

Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México*

Spatial pattern of maize head smut in different localities of the State of Mexico

Jesús Ricardo Sánchez-Pale^{1§}, José Francisco Ramírez-Dávila, Andrés González-Huerta y Carlos de León²

¹Universidad Autónoma del Estado de México-Postgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Toluca, Estado de México. A. P. 435. México. (jframirez@uaemex.mx; agonzalez@uaemex.mx). ²Colegio de Postgraduados-Postgrado en Fitopatología. Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México. (cdeleon@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: jrsanchezp@uaemex.mx.

Resumen

Con el fin de generar bases para el manejo del carbón de la espiga del maíz en zonas infestadas del Estado de México, se estudió el patrón espacial que presentó durante un cuarto año de estudio. La presente investigación se realizó para determinar la distribución espacial de esta enfermedad con técnicas geoestadísticas durante el año 2009. Su incidencia se determinó en 100 parcelas de cada una de las 25 localidades evaluadas, ubicándolas geográficamente con un dGPS. La determinación de la distribución espacial se realizó con el uso de herramientas Geoestadísticas, que fue validada a través del procedimiento de validación cruzada. Se elaboraron mapas de la distribución espacial por medio del kriging y se estimó la superficie infestada. Los resultados de la validación cruzada indicaron que los semivariogramas obtenidos se ajustaron al modelo esférico en 19 localidades, cuatro al exponencial y dos al gaussiano. Los diferentes modelos mostraron que el patrón espacial de la enfermedad se presenta de forma agregada o puntos específicos dentro de cada localidad. La agregación se visualizó de forma aleatoria dentro de cada localidad a través de los mapas elaborados. Dichos mapas permitieron estimar la superficie infestada, lo cual permitirá realizar su manejo con precisión a través del sitio-específico y detectar cambios en los patrones espaciales a través del tiempo.

Abstract

In order to generate a basis to handle head smut of corn, on infested areas in the State of Mexico, the spatial pattern showed during four consecutive years of study was studied. This research was conducted to determine the spatial distribution of the disease with geostatistical techniques in 2009. Its incidence was determined in 100 plots of each of the 25 locations evaluated, geographically locating them with dGPS. Determining the spatial distribution was performed using geostatistical tools, which were validated through cross validation procedure. Spatial distribution maps through kriging were developed and the infested area was estimated. The results of cross validation indicated that semivariograms obtained were fitted to the spherical model in 19 locations, four at exponential and two to Gaussian. Different models showed that the spatial pattern of the disease occurs in aggregate form or specific points within each locality. The aggregation was visualized at random within each locality through the elaborated maps. These maps enable estimating the infested area, which will allow its handling with precision through the site-specific and detect changes in spatial patterns over time.

Keywords: *Zea mays* L., geostatistics, spatial distribution.

* Recibido: enero de 2015
Aceptado: abril de 2015

Palabras clave: *Zea mays* L., distribución espacial, geoestadística.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de mayor superficie cultivada en el Estado de México con 556 325 ha: 467 578 ha en secano y 88 747 en riego, una producción estimada en 1 801 330 t y rendimiento de grano de 2.97 t ha⁻¹ (SIAP, 2014). Reducciones en su rendimiento de hasta 15.1% se han reportado en la mayoría de las variedades e híbridos comerciales por la presencia de la enfermedad carbón de la espiga (CESAVEM, 2005; Aquino *et al.*, 2011) ocasionada por el hongo *Sporisorium reilianum* (Kühn) Langdon y Fullerton. En el país, la incidencia de la enfermedad ha oscilado desde 0.1 hasta 40% (SARH, 1992). En otras regiones del Mundo se han observado incidencias hasta de 80% (Pataky, 1999).

Temperaturas en el suelo entre 21 a 28 °C y humedad entre 15 y 25% peso/peso (Pataky, 1999) favorecen la infección, sus esporas son viables en el suelo hasta por 10 años (SARH, 1992). Recientemente, la enfermedad ha infectado a cultivares criollos poniendo en riesgo la diversidad genética del maíz en México, considerado centro de origen primario. También el teocintle (*Zea mays* subsp. mexicana), el pariente más cercano del maíz, es afectado por el carbón de la espiga.

El conocimiento del patrón espacial de las enfermedades pueden darnos valiosa información acerca de la naturaleza y rol de las fuentes de inóculo para el desarrollo de epidemias (Navas *et al.*, 2008) que permitan realizar estrategias de su manejo (Rodríguez *et al.*, 2009). Un eficiente control va estrechamente ligado al conocimiento de los patrones espaciales de la enfermedad ya que permiten dirigir en forma focalizada las diversas alternativas de manejo. La geoestadística se ha utilizado para analizar los patrones espaciales de las enfermedades en plantas (Alves *et al.*, 2006; Navas *et al.*, 2008; Carvalo *et al.*, 2009) y de las poblaciones de patógenos a través del tiempo para caracterizarlos cuantitativamente (Stein *et al.*, 1994).

Con el uso de la geoestadística es posible establecer mapas de distribución espacial de la enfermedad y su porcentaje de infección, consiguiéndose ahorros económicos y ambientales al direccionar las alternativas de control hacia puntos específicos donde se presenta la enfermedad, con un consecuente menor uso de insumos (Carvalo *et al.*,

Introduction

Corn (*Zea mays* L.) is the largest acreage crop in the State of Mexico with 556 325 ha of which 467 578 ha are under rainfed and 88,747 under irrigation, an estimated production of 1 801 330 tons and a grain yield of 2.97 t ha⁻¹ (SIAP, 2014). Reductions in yield of up to 15.1% have been reported in most commercial varieties and hybrids for the presence of head smut (CESAVEM, 2005; Aquino *et al.*, 2011) caused by the fungus *Sporisorium reilianum* (Kühn) Langdon and Fullerton. In the country, the incidence of the disease has ranged from 0.1 to 40% (SARH, 1992). In other regions of the world there have been incidences of up to 80% (Pataky, 1999).

Soil temperatures between 21-28 °C and humidity between 15 and 25% w/w (Pataky, 1999) favor the infection, its spores are viable in the soil for up to 10 years (SARH, 1992). Recently, the disease has infected native cultivars putting the genetic diversity of maize in Mexico at risk, considered as primary center of origin. Also teosinte (*Zea mays* subsp. mexicana), the closest relative of maize is affected by head smut.

The knowledge of the spatial pattern of the disease can give us valuable information about the nature and role of inoculum sources for the development of epidemics (Navas *et al.*, 2008) that allow to perform management strategies (Rodríguez *et al.*, 2009). Efficient control is closely linked to the knowledge of spatial patterns of the disease, as it allows focusing on specific areas different management alternatives. Geostatistics has been used to analyze spatial patterns of plant diseases (Alves *et al.*, 2006; Navas *et al.*, 2008; Carvalo *et al.*, 2009) and pathogen populations over time to characterize them quantitatively (Stein *et al.*, 1994).

With the use of geostatistics is possible to set maps of spatial distribution of the disease and its infection rate, achieving economic and environmental savings by addressing control alternatives at specific points where the disease occurs, with a consequent decrease in use of inputs (Carvalo *et al.*, 2009). Even today there is little information on the spatial distribution of this disease that provides the basis to improve the efficiency and sustainability of management of this disease. Given this context, the following objectives were set a) Determine the spatial patterns of head smut in corn at regional level through geostatistics; and b) generate maps from the infested area with the disease for 2009.

2009). Aún en la actualidad existe poca información sobre la distribución espacial de esta enfermedad que proporcione las bases para la mejora de la eficiencia y sostenibilidad del manejo de esta enfermedad. Ante este contexto, en el presente se plantearon los objetivos de a) Determinar los patrones espaciales del carbón de la espiga del maíz a nivel regional por medio de la geoestadística; y b) generar mapas de la superficie infestada con la enfermedad para el año 2009.

