

# Asociación espacial de largo plazo de *Sporisorium reilianum* en el cultivo de maíz

José Francisco Ramírez-Dávila<sup>1</sup>, Jesús Ricardo Sánchez-Pale<sup>2</sup>  
Dulce Karen Figueroa Figueroa<sup>2</sup>, Carlos de León<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, A. P. 435. México. <sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de México. Postgrado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Toluca, Estado de México, A. P. 435. México. <sup>3</sup> Postgrado en Fitopatología. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México

## Long-term spatial association of *Sporisorium reilianum* in maize

**Abstract.** Corn head smut has caused important economic and ecological damages in corn-producing regions in Mexico. The stability and the spatiotemporal distribution of the disease are necessary for the elaboration of integrated management programs through a specific point. The objective of the existing study was to determine corn head smut spatiotemporal stability through the  $I_m$  index SADIE and through the Cramer- von Mises test; and in the same way to characterize its spatial distribution through geostatistics techniques. The incidence of the disease was determined in 100 georeferenced plots in the localities of "La Mesa" and "Tutuapan" in "Ixtapan del Oro" municipality, Mexico State. Aggregated maps were done by Kriging. The spatiotemporal stability was determined in long term with the association Index ( $I_m$ ) and the Cramer- von Mises test. The results showed that the  $I_m$  index SADIE and the Cramer- von Mises test allowed determining the spatiotemporal stability of the disease in the years from 2006 to 2008. *S. reilianum* spatial patterns were obtained in the four analyzed years, visualizing its aggregation centers with elaborated maps; which will allow to adequate management actions on specific points or sites.

**Keywords:** corn head smut, spatial distribution, Mexico, geostatistical, SADIE

**Resumen.** El carbón de la espiga causa daños económicos y ecológicos importantes en regiones productoras de maíz en México. La asociación y distribución espacio temporal de la enfermedad es indispensable para elaborar programas de manejo integrado a través del enfoque de punto o sitio específico. El objetivo del presente estudio fue determinar la asociación espacio temporal del carbón de la espiga con el índice  $I_m$  de SADIE y la prueba de Cramer-von Mises, así como caracterizar su distribución espacial mediante técnicas geoestadísticas. La incidencia de la enfermedad se estimó en 100 parcelas georeferenciadas de las localidades de Las Mesas y Tutuapan del Municipio de Ixtapan del Oro, Edo. de México. Se elaboraron mapas de agregación por medio de Kriging. Se determinó la asociación espacio temporal a largo plazo con el índice de asociación ( $I_m$ ) y la prueba de Cramer-von Mises. Los resultados mostraron que el índice de asociación ( $I_m$ ) y la prueba de Cramer-von Mises permitieron determinar la asociación espacio temporal de la enfermedad entre los años 2006 a 2008. Se obtuvieron los patrones espaciales de *S. reilianum* en los cuatro años analizados, visualizando sus centros de agregación con los mapas elaborados, que permitirá adecuar las acciones de manejo en puntos o sitios específicos.

**Palabras clave:** carbón de la espiga, distribución espacial, México, geoestadística, SADIE

Received 23 September 2013; accepted 20 August 2014.

Recibido 23 de septiembre 2013; aceptado 20 de agosto 2014.

Autor para correspondencia: José Francisco Ramírez-Dávila  
jframirez@uaemex.mx

## Introducción

El carbón de la espiga del maíz es una enfermedad emergente ocasionada por *Sporisorium reilianum* (Kühn) Langdon y Fullerton (= *Sphacelotheca reiliana*) (Kühn) Clint) (*S. reilianum*) en los Valles Altos de México, sus daños se han incrementado ciclo tras ciclo desde su aparición en el año 2003. En el Estado de México se ha estimado una reducción en el rendimiento hasta del 15% en variedades e híbridos susceptibles mientras que en otras regiones de México, se reportan incidencia que oscilan de 0.1 hasta 42.5% (Pérez-Camarillo *et al.*, 2008), pero se han observado incidencias de hasta 80% en otras regiones del Mundo (Pataky, 1999).

La obtención de sus patrones o arreglos espaciales pueden darnos valiosa información acerca de la naturaleza y el rol de las fuentes de inóculo para el desarrollo de epidemias (Navas-Cortés *et al.*, 2008). La geoestadística se ha utilizado para analizar los patrones espaciales de las enfermedades en plantas (Wu *et al.*, 2001) y de las poblaciones de los patógenos a través del tiempo para caracterizarlos cuantitativamente (Stein *et al.*, 1994). Franke *et al.* (2009) consideran que la técnica de SADIE es adecuada para analizar los patrones espaciales de algunas enfermedades, así como para evaluar la relación entre los patrones espaciales dentro de un mismo campo agrícola en diferentes períodos de tiempo (Scott *et al.*, 2003).

