

Spatial and temporal distribution of ojo de gallo (*Mycena citricolor*) in coffee plantations of the State of Mexico

Distribución espacial y temporal de ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en cafetales del Estado de México

Esther Pino-Miranda, José Francisco Ramírez-Dávila*, Rodolfo Serrato-Cuevas, Jaime Mejía-Carranza, Atenas Tapia-Rodríguez, 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.

*Corresponding author: jframirez@uaemex.mx.

Received: April 20, 2022.

Accepted: July 07, 2022.

Pino-Miranda E, Ramírez-Dávila JF, Serrato-Cuevas R, Mejía-Carranza J and Tapia-Rodríguez A. 2022. Spatial and temporal distribution of ojo de gallo (*Mycena citricolor*) in coffee plantations of the State of Mexico. Mexican Journal of Phytopathology 40(3): 433-446.

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2204-2>

First DOI publication: July 27, 2022.

Primera publicación DOI: 27 de Julio, 2022.

Abstract. The eye of the rooster (*Mycena citricolor*) is a disease in the coffee crop that can be more severe during the rainy season due to the favorable conditions that occur during this period. The objective of the study was to determine the spatial distribution and population density of *M. citricolor* in coffee cultivation in the State of Mexico and thus understand the epidemiological process of the disease. The research was carried out in the municipality of Amatepec, State of Mexico.

Resumen. El ojo de gallo (*Mycena citricolor*) es una enfermedad en el cultivo de café que puede ser más severa durante la época de lluvias debido a las condiciones favorables que se presentan durante este período. El objetivo del estudio fue determinar la distribución espacial y densidad poblacional de *M. citricolor*, en cultivo de café en el Estado de México y así comprender el proceso epidemiológico de la enfermedad. La investigación se realizó en el municipio de Amatepec, Estado de México. Los muestreos se realizaron quincenalmente de septiembre 2020 a febrero 2021; seleccionando seis parcelas y 200 cafetos (*Coffe arabica*) variedades Typica y Caturra, al azar por parcela, estos se marcaron y georreferenciaron. Se utilizaron métodos para obtener la distribución espacial de ojo de gallo, mostrando diferentes ajustes de modelos geostatísticos como el gaussiano, esférico y exponencial, estos fueron validados con el método de validación cruzada, mostrando una distribución agregada. La estimación de la superficie infectada

The samplings were carried out fortnightly from September 2020 to February 2021; selecting six plots and 200 coffee trees (*Coffe arabica*) Typica and Caturra varieties, randomly per plot, these were marked and georeferenced. Methods were used to obtain the spatial distribution of the rooster's eye, showing different adjustments of geostatistical models such as Gaussian, spherical and exponential, these were validated with the cross-validation method, showing an aggregate distribution. The estimation of the area infected by *M. citricolor* was obtained using ordinary kriging, revealing the presence of foci of infection within the plots, finding a relationship between density and climatic conditions (temperature, humidity and dew point). A high degree of spatial dependence was also obtained in all samples, indicating a strong correlation between the data. It is concluded that geostatistics is an effective tool to study and forecast this type of disease and give a clearer idea of the epidemiological process of the disease.

Keywords: *Mycena citricolor*, Spatial distribution, Epidemiology

Mexico produces one of the highest quality and most demanded coffee varieties worldwide. It produces around 944 thousand tons of coffee grains each year. The states with the highest production are Chiapas, with 40.8% of the national production, Veracruz with 24.4% and Puebla with 15.5%. Together, these three states produce more than 70% of the national total (SIAP, 2021). The State of Mexico currently has approximately 549 hectares planted with coffee, from which 622 tons of coffee are obtained each year. These plantations are distributed over several municipalities, the most important of which are Amatepec (338.2 hectares

por *M. citricolor* se obtuvo utilizando el krigeado ordinario revelándonos la presencia de focos de infección dentro de las parcelas, encontrándose una relación de la densidad con las condiciones climáticas (temperatura, humedad y punto de rocío). También se obtuvo un alto grado de dependencia espacial en todos los muestreos, lo que indica una fuerte correlación entre los datos. Se concluye que la geostatística es una herramienta eficaz para estudiar y pronosticar este tipo de enfermedad y dar una idea más clara del proceso epidemiológico de la enfermedad.

Palabras claves: *Mycena citricolor*, Distribución espacial, Epidemiología

México produce uno de los cafés (café arábica) con mayor demanda y calidad en el mundo; a nivel nacional se producen alrededor de 944 mil toneladas del grano, los estados con mayor producción son Chiapas que reporta una producción del 40.8%, Veracruz con el 24.4% y Puebla con el 15.5%, estas entidades producen más del 70% del total nacional (SIAP, 2021). Actualmente el Estado de México tiene aproximadamente 549 ha sembradas de café de las cuales se obtiene una producción de 622 toneladas, estas plantaciones se encuentran distribuidas en varios municipios, los más importantes son: Amatepec con una superficie sembrada de 338.2 ha y una producción de 333.2 toneladas, Sultepec y Temascaltepec (SIAP, 2020).

A pesar de la relevancia del café, en México, los agricultores en general enfrentan diversos problemas fitosanitarios durante el proceso de producción del cultivo (SENASICA, 2018). Una de estas dificultades es ojo de gallo ocasionada por el hongo *M. citricolor*, miembro de la Clase Basidiomycete, el principal efecto de la enfermedad es el bajo ren-

and 333.2 tons), Sultepec and Temascaltepec (SIAP, 2020).

Despite their importance, coffee crops in Mexico face various phytosanitary problems (SENASICA, 2018). One of these is “ojo de gallo” (American Leaf Spot), caused by the fungus *M. citricolor*, a member of the Basidiomycetes group of fungi. The main effect of the disease is low production yield due to defoliation (Granados, 2020). The variety *C. arabica* and varieties derived from the Timor Hybrid (TH) have different degrees of susceptibility to the attack of “ojo de gallo”. For example, the Catuaí and Villa Sarchí varieties have greater tolerance to the disease than the varieties of the Catimor group (Santacreo 2001; Avelino *et al.*, 1995).

