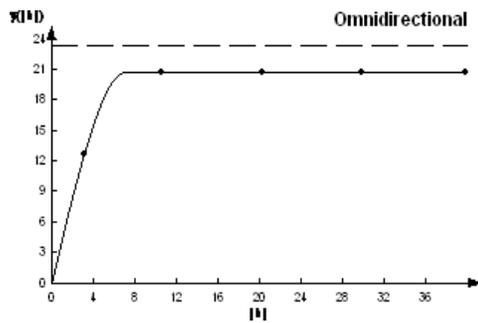
Mayo 2021



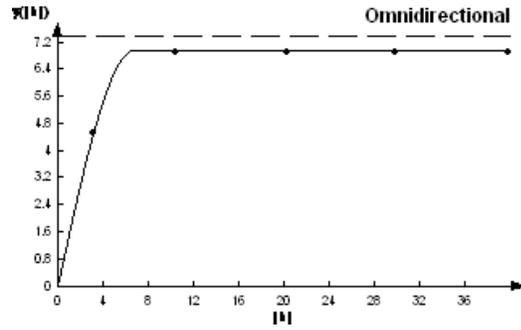
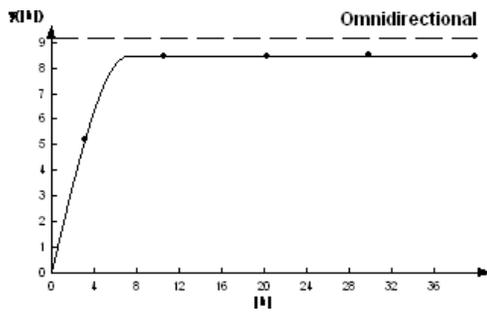
Junio 2021



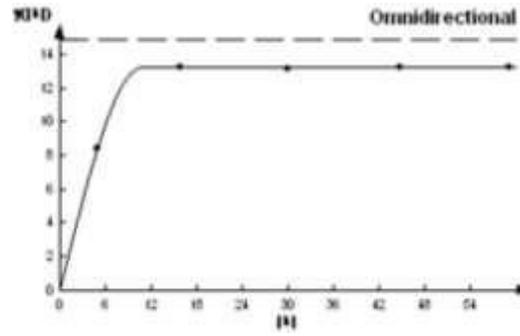
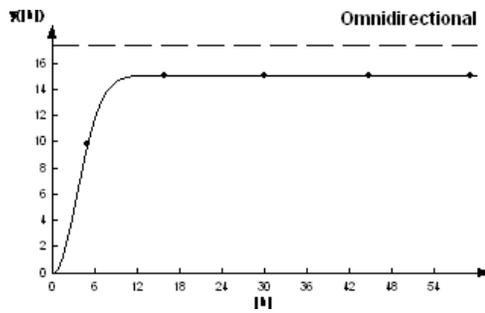
Julio 2021



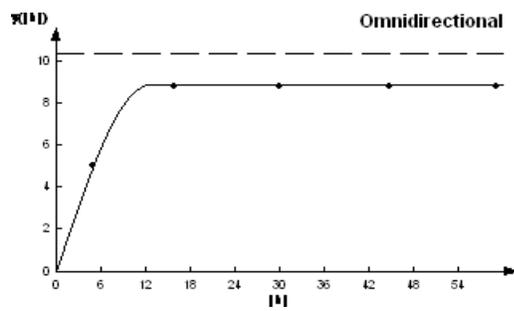
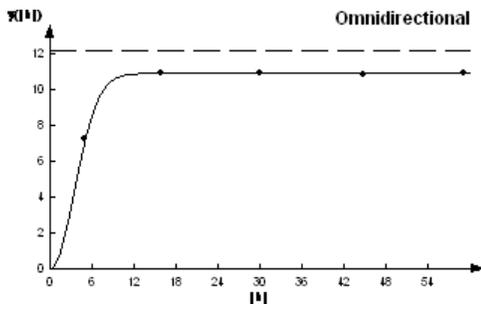
Agosto 2021



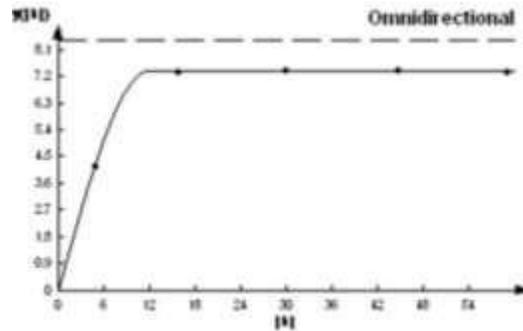
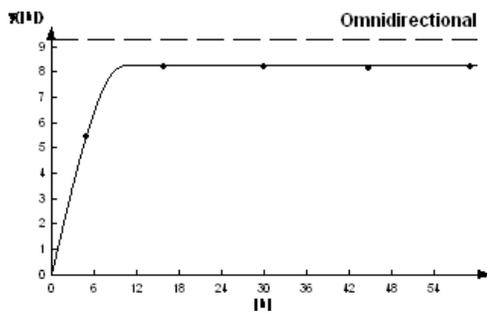
Septiembre 2021



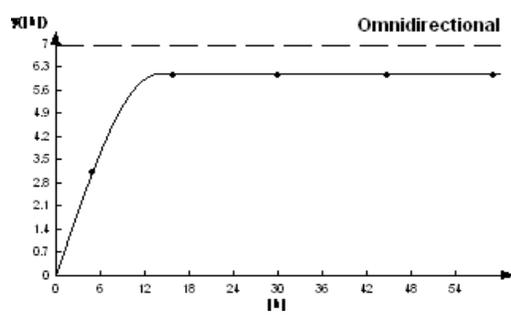
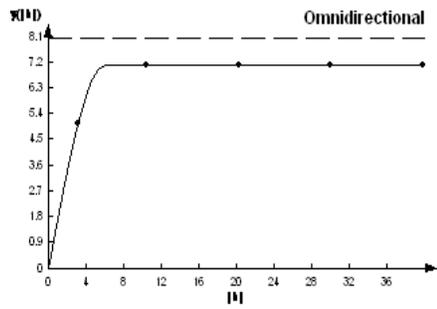
Octubre 2021



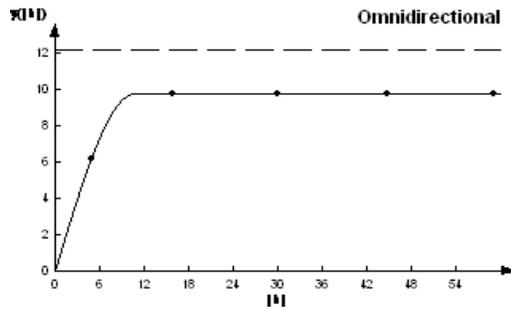
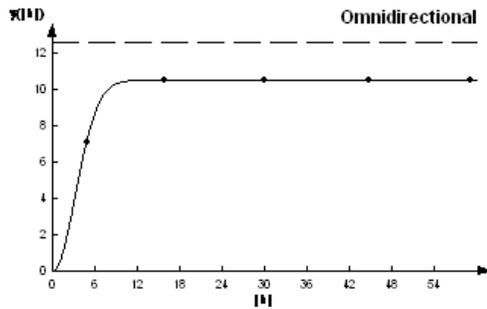
Noviembre 2021



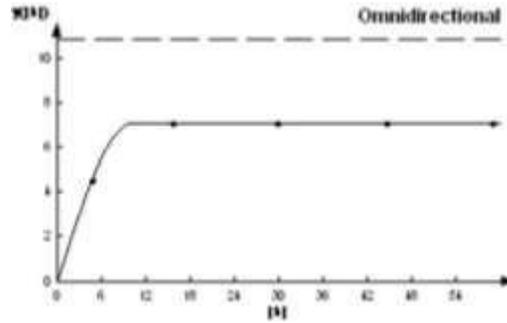
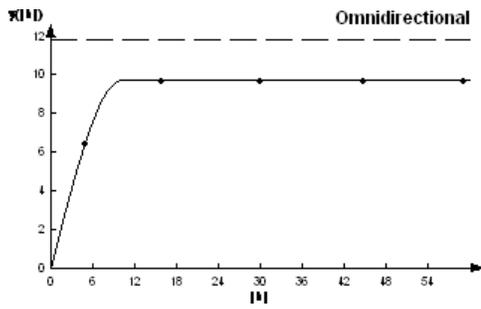
Diciembre 2021



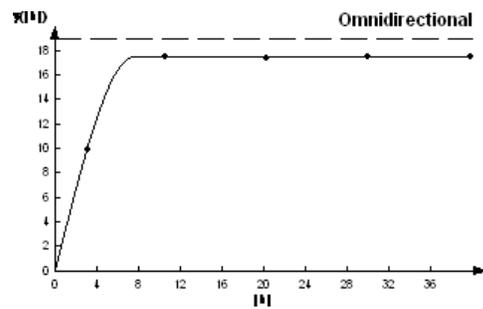
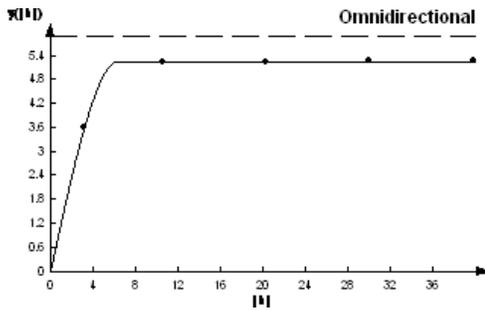
Enero 2022



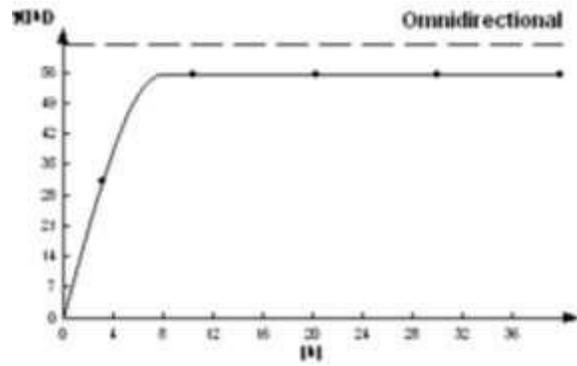
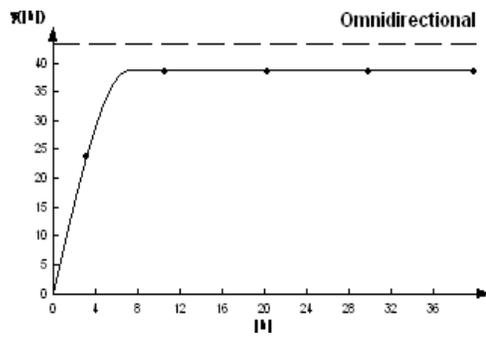
Febrero 2022



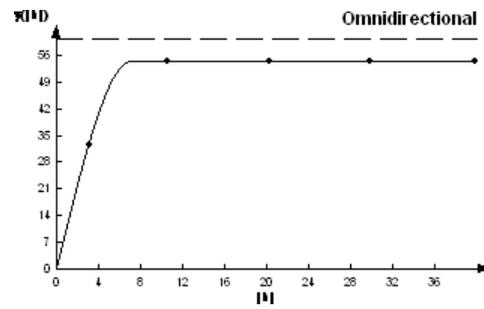
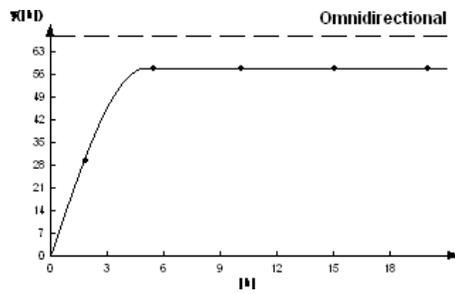
Marzo 2022



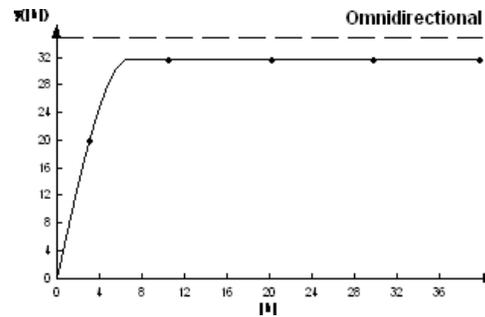
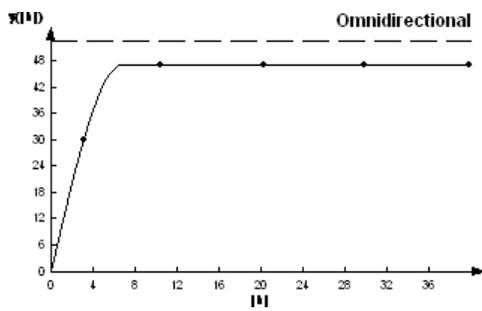
Abril 2022



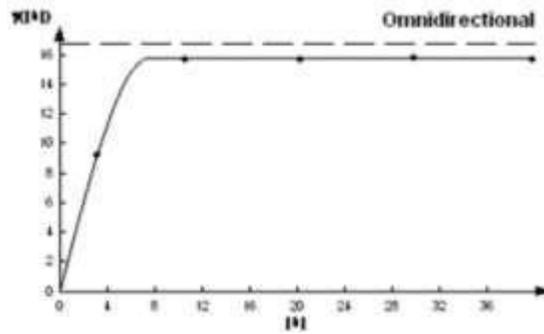
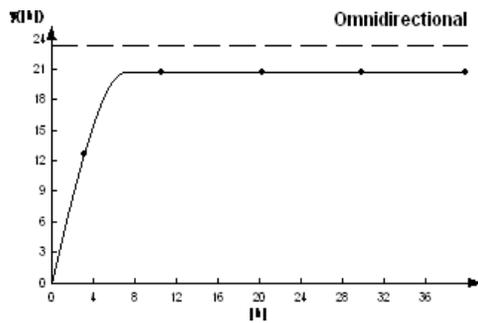
Mayo 2022



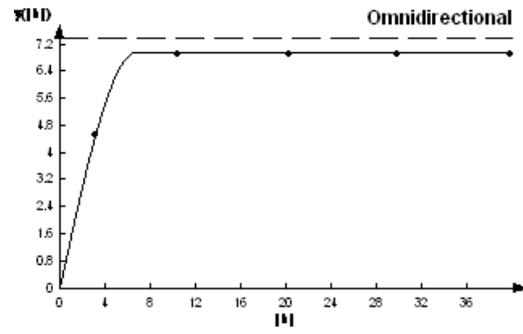
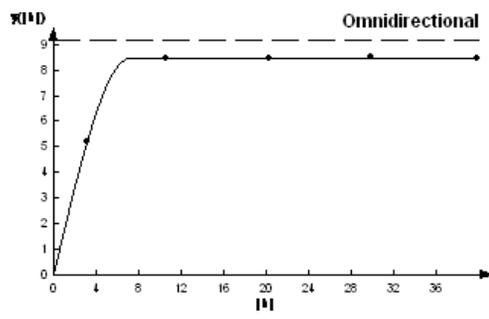
Junio 2022