Los métodos geoestadísticos proporcionan una medida directa de la dependencia espacial de las unidades muestreadas, debido a que consideran la naturaleza bidimensional de la distribución de los organismos y permiten elaborar mapas (Sciarretta *et al.*, 2001) formando gradientes de la intensidad de la enfermedad (Nava-Díaz, 2009). Un correcto control va estrechamente ligado al conocimiento de su distribución espacial, en específico para aquellas enfermedades que afectan a la raíz (Campbell y Benson, 1994). Con el uso de la geoestadística es posible establecer

mapas de la distribución espacial de la enfermedad y su porcentaje de infección permitiendo identificar reservorios o fuentes de inóculo del patógeno, así como conseguir ahorros económicos y ambientales al direccionar las alternativas de control hacia puntos específicos donde se presenta la enfermedad.

La determinación de la asociación espacio-temporal de las enfermedades es de gran importancia para el entendimiento y predicción del desarrollo de áreas infestadas a través del tiempo, así como para el manejo desde una perspectiva de puntos específicos. Sin embargo, es inexistente la información disponible sobre la asociación espacio temporal de *S. reilianum* a nivel de región que proporcione alternativas epidemiológicas para su manejo.

Dicho conocimiento permitiría la elección de alternativas eficientes y sustentables dentro del manejo integral del cultivo del maíz que minimice los riesgos al permitir el desarrollo de modelos de manejo de enfermedades. Ante este contexto, en el presente estudio se plantearon los siguientes objetivos: a) establecer la asociación espacio temporal del carbón de la espiga con el índice  $I_m$  de SADIE y la técnica de Cramer-von Mises y b) Caracterizar la distribución espacial de la enfermedad entre los años 2006 a 2009, mediante técnicas geoestadísticas.

## Materiales y métodos

El muestreo se realizó cuando las variedades e híbridos comerciales de maíz se encontraba al 50% de la etapa R3 (Ritchie y Hanway, 1982) en 100 parcelas con antecedentes de haberse presentado la enfermedad en las localidades de Las Mesas y Tutuapan, del municipio de Ixtapan del Oro, Estado de México, ubicando su punto geográfico con un dGPS (Model SPS351, Trimble, E.U.A.); la determinación de la incidencia consistió en dividir a cada parcela 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. Se analizaron las incidencias de la enfermedad de las parcelas de los ciclos agrícolas 2006 - 2009.

### Geostatística

El análisis geostatístico consistió en: 1) estimación del semivariograma; 2) estimación de los parámetros del modelo de semivariograma; 3) estimación de la superficie (mapas) utilizando puntos (estimaciones) a partir del kriging. La estimación del semivariograma se hizo con datos recolectados en los sitios de muestreo de la enfermedad; el valor experimental del semivariograma se calculó en base a lo establecido por 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 muestrales separados por el intervalo de distancia  $h$ ;  $z(x)$  es el valor de la variable de interés en el punto muestral  $x$ , y  $z(x_i+h)$  es el valor de la variable de interés en el punto muestral  $x_i+h$ . A este semivariograma se le denomina experimental y se ajustó a un semivariograma teórico preestablecido, para posteriormente validarlo.

La validación de los modelos ajustados a los semivariogramas experimentales se realizó con el procedimiento de validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989), con el cual se elimina un valor muestral y se usa el método de interpolación geostatística denominado kriging, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restantes valores muestrales. Este procedimiento se efectúa sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumen en estadísticos de validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989; Hevesi et al., 1992). Los parámetros a validar son el efecto pepita (nugget), la meseta

(sill) y el rango o alcance, que se modifican a prueba y error hasta obtener los siguientes estadísticos de validación cruzada: media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM), error cuadrático medio adimensional (ECMA) y un estadístico adicional para validar el ajuste del modelo consiste en que el valor de la varianza de los errores sea menor a la varianza muestral.

Para determinar qué tan fuerte es la relación entre los datos obtenidos en los muestreos se calculó el nivel de dependencia espacial. Este valor se obtiene al dividir el efecto pepita y la meseta, expresado en porcentaje: con menos de 25 % es alto; entre 26 y 75 % es moderado y mayor a 76 % es bajo (López-Granados et al., 2002).