Rooster’s eye is a very important disease in plantations located over 700 meters above sea level, with shade >46%, ambient humidity >80% and cool temperatures between 19 and 23 °C (CENICAFE, 2011). Studies carried out in El Salvador, Costa Rica and Guatemala have shown that the development of the disease depends on the seasonal fluctuations of rainfall and relative humidity. The incidence of the disease increases in rainy seasons, as does the number of diseased leaves and the number of lesions per leaf (from 1 to 75 lesions) (SENASICA, 2014).

In nature, organisms form aggregations or gradients in response to structural characteristics that depend on biotic and abiotic variables of their habitat. This should be kept in mind to better understand the population dynamics of different organisms and their relationship with the environment (Gomez *et al.*, 2010).

The last important epidemic of rooster’s eye in coffee occurred in Costa Rica in 2010. It was associated with a 12% decrease (around 71,400,000 kg) in the estimated harvest production for the productive year 2010-2011, which meant a loss of

diminution in the production, due to the defoliation (Granados, 2020). The varieties of *C. arabica* and varieties derived from the Híbrido de Timor (HdT) tienen diferentes grados de susceptibilidad al ataque de ojo de gallo; por ejemplo, las variedades Catuaí y Villa Sarchí tienen mayor tolerancia a la enfermedad, que los del grupo Catimor (Santacreo 2001; Avelino *et al.*, 1995).

Ojo de gallo es una enfermedad muy importante en plantaciones localizadas por arriba de los 700 msnm, sombra >46%, con humedad en el ambiente >80% y temperaturas frescas comprendidas entre 19 y 23 °C (CENICAFE, 2011). Estudios realizados en El Salvador, Costa Rica y Guatemala, han demostrado que el desarrollo de la enfermedad depende de la fluctuación estacional de la lluvia y la humedad relativa. La incidencia de la enfermedad se hace más evidente en épocas lluviosas, el número de hojas enfermas y el número de lesiones por hoja aumenta rápidamente, desde 1 hasta 75 lesiones (SENASICA, 2014).

Es fundamental reconocer que en la naturaleza los organismos se encuentran formando agregaciones o gradientes en respuesta a características estructurales controladas por variables bióticas y abióticas que presentan los hábitats, para contribuir a un mayor entendimiento de la dinámica poblacional de los organismos y su relación con el ambiente (Gómez *et al.*, 2010).

En Costa Rica en 2010 se presentó la última epidemia importante de ojo de gallo en café, se contabilizó una disminución del 12 % (alrededor de 71 400 000 kg) de la cosecha estimada para el año productivo (2010-2011), lo que significó una pérdida de alrededor de \$60 millones USD (Granados *et al.*, 2020). En México algunas plantaciones han mostrado incidencia del 30%; y para el caso del Estado de México esta enfermedad es monitoreada por el Programa de Monitoreo Epidemiológico Fitosanitario (SENASICA, 2017).

around USD \$60 million (Granados *et al.*, 2020). In Mexico, some plantations have shown an incidence of 30%. In the State of Mexico, this disease is monitored by the Phytosanitary Epidemiological Monitoring Program (SENASICA, 2017).

Geostatistics is a set of tools and techniques used to analyze and predict values of a variable that is distributed over space or time in a continuous way. It can be used to study phytosanitary problems. All geostatistical work has three stages; 1. Exploratory data analysis during which sample data are studied without considering their geographical distribution. 2. Structural analysis or study of the spatial continuity of the variables. 3. Predictions or estimates of the variables in non-sample points (Moral, 2004). The present study aimed to collect data of the spatial distribution and population density of *M. citricolor* in coffee crops in the State of Mexico to understand the epidemiological process of the disease.

The research was carried out in the municipality of Amatepec, located in the extreme south of the western part of the State of Mexico. Six plots of Arabica coffee (Typica and Caturra) were selected, with an age of 10 to 20 years and an average area of 5000 m². The shade percentage of the plots ranged between 40 and 60%. The main management activities carried out in each plot were formation pruning, shade regulation and phytosanitary pruning. For the sampling, the plots were delimited and divided into 10x10m quadrants, making a total of 50 quadrants per plot. Four trees were randomly selected from each quadrant, for a total of 200 trees. Each plant was marked and georeferenced using a differential global positioning system (Trimble SPS361) to locate and sample the same plants during the study. In each plant, samplings were performed by stratum (lower, middle and upper), taking four branches from each of them (one for each cardinal point). Three random leaves

La Geoestadística es un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua; utilizando esta herramienta para el estudio de problemas fitosanitarios. Todo trabajo geoestadístico tiene tres etapas; 1. Análisis exploratorio de los datos. Se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. 2. Análisis estructural. Estudio de la continuidad espacial de la variable. 3. Predicciones. Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales (Moral, 2004). El objetivo del estudio fue recolectar datos que determinaron la distribución espacial y densidad poblacional de *M. citricolor*, en cultivos de café en el Estado de México y así comprender el proceso epidemiológico de la enfermedad.

La investigación se llevó a cabo en el municipio de Amatepec, ubicado en el extremo sur de la porción occidental del Estado de México. Se seleccionaron seis parcelas de café arábico (Typica y Caturra) con una edad de 10 a 20 años, un área promedio de 5000 m²; el porcentaje de sombra de las parcelas fue en un rango de 40-60%. Las principales actividades de manejo desarrolladas en cada parcela fueron: poda de formación, regulación de sombra y podas fitosanitarias. Para el muestreo las parcelas fueron delimitadas y divididas en cuadrantes de 10x10m obteniendo un total de 50 cuadrantes por parcela, de los cuales se tomaron cuatro árboles al azar, para tener un total de 200 árboles. Cada planta fue marcada y georreferenciada mediante un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), modelo Trimble SPS361; para ubicar y muestrear las mismas plantas durante la investigación. En cada planta los muestreos se realizaron por estrato (bajo, medio y alto) y de cada uno de ellos se seleccionaron cuatro ramas (una por cada punto cardinal); de cada rama se evaluaron tres hojas al azar. La incidencia de ojo de gallo se determinó con

from each branch were evaluated. The incidence of rooster's eye was determined based on the number of leaves that presented symptoms of the disease, compared to the total number of leaves on each branch. The evaluations were carried out every 14 days from September 2020 to February 2021.