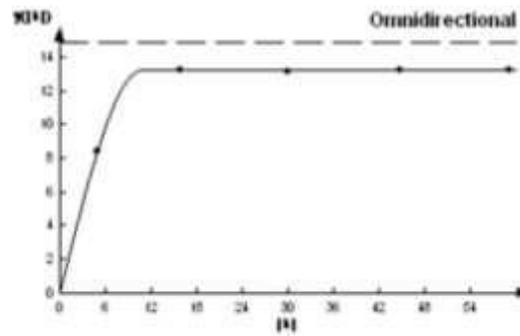
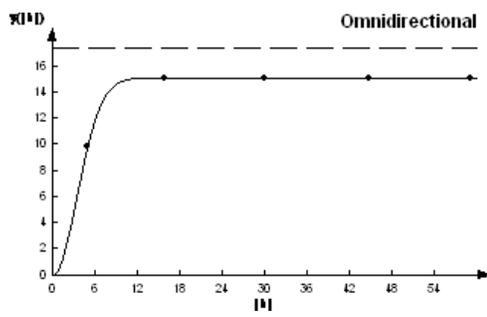
Julio 2022



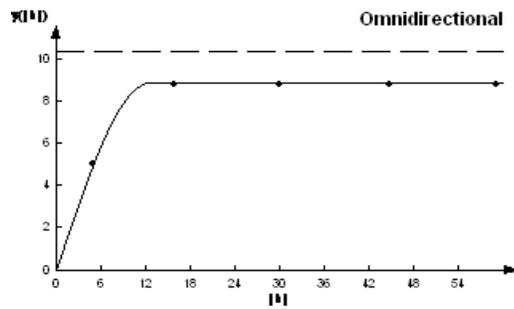
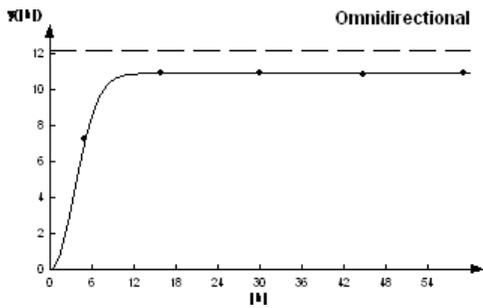
Agosto 2022



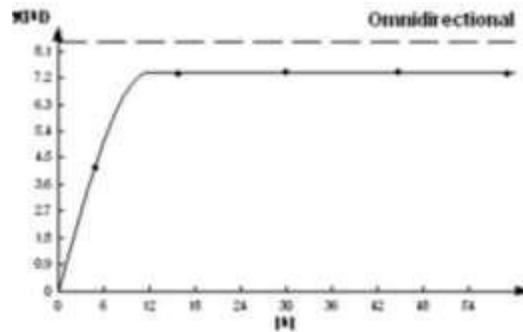
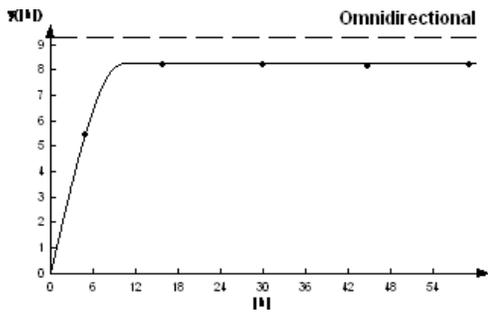
Septiembre 2020



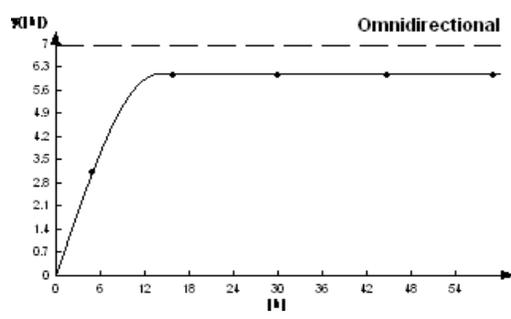
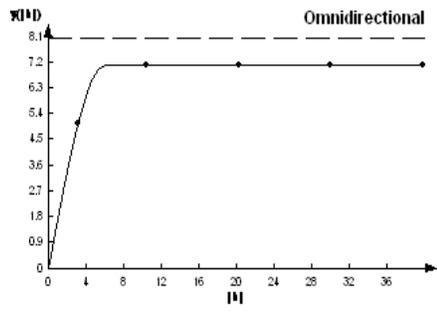
Octubre 2020



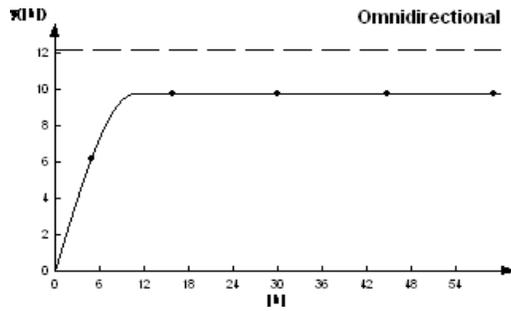
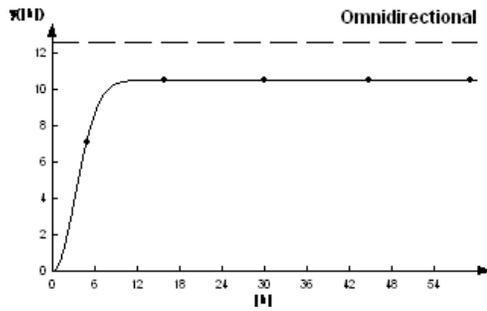
Noviembre 2020



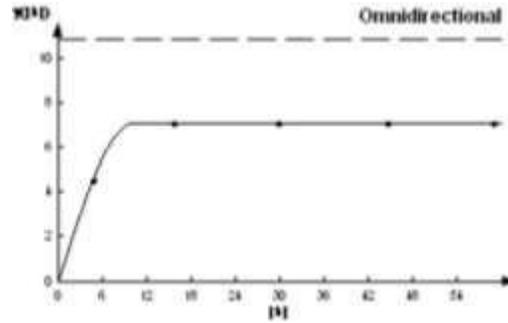
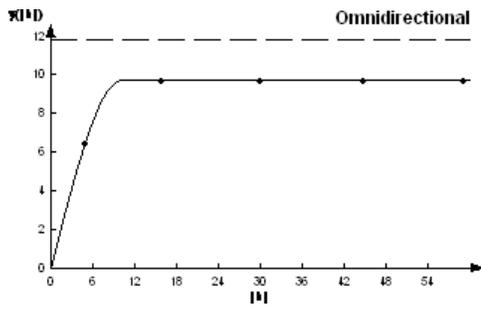
Diciembre 2020



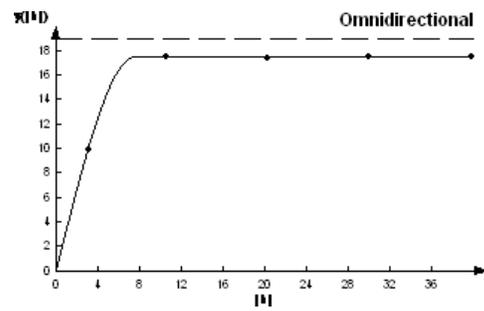
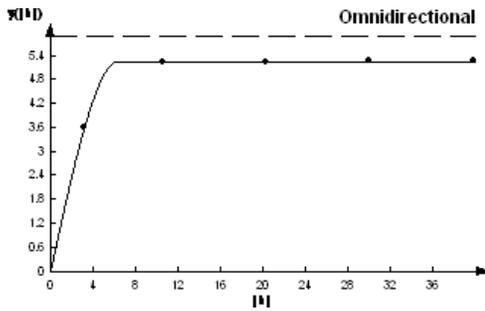
Enero 2021



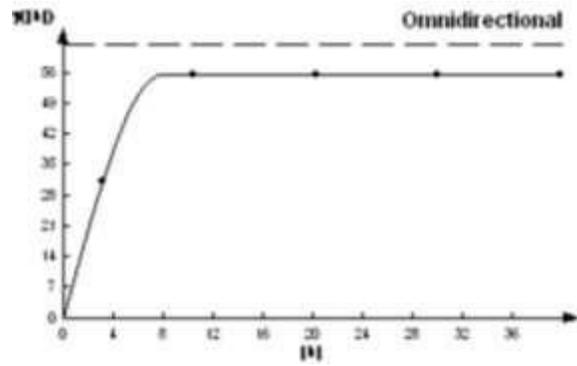
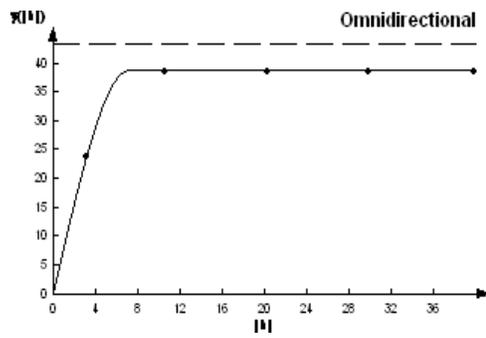
Febrero 2021



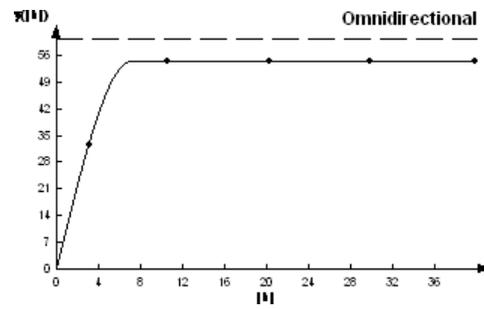
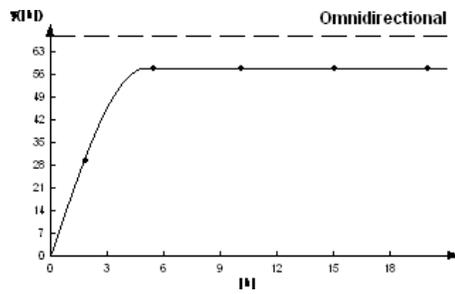
Marzo 2021



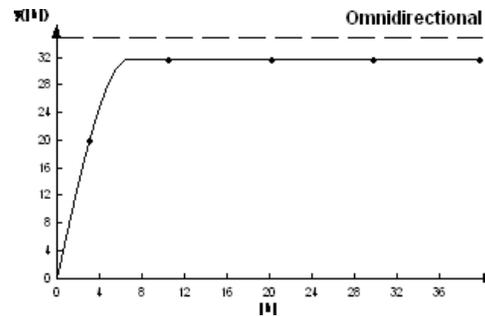
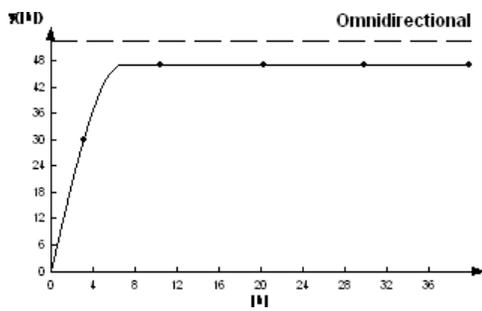
Abril 2021



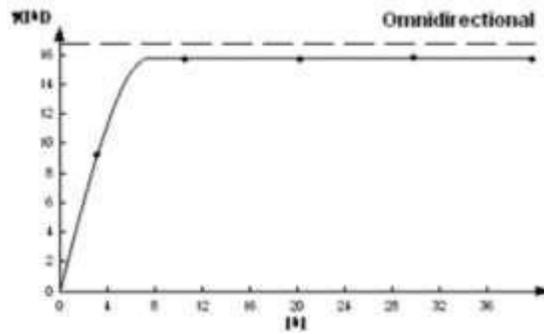
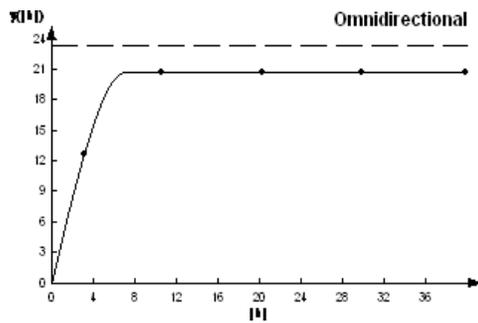
Mayo 2021



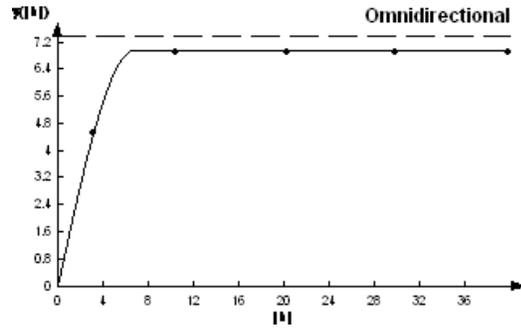
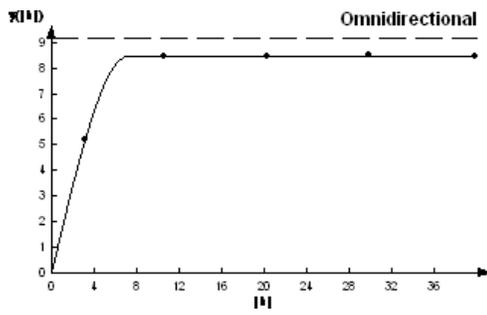
Junio 2021



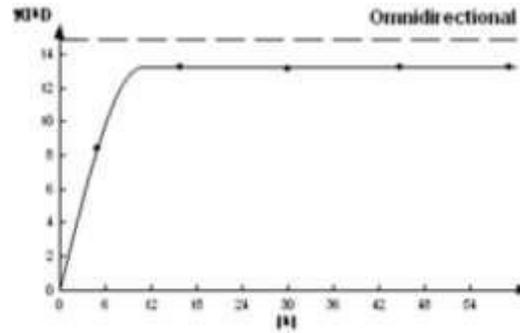
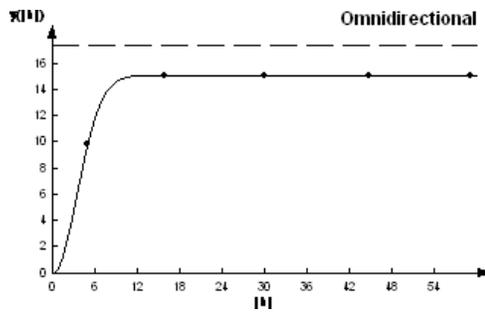
Julio 2021



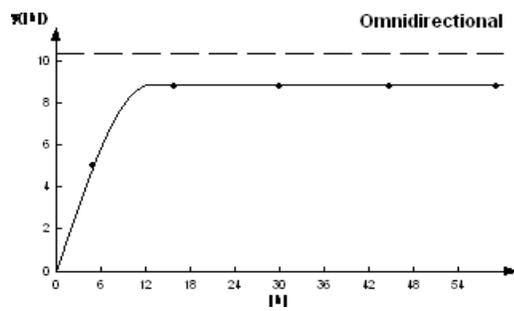
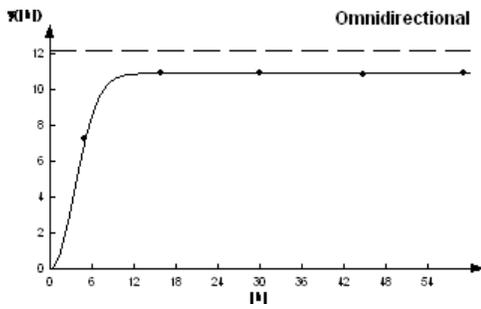
Agosto 2021