Materiales y métodos

Este trabajo es la continuación y ampliación de uno anterior (Sánchez *et al.*, 2011) sobre el comportamiento espacial del carbón de la espiga en el Estado de México. El muestreo se realizó en variedades criollas e híbridos comerciales de maíz cuando se encontraban al 50% de grano lechoso-masoso de la etapa R3 (Ritchie y Hanway, 1982) en 25 localidades del Estado de México. De cada localidad se consideraron 100 parcelas con antecedentes de haberse presentado la enfermedad ubicando su punto geográfico o coordenadas con un dGPS (Model SPS351, Trimble, Estados Unidos de América). La determinación de la incidencia consistió en dividir a cada predio en cinco puntos de muestreo, en cada punto se contabilizaron 100 plantas consecutivas en la misma hilera; registrando las que presentaron síntomas de la enfermedad. La incidencia se estimó a partir del porcentaje de las plantas enfermas en un total de 500 evaluadas en cada predio. Se registró el rango en que fluctuó la incidencia dentro de cada localidad.

Geoestadística: con los datos de incidencia de la enfermedad y su punto geográfico, el análisis geoestadístico consistió en: 1) estimación del semivariograma; 2) estimación de los parámetros del modelo de semivariograma; y 3) estimación de la superficie (mapas) utilizando puntos (estimaciones) a partir del krigeado. Con los datos de incidencia de la enfermedad obtenidos, se estimó el semivariograma experimental por medio de la siguiente expresión (Isaaks y Srivastava, 1989):

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

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

Materials and methods

This work is the continuation and expansion (Sanchez *et al.*, 2011) on spatial behavior of head smut in the State of Mexico. Sampling was conducted in native and commercial hybrid maize when the grain was at 50% milky-doughy in R3 stage (Ritchie and Hanway, 1982) in 25 localities from the State of Mexico. 100 plots with a history of having the disease were considered from each locality, locating its geographic location or coordinates with a dGPS (Model SPS351, Trimble, USA). In order to determine the incidence, each field was divided into five sampling points, in each point 100 consecutive plants were counted in the same row; recording those showing symptoms of the disease. The incidence was estimated from the percentage of diseased plants from a total of 500 assessed in each property. The range in which the incidence fluctuated within each locality was recorded.

Geostatistics: with disease incidence data and its geographical point, the geostatistical analysis consisted of: 1) estimation of the semivariogram; 2) estimation of the semivariogram model parameters; and 3) estimate of the area (maps) using points (estimates) from kriging. With data obtained from incidence of the disease, the experimental semivariogram was estimated through the following expression (Isaaks and Srivastava, 1989):

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

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

After obtaining the experimental semivariogram, it's fit to a theoretical model (spherical, exponential, Gaussian, etc.) was performed (Englund and Sparks 1988) using the Model program version 2.2 from Variowin (Software for spatial data analysis in 2D. Springer Verlag, New York. USA). The validation of the theoretical model was performed with the cross-validation procedure (Isaaks and Srivastava, 1989), in an interactive way, by varying the C_0 (nugget effect), $C + C_0$ (plateau) and a (range) values, to match the best fit; once determined it was validated by determining the four statistical parameters of cross-validation (Samper and Carrera, 1996) such as: estimation mean square error (MEE) that should

Una vez obtenido el semivariograma experimental, se realizó su ajuste a un modelo teórico (esférico, exponencial, gaussiano, etc.) (Englund y Sparks 1988) utilizando el programa Model versión 2.2 de Variowin (Software for spatial data analysis in 2D. Spring Verlag, New York. USA). La validación del modelo teórico se realizó con el procedimiento de validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989), de una forma interactiva, variando los valores C_0 (efecto de pepita), $C + C_0$ (meseta) y a (alcance), hasta coincidir con el mejor ajuste, una vez determinado se validó a través de la determinación de los cuatro parámetros estadísticos de validación cruzada (Samper y Carrera 1996) como son: media de los errores de estimación (MEE) que no debe ser significativamente distinta de 0 para que se considere que el ajuste del modelo es adecuado, error cuadrático medio (ECM) cuyo valor final debe ser cercano a cero, error cuadrático medio adimensional (ECMA) que debe estar comprendido entre los valores $1 \pm 2 (2/N)^{0.5}$ (Ramírez *et al.* 2013) y un estadístico adicional que consiste en que el valor de la varianza de los errores sea menor a la varianza muestral.

Para determinar el grado de relación espacial entre los datos obtenidos en los muestreos se calculó el índice de dependencia espacial, que se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje su resultado. Si el resultado fue menor de 25% el índice de dependencia espacial se considera alto, si se encuentra entre 26 y 75% es considerado como moderado y si es mayor de 76% el índice de dependencia es bajo (Ramírez *et al.*, 2013). Se utilizó el kriging para estimar los valores insesgados en los puntos que no fueron muestreados (Samper y Carrera, 1996) para elaborar los mapas de densidad de enfermedad que permitieran visualizar el comportamiento espacial de la enfermedad. Tanto las estimaciones obtenidas representadas en forma de mapa como la determinación de la superficie infestada estimada por localidad se realizaron mediante el uso del programa Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 4th Street. Golden, Colorado 804011866. USA).

Resultados y discusión

La enfermedad se presentó en 25 localidades de 24 municipios del Estado de México (Cuadro 1). La incidencia de la enfermedad fluctuó de 0.2 a 27% dentro de las diferentes localidades evaluadas. La mayor incidencia en campo (27.0%) se presentó en la localidad de San José Ixtapa del municipio de Temascalcingo, por arriba de lo reportado por Aquino *et al.* (2011) quienes encontraron incidencias de

not be significantly different from 0 to consider that the fitting of the model is right, mean squared error (ECM) whose final value should be close to zero, dimensionless mean square error (ECMA) must be between the values $1 \pm 2 (2/N)^{0.5}$ (Ramírez *et al.*, 2013) and an additional statistical consisting in the value of the error variance is lower than the sampling variance.

To determine the degree of spatial relationship between the data obtained in the sampling, the spatial dependence rate was calculated by dividing the nugget effect on the plateau and expressing the result in percentage. If the result was lower than 25% the spatial dependence rate is considered high, if it is between 26 and 75% is considered as moderate and if it is over 76% the dependency ratio is low (Ramírez *et al.*, 2013). Kriging was used to estimate the unbiased values at points that were not sampled (Samper y Carrera, 1996) to develop the disease density maps that allow visualize the spatial behavior of the disease. Both the estimates obtained represented in map form as the determining of the estimated surface infested by locality were made using Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809 4th Street. Golden, Colorado 804011866. USA).

Results and discussion

The disease was present in 25 locations from 24 municipalities of the State of Mexico (Table 1). The incidence of the disease ranged from 0.2 to 27% in different localities. The highest incidence in the field (27.0%) occurred in the locality of San José Ixtapa from the municipality of Temascalcingo, higher than that reported by Aquino *et al.* (2011) who found incidences of 15.7% in maize genotypes that are usually planted in Valles altos, plus the incidence of the disease had an increase regarding to Sanchez *et al.* (2011) who reported levels of 3.4% for 2008. The total area infested with head smut of corn for the State of Mexico was 631.3 ha (Table 1) in 2009, lower than 914.8 ha estimated the year before (Sanchez *et al.*, 2011).