The kurtosis and the coefficient of variation of the obtained data were evaluated to verify their normality. Once the database was integrated, a geostatistical analysis was carried out. It began by obtaining the experimental semivariogram of the incidence of the disease found during the study. The experimental semivariograms, which were computed using the Variowin 2.2 software (Springer Verlag, NY) (Maldonado *et al.*, 2017), were adjusted to spherical, Gaussian, exponential, pure nugget effect, logarithmic, monomic and hole-effect theoretical models. The plateau, range and nugget effect parameters of these models were modified manually to mathematically validate the adjusted models using validation statistics such as Mean Estimation Errors (MEE), Mean Square Error (ECM) and Dimensionless Mean Square Error (MCE) (Rivera-Martínez *et al.*, 2017).

The experimental values of the semivariograms were calculated using the following expression (Journel and Huijbregts 1978; Isaaks and Srivastava 1989):

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

Where: $\gamma^*(h)$ is the experimental value of the semivariogram for the distance interval h ; $N(h)$ is the number of pairs of sampled points separated by the distance interval h ; $z(x_i)$ is the value of the variable of interest at the sample point x_i ; $z(x_i+h)$ is the value of the variable of interest at the sample point x_i+h .

base al número de hojas que presentaron síntomas de la enfermedad, con respecto al total de hojas en cada rama; las evaluaciones se realizaron cada 14 días de septiembre 2020 a febrero 2021.

A los datos adquiridos se les aplicó los parámetros estadísticos Curtosis y el coeficiente de variación para verificar su normalidad, se detectó normalidad en ellos. Una vez integrada la base de datos, se realizó un análisis geoestadístico, se inició con la obtención del semivariograma experimental a partir de la incidencia recabada en la investigación con el programa Variowin 2.2 (Software for spatial data analysis en 2D. Springer Verlag, NY) (Maldonado *et al.*, 2017). Los semivariogramas experimentales se ajustaron a modelos teóricos, los cuales son esféricos, gaussianos, exponenciales, de efecto pepita puro, logarítmicos, monómicos y de efecto agujero, donde los parámetros de meseta, rango y efecto pepita se modifican manualmente hasta obtener estadísticos de validación que sean adecuados y permitan aprobar matemáticamente los modelos ajustados, tales como la Media de los Errores de Estimación (MEE), Error Cuadrático Medio (ECM) y Error Cuadrático Medio Adimensional (ECMA) (Rivera-Martínez *et al.*, 2017).

El valor experimental del semivariograma fue calculado con la siguiente expresión (Journel y Huijbregts 1978; Isaaks y Srivastava 1989):

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

Dónde: $\gamma^*(h)$ es el valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h ; $N(h)$ es el número de pares de puntos muestreados separados por el intervalo de distancia h ; $z(x_i)$ es el valor de la variable de interés en el punto muestral x_i y $z(x_i+h)$ es valor de la variable de interés en el punto muestra x_i+h .

The maps were elaborated by interpolating values through ordinary Kriging, an interpolation technique that allows for the unbiased estimation of non-sampled points. Density maps were then prepared with the Surfer 16.0 software (Surface Mapping System). This software was also used to determine the infected surface in the maps to establish where the disease was actually present within the study plots (Rivera-Martínez *et al.*, 2017). The incidence of rooster's eye was associated with climatic conditions such as temperature, relative humidity and dew point, which were determined using a climatic sensor and data logger HOBO ProV2.

Seventy-two semivariograms were calculated in the present study. They showed that the disease rooster's eye had an aggregated spatial distribution that fitted Gaussian and spherical models in most plots, except for plots 1 and 3, for which the semivariograms of February and November fitted an exponential model (Table 1). Martínez *et al.* (2021) described spherical models, which indicate that the populations are present in greater quantity in certain areas of the plot compared to the rest of the sampled points, and that the aggregation centers are random. A Gaussian model indicates that the aggregation behavior occurs continuously within the plots, which means that the fungus disperses to nearby individuals and not to those that are further away. The adjusted parameters that allowed validating the models were the range, which is the degree of correlation between the sampled data; starts at 11,517 ending at 19.84 for the 6 plots. In all models, the nugget effect was equal to zero, which according to Twizeyimana *et al.* (2008) indicates a high level of aggregation of the incidence of the disease, and also that the sample size used in the study was sufficient and the sampling error minimal. In all the samples, there was a high spatial dependence between the

La elaboración de mapas se realizó al utilizar la interpolación de valores a través del krigeado ordinario que 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 con el programa Surfer 16.0 (SurfaceMappingSystem). Finalmente 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, al emplear el programa Surfer 16.0 (SurfaceMappingSystem) (Rivera-Martínez *et al.*, 2017). Se relacionó la incidencia de ojo de gallo con las condiciones climáticas, temperatura, humedad relativa y punto de rocío; obtenidas de sensores climáticos datta loggers HOBO ProV2.