### Asociación espacial y temporal a largo plazo

Se compararon los mapas elaborados con el método del Kriging ordinario de un año con otro con la finalidad de establecer si existía o no una asociación espacio-temporal de las poblaciones de *S. reilianum* mediante la utilización de la prueba estadística no paramétrica de Cramer-von Mises ( $\mathcal{P}$ ) modificada por Syrjala (1996) tal y como lo aconsejan Liebhold et al. (1993). Cabe indicar que las comparaciones fueron realizadas con resultados de fechas próximas entre sí (Rossi et al., 1992). La comparación requiere que se conozca perfectamente la localización espacial de *Sporisorium reilianum* y que además el muestreo se realice sobre los mismos puntos a comparar. Paralelamente se utilizó el índice de asociación del SADIE llamado  $I_n$  (Korie et al., 2000) que permite una comparación directa entre dos conjuntos de datos (años) y evalúa la estabilidad de la distribución espacial entre dos periodos de muestreo. Si  $I_n > 0$ , indica que existe una asociación o una estabilidad espacio-temporal entre los mapas si existe un nivel de significación de  $P_n < 0.025$ . La determinación de la estabilidad se realizó con el programa SADIE 1.22.

La distribución espacial del *Sporisorium reilianum* fue también analizada con la técnica de SADIE (Spatial

Analysis by Distance Indices (por sus siglas en inglés) (Perry, 1995). El análisis de SADIE se realizó con los datos de incidencia determinados en cada año para calcular el índice de agregación  $I_a$  (Perry, 1998). Usualmente, se dice que una muestra es agregada si  $I_a > 1$ , la muestra es espacialmente aleatoria si  $I_a = 1$ , y la muestra es regular si  $I_a < 1$  (Perry *et al.*, 1999). La probabilidad asociada ( $P_a$ ) se calculó a partir de las pruebas formales al azar bajo la hipótesis nula de que los recuentos observados fueron dispuestos al azar entre los puntos de muestreo dado.

Se determinó el grado de agrupamiento a través del índice de agregación  $J_a$  y su probabilidad asociada ( $Q_a$ ) (Perry, 1998). Similar al índice  $I_a$ , valores de  $J_a > 1$  usualmente indican una muestra agregada,  $J_a = 1$  representan datos espacialmente aleatorios y  $J_a < 1$  muestras regulares. Análogamente, la hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada si  $Q_a < 0.025$  (en favor de la alternativa de agregación) o si  $Q_a > 0.975$  (en favor de la alternativa de regularidad).

De esta manera, los valores del índice  $J_a$  sirven para corroborar los resultados obtenidos con el índice  $I_a$ . Además, este índice se utiliza para discriminar entre patrones espaciales donde hay un único agrupamiento importante para el cual sus valores son significativamente mayores que la unidad, y en donde hay dos o más agrupamientos, su valor no es significativamente diferente de la unidad o incluso menor que ella.

El programa utilizado en este trabajo para determinar los valores y las probabilidades de ambos índices

fue el SADIE 1.22 (programa cedido por el Dr. Perry). Se utilizaron mapas de densidad realizados con antelación mediante un Análisis Geoestadístico en el cual se empleó el Krigeado (Samper y Carrera, 1996) Ordinario, para corroborar los resultados obtenidos con los índices del SADIE.

## Resultados y discusión

La incidencia de *S. reilianum* fluctuó de 0.2 a 3.0% durante los cuatros años de estudios. La mayor incidencia (3.0%) se presentó en el año 2006 (Tabla 1).

### Geoestadística

En los cuatro años estudiados se determinó que la distribución espacial del carbón de la espiga del maíz presentó un arreglo espacial de tipo agregado. Los análisis estadísticos (Tabla 2) indicaron que los semivariogramas experimentales se ajustaron a un modelo teórico de tipo esférico para cada uno de los cuatro años analizados (Figura 1a). Dicho modelo es indicativo que dentro de la localidad analizada existen parcelas o zonas en que se manifiesta más el carbón de la espiga respecto al resto de parcelas muestreadas, es decir, existen focos específicos de la enfermedad que avanza desde una fuente puntual, lo que permite suponer que la enfermedad se originó a partir de un punto inicial de inóculo o semilla contaminada, dichos focos o puntos específicos están dispersos dentro de las localidades de Ixtapan del Oro. Las

Tabla 1. Superficie afectada, incidencia y valor de los índices de SADIE ( $I_a$  y  $J_a$ ) y sus respectivas probabilidades  $P_a$  y  $Q_a$  de *Sporisorium reilianum* durante los años 2006 a 2009 en Ixtapan del Oro, Edo. de México