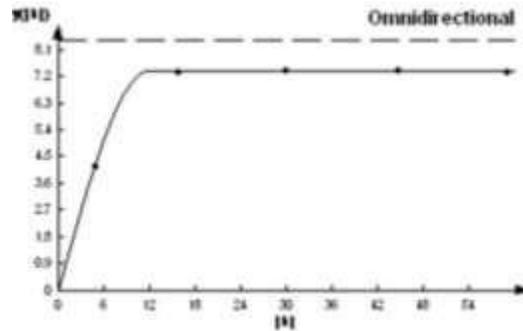
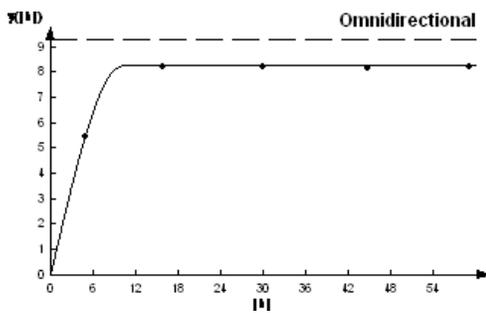
Septiembre 2021



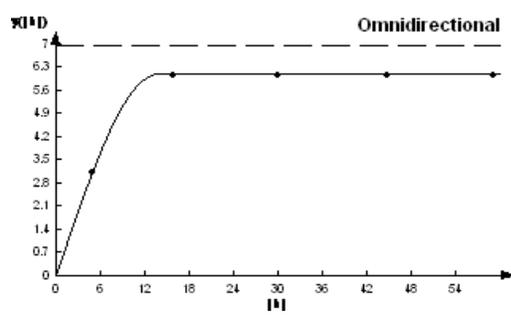
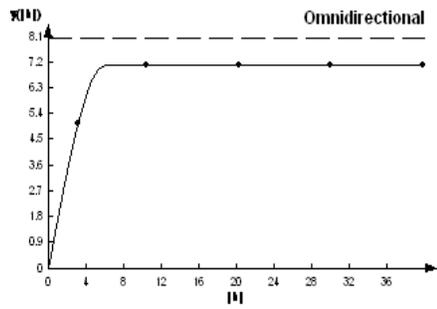
Octubre 2021



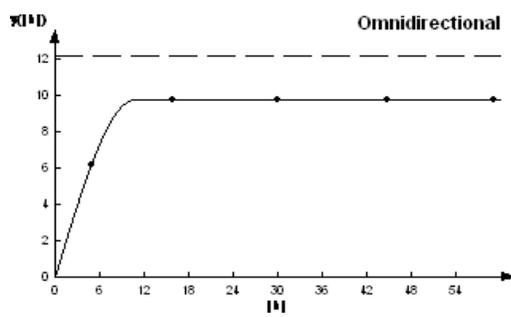
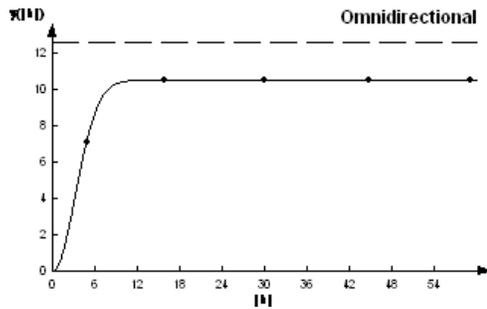
Noviembre 2021



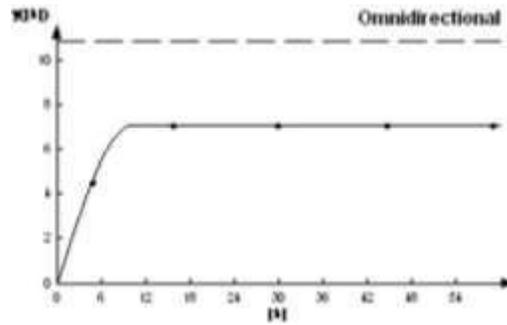
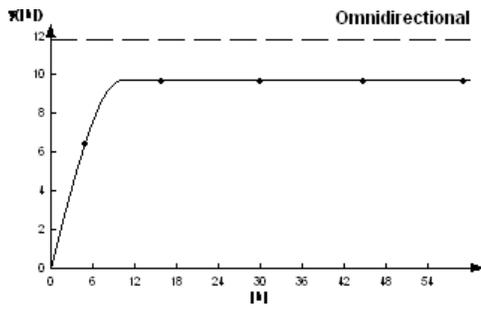
Diciembre 2021



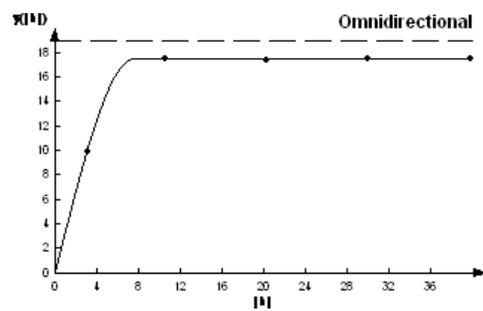
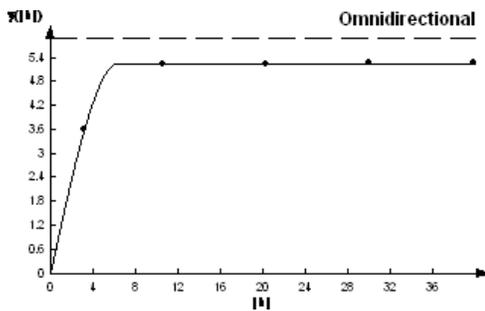
Enero 2022



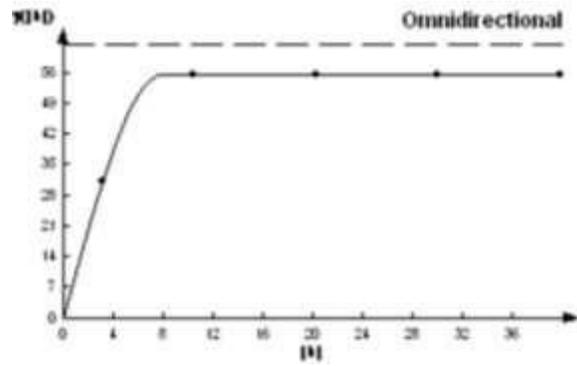
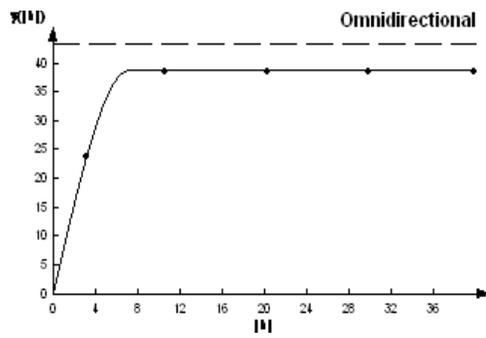
Febrero 2022



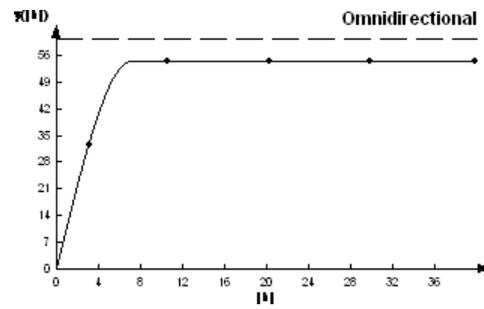
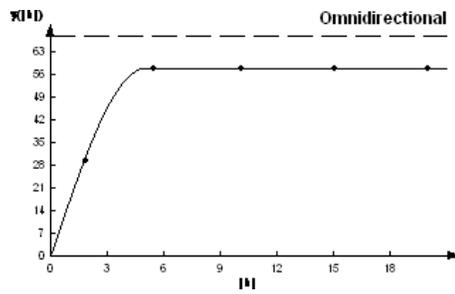
Marzo 2022



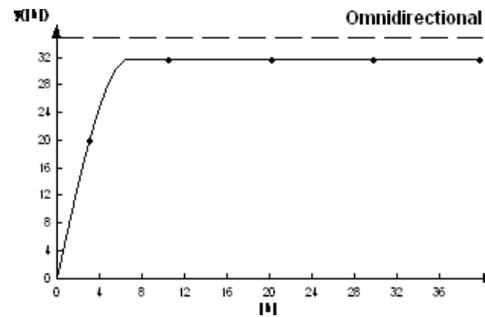
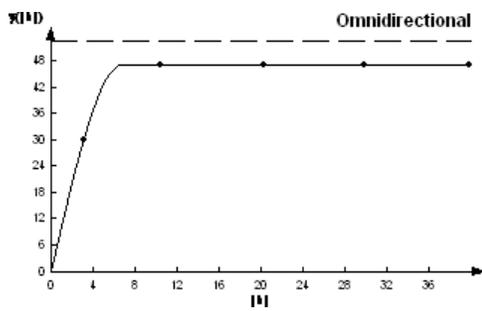
Abril 2022



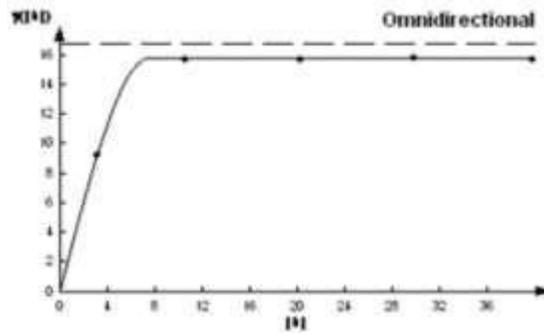
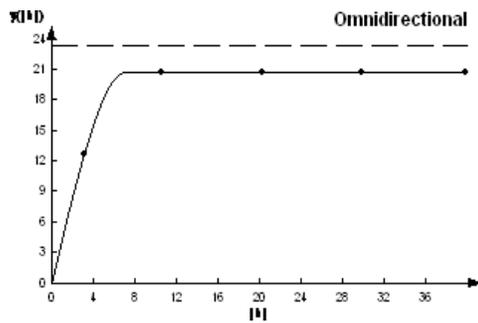
Mayo 2022



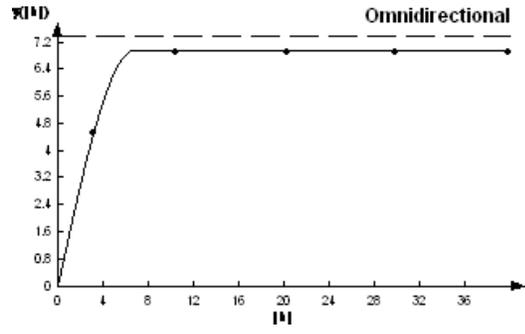
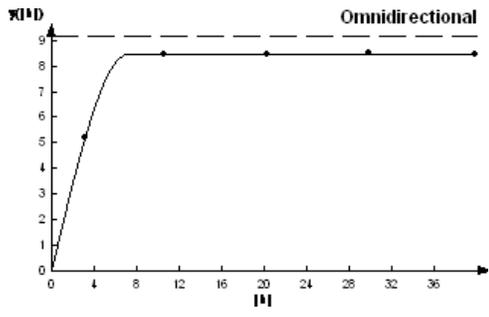
Junio 2022



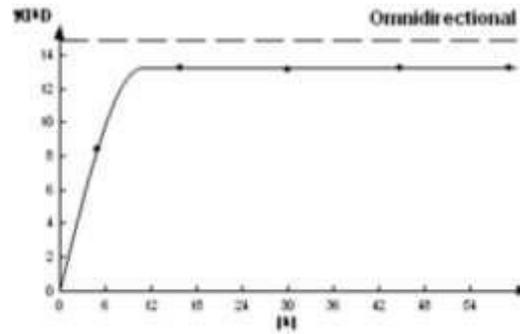
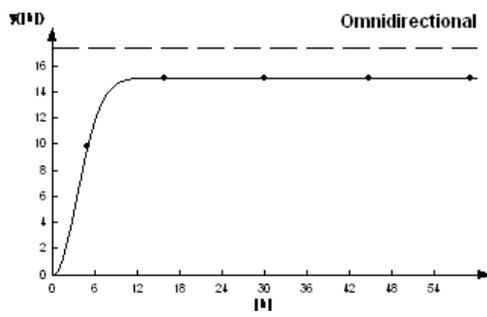
Julio 2022



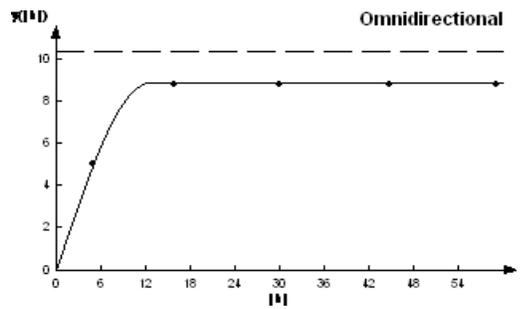
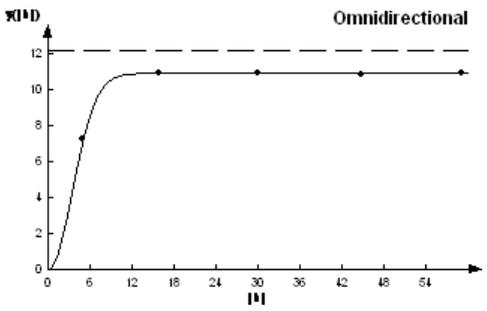
Agosto 2022



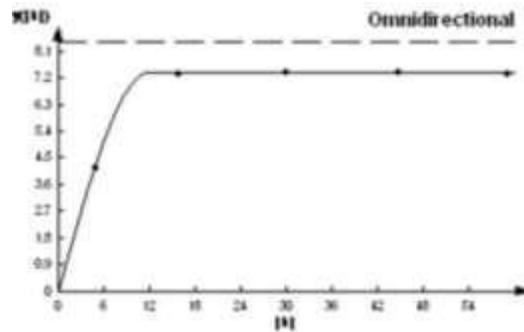
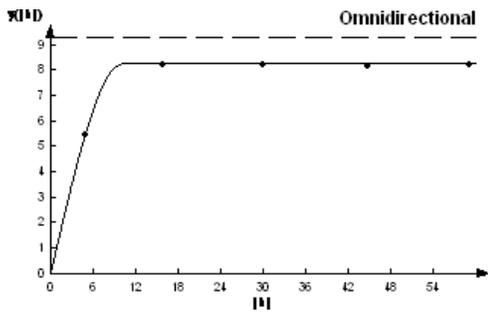
Septiembre 2020