En la investigación se realizaron 72 semivariogramas, los cuales muestran que la enfermedad ojo de gallo presentó una distribución espacial en forma agregada, adecuándose a modelos de tipo gaussiano y esférico en la mayoría de las parcelas; excepto para las parcelas 1 y 3, en los meses de febrero y noviembre correspondientemente, presentaron un modelo de tipo exponencial (Cuadro 1). Martínez *et al.* (2021) describieron modelos de tipo esférico los cuales indica que las poblaciones se presentan en mayor cantidad en ciertas zonas de la parcela respecto al resto de puntos considerados en el muestreo y que los centros de agregación son aleatorios; el modelo gaussiano es indicativo de que el comportamiento de agregación se da de forma continua dentro de las parcelas, indica que el hongo se dispersa a individuos que se encuentren cercanos y no a aquellos más lejanos. Los parámetros ajustados que permitieron validar los modelos, fueron el rango que es el grado de correlación entre los datos muestreados; inicia en 11.517 hasta 19.84 para las seis parcelas. El efecto pepita para todos los modelos, es igual a cero, que de acuerdo con Twizeyimana *et al.* (2008), puede ser explicado

Table 1. Parameters of the semivariogram of the incidence per plot of *Mycena citricolor* between September 2020 and February 2021 in the municipality of Amatepec, State of Mexico.**Cuadro 1. Parámetros del semivariograma de los muestreos por parcela de *Mycena citricolor* de septiembre 2020 a febrero 2021 del municipio de Amatepec, Edo. de México.**

Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pepita/ Meseta	Dependencia Espacial
Parcela 1								
Sep-1 ^z	4.10	15.33	Gaussiano	0	12.64	11.52	0	Alta
Sep- 2	4.22	14.41	Esférico	0	10.95	17.92	0	Alta
Oct-1	4.38	14.17	Gaussiano	0	11.99	11.52	0	Alta
Oct-2	4.19	12.97	Gaussiano	0	10.66	10.88	0	Alta
Nov-1	4.08	13.59	Gaussiano	0	11.06	15.36	0	Alta
Nov- 2	4.06	12.19	Esférico	0	11.05	14.08	0	Alta
Dic-1	3.77	11.10	Esférico	0	9.12	17.28	0	Alta
Dic-2	3.68	10.12	Esférico	0	8.47	16.64	0	Alta
Ene-1	3.54	9.88	Esférico	0	9.20	19.84	0	Alta
Ene-2	3.83	9.09	Gaussiano	0	8.46	12.8	0	Alta
Feb-1	3.63	8.70	Exponencial	0	8.44	9.60	0	Alta
Feb-2	3.48	7.38	Gaussiano	0	7.10	13.44	0	Alta
Parcela 2								
Sep-1	8.45	34.69	Esférico	0	27.99	16.64	0	Alta
Sept-2	8.43	32.86	Esférico	0	27.39	16.00	0	Alta
Oct-1	8.80	30.07	Esférico	0	25.80	10.88	0	Alta
Oct-2	9.02	33.48	Esférico	0	27.54	16.00	0	Alta
Nov-1	8.56	29.43	Esférico	0	23.51	18.07	0	Alta
Nov-2	8.37	27.97	Esférico	0	23.54	15.36	0	Alta
Dic-1	8.02	23.75	Esférico	0	20.16	14.72	0	Alta
Dic-2	7.79	21.33	Esférico	0	17.60	17.28	0	Alta
Ene-1	7.48	17.64	Esférico	0	15.12	14.72	0	Alta
Ene-2	7.17	14.11	Esférico	0	11.85	17.28	0	Alta
Feb-1	6.95	11.61	Esférico	0	10.08	9.60	0	Alta
Feb-2	6.64	9.75	Esférico	0	8.53	16.00	0	Alta
Parcela 3								
Sep-1	8.72	53.19	Esférico	0	45.29	17.92	0	Alta
Sept-2	8.97	51.49	Esférico	0	44.72	14.72	0	Alta
Oct-1	8.94	48.87	Esférico	0	43.61	14.72	0	Alta
Oct-2	8.83	46.09	Gaussiano	0	37.72	11.52	0	Alta
Nov-1	8.67	44.13	Esférico	0	36.96	15.36	0	Alta
Nov-2	8.42	40.10	Exponencial	0	38.40	10.88	0	Alta
Dic-1	8.24	36.90	Esférico	0	31.82	15.36	0	Alta
Dic-2	8.06	33.92	Gaussiano	0	29.92	10.88	0	Alta
Ene-1	7.61	29.68	Esférico	0	24.90	14.72	0	Alta
Ene-2	7.23	25.32	Esférico	0	21.84	9.60	0	Alta
Feb-1	6.89	21.69	Esférico	0	17.60	10.88	0	Alta
Feb-2	6.57	18.19	Esférico	0	14.63	10.24	0	Alta
Parcela 4								
Sep-1	9.77	51.70	Esférico	0	44.72	16.38	0	Alta
Sept-2	9.55	45.65	Esférico	0	39.10	9.45	0	Alta
Oct-1	9.42	42.79	Esférico	0	37.41	15.75	0	Alta
Oct-2	9.27	39.47	Esférico	0	33.85	14.49	0	Alta
Nov-1	9.02	35.61	Esférico	0	30.60	10.71	0	Alta

Table 1. Continues.
Cuadro 1. Continúa.

Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pepita/ Meseta	Dependencia Espacial
Nov-2	8.78	31.50	Esférico	0	26.56	9.43	0	Alta
Dic-1	8.50	27.92	Gaussiano	0	24.08	8.19	0	Alta
Dic-2	8.37	26.02	Gaussiano	0	21.58	8.19	0	Alta
Ene-1	8.14	23.09	Esférico	0	20.15	9.45	0	Alta
Ene-2	8.02	21.26	Esférico	0	18.70	10.71	0	Alta
Feb-1	7.90	20.20	Esférico	0	17.43	10.08	0	Alta
Feb-2	7.63	17.76	Esférico	0	16.20	15.12	0	Alta
Parcela 5								
Sep-1	10.95	48.13	Esférico	0	41.76	14.08	0	Alta
Sept-2	10.80	44.57	Gaussiano	0	39.15	10.88	0	Alta
Oct-1	10.54	40.93	Esférico	0	34.12	14.72	0	Alta
Oct-2	10.24	37.19	Esférico	0	33.44	10.24	0	Alta
Nov-1	10.05	34.04	Esférico	0	28.90	14.18	0	Alta
Nov-2	9.76	30.58	Esférico	0	25.04	14.72	0	Alta
Dic-1	9.35	27.25	Esférico	0	22.96	10.88	0	Alta
Dic-2	9.20	26.86	Esférico	0	22.68	8.96	0	Alta
Ene-1	8.96	23.86	Esférico	0	20.40	10.24	0	Alta
Ene-2	8.71	21.19	Esférico	0	18.26	9.60	0	Alta
Feb-1	8.33	18.021	Esférico	0	15.48	8.96	0	Alta
Feb-2	8.03	15.62	Gaussiano	0	13.44	10.88	0	Alta
Parcela 6								
Sep-1	11.79	49.90	Gaussiano	0	41.11	10.88	0	Alta
Sept-2	11.39	45.10	Gaussiano	0	39.60	10.88	0	Alta
Oct-1	11.10	41.39	Gaussiano	0	34.44	10.88	0	Alta
Oct-2	10.95	38.59	Gaussiano	0	33.54	10.88	0	Alta
Nov-1	10.62	35.29	Esférico	0	31.65	14.09	0	Alta
Nov-2	10.68	34.09	Esférico	0	28.22	14.72	0	Alta
Dic-1	10.44	31.58	Esférico	0	28.16	13.44	0	Alta
Dic-2	10.04	27.67	Esférico	0	24.36	14.72	0	Alta
Ene-1	9.57	23.55	Esférico	0	21.36	10.88	0	Alta
Ene-2	9.28	20.72	Esférico	0	19.32	13.78	0	Alta
Feb-1	9.01	18.33	Esférico	0	17.10	14.08	0	Alta
Feb-2	8.80	17.51	Esférico	0	16.38	14.08	0	Alta

^z1) First sampling, 2) Second sampling. / ^z1) Primer muestreo, 2) Segundo muestreo.

data, which reflects that the data were associated with each other in a highly significant way (Rossi *et al.*, 1992). The data obtained showed that the aggregation of the incidence of rooster's eye is strongly stable (Maldonado *et al.*, 2017).

como un alto nivel de agregación de la incidencia de la enfermedad, también es un indicativo que el tamaño muestral utilizado en el estudio es suficiente y el error muestral es el mínimo. En todos los muestreos, existe una dependencia espacial alta

In the present study, maps were generated through ordinary kriging to estimate the percentages of infected surface and the values associated with non-sampled points. The 72 maps of the infected surface show the presence of *M. citricolor* in different coffee plots of the municipality of Amatepec (Figure 1). They show that the rooster's eye disease was distributed in central aggregation points, which were constant in all the samplings, indicating that the disease was latently but persistently present in the plots, awaiting the appropriate environmental conditions to spread. In the months of September, October, November and December, the points of aggregation of eye of the rooster were more pronounced but decreased from the month of January. This is due to the decrease of humidity and dew point temperature in the plots during these months (Figure 2). Cardenas *et al.* (2017) pointed out that the semivariograms and the maps generated through Kriging allow to identify foci of infection. They suggest that Geostatistics can explain the spatial arrangement of crop diseases and thus help develop accurate and comprehensive management strategies.

A key element of precision agriculture is the determination of the areas in need of management. For this, it is important to know which areas are infected and the percentage they represent of the total surface (Ramírez and Porcayo, 2009). In the present study, the percentage of infection for the six plots (Table 2) ranged between 64% and 85%. The months from September to December showed higher incidence of infection due to the change in climatic conditions (Figure 2) such as temperature, which averages 20 °C during these months. Campos (2010) mentioned that rooster's eye thrives under relatively cool temperature conditions between 17 and 22 °C, compared to the temperatures required by other fungi that attack coffee plants. Relative humidity was 88% in September, 91% in October,

entre los datos, que nos refleja que los datos están asociados entre sí de una manera altamente significativa (Rossi *et al.*, 1992), con los datos obtenidos se observa que las agregaciones presentadas por ojo de gallo son fuertemente estables (Maldonado *et al.*, 2017).

En este trabajo se generaron mapas a través del krigeado ordinario, para estimar los porcentajes de superficie infectada y los valores asociados a puntos no muestreados. Los 72 mapas obtenidos de la superficie infectada muestran la presencia de *M. citricolor* en las diferentes parcelas del municipio de Amatepec (Figura 1); mostró que ojo de gallo está distribuida en puntos centrales de agregación, los cuales se conservaron durante todos los muestreos, mostrando que la enfermedad está localizada en las parcelas de manera constante y latente que espera las condiciones ambientales adecuadas para incrementar. En los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre se observa que los puntos de agregación de ojo de gallo son más pronunciados y disminuyeron a partir del mes de enero; esto se debió a que la humedad y el punto de rocío presente en las parcelas se reducen en estos meses (Figura 2). Cárdenas *et al.* (2017), señalan que los semivariogramas y los mapas generados a través del krigeado permiten identificar focos de infección de las enfermedades, y, a su vez, sugiere que la Geostatística es una herramienta que puede explicar la disposición espacial que siguen las enfermedades de los cultivos, y de esta manera poder ayudar a tomar decisiones acertadas y oportunas, que ayudan a originar estrategias de manejo integral.