The values within the appropriate range of cross-validation statistical enabled to validate the spatial pattern of aggregate type from the disease that was obtained with the fitted theoretical models (Table 2), so that 19 locations were fitted to the spherical model; four locations were fitted to the exponential model and two locations were fitted to Gaussian model (Table 3), which allowed modeling the spatial variability that the disease has in different localities from the State of Mexico. The differences in incidence of the disease as well as the distance between the farms with

15.7% en genotipos de maíz que usualmente se siembran en Valles altos, además la incidencia de la enfermedad tuvo un incremento respecto a lo determinado por Sánchez *et al.* (2011) quienes reportan niveles de 3.4% para el año 2008. La superficie total infestada con carbón de la espiga del maíz para el Estado de México fue de 631.3 ha (Cuadro 1) en 2009, menor a las 914.8 ha estimadas el año inmediato anterior (Sánchez *et al.*, 2011).

presence and absence of the disease in each location possibly originated the different spatial behaviors that were reflected in three types of model with aggregate spatial structure of the disease.

All fitted models lacked of nugget effect, so the sampling error was considered minimal and the scale of sampling for each locality was the adequate (Rossi *et al.*, 1992). This means

Cuadro 1. Incidencia, superficie infestada y área infestada estimada por el carbón de la espiga del maíz por municipio y localidad en Valles altos durante 2009.

Table 1. Incidence, infested surface and infested area estimated for head smut of corn by municipality and locality in Valles altos during 2009.

Núm.	Municipio	Localidad	Superficie infestada (ha)	Incidencia (%) (%) ^{a)}	Área infestada estimada ^{b)}	Tipo de maíz infectado ^{c)}
1	Atacomulco	Tic tic	47.90	0.4	69	Cr, 32D
2	Calimaya	Calimaya	67.70	0.2-1.8	74	AS
3	Chalco	San Martín C.	14.60	1.0-3.6	78	Leo
4	Cocotitlan	San Andrés	30.50	0.4-5.6	80	Ni
5	Donato Guerra	San José Tiloxtoc	5.22	0.2-1.0	67	Cr
6	Ixtapan del Oro	El Salto y Mesas	1.77	0.2-0.8	39	Cr, To
7	Jilotepec	San Pablo Huantepec	29.10	1.0	41	AS
8	Jocotitlán	Mavoro	8.90	0.2	58	Cro, Ac
9	Metepec	Metepec	91.30	0.2-0.6	71	Z, AS, HC8
10	Otzoloapan	El Calvario	6.71	0.2-0.4	59	Cr
11	Rayón	Rayón	39.80	0.4-1.8	54	AS
12	San Felipe P.	San Felipe	4.30	0.4	22	Cr
13	Soyaniquilpan	San Jose Deguedo	1.60	0.8	66	AS
14	Temascalcingo	San José Ixtapa	74.80	0.2-27.0	74	Cro, 32D, Bu, AS, HC8
15	Temascaltepec	La Finca	43.22	2.0-4.0	71	Cr
16	Tenancingo	San José El Cuartel	9.20	5.0	81	CrA
17	Tenango del Valle	Tenango	3.10	0.4	82	AS
18	Tequixquiac	Ejido Adolfo López	9.50	3.0	68	A2
19	Tianguistenco	Tianguistenco	34.40	0.2-1.2	52	AS
20	Tlalmanalco	Tlalmanalco	11.30	1.4-4.0	31	Ni
21	Toluca	Cerrillo	20.00	0.8	85	H50
22	Valle de Bravo	Santa Teresa T.	8.64	0.2-5.4	47	Cr, To, A7
		Santa Magdalena T.	10.14	0.2-1.0	74	Cr, A7 To
23	Villa del Carbón	Cruz y Carrizal	0.60	1.0	73	Tro
24	Xonacatlán	Ejido Xonacatlán	57.0	0.4-2.0	76	AS, Z
		Total	631.3			

^{a)}Rango en que fluctuó la incidencia dentro de la localidad; ^{b)}determinada en base a la interpolación que realiza la técnica de kriging; ^{c)}nomenclatura; Cr= criollo. 32D= 32D06; AS= AS722. Leo= Leopardo. Ni= Niebla; To= Tornado; Cro= Cromo; Ac= Aculco; Z= Z60; Bu= Buho; CrA= Criollo Amarillo; A2= A2020; A7= A7573; Tro= Tromba.

Los valores dentro del rango apropiado de los estadísticos de validación cruzada permitieron validar el patrón espacial de tipo agregado de la enfermedad que se obtuvo con los modelos teóricos ajustados (Cuadro 2), de tal forma que 19 localidades se ajustaron al modelo esférico; cuatro localidades se ajustaron al modelo exponencial y dos localidades se

that 100% of the variation in the disease distribution is explained by the spatial structure set in the respective semivariograms. The level of spatial dependence found for all cases was high (Table 3), indicating a strong aggregate distribution of the disease in all locations. Range values fluctuated between 142.67 and 2 747.94 m between the different models.

ajustaron al modelo gaussiano (Cuadro 3), lo que permitió modelar la variabilidad espacial que presenta la enfermedad en las diferentes localidades del Estado de México. Las diferencias de incidencias de la enfermedad así como en la distancia entre los predios con presencia y ausencia de la enfermedad en cada localidad posiblemente originaron los diferentes comportamientos espaciales que se reflejaron en tres tipos de modelos de la estructura espacial agregada de la enfermedad.

Incidences of *S. reilianum* above 3% were visually associated with the spherical model. The spatial distribution with fit to the spherical model indicates that within locality there are plots or geographic points in which the disease manifest more compared to the rest of the sampled plots, i.e. there are outbreaks of the disease that moves from a punctual source, which are scattered within each locality, as mentioned by Van de Landea and Zadoks (1999). On the other hand, Jaime and Cotti (2003) consider that the spherical model is

Cuadro 2. Valor de los estadísticos de validación cruzada in los modelos de agregación del carbón de la espiga del maíz por municipio en 2009.

Table 2. Cross-validation values in aggregation models of head smut of corn per municipality in 2009.

Núm.	Municipio	Tamaño de la muestra	Media de la muestra	Varianza de la muestra	MEE	Varianza de los errores	ECM	ECMA
1	Atacomulco	100	0.070	0.36030	0.10 ^{ns}	0.29579	0.04	1.01
2	Calimaya	100	0.050	0.05550	0.11 ^{ns}	0.03372	0.05	1.06
3	Chalco	100	0.116	0.30894	0.10 ^{ns}	0.24062	0.12	1.13
4	Cocotitlan	100	0.178	0.70712	0.12 ^{ns}	0.53711	0.09	1.06
5	Donato Guerra	100	0.026	0.01812	0.11 ^{ns}	0.00241	0.10	1.11
6	Ixtapan del Oro	100	0.012	0.00706	0.11 ^{ns}	0.00126	0.03	1.07
7	Jilotepec	100	0.020	0.01960	0.12 ^{ns}	0.00528	0.11	1.02
8	Jocotitlán	100	0.004	0.0076	0.09 ^{ns}	0.00024	0.10	1.13
9	Metepc	100	0.022	0.00872	0.10 ^{ns}	0.00269	0.12	1.10
10	Otzoloapan	100	0.006	0.00196	0.11 ^{ns}	0.00108	0.08	1.07
11	Rayon	100	0.022	0.03652	0.12 ^{ns}	0.02671	0.05	1.13
12	San Felipe P.	100	0.002	0.00040	0.10 ^{ns}	0.00015	0.11	1.01
13	Soyaniquilpan	100	0.008	0.00634	0.13 ^{ns}	0.00368	0.05	1.04
14	Temascalcingo	100	0.431	7.52554	0.08 ^{ns}	531,631	0.03	1.06
15	Temascaltepec	100	0.200	0.56000	0.11 ^{ns}	0.44921	0.11	1.12
16	Tenancingo	100	0.050	0.24750	0.09 ^{ns}	0.16820	0.04	1.10
17	Tenango del Valle	100	0.004	0.00158	0.12 ^{ns}	0.00117	0.13	1.05
18	Tequixquiac	100	0.030	0.08910	0.10 ^{ns}	0.06923	0.06	1.09
19	Tianguistenco	100	0.018	0.016708	0.11 ^{ns}	0.01305	0.10	1.11
20	Tlalmanalco	100	0.054	0.017668	0.12 ^{ns}	0.12840	0.07	1.07
21	Toluca	100	0.008	0.00640	0.08 ^{ns}	0.00503	0.11	1.03
22	Valle de Bravo	100	0.138	0.33176	0.10 ^{ns}	0.25821	0.12	1.12
23		100	0.066	0.03844	0.11 ^{ns}	0.02419	0.06	1.05
24	Villa del Carbón	100	0.010	0.00990	0.08 ^{ns}	0.00792	0.03	1.11
25	Xonacatlán	100	0.130	0.17070	0.12 ^{ns}	0.13055	0.12	1.09