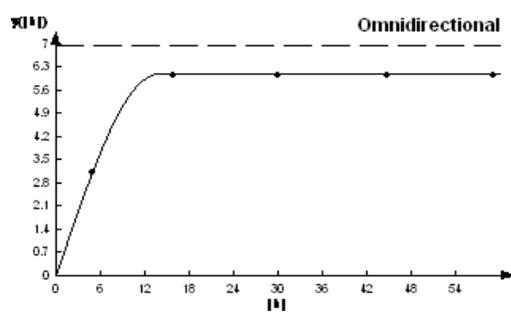
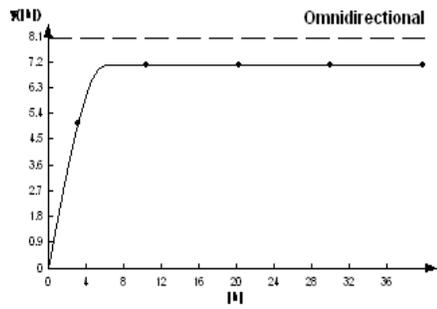
Octubre 2020



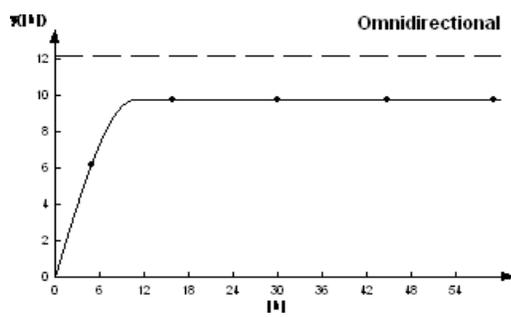
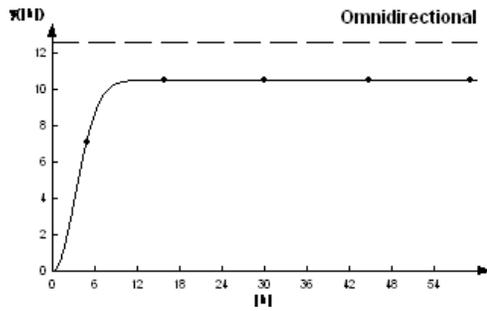
Noviembre 2020



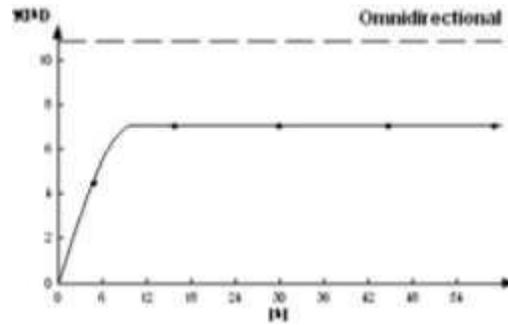
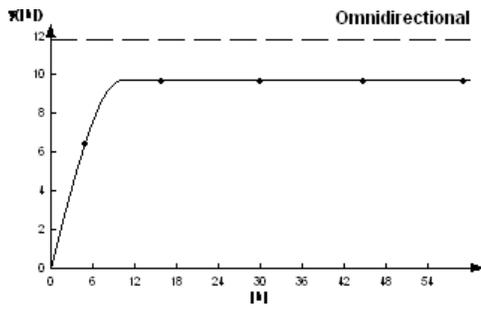
## Diciembre 2020



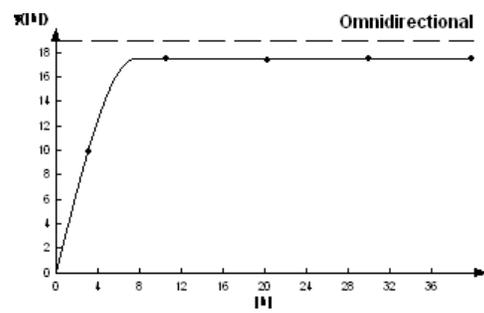
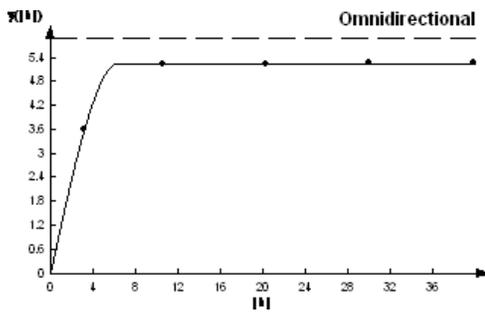
## Enero 2021



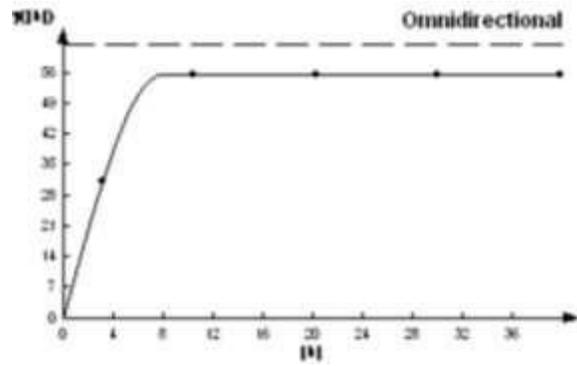
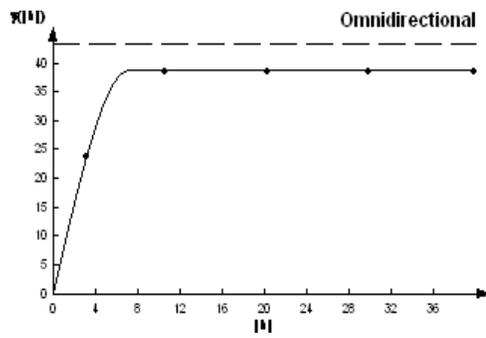
## Febrero 2021



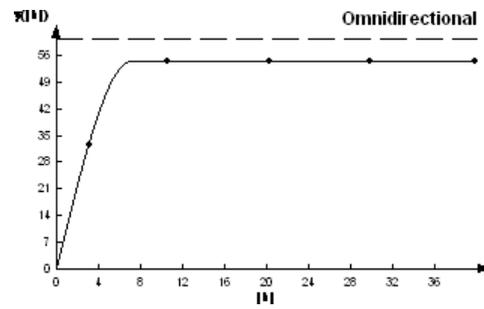
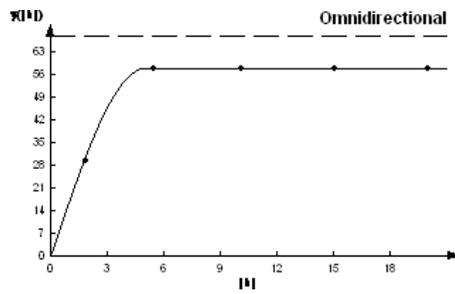
## Marzo 2021



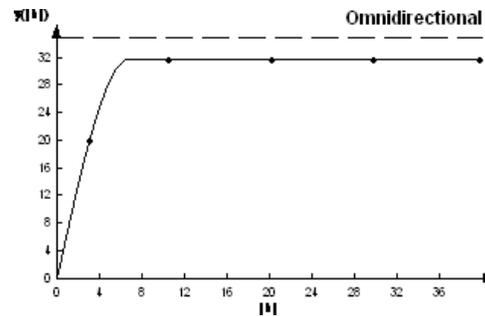
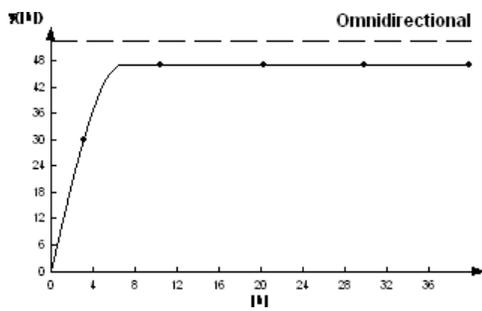
Abril 2021



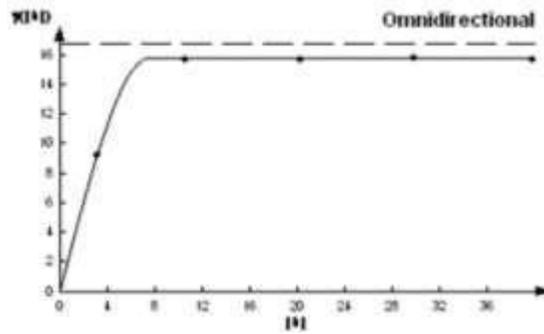
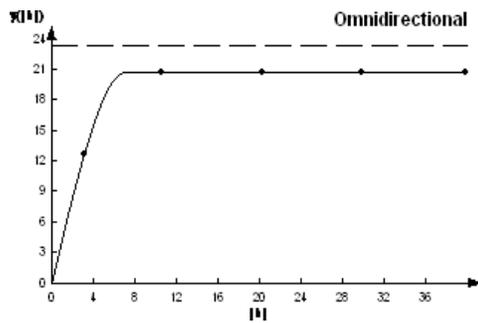
Mayo 2021



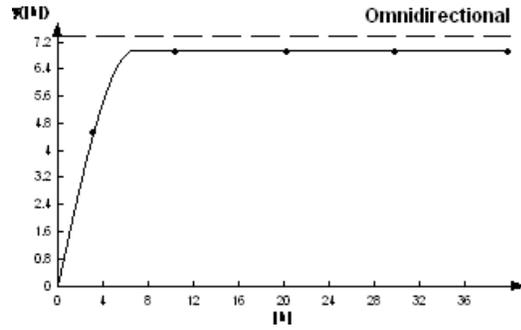
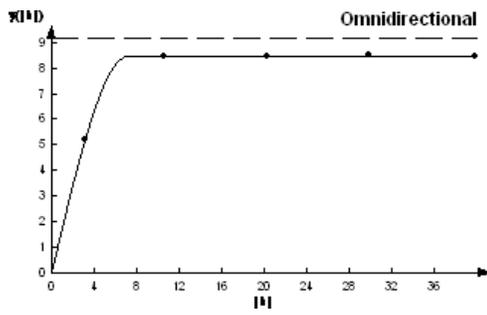
Junio 2021



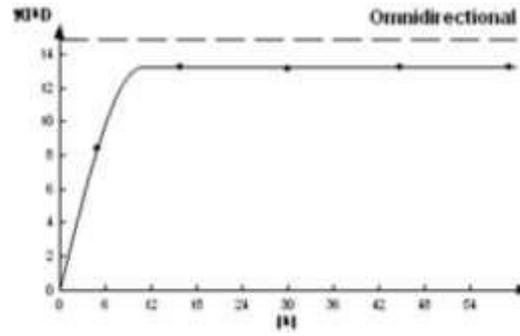
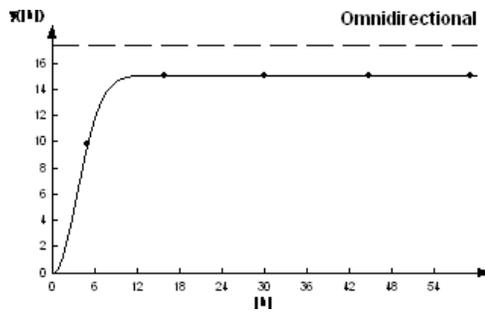
Julio 2021



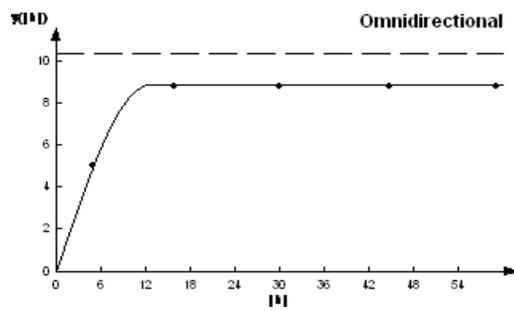
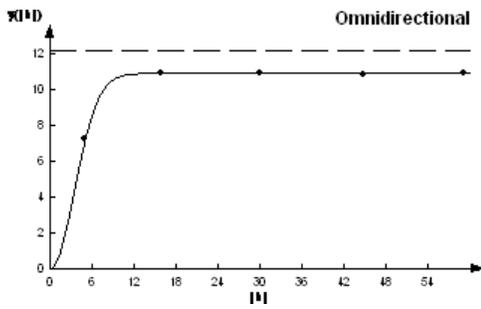
Agosto 2021



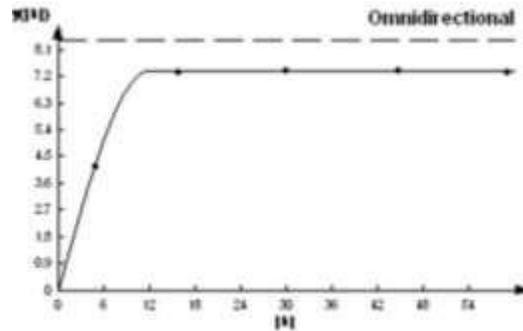
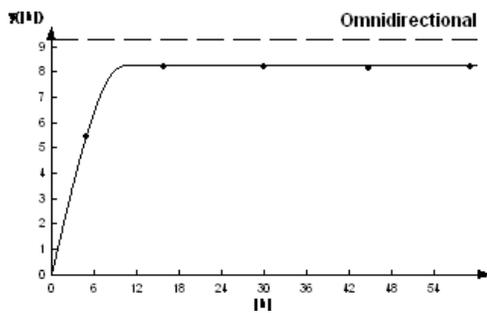
Septiembre 2021



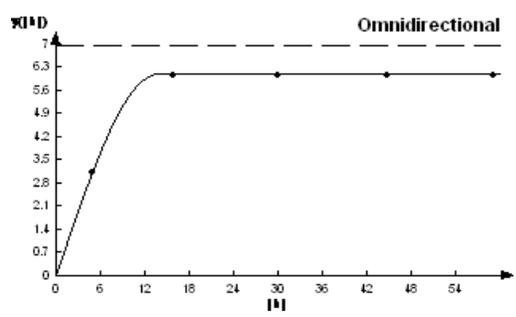
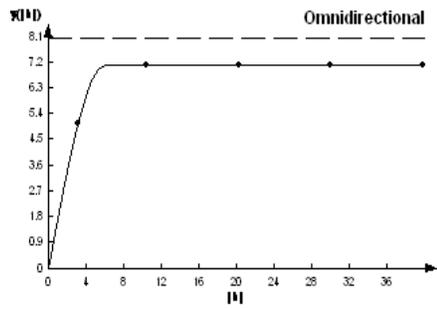
Octubre 2021



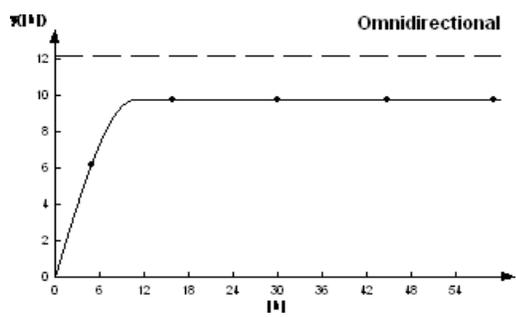
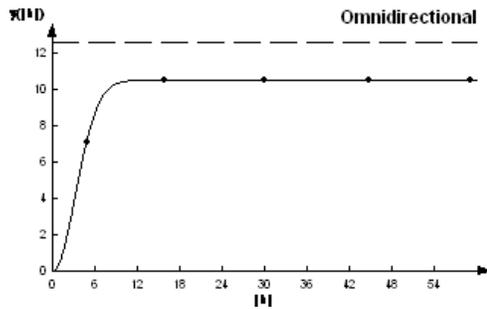
Noviembre 2021