Una de las bases de la agricultura de precisión es determinar las áreas con necesidad de manejo. Para ello es importante conocer las áreas infectadas y el porcentaje que representan del total de la superficie (Ramírez y Porcayo, 2009). El porcentaje de infección para las seis parcelas (Cuadro 2) oscila entre 64% de infección como mínima y el

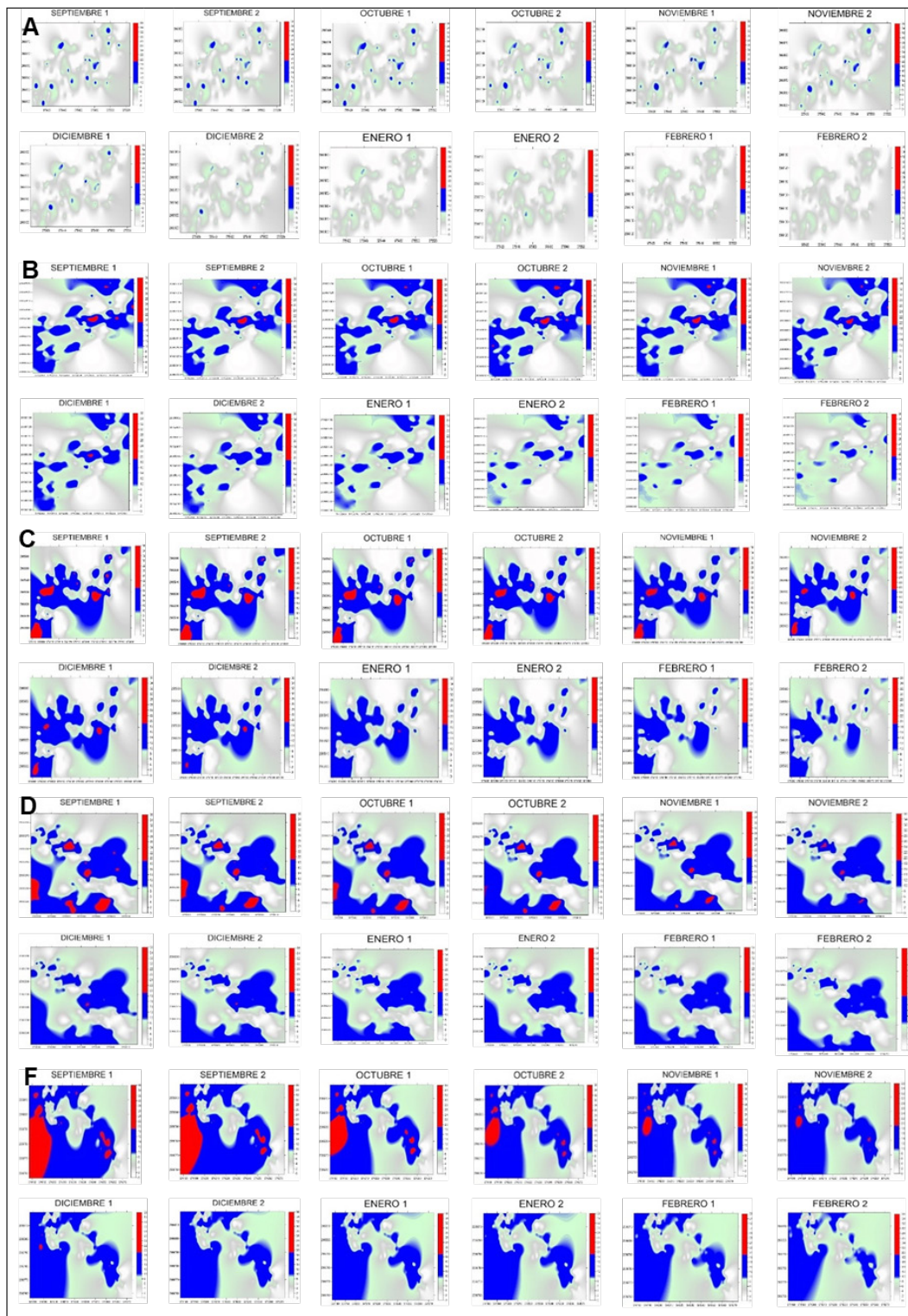


Figure 1. Maps of rooster's eye infection in coffee plantations in the municipality of Amatepec, State of Mexico. (A) plot 1, (B) plot 2, (C) plot 3, (D) plot 4, (E) plot 5 and (F) plot 6.

Figura 1. Mapas de infección de ojo de gallo en cafetales del municipio de Amatepec, Edo. de México. (A) parcela 1, (B) parcela 2, (C) Parcela 3, (D) parcela 4, (E) parcela 5 y (F) parcela 6.

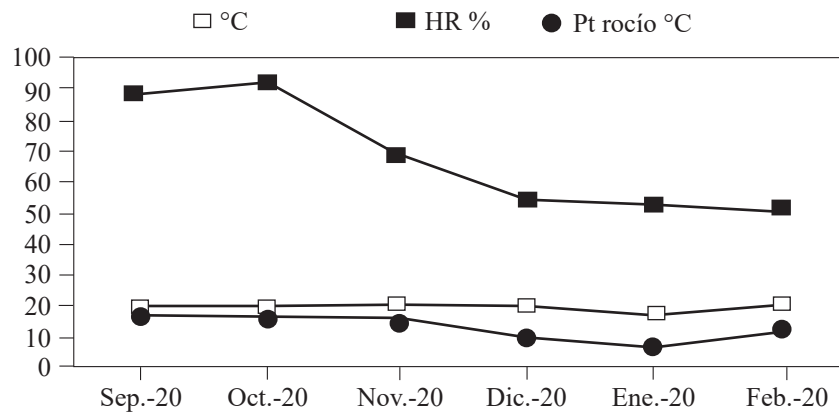


Figure 2. Climatic conditions (Temperature °C, Relative Humidity RH % and Dew Point °C) during the evaluation months, from September 2020 to February 2021 in the municipality of Amatepec, State of Mexico.

Figura 2. Condiciones climáticas (Temperatura °C, Humedad relativa HR % y Punto de Rocío Pt Rocío °C) de los meses de evaluación, septiembre 2020 a febrero 2021 en el municipio de Amatepec, Edo. De México.