1±2 (2/N) 0.5 = 1±0.45, ns: diferencia no significativa ($p=0.05$). Media de los errores de estimación (MEE); Error cuadrático medio (ECM) y error cuadrado medio adimensional (ECMA).

Todos los modelos ajustados carecieron de efecto pepita por lo que el error de muestreo se consideró mínimo y la escala de muestreo para cada localidad fue la adecuada (Rossi *et al.*, 1992). Esto significa que 100% de la variación de la distribución de la enfermedad se explicó por la estructura espacial establecida en los semivariogramas respectivos. El nivel de dependencia espacial encontrado para todos los casos fue alta (Cuadro 3), indicativo de una

indicative of an uneven distribution of the disease within the study area. The irregularity of the outbreaks within the locality suggests that the disease originated from contaminated seed (Roberto *et al.*, 2002). Despite being another pathosystem, these is consistent with that reported by Johnson *et al.* (2007) who determined the distribution patterns of *Puccinia melanocephala* by geostatistical techniques to spherical models.

fuerte distribución agregada de la enfermedad en todas las localidades evaluadas. Los valores del rango fluctuaron entre 142.67 y 2747.94 m entre los diferentes modelos.

The four localities with fit of the semivariogram for the exponential model show an irregular or random limit distribution of the disease, which biologically present an

Cuadro 3. Efecto pepita, meseta y rango de los modelos ajustados a los semivariogramas obtenidos del carbón de la espiga del maíz por municipio en 2009.

Table 3. Nugget effect, plateau and range of fit models to the semivariograms obtained from heat smut of corn per municipality in 2009.

Núm.	Municipio	Modelo	Efecto pepita	Meseta	Rango	Pepita/meseta (%)	Índice de dependencia espacial
1	Atacomulco	Esférico	0.00	0.32184	2747.94	0.00	Alto
2	Calimaya	Esférico	0.00	0.022108	1406.99	0.00	Alto
3	Chalco	Esférico	0.00	0.199693	142.67	0.00	Alto
4	Cocotitlan	Esférico	0.00	0.445547	428.00	0.00	Alto
5	Donato Guerra	Esférico	0.00	0.014892	199.94	0.00	Alto
6	Ixtapan del Oro	Esférico	0.00	0.001575	155.06	0.00	Alto
7	Jilotepec	Esférico	0.00	0.018215	1355.75	0.00	Alto
8	Jocotitlán	Esférico	0.00	0.000217	1881.65	0.00	Alto
9	Metepec	Esférico	0.00	0.003233	467.13	0.00	Alto
10	Otzoloapan	Gaussiano	0.00	0.001692	652.63	0.00	Alto
11	Rayón	Exponencial	0.00	0.024830	515.85	0.00	Alto
12	San Felipe P.	Esférico	0.00	5.77E-04	388.6	0.00	Alto
13	Soyaniquilpan	Exponencial	0.00	0.002708	1215.72	0.00	Alto
14	Temascalcingo	Esférico	0.00	3.29131	1421.50	0.00	Alto
15	Temascaltepec	Esférico	0.00	0.48738	418.00	0.00	Alto
16	Tenancingo	Esférico	0.00	0.03277	1936.26	0.00	Alto
17	Tenango del Valle	Esférico	0.00	0.000566	2318.43	0.00	Alto
18	Tequixquiac	Gaussiano	0.00	0.080862	2429.90	0.00	Alto
19	Tianguistenco	Esférico	0.00	0.007615	152.93	0.00	Alto
20	Tlalmanalco	Esférico	0.00	0.15846	405.13	0.00	Alto
21	Toluca	Exponencial	0.00	0.002137	888.64	0.00	Alto
22	Valle de Bravo	Esférico	0.00	0.03563	429.24	0.00	Alto
		Esférico	0.00	0.03563	422.28	0.00	Alto
23	Villa del Carbón	Esférico	0.00	0.005177	197.58	0.00	Alto
24	Xonacatlán	Exponencial	0.00	0.114307	710.35	0.00	Alto

Incidencias por arriba de 3% de *S. reilianum* se asociaron visualmente con el modelo esférico. La distribución espacial con un ajuste al modelo esférico indica que dentro de la localidad existen parcelas o puntos geográficos en que se manifiesta más la enfermedad respecto al resto de las parcelas muestreados, es decir, existen focos de la enfermedad que avanza desde una fuente puntual, los cuales están dispersos dentro de cada localidad, tal como lo mencionan Van de Landea y Zadoks (1999). Por otro lado, Jaime y Cotti (2003) consideran que el modelo esférico es indicativo de una distribución irregular de la enfermedad dentro del área analizada. La irregularidad de los focos de infestación dentro de la localidad permite

irregular or random limit aggregate distribution of head smut of corn within the area of each locality; allowing to infer the existence of a possible factor that originates it, as might be the susceptibility of varieties and hybrids, so it is possible that the presence of these genotypes is irregular within the locality or is caused by a greater abundance native varieties which show a low susceptibility to disease (CESAVEM, 2005). Fit of Gaussian model in the localities of Otzoloapan and Tequixquiac, indicate that outbreaks were expressed in a continual expansion form regarding to the sampled points (Alves *et al.*, 2006), which allows us to infer the existence of different environmental factors favoring it and that the disease is continuously spread to neighboring plots.

suponer que la enfermedad se originó a partir de semilla contaminada (Roberto *et al.*, 2002). A pesar de tratarse de otro patosistemas, los presentes encontrados concuerda con lo reportado por Johnson *et al.* (2007) quienes determinaron los patrones de distribución de *Puccinia melanocephala* por técnicas geoestadísticas a modelos esféricos.

Las cuatro localidades con un ajuste del semivariograma al modelo exponencial manifiestan una distribución de límites irregulares o aleatorios de la enfermedad, que biológicamente manifiestan una distribución agregada de límites irregulares o aleatorios del carbón de la espiga del maíz dentro del área de cada localidad; lo que permite inferir la existencia de un posible factor que la origina, como podría ser la susceptibilidad de las variedades e híbridos, por lo que es posible que la presencia de dichos genotipos sea irregular dentro de la localidad o bien sea originada por una mayor abundancia de variedades criollos los cuales expresan una menor susceptibilidad a la enfermedad (CESAVEM, 2005). El ajuste del modelo gaussiano en las localidades de Otzoloapan y Tequixquiac, indica que los focos de la enfermedad se expresaron en forma o expansión continua respecto a los puntos muestreados (Alves *et al.*, 2006), que nos permite inferir la existencia de diversos factores medio ambientales que le favorecen, y que la enfermedad se disemina continuamente a las parcelas vecinas.