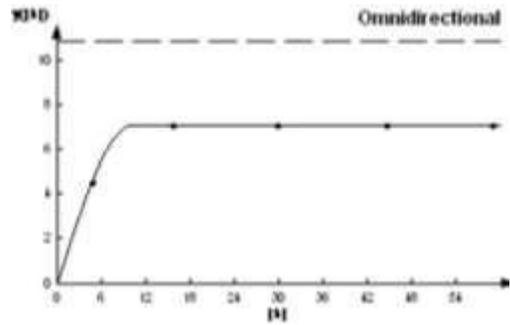
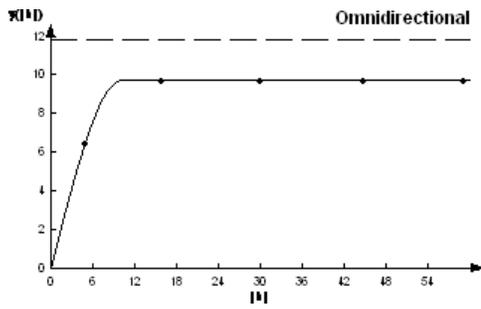
Diciembre 2021



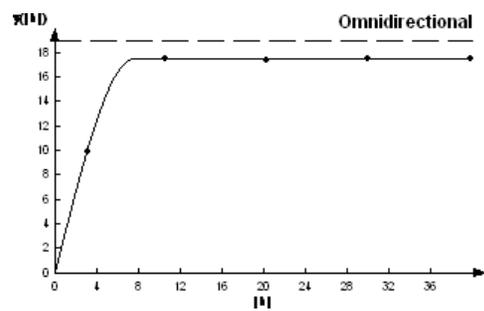
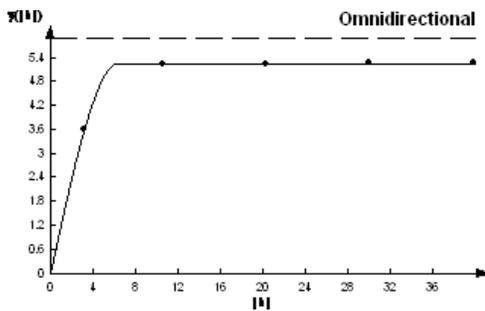
Enero 2022



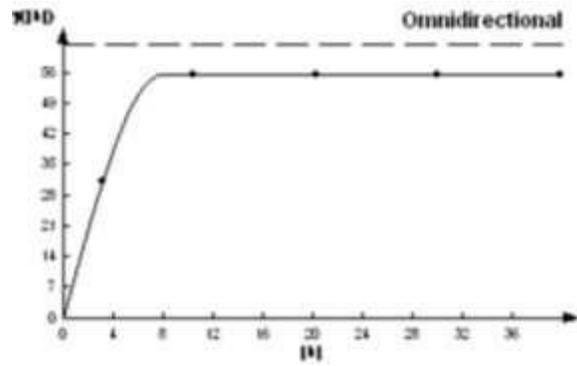
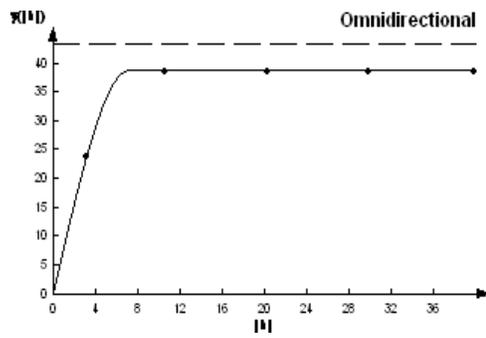
Febrero 2022



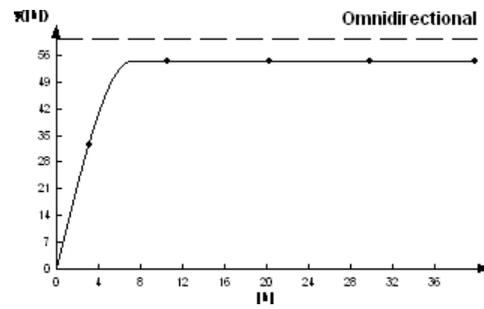
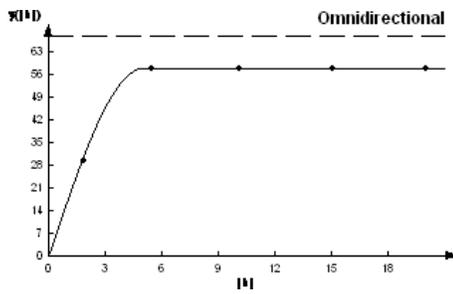
Marzo 2022



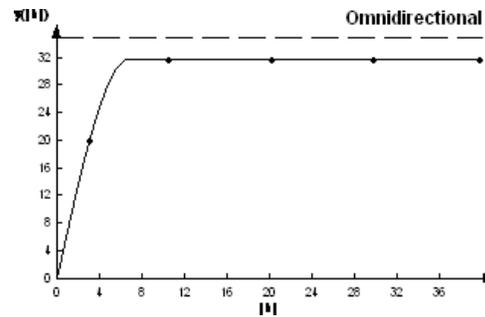
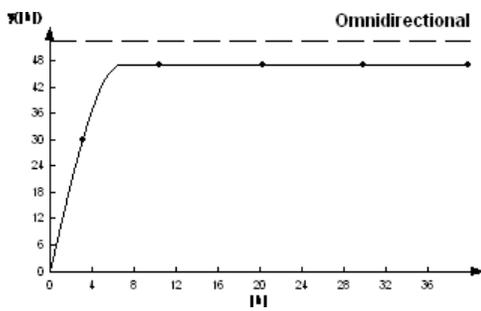
Abril 2022



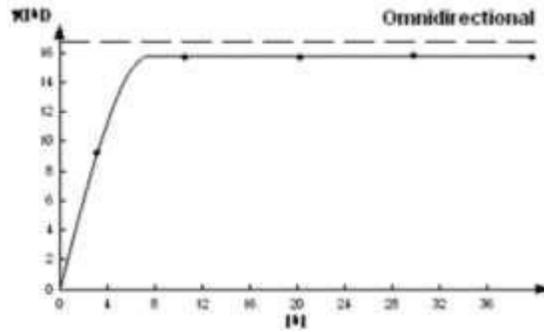
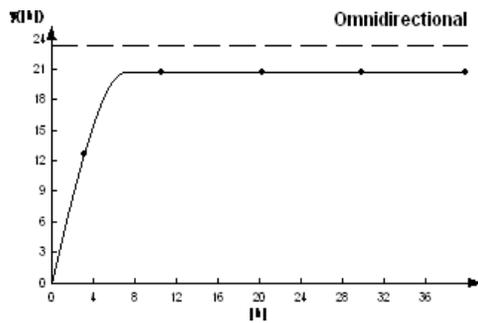
Mayo 2022



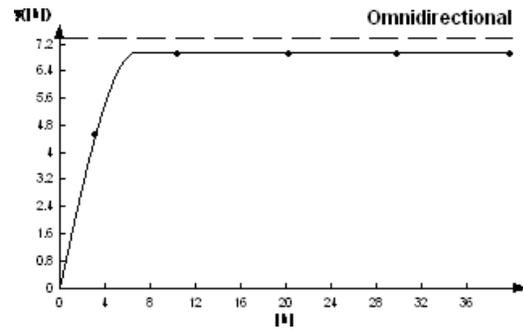
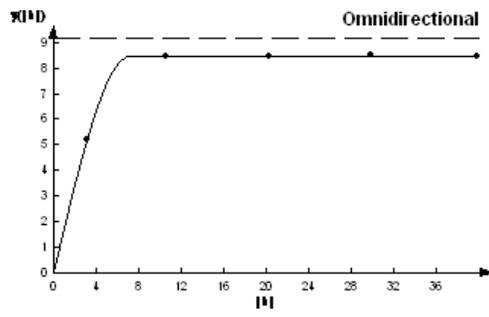
Junio 2022



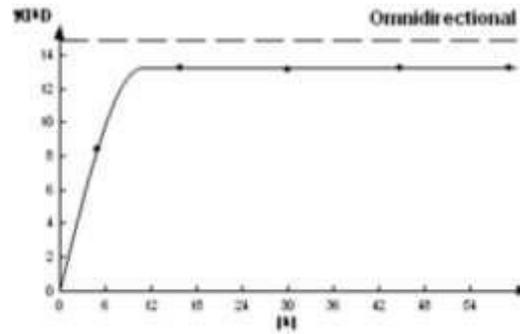
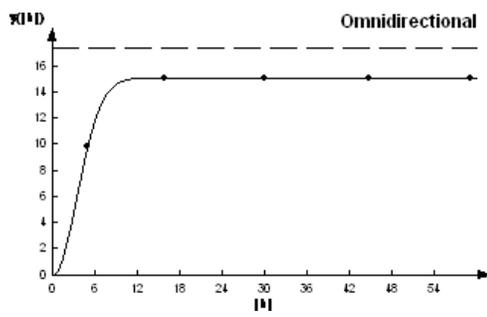
Julio 2022



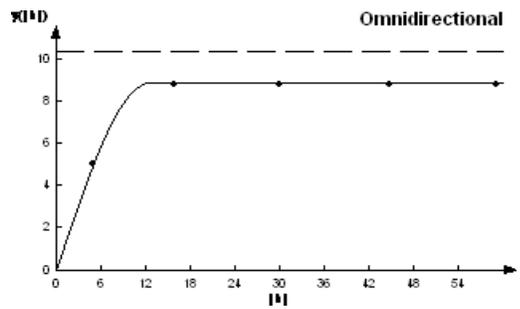
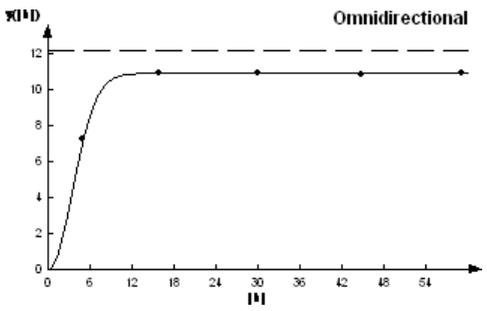
Agosto 2022



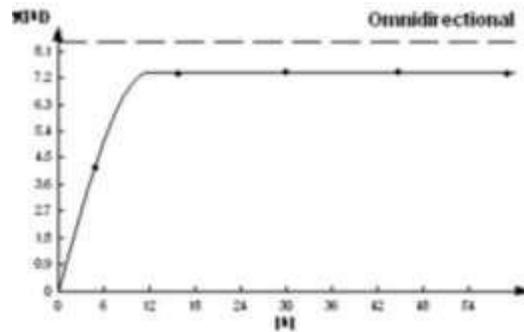
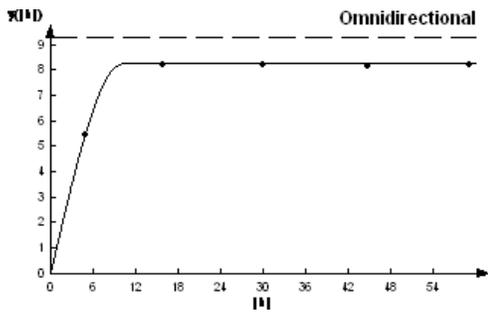
Septiembre 2020



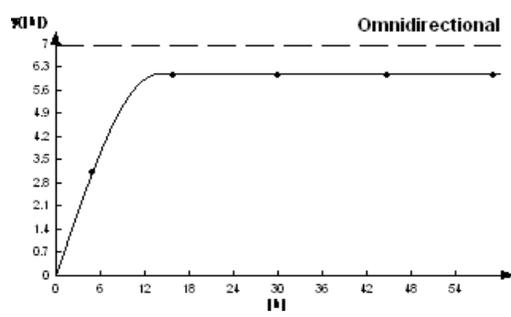
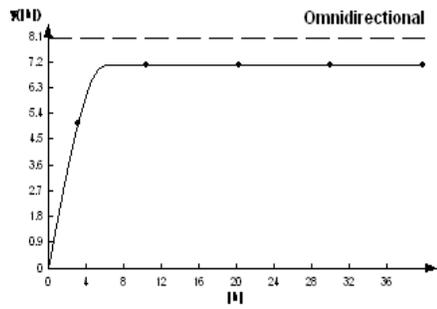
Octubre 2020



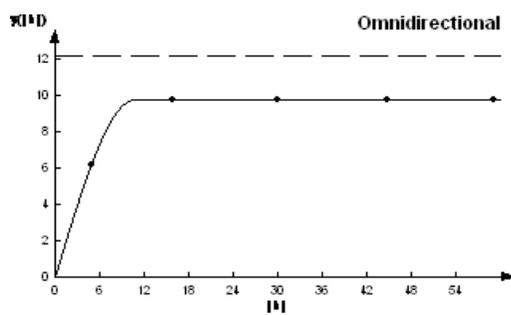
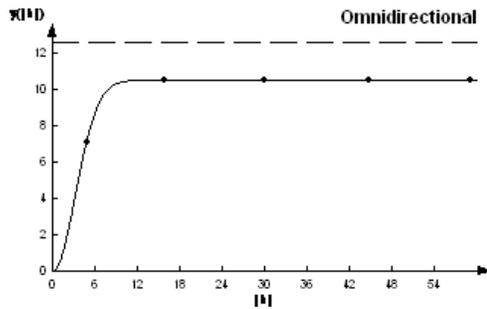
Noviembre 2020



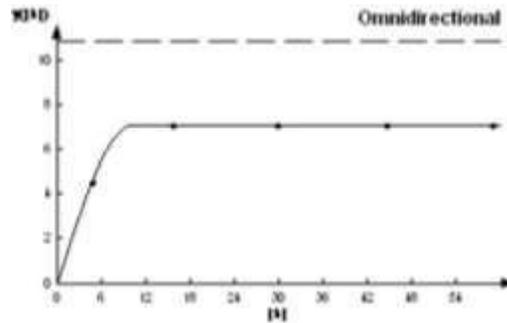
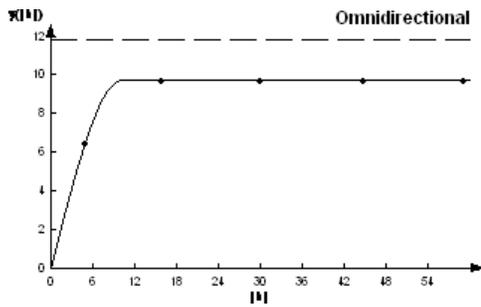
Diciembre 2020