Año	Superficie (Ha)	Incidencia (%)	$I_a$	$P_a$	$J_a$	$Q_a$
2006	4.5	0.2-3.0	1.46	0.011 <sup>s</sup>	1.12	0.212 <sup>ns</sup>
2007	9.43	0.2-1.0	1.57	0.008 <sup>s</sup>	1.11	0.143 <sup>ns</sup>
2008	9.93	0.2-1.8	1.51	0.016 <sup>s</sup>	1.14	0.265 <sup>ns</sup>
2009	10.12	0.2-1.0	1.60	0.013 <sup>s</sup>	1.16	0.258 <sup>ns</sup>

ns: no significativo al 5% s: significativo al 5%

Tabla 2. Parámetros de los modelos ajustados (pepita, meseta y rango) y nivel de dependencia espacial del carbón de la espiga del maíz obtenido del año 2006 a 2009 en Ixtapan del Oro

Año	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pepita/Meseta (%)	Nivel de dependencia espacial
2006	Esférico	0	0.02045	152.32	0.00	Alto
2007	Esférico	0	0.00469	276.40	0.00	Alto
2008	Esférico	0	0.00348	210.64	0.00	Alto
2009	Esférico	0	0.00158	155.06	0.00	Alto

similitudes en la ubicación geográfica de los predios con presencia de la enfermedad de un año a otro, así como los niveles de incidencia del carbón de la espiga, posiblemente originaron el mismo tipo de distribución espacial en los cuatro años de estudio.

La existencia de puntos específicos de la enfermedad permite focalizar las acciones de monitoreo y dirigir las medidas de control hacia puntos o sitios específicos. La distribución espacial determinada en este estudio es similar al encontrado con la enfermedad de etiología desconocida en palmas de aceite (Van de Lande y Zadoks, 1999) pero que avanza de una fuente puntual. Por otro lado, Jaime-García y Cooty (2003) consideran que el modelo esférico es indicativo de una distribución irregular de la enfermedad dentro de un área analizada.

En cuanto a meseta, los valores variaron entre 0.00158 y 0.02045. Los valores del rango fluctuaron entre 152.32 a 276.40 m (Tabla 2). El nivel de dependencia espacial encontrado para todos los casos fue alto, indicativo que los centros de agregación del carbón de la espiga están relacionados. En todos los semivariogramas se determinó un efecto pepita igual a cero lo que significa que el 100% de la variación de la distribución de la enfermedad se explica por la estructura espacial establecida en los semivariogramas respectivos, además es indicativo que el error de muestreo fue mínimo y que la escala de muestreo utilizada fue adecuada (Rossi *et al.*, 1992).

Los valores obtenidos dentro del rango apropiado de los estadísticos de validación cruzada (Tabla 3) permiten validar estadísticamente el modelo teórico ajustado. Los

modelos de los semivariogramas ajustados establecidos por año se observan en el Figura 1a. La validación de los semivariogramas experimentales al modelo teórico corroboró la adecuación de los datos de la enfermedad a nivel de región al modelo ajustado, que permitió tener certeza de que el método de muestreo utilizado en el estudio fue apropiado, por lo que el análisis geoestadístico fue apropiado para el estudio de la distribución espacial de la enfermedad.

La utilización de técnicas geoestadísticas para la obtención de la distribución espacial de *S. reilianum* en maíz obtenida a nivel de localidad en el presente trabajo concuerda con la obtenida por Sánchez-Pale *et al.* (2011) al determinar los patrones espaciales de *S. reilianum* en maíz y con lo reportado por Allen *et al.*, (2008) en trigo con *Tilletia indica*.

#### Superficie infestada en base a mapas de densidad

La utilización de técnicas geoestadísticas permite la elaboración de mapas que pueden conducir al manejo con precisión de plagas y enfermedades (Fleischer *et al.*, 1999). Con los modelos obtenidos se lograron establecer mapas de agregación (Figura 1b) del carbón de la espiga del maíz, mostrando la heterogeneidad espacial de la enfermedad dentro de la misma localidad, así como los gradientes de la enfermedad que permiten su visualización. En los cuatro años se observaron agregaciones del carbón de la espiga del maíz en zonas específicas respecto al resto de los puntos muestreados.