La distribución en puntos específicos o focos de infección de *S. reilianum* dentro de cada localidad, permite suponer la existencia de condiciones medio ambientales favorables o de genotipos susceptibles de maíz que favorecen la expresión de la enfermedad dentro de cada localidad, tal como lo indica Aquino *et al.* (2011) quienes mencionan que la mayoría de genotipos de maíz sembrados en los Valles Altos del Estado de México expresan la enfermedad con diferentes niveles de susceptibilidad, encontrando que los genotipos híbridos expresaron mayor incidencia. La modelización espacial geoestadística del carbón de la espiga en maíz obtenida en el presente trabajo concuerda con la determinación de los patrones espaciales de la enfermedad obtenida por Sánchez *et al.* (2011) quienes determinaron los patrones espaciales de *S. reilianum* en maíz que se presentaron durante el ciclo agrícola 2008 y con lo reportado en otros patosistemas, aunque con el uso de las mismas técnicas, por Allen *et al.* (2008) en trigo con *Tilletia indica*. Así con lo reportado por Johnson *et al.* (2007) quienes determinaron los patrones de distribución de *Puccinia melanocephala*.

The distribution in specific points or infection points of *S. reilianum* within each locality, suggests the existence of favorable environmental conditions or susceptible corn genotypes that favor the expression of the disease within each locality, as indicated by Aquino *et al.* (2011) who mentioned that most corn genotypes grown in Valles altos from the State of Mexico express the disease with different levels of susceptibility, finding that hybrid genotypes expressed greater incidence. Geostatistics spatial modeling of head smut in maize obtained in this study is consistent with the determination of the spatial patterns of disease obtained by Sánchez *et al.* (2011) who determined the spatial patterns of *S. reilianum* in corn that occurred during the 2008 agricultural cycle and with those reported in other pathosystems, although using the same techniques, by Allen *et al.* (2008) in wheat for *Tilletia indica*; so with that reported by Johnson *et al.* (2007) who determined the distribution patterns of *Puccinia melanocephala*.

In all validated models it was able to establish maps where the aggregate behavior and gradients of the disease can be observed (Figure 1). The variable scales of maps from the 25 localities are due to differences in distance between locations of 100 plots within each locality. It showed that the highest percentages of un-infested area were associated with the spherical model in the locality of San Felipe, municipality of San Felipe del Progreso and Tlalmanalco; that is, the disease was located in very specific areas within the map; while the location of Otzoloapan and Tequixquiac fitted to the Gaussian model, the aggregation centers if the disease were observed continuously, but compact, which means the progression of infestation to neighboring parcels (Alves *et al.*, 2006).

The un-infested area estimated per municipality ranged between 20 and 78% from the total sampled area (Table 1). The localities of San Felipe del Progreso, Tlalmanalco and El Salto from the municipality of Ixtapan del Oro had the highest percentages of un-infested area estimated. On the other hand, the infested area estimated fluctuated between 22% and 85%, the highest infested area estimated was in the locality of Cerrillo from the municipality of Toluca (85%), Tenango from the municipality of Tenango del Valle (80%), and San José El Cuartel (81%). This allowed us to identify infested and un-infested areas within each locality. No location showed 100% infestation (Figure 1). No association was found between the highest percentages of disease incidence obtained in the field, with the highest percentages of infested areas estimated.

The occurrence of the disease in specific points within the localities enables monitoring actions and address control measures towards specific points or sites, which adequate

En todos los modelos validados se lograron establecer mapas donde se observan y se visualiza el comportamiento en agregados (Figura 1) de la enfermedad, así como los gradientes de la enfermedad. Las escalas variables de los mapas de las 25 localidades se deben a las diferencias en distancia que existen entre las ubicaciones de las 100 parcelas dentro de cada localidad. Se evidenció que los mayores porcentajes de área sin infestar se asociaron con el modelo esférico en la localidad de San Felipe, municipio de San Felipe del Progreso y Tlalmanalco; es decir, la enfermedad se ubicó en zonas muy específicas dentro del mapa; mientras que en las localidad de Otzoloapan y Tequixquiac ajustadas al modelo gaussiano, los centros de agregación de la enfermedad se visualizaron en forma continua, pero compacta, lo que implica el avance de la infestación a parcelas vecinas (Alves *et al.*, 2006).

agronomic management actions in terms of specific points or sites (Moral *et al.*, 2011). This management has the potential to reduce the use of fungicides and to delay resistance development due to the creation of dynamic temporary shelters (Fleischer *et al.*, 1999) defined as areas without spraying of pesticides allowing the proliferation of natural enemies and a lower pressure of fungicides on pathogen. Carvalho and Ampelio (2010) indicate that the maps obtained by kriging is a suitable tool for disease monitoring and accurate management, also can be used to detect changes in spatial patterns of disease over time (Navas *et al.*, 2008). The use of distribution maps of the diseases seeks to aim control measures on specific areas with infestation (Park *et al.*, 2007) that allows reducing the use of different inputs.