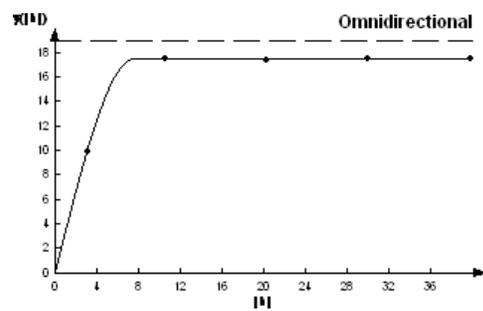
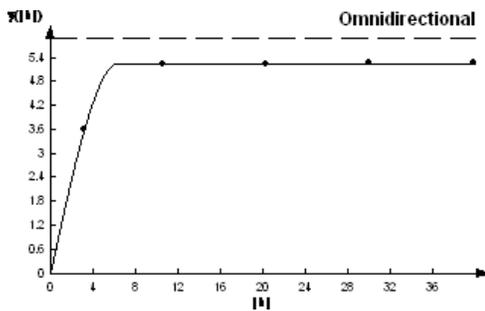
Enero 2021



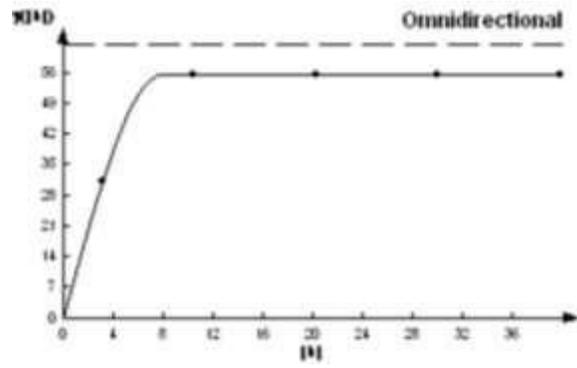
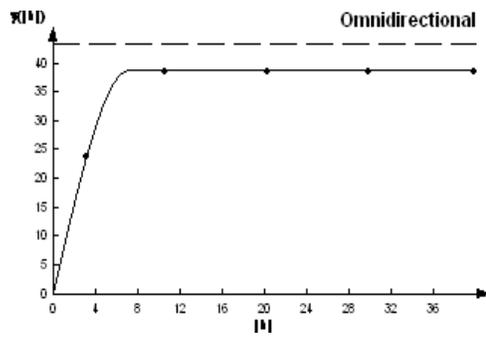
Febrero 2021



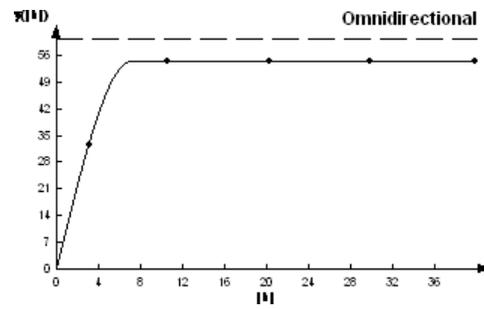
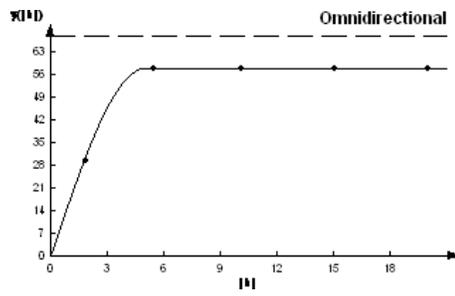
Marzo 2021



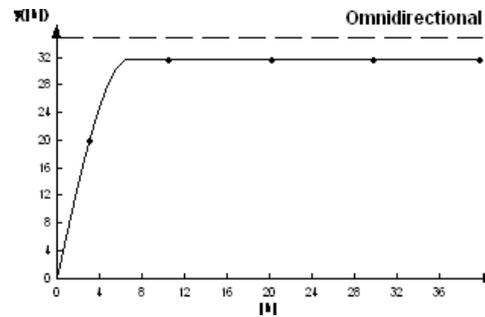
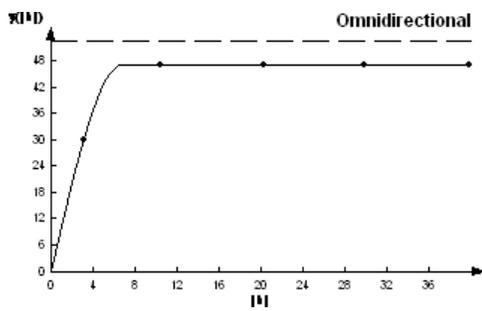
Abril 2021



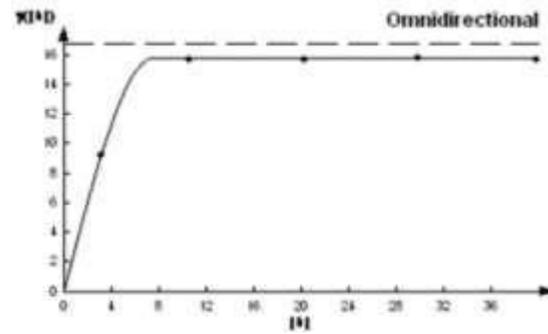
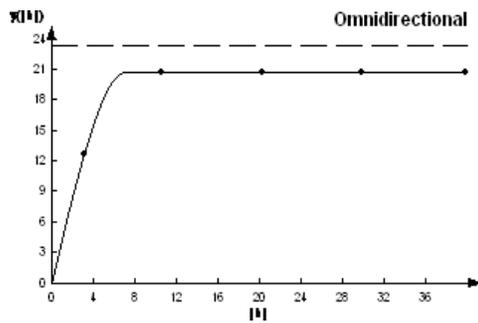
Mayo 2021



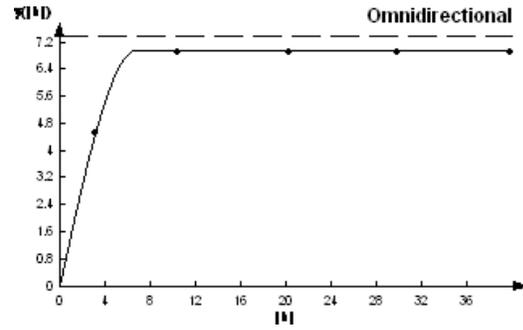
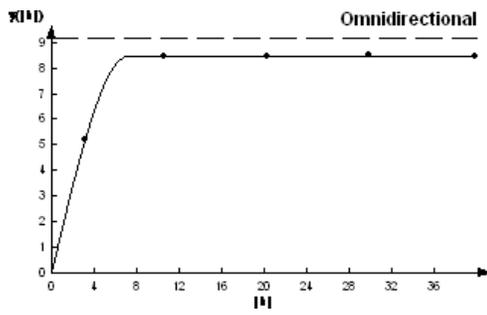
Junio 2021



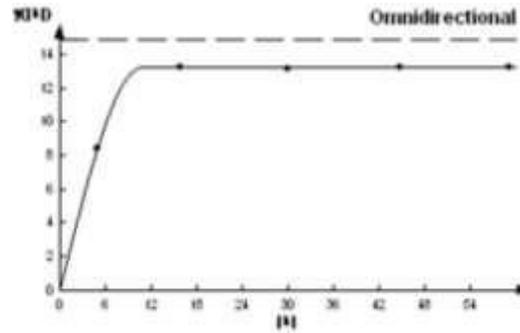
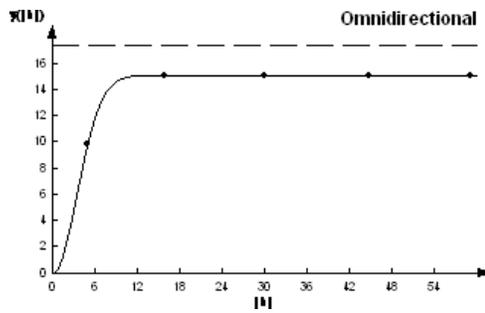
Julio 2021



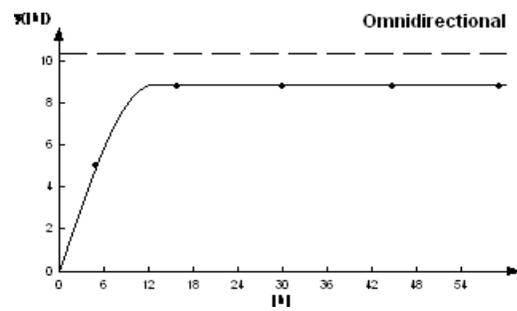
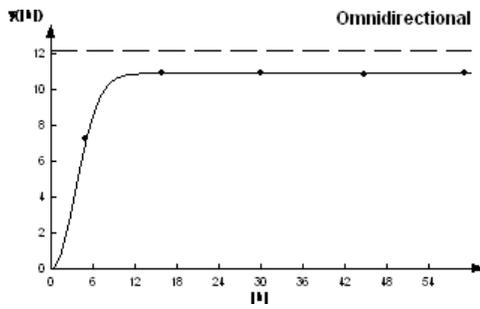
Agosto 2021



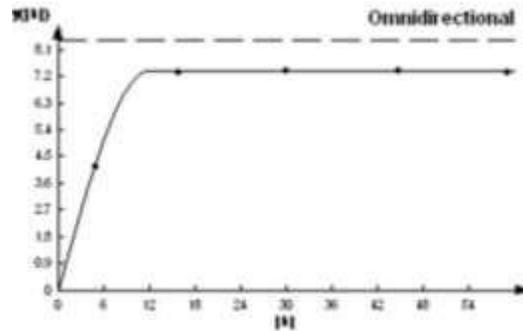
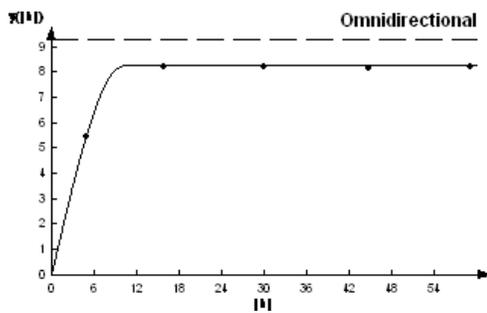
Septiembre 2021



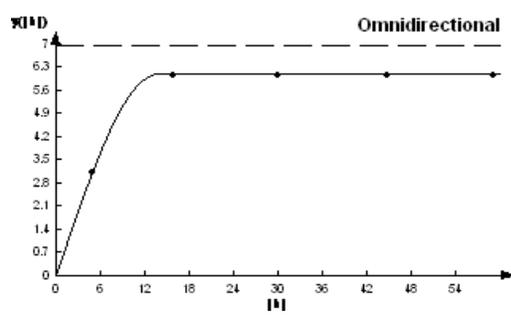
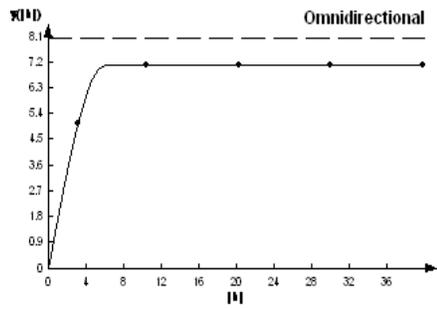
Octubre 2021



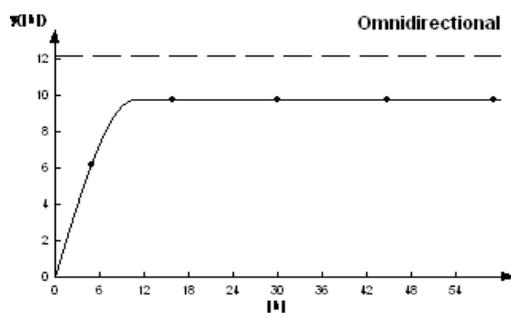
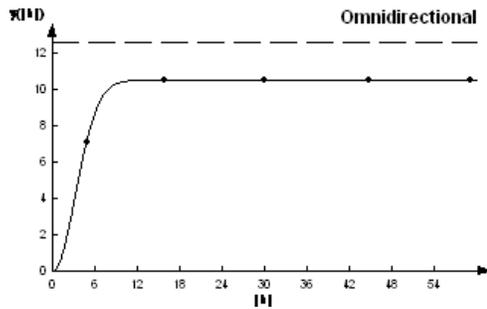
Noviembre 2021



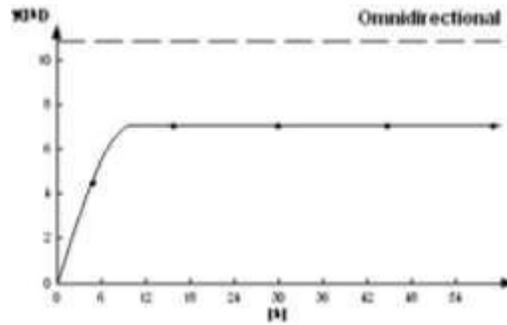
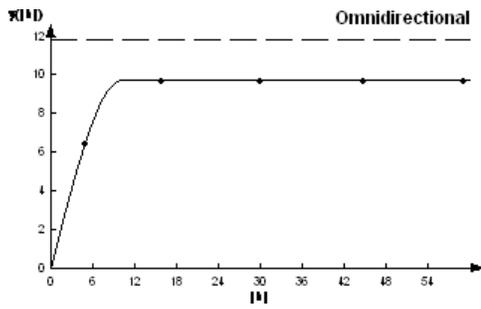
Diciembre 2021



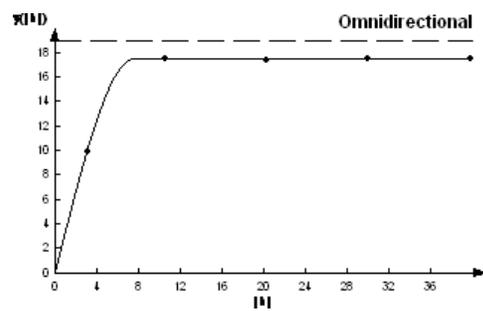
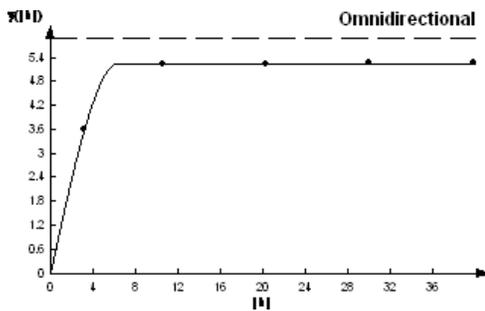
Enero 2022



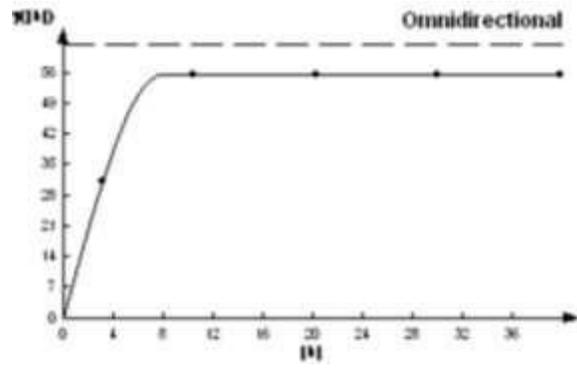
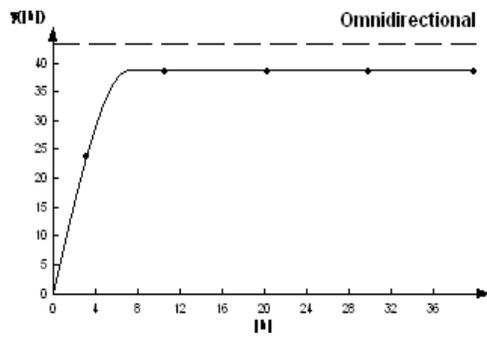
Febrero 2022