70% in November and 55% in December, with dew point temperatures of 10.9, 18.6 and 13.9 °C. Granados (2015) mentioned that the development of the epidemic depends on the seasonal fluctuation of rainfall and relative humidity. It is particularly favored by humidity values above 80%. For this reason, the months of September and October have a greater incidence of the disease. Once the rains start, the number of diseased leaves and the number of lesions increase rapidly. The incidence of the disease does not decrease in January and February because the temperature and the dew point remain within suitable ranges. It is worth remembering that a strong dew allows the disease to continue its development, even in a dry period (Waller *et al.*, 2007). The percentage of shade is another of the important parameters since no pruning is carried out in some plots. Rivillas and Castro (2011) mention that coffee cultivation must have a rational distribution of shade, so that it does not affect the availability of light for coffee plants or intercept solar radiation. Shade should not affect the photosynthetic processes of the plant

85% como máxima. Se observa que los meses de septiembre a diciembre tiene mayor incidencia de infección, esto debido a las diferentes condiciones climáticas presentes en el municipio (Figura 2); como fue la temperatura que presentó una media de 20 °C. Campos (2010) menciona, que el ojo de gallo prospera bajo condiciones de temperatura relativamente frescas comprendidas entre 17 – 22 °C, en comparación con la requerida por otros hongos que atacan plantas de café. Por su lado la humedad relativa mostró valores de 88% para septiembre, 91% para octubre, noviembre con 70% y diciembre 55%; finalmente se percibió un punto de rocío 10.9, 18.6 y 13.9 °C. Granados (2015) mencionan que el desarrollo de la epidemia depende de la fluctuación estacional de la lluvia y la humedad relativa, sobre todo de que la humedad se mantenga superior al 80%; por esta razón los meses de septiembre y octubre tienen mayor presencia de infección de la enfermedad. Una vez que las lluvias inician, el número de hojas enfermas y el número de lesiones aumentan rápidamente. Para enero y febrero el porcentaje de la incidencia no disminuyó, esto debido

Table 2. Surface infected with *Mycena citricolor* from September 2020 to February 2021 in the the municipality of Amatepec, State of Mexico.

Cuadro 2. Superficie infectada de *Mycena citricolor* de septiembre del 2020 a febrero del 2021; del municipio de Amatepec, Edo. de México.

A)			B)			C)		
Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %	Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %	Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %
Sep-1	68	32	Sep-1	74	26	Sep-1	76	24
Sept-2	69	31	Sept-2	75	25	Sept-2	77	23
Oct-1	70	30	Oct-1	75	25	Oct-1	77	23
Oct-2	70	30	Oct-2	75	25	Oct-2	77	23
Nov-1	71	29	Nov-1	76	24	Nov-1	78	22
Nov-2	72	28	Nov-2	76	24	Nov-2	78	22
Dic-1	67	33	Dic-1	75	25	Dic-1	78	22
Dic-2	66	34	Dic-2	74	26	Dic-2	76	24
Ene-1	66	34	Ene-1	74	26	Ene-1	75	25
Ene-2	65	35	Ene-2	73	27	Ene-2	75	25
Feb-1	65	35	Feb-1	72	28	Feb-1	74	26
Feb-2	64	36	Feb-2	72	28	Feb-2	73	27

D)			E)			F)		
Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %	Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %	Muestreo	Superficie infectada %	Superficie no infectada %
Sep-1	77	23	Sep-1	84	16	Sep-1	75	25
Sept-2	77	23	Sept-2	84	16	Sept-2	76	24
Oct-1	77	23	Oct-1	84	16	Oct-1	76	24
Oct-2	78	22	Oct-2	85	15	Oct-2	76	24
Nov-1	78	22	Nov-1	85	15	Nov-1	76	24
Nov-2	78	21	Nov-2	85	15	Nov-2	77	23
Dic-1	77	23	Dic-1	83	17	Dic-1	75	25
Dic-2	77	23	Dic-2	83	17	Dic-2	74	26
Ene-1	75	25	Ene-1	82	18	Ene-1	74	26
Ene-2	75	25	Ene-2	82	18	Ene-2	74	26
Feb-1	75	25	Feb-1	81	19	Feb-1	73	27
Feb-2	74	26	Feb-2	80	20	Feb-2	72	28

or increase the humidity of the crop. But shade modifies the microclimate and increases the number of ecological niches in coffee plantations, which favors the establishment and development of the rooster's eye disease. By reducing the speed of the wind, shading elements can lead to an increase in the relative humidity of the air. The fact that some shading plants are alternate hosts of the pathogen

a que la temperatura y el punto de rocío continuaron entre los rangos permitidos; ya que un fuerte rocío permite que la enfermedad continúe su desarrollo, aun en período seco (Waller *et al.*, 2007). El nivel de sombreado es otro de los parámetros importantes, debido a que en algunas parcelas no se realiza ningún tipo de podas; Rivillas y Castro (2011) mencionan que el cultivo de café debe tener

(Granados, 2015) could explain why the infection surface was larger in some of the plots (4, 5 and 6) evaluated in the present study. Another factor that can help explain the incidence of the disease is the altitude (geographical factor) of the municipality under study, which is 1800 meters above sea level. According to Condori (2021), there is a direct relationship between altitude and incidence of this disease, that is, the incidence is higher in high areas and lower in low areas. Finally, the cultivation of different coffee varieties is an important factor in the incidence of the disease, since some varieties are more vulnerable to attack by rooster's eye (Santacreo, 2001).

In conclusion, the rooster's eye disease in coffee (*C. arabica*) showed a spatial distribution that fitted Gaussian and spherical models. This explains the spatial behavior of *M. citricolor*, which was distributed in aggregates, with some specific aggregation points that did not change in the months sampled, even though they partially decreased due to the changes in climatic conditions. Geostatistics has proven to be one of most effective methods to analyze the spatial distribution of crop diseases, which in turn facilitates making appropriate, pertinent and timely decisions on integrated management.

ACKNOWLEDGMENTS

To the National Council of Science and Technology for the scholarship granted to carry out my Postgraduate studies. To the coffee producers of the municipality of Amatepec for their willingness to collaborate to carry out the present investigation. Special thanks to my parents Adalberto Pino and Audelia Miranda.