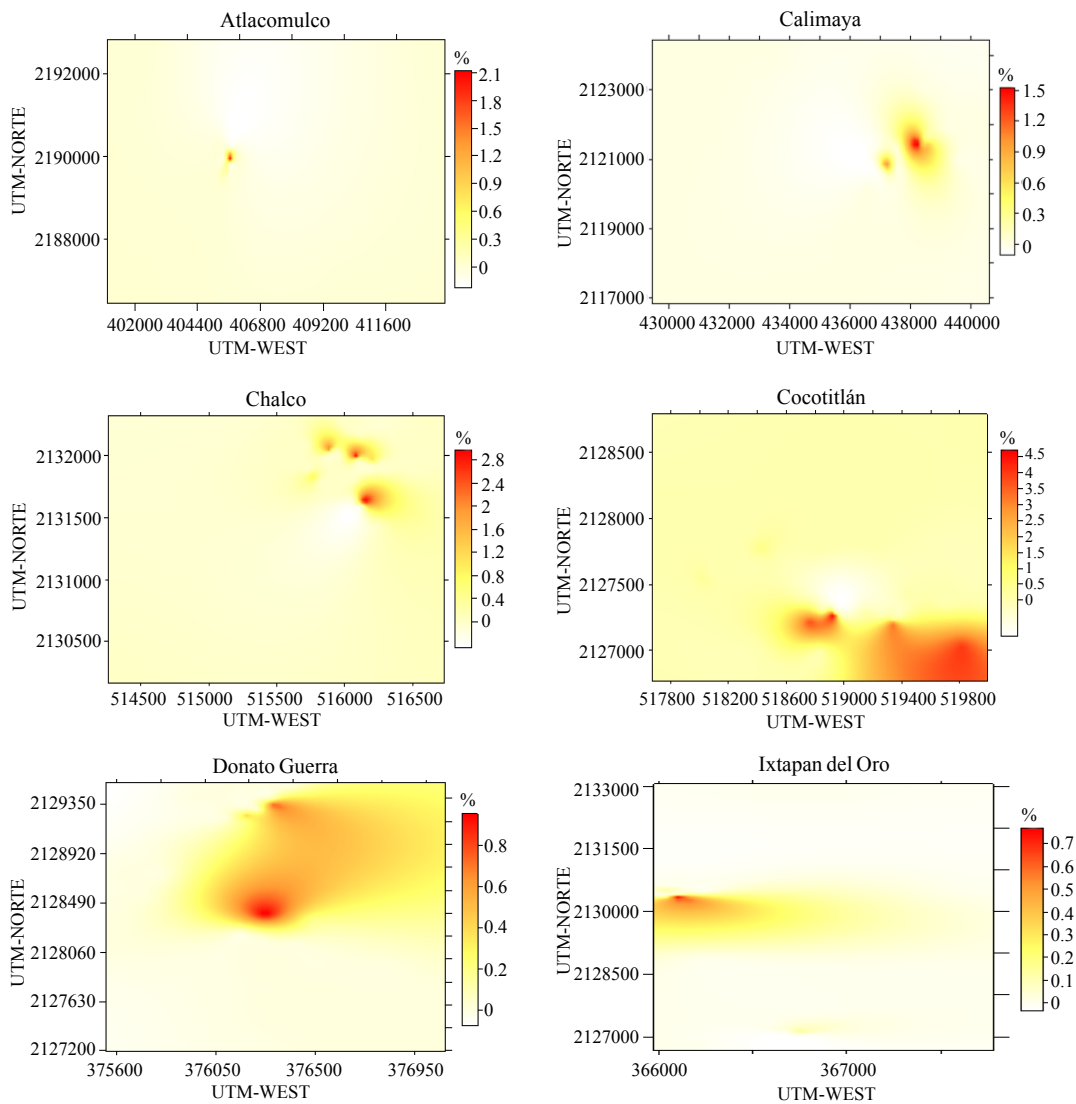


Figura 1. Mapas de densidad del carbón de la espiga del maíz en 2009. (%) indica incidencia de la enfermedad.
Figure 1. Maps density smut of maize in 2009. (%) indicates incidence of the disease.

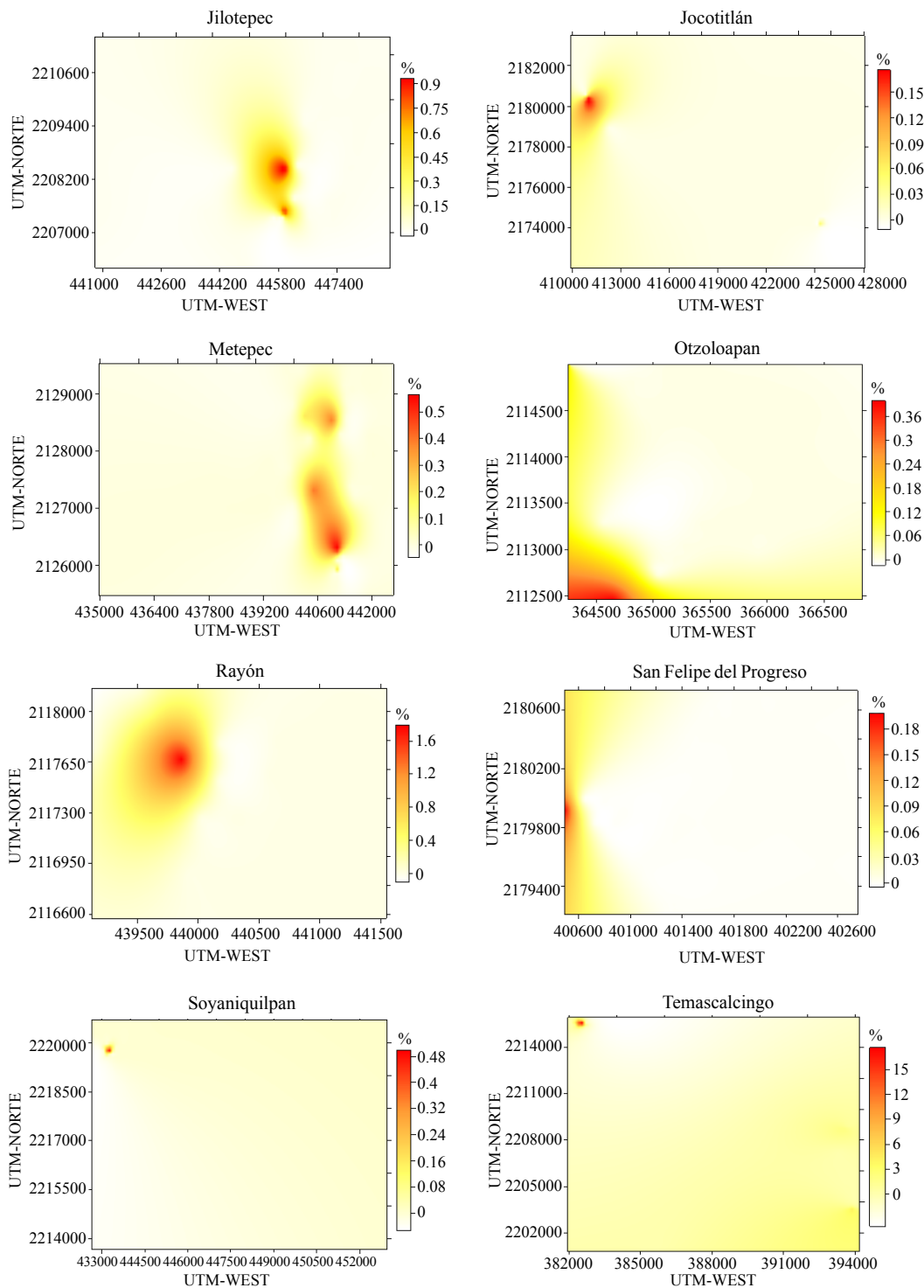
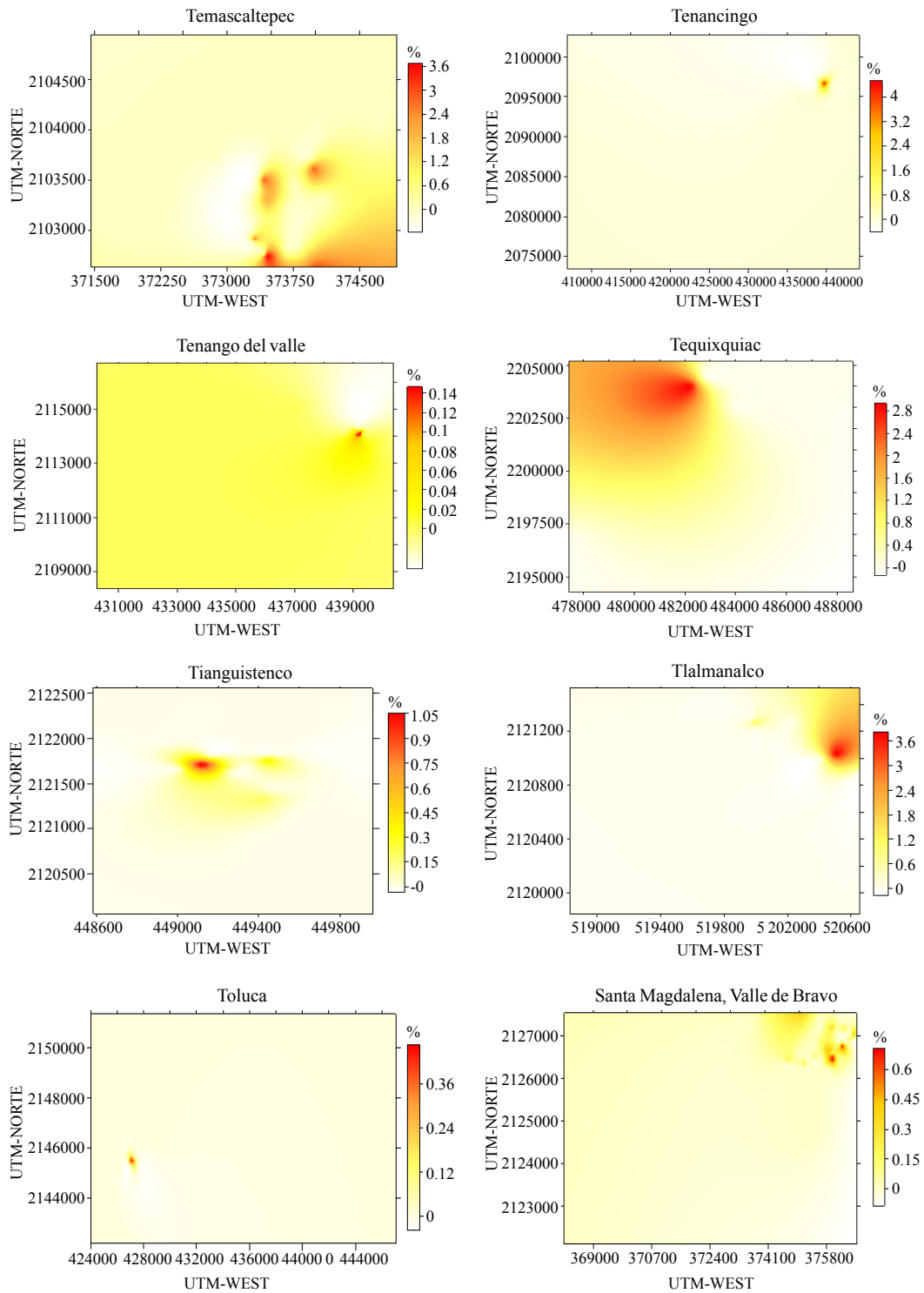