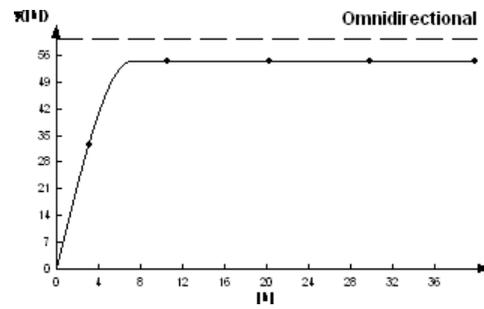
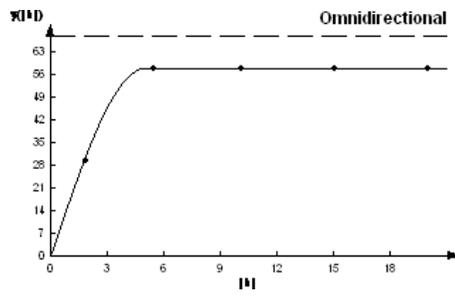
Marzo 2022



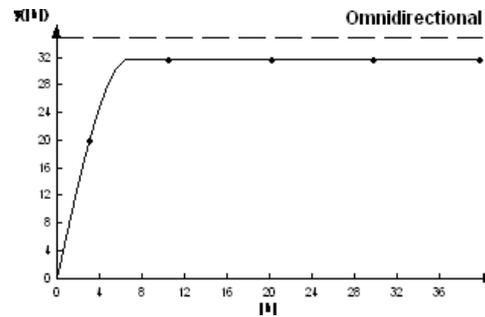
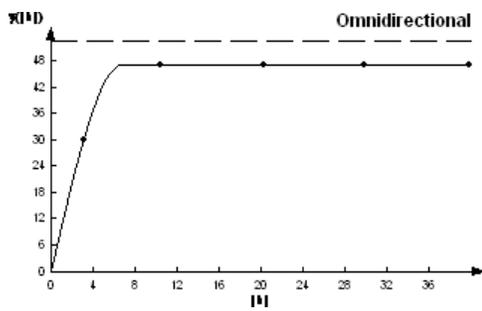
Abril 2022



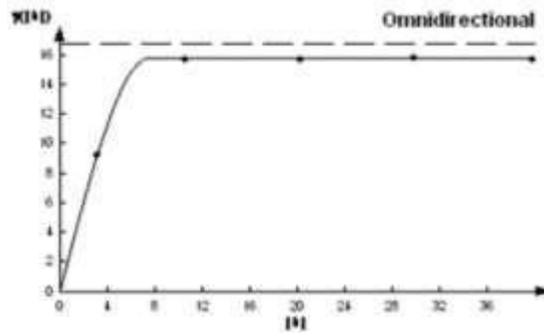
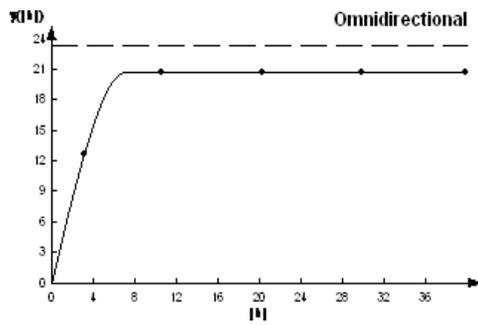
Mayo 2022



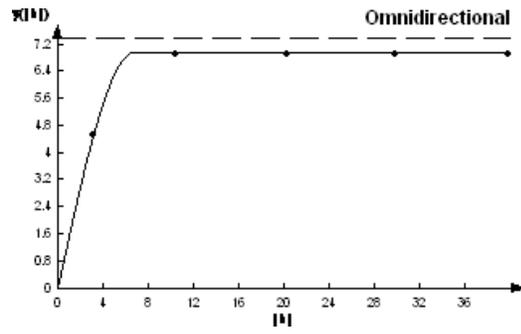
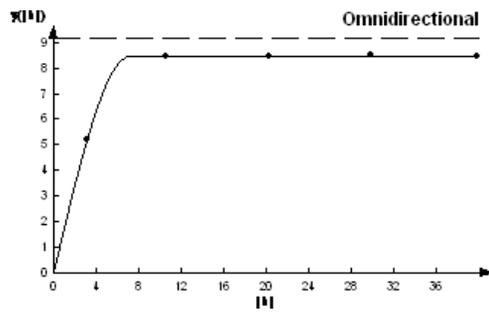
Junio 2022



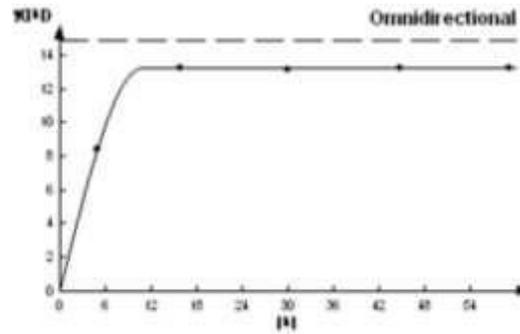
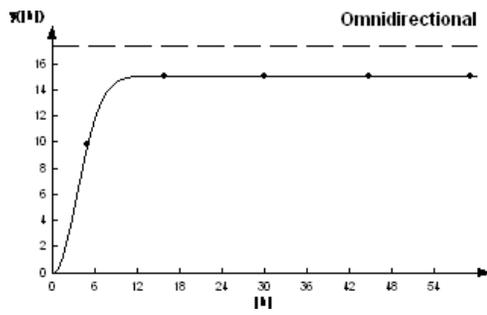
Julio 2022



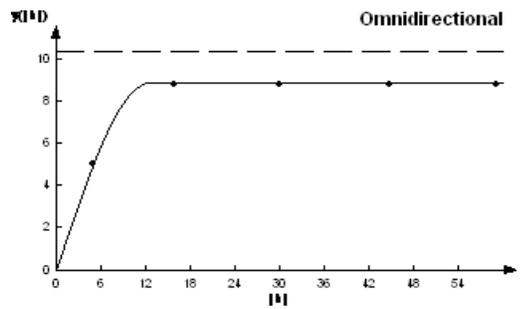
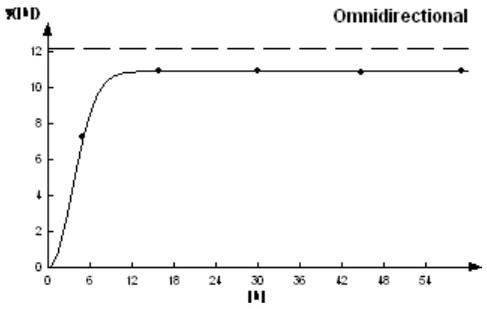
Agosto 2022



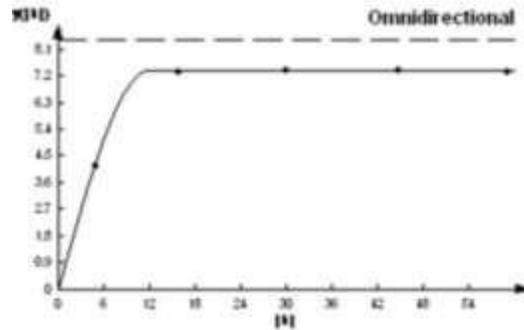
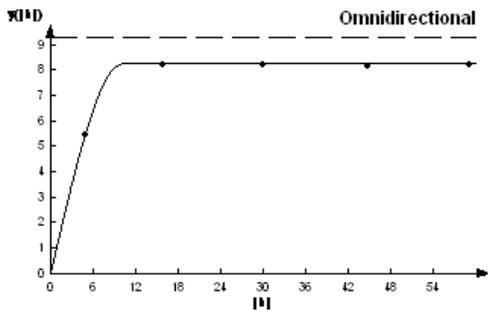
Septiembre 2020



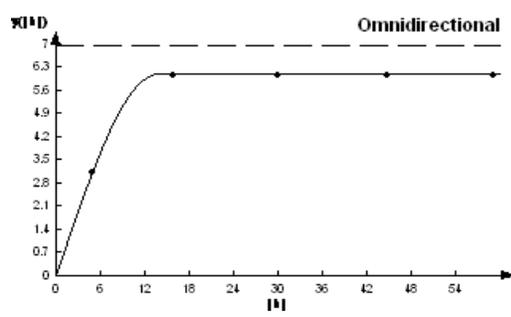
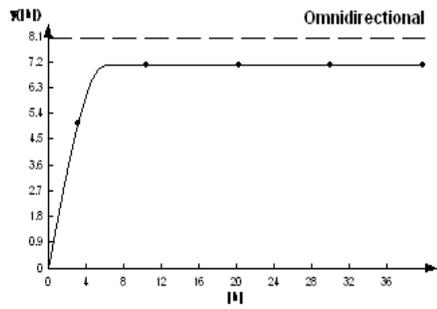
Octubre 2020



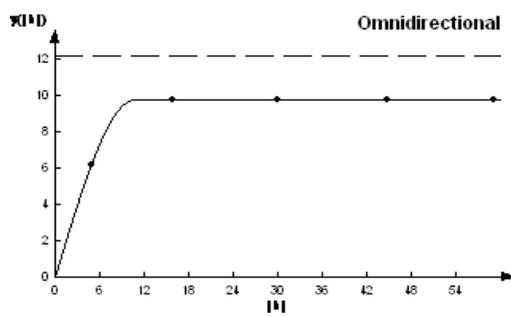
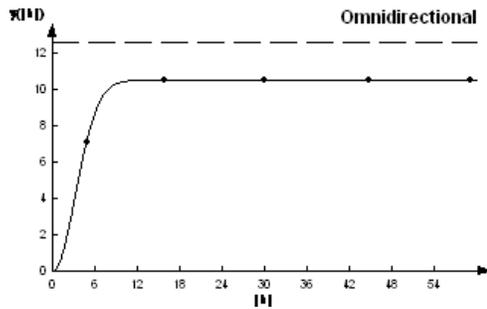
Noviembre 2020



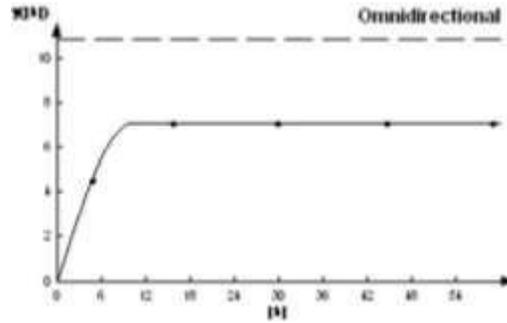
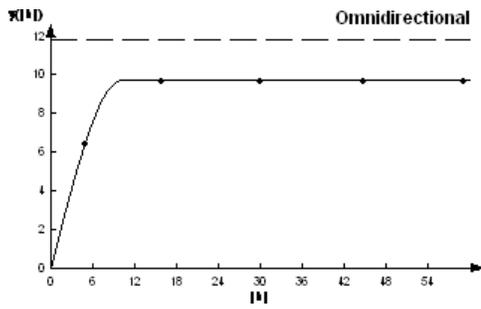
Diciembre 2020



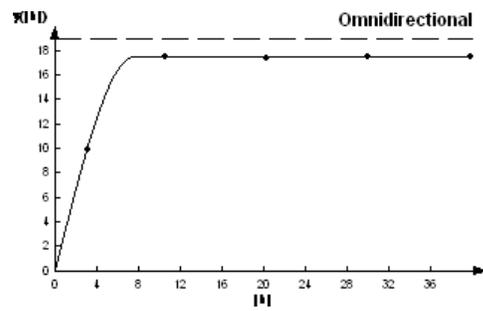
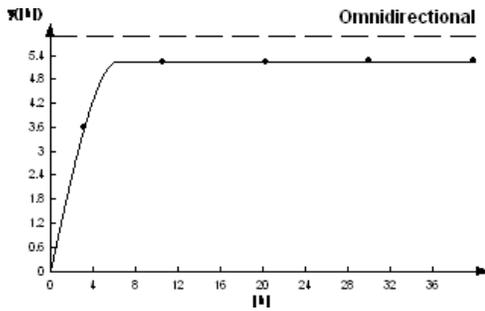
Enero 2021



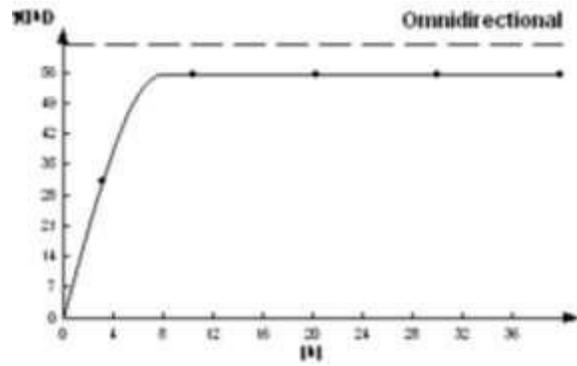
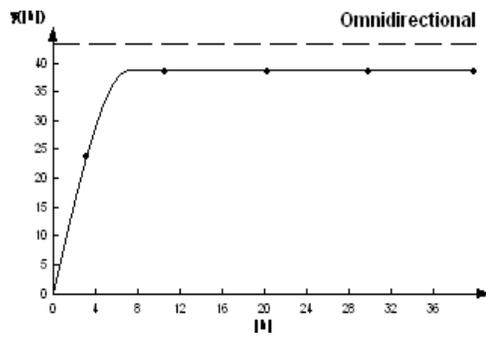
Febrero 2021



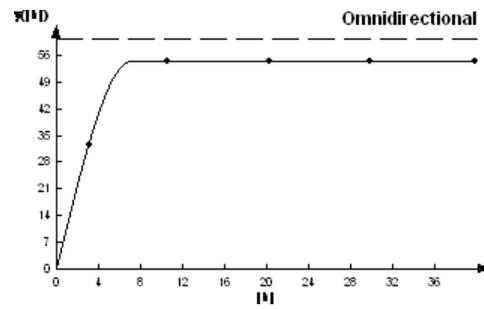
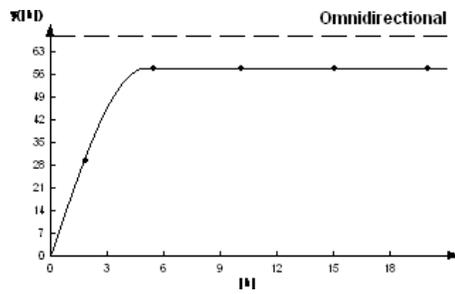
Marzo 2021