CITED LITERATURE

Avelino J, Toledo J y Medina B. 1995. Desarrollo del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en una finca del norte de Guatemala y evaluación de los daños provocados por esta enfermedad.

una distribución racional del sombrío, de manera que este no afecte la disponibilidad de luz para las plantas de café ni intercepte la radiación solar, sin afectar los procesos fotosintéticos de la planta, ni aumentar la humedad del cultivo. La sombra modifica el microclima e incrementa los nichos ecológicos en los cafetales, lo que favorece el establecimiento y desarrollo del ojo de gallo, así también, al disminuir la velocidad del viento, promueve mayor humedad relativa del aire y también el hecho de que algunas especies de sombra son huéspedes alternos del patógeno (Granados, 2015); esto podría explicar por qué en las parcelas (4, 5 y 6) del presente trabajo, la superficie de infección es mayor. Otro factor que podría aclarar la incidencia de la enfermedad es la altitud (factor geográfico) con la que cuenta el municipio, que es de 1800 msnm, que de acuerdo a Condori (2021) cita que existe una relación directa entre altitud e incidencia de esta enfermedad, es decir en zonas altas la incidencia es mayor y en zonas bajas la incidencia es menor. Por último, el uso de variedades de café es una causa importante en la incidencia de la enfermedad, ya que existen variedades más vulnerables al ataque por ojo de gallo (Santacreo, 2001).

En conclusión, la enfermedad ojo de gallo en café (*C. arabica*) presentó una distribución espacial que se ajustó a modelos gaussiano y esférico; que permite explicar un comportamiento espacial en agregados de *M. citricolor*, con algunos puntos de agregación específicos en las parcelas que no se mueven en los meses muestreados, aun que disminuyen parcialmente debido a las condiciones climáticas que se presentan en las áreas muestreadas. La geoestadística ha demostrado ser uno de los métodos utilizados en el sector agrícola para analizar de manera efectiva la distribución espacial de las enfermedades de los cultivos, lo que a su vez facilita la toma de decisiones adecuadas, pertinentes y oportunas sobre el manejo integrado.

- XVI Simposio de Caficultura Latinoamericana. Managua, Nicaragua. 25- 29 de octubre 1993.
- Campo AO. 2010. Manejo integrado del Ojo de gallo *Mycena citricolor*. El cafetal: La revista del caficultor. 31 p
- Cárdenas PNJ, Darghan CAE, Sosa RMD y Rodríguez A. 2017. Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. Acta Biológica Colombiana 22: 209-220. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- CENICAFE. 2011. Ojo de gallo o gotera del cafeto *Omphalia flavida*. Centro Nacional de Investigación de Café (CENICAFE). Chinchiná, Caldas, Colombia.
- Condori CP. 2021. Incidencia de daño de enfermedades asociadas al cultivo del cafeto (*Coffea arabica* L.) en los valles de tambopata y alto Inambari. Universidad Nacional Del Altiplano Facultad de Ciencias Agrarias Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica.
- Gómez-Campo K, Rueda M y García-Valencia C. 2010. Distribución espacial, abundancia y relación con características del hábitat del caracol pala eustrombus gigas (linnaeus) (mollusca: Strombidae) en el archipiélago nuestra señora del rosario, caribe colombiano. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras 39(1): 137-159. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.1.146>
- Granados-Montero MDM, Avelino J, Arauz-Cavallini F, Castro-Tanzi S y Ureña N. 2020. Hojarasca e inóculo de *Mycena citricolor* sobre la epidemia de ojo de gallo. Agronomía Mesoamericana 77-94. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.36614>
- 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.
- Isaaks E and Srivastava M. 1988. Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. Mathematical Geology 20(4): 313-341. <https://doi.org/10.1007/BF00892982>
- Journel A and Huijbregts CJ. 1978. *Mining geostatistics*. London, United Kingdom: Academic Press.
- 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/10.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Martínez-Martínez N, Ramírez-Dávila JF, Lara-Vázquez F y Figueroa-Figueroa DK. 2021. Distribución espacial de muérdago enano en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Colombia Forestal 24(2): 65-81.
- Moral García F. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales: Ecosistemas 13(1). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/582>
- Ramírez-Dávila J y 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.

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 Amatepec por su disposición y colaboración para poder realizar la investigación. Dedicado especialmente a mis padres Adalberto Pino y Audelia Miranda

~~~~~ Fin de la versión en Español ~~~~~

- Rivera-Martínez R, Acosta-Guadarrama AD, Ramírez-Dávila JF, Figueroa-Figueroa DK, Maldonado-Zamora FI y Lara-Díaz AV. 2017. Distribución espacial de las poblaciones de adultos de *Bactericera cockerelli* Sulc. 1 en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). Southwestern Entomologist 42(4): 1057-1068.
- Rivillas C y Castro A. 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)
- Rossi, R., J. Mulla, G. Journel, and H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecol. Monographs 62: 277-314.
- Santacreo R. 2001. Variedades y mejoramiento genético del café. In Manual de caficultura. 3ed. IHCAFE. Tegucigalpa M.D.C., Honduras. p. 23-40. SENASICA. 2014. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. 49: 3-8 (consultado marzo 2021, Ojo de gallo *Mycena citricolor* Berkeley & Curtis).
- SENASICA. 2017. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (consultado junio 2020).
- SENASICA. 2018. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. <https://www.gob.mx/senasica>. (consultado junio 2021)
- SIAP. 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/fnd/articulos/mexico-y-el-cafe-organico?idiom=es>. (consultado marzo 2021)
- SIAP. 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/667940/Escenario\\_cafe\\_ago21](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/667940/Escenario_cafe_ago21). (consultado marzo 2021)
- Twizeyimana M, Ojiambo PS, Sonder k, Ikotun, T, Hartman GL and Bandyopadhyay R. 2008. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* infecting soybean in Nigeria. Phytopathology 99: 353-361. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0353>.
- Waller JM, Bigger M and Hillocks RJ. 2007. Coffee Pests, Diseases and Their Management. Cabi International Series.434 p.