Figura 1. Mapas de densidad del carbón de la espiga del maíz en 2009. (%) indica incidencia de la enfermedad (Continuación).
Figure 1. Maps density smut of maize in 2009. (%) indicates incidence of the disease (Continuation).



**Figura 1. Mapas de densidad del carbón de la espiga del maíz en 2009. (%) indica incidencia de la enfermedad (Continuación).
 Figure 1. Maps density smut of maize in 2009. (%) indicates incidence of the disease (Continuation).**

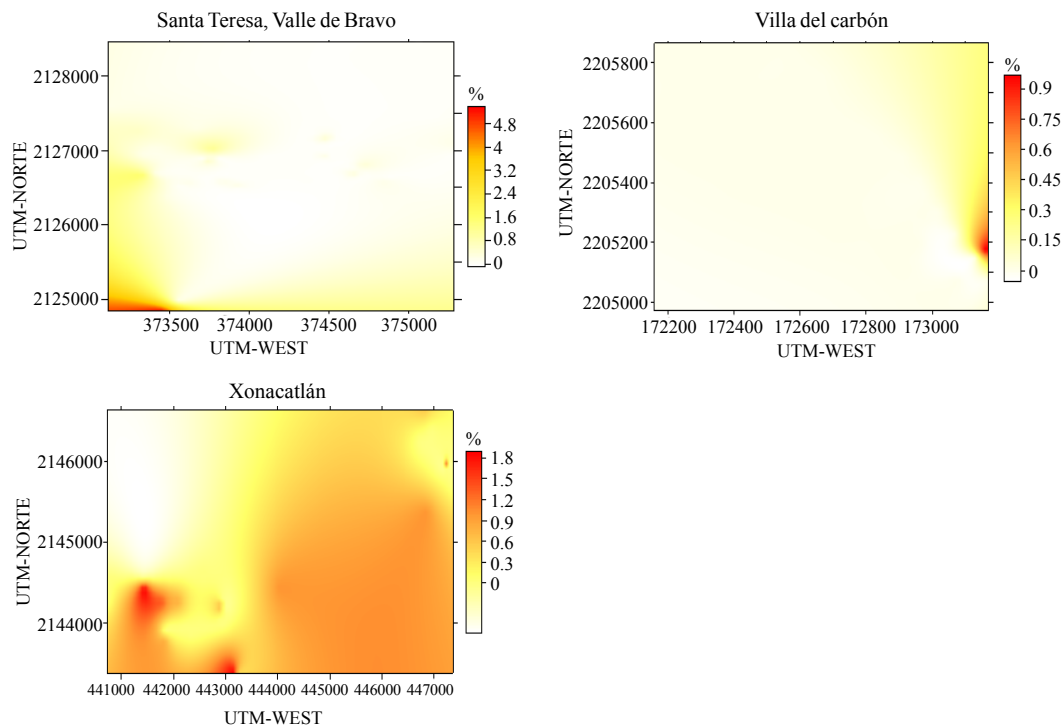


Figura 1. Mapas de densidad del carbón de la espiga del maíz en 2009. (%) indica incidencia de la enfermedad (Continuación).
Figure 1. Maps density smut of maize in 2009. (%) indicates incidence of the disease (Continuation).

El área estimada por municipio sin infestar se ubicó entre 20 y 78%, del área total muestreada (Cuadro 1). Las localidades de San Felipe del progreso, Tlamanalco y El Salto del Municipio de Ixtapan del Oro presentaron los mayores porcentajes de superficie estimada sin infestar. Por otro lado, el área estimada infestada fluctuó entre 22% y 85%, la mayor superficie infestada estimada se presentó en la localidad del Cerrillo del municipio de Toluca (85%), Tenango del municipio de Tenango del Valle (80%), y San José El Cuartel (81%). Lo anterior nos permitió identificar áreas infestadas y libres de infestación dentro de cada localidad. Ninguna localidad presentó el 100% de área infestada (Figura 1). No se encontró una asociación entre los mayores porcentajes de incidencia de la enfermedad obtenida en campo, con los mayores porcentajes de áreas infestadas estimadas.

La ocurrencia de la enfermedad en puntos específicos dentro de la localidad permite focalizar las acciones de monitoreo y dirigir las medidas de control hacia puntos o sitios específicos, lo que adecua las acciones de manejo agronómico en términos de puntos o sitios específicos (Moral *et al.*, 2011). Este manejo tiene el potencial de reducir el uso de fungicidas y de retardar el desarrollo de la resistencia debido a la creación de refugios temporales dinámicos (Fleischer *et al.*, 1999) definidos como las áreas

Sánchez *et al.* (2011) mentions that this disease occurs at specific points within each locality, which is consistent with the results obtained in this work. This manifestation may be due to this *Ustilaginal* fungus rarely spreads long distances by wind; apparently the biological principle of the spherical model suggests that the disease has a random distribution within localities, i.e., its spread is observed from a point source; which supports the idea that the points or outbreaks of the disease originated from contaminated propagation material (Roberto *et al.*, 2002), possibly these point sources are product of the infestation caused by infested or contaminated seed corn, specifically from commercial hybrids that are introduced to the localities. The prevalence of these genotypes in the locations analyzed, have also originated the highest levels of incidence (Table 1) to be considered with greater susceptibility to landraces or native corn (Aquino *et al.*, 2011).

The results of aggregation and maps obtained suggest the possibility of performing alternatives address to chemical and cultural control that are used, thus focusing sampling activities, which make feasible to obtain economic and environmental savings (Park *et al.*, 2007), which allow us to justify the use of precision agriculture techniques to control infestations of head smut through chemical or alternative methods where their presence is reported.

sin aspersión de plaguicidas que permiten la proliferación de enemigos naturales y una menor presión de fungicidas sobre el patógeno. Carvalho y Ampélio (2010) indican que los mapas obtenidos con el krigeado es una herramienta adecuado para el monitoreo de enfermedades y el manejo de la enfermedad con precisión, además que pueden utilizarse para detectar cambios de los patrones espaciales de la enfermedad a través del tiempo (Navas *et al.*, 2008). La utilización de mapas de la distribución de enfermedades tiene por objeto dirigir medidas de control sobre áreas específicas de infestación (Park *et al.*, 2007) que permite reducir el uso de diferentes insumos.