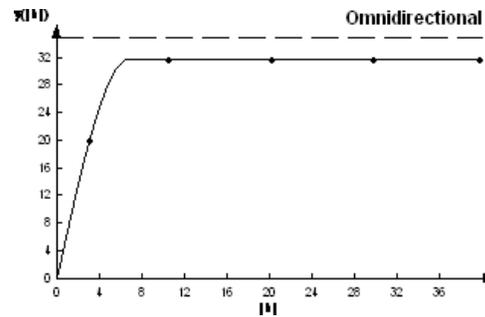
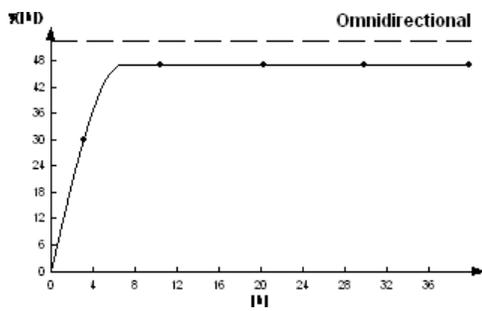
Abril 2021



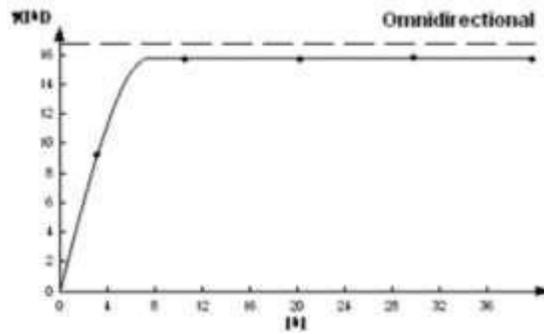
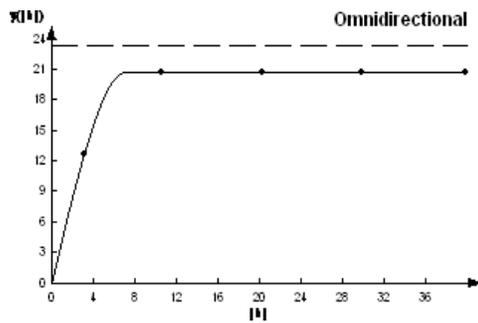
Mayo 2021



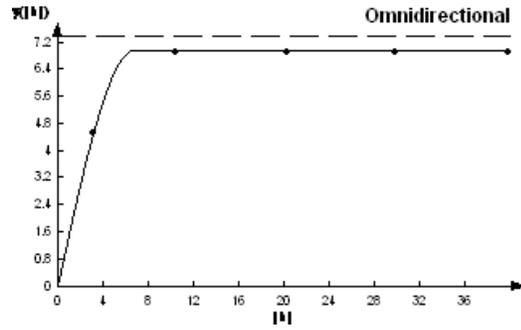
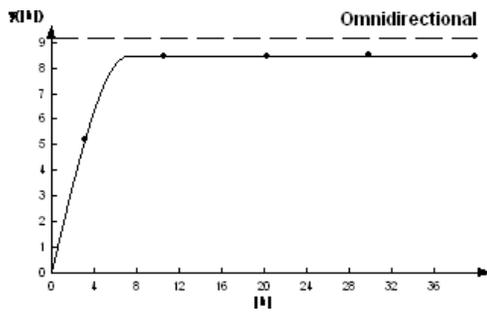
Junio 2021



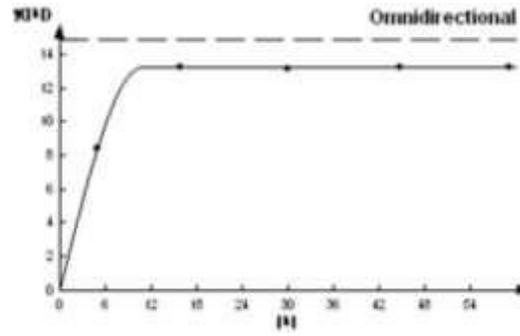
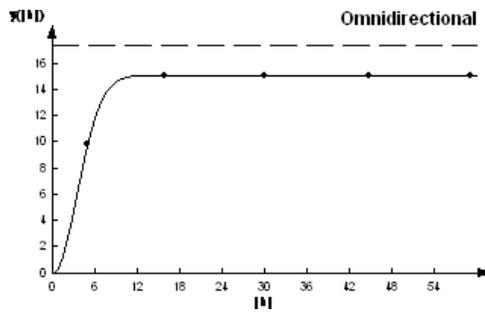
Julio 2021



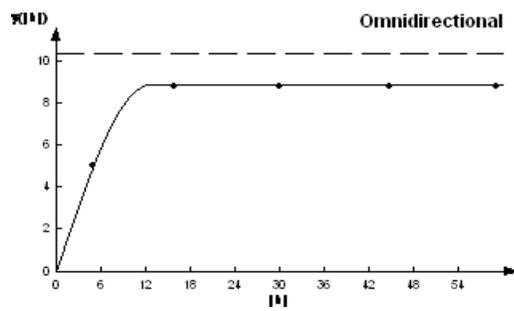
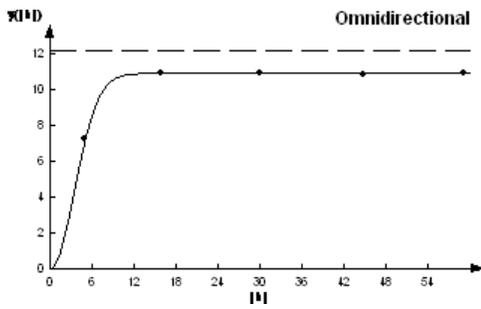
Agosto 2021



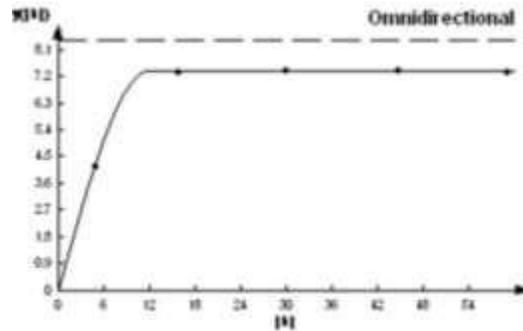
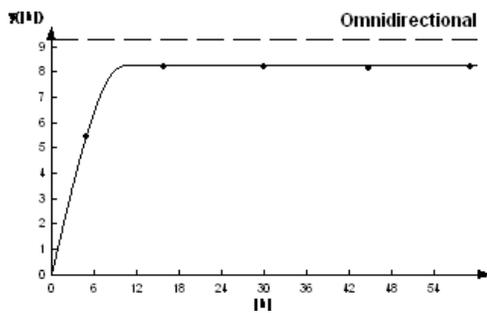
Septiembre 2021



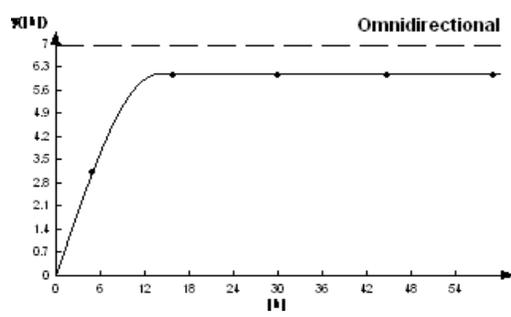
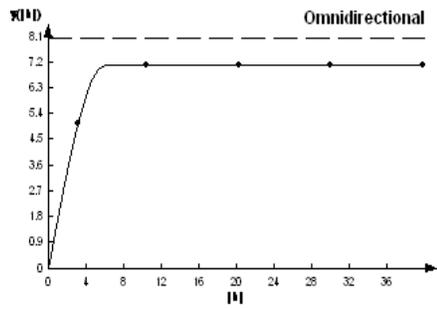
Octubre 2021



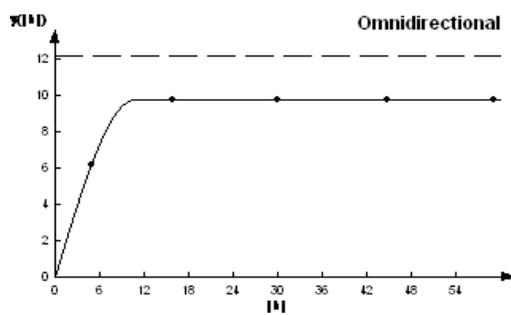
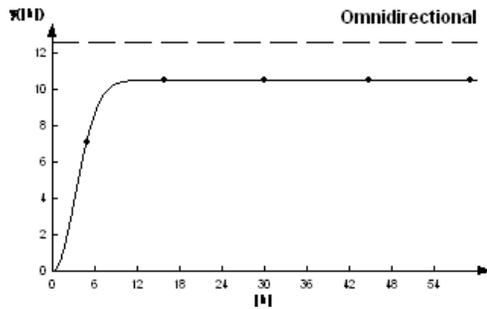
Noviembre 2021



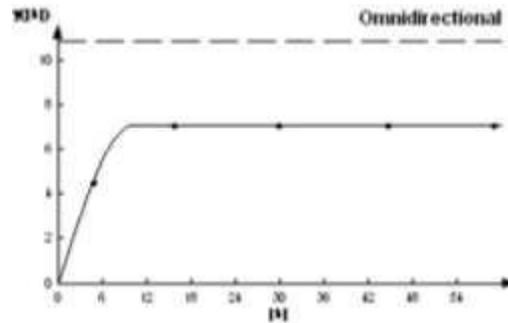
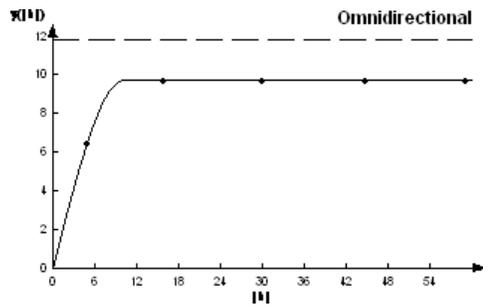
## Diciembre 2021



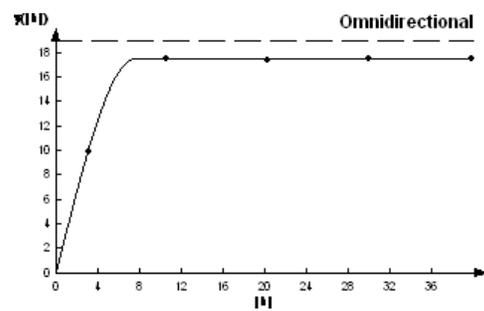
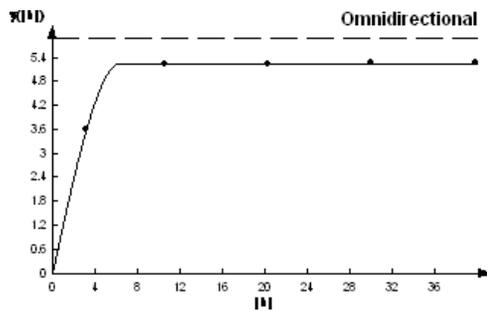
## Enero 2022



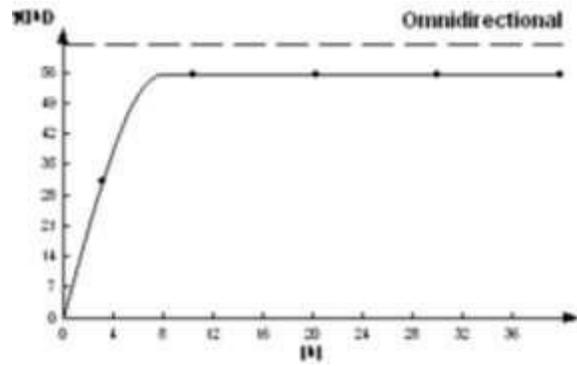
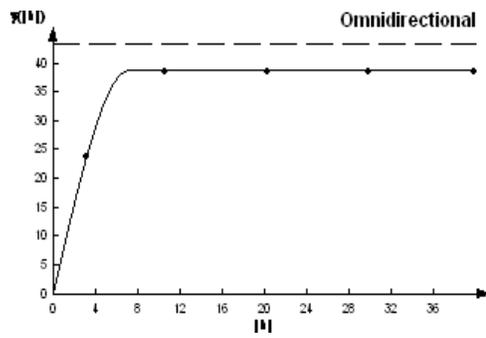
## Febrero 2022



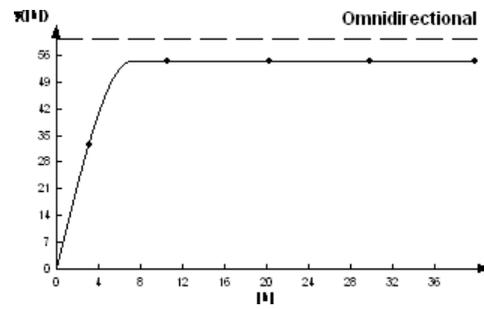
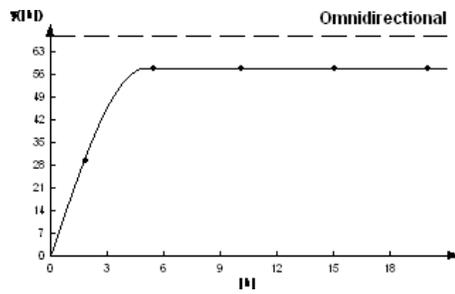
## Marzo 2022



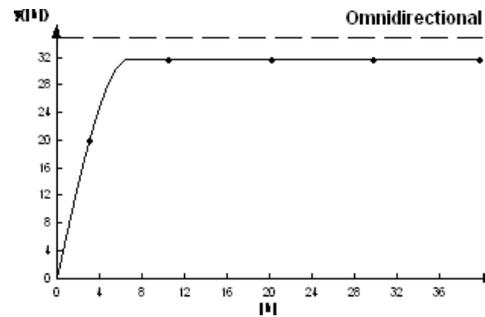
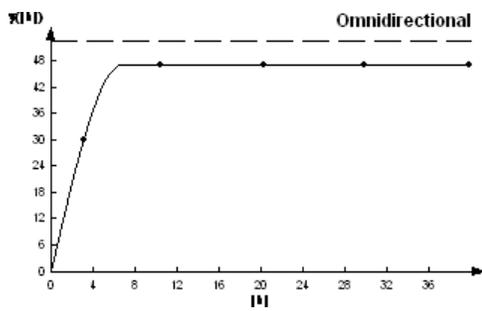
Abril 2022



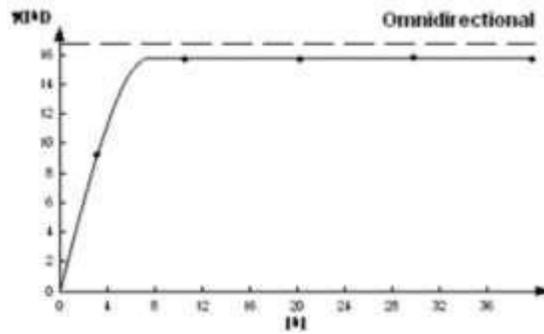
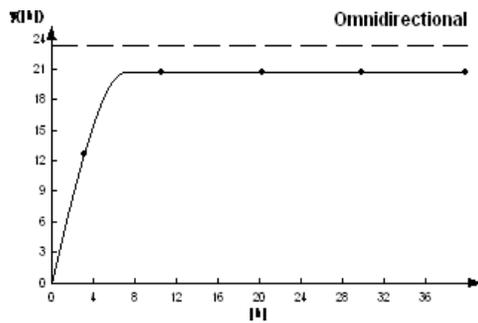
Mayo 2022



Junio 2022



Julio 2022



Agosto 2022