Sánchez *et al.* (2011) mencionan que esta enfermedad se manifiesta en puntos específicos dentro de cada localidad, concordando con los resultados obtenidos. Dicha manifestación podría deberse a que este hongo *Ustilaginal* raramente se disemina a grandes distancias por el viento; al parecer el principio biológico del modelo esférico plantea que la enfermedad tiene una distribución aleatoria dentro de las localidades, es decir, su propagación se visualiza a partir de una fuente puntual; que soporta la idea que la enfermedad se originó a partir de material propagativo contaminado (Roberto *et al.*, 2002), posiblemente dichas fuentes puntuales sean producto de la infestación originada de semilla de maíz infestada de los híbridos comerciales, que se introducen a las localidades. La prevalencia de dichos genotipos en las localidades analizadas, han originado mayores niveles de incidencia (Cuadro 1) al considerarse con una mayor susceptibilidad respecto a los maíces criollos (Aquino *et al.*, 2011).

Los resultados de agregación y los mapas obtenidos sugieren la posibilidad de realizar alternativas dirigidas del control químico y cultural que se utilicen, así como focalizar las actividades de muestreo, que hace factible obtener ahorros económicos y ambientales (Park *et al.*, 2007), lo cual nos permiten justificar el uso de las técnicas de la agricultura de precisión para controlar las infestaciones del carbón de la espiga mediante métodos químicos o alternativos en donde se reporte su presencia.

Conclusiones

Los patrones espaciales del carbón de la espiga del maíz se presentaron de forma agregada durante el año 2009 en las 25 localidades analizadas, lo que propició infestaciones en zonas específicas, que permitirá direccionar y focalizar las diferentes medidas de control sobre los puntos de agregación. Los mapas obtenidos reflejaron la estructura agregada de la enfermedad en todas las localidades analizadas.

Conclusions

Spatial patterns of head smut of corn were present in aggregate form during 2009 in 25 localities analyzed, which favored infestations in specific areas, which will allow to address and focus the different control measures on aggregation points. The maps obtained showed the aggregate structure of the disease at all localities analyzed.

End of the English version



Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para la realización de estudios de Posgrado y el presente trabajo.

Literatura citada

- Aquino, M. J. A.; Sánchez-Flores, A.; González-Huerta, A. y Sánchez-Pale J. R. 2011. Evaluación de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays* L.) por su resistencia a *Sporisorium reilianum* (Kühn) Langdon & Fullerton y rendimiento de grano. *Rev. Mex. Fitopatol.* 29:39-49.
- Allen, T. W.; Maples, H. W.; Workneh, F.; Stein, J. M. and Rush C. M. 2008. Distribution and recovery of *Tilletia indica* teliospores from regulated wheat fields in Texas. *Plant Dis.* 92:344-350.
- Alves, M. C.; Pozza, E. A.; Machado, J. C.; Araújo, D. V.; Talamini, V. e Oliveira, M. S. 2006. Geoestatística como metodologia para estudar a dinâmica espaço-temporal de doenças associadas a *Colletotrichum* spp. transmitidos por sementes. *Fitopatologia Brasileira.* 31:557-563.
- Carvalho, A. M. and Ampélio, P. E. 2010. Indicator kriging modeling epidemiology of common bean anthracnose. *Applied Geomatical.* 2:65-72.
- Carvalho, A. M.; Moreira, da S. F.; Ampélio, P. E. and Silva, de O. M. 2009. Modeling spatial variability and pattern of rust and brown eyespot in coffee agroecosystem. *J. Pest. Sci.* 82:137-148.
- CESAVEM (Comité de Sanidad Vegetal del Estado de México). 2005. Carbón de la espiga del maíz. Campaña Manejo fitosanitario del cultivo del maíz. SENASICA-SAGARPA-SEDAGRO. Folleto para Productores. Toluca Estado de México. 6 p.
- Englund, E. and Sparks, A. 1988. Geostatistical Environmental Assessment Software (GEO-EAS) User's Guide. U.S. Environmental Protection agency document EPA/600/4-88/033. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Las Vegas, NV, USA. 186 p.

- Fleischer, J.; Blom, E. and Weisz, R. 1999. Sampling in precision IPM: when the objective is a map. *Phytopathology*. 89:115-118.
- Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. New York. 561 p.
- Jaime, G. R. and Cotty, P. J. 2003. Aflatoxin contamination of commercial cottonseed in south texas. *Phytopathology*. 93:1190-1200.
- Johnson, R. M.; Grisham, M. P. and Richard, E. P. Jr. 2007. Relationship between sugarcane rust severity and soil properties in Louisiana. *Phytopathology*. 97:748-755.
- Moral, F. J.; Terron, J. M. and Rebollo, F. J. 2011. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. *Computers and Electronics in Agriculture* 75:223-230.
- Navas, C. J. A.; Landa, B. B.; Mercado-Blanco, J.; Trapero-Casas, J. L.; Rodríguez-Jurado, D. and Jiménez-Díaz, R. M. 2008. Spatiotemporal analysis of spread of infections by *Verticillium dahliae* pathotypes within a high tree density olive orchard in southern Spain. *Phytopathology*. 98:167-180.
- Park, Y. L.; Krell, R. K. and Carroll, M. 2007. Theory, technology and practice of site-specific insect pest management. *J. Asia-Pacific Entomol.* 10(2):89-101.
- Pataký, J. K. 1999. Smuts. *In*: White, D. G. (Ed.). Compendium of corn diseases. Third edition. APS Press. St. Paul Minnesota, USA. 33-55 p.
- Ramírez, D. J. F.; Solares, V. M.; Figueroa, D. K. y Sánchez, J. R. 2013. Comportamiento espacial de trips (Insecta: Thysanoptera), en plantaciones comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.) en Zitácuaro, Michoacán, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 93:545-563.
- Ritchie, S. W. and Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Special Report 48. Cooperative Extension Service Ames, Iowa, USA. 24 p.
- Roberto, S. R.; Farias, P. R. S. and Bengamin, F. A. 2002. Geostatistical analysis of spatial dynamics of Citrus Variegated Chlorosis. *Fitopatologia Brasileira*. 27:599-604.
- Rodríguez, E.; García-Garrido, J. M.; García, P. A. and Campos, M. 2009. Large-scale epidemiological study and spatial patterns of Verticillium wilt in olive orchards in southern Spain. *Crop Protection*. 28:46-52.
- Rossi, R.; Mulla, J.; Journel, G. and Franz, H. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*. 62:277-314.
- Samper, F. J. y Carrera, J. 1996. Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea. 2ª Ed. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. Barcelona. 484 p.
- Sánchez, P. J. R.; Ramírez-Dávila, J. F.; González-Huerta, A. and De León, C. 2011. Modelization of the spatial distribution of corn head smut (*Sporisorium reilianum* Langdon and Fullerton) in Mexico. *Spanish J. Agric. Res.* 9:882-893.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1992. Enfermedades del maíz. *In*: SARH (Edit.). Guía fitosanitaria para el cultivo del maíz. Serie Sanidad Vegetal. México D. F. 14 p.
- SIAP (Sistema de Información Agrícola y Pecuaria). 2014. Cierre de la producción agrícola por estado del año 2012. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> fecha de consulta: 30 de Junio de 2014.
- Stein, A.; Kocks, C. G.; Zadoks, J. C.; Frinkin, H. D.; Ruissen, M. A. and Myers, D. E. 1994. A geostatistical analysis of the spatio-temporal development of downy mildew epidemics in cabbage. *Phytopathology*. 84:1227-1239.
- Van de Landea, H. L. and Zadoks, J. C. 1999. Spatial patterns of spear rot in oil palm plantations in Surinam. *Plant Pathology*. 48:189-201.