La agregación observada en los mapas permite adecuar las acciones de manejo en términos de puntos o sitios específicos, además que pueden utilizarse para detectar

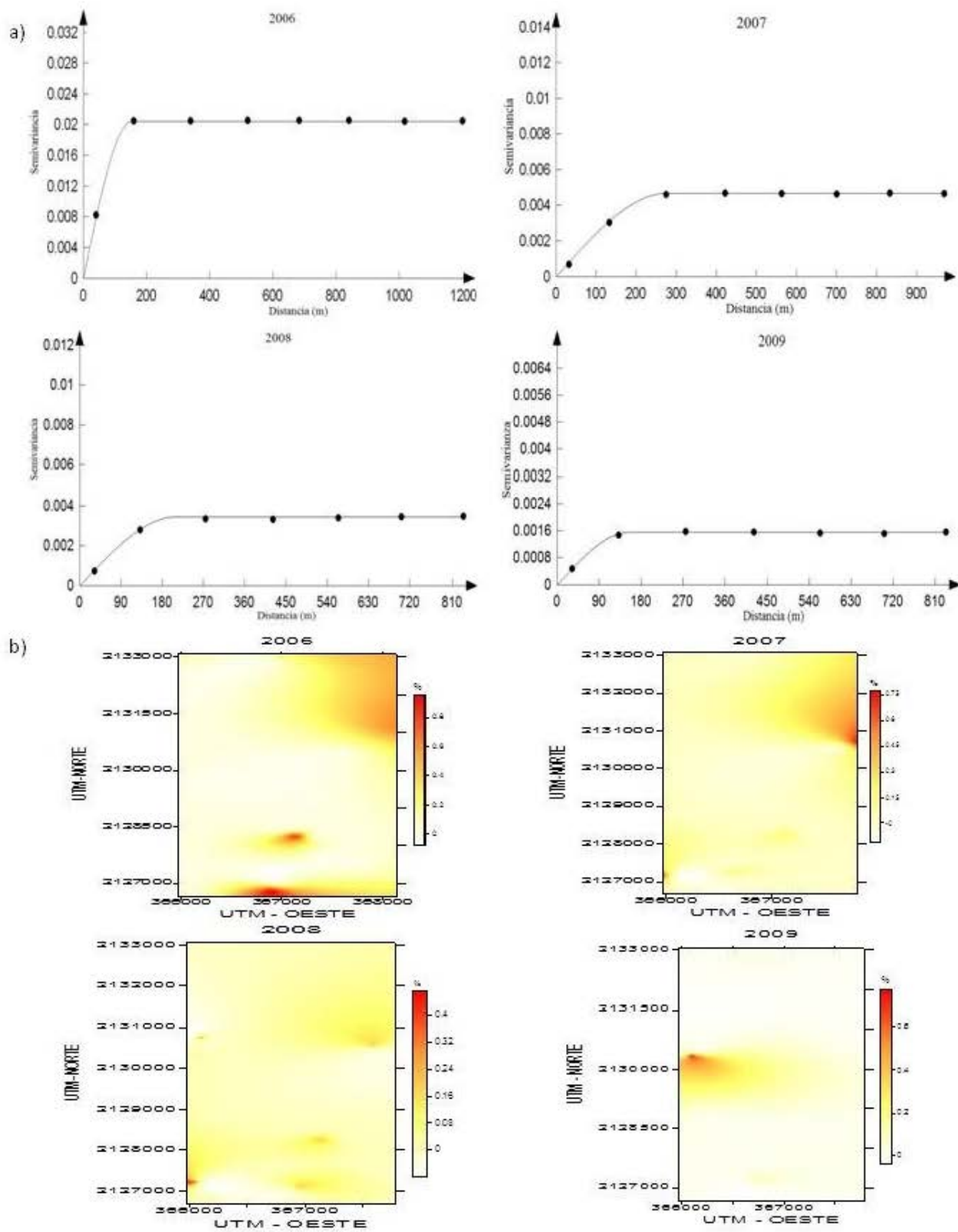


Figura 1. Semivariogramas (a) y mapas de densidad (b) del carbón de las espigas del maíz obtenidos de 2006 a 2009 en Ixtapan del Oro. % índice incidencia de la enfermedad; UTM: Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator expresada en metros.

cambios de los patrones espaciales de la enfermedad a través del tiempo (Lecoustre *et al.*, 1989). En los mapas, no se observó una mayor cantidad de centros de agregación con mayores niveles de incidencia de la enfermedad; sin embargo se observó que en el mapa del año 2008, se presentó la mayor área estimada infestada (Tabla 3).

El área estimada sin carbón de la espiga se ubicó entre 16.0 y 61.0% del área total muestreada dependiendo del año (Tabla 3). La mayor superficie infestada estimada se presentó en el año 2008 (84%) permitiendo identificar tanto áreas infestadas, o con necesidad de manejo, como libres de la enfermedad.

En el presente estudio se demuestra que *S. reilianum* no se distribuyó en el 100% del área de la localidad de reciente infestación, es decir, la distribución espacial no fue uniforme. Los resultados sugieren utilizar semilla de maíz tratada con fungicida y la eliminación de plantas enfermas, así como los muestreos direccionados son alternativas a utilizar en forma dirigida a sitios o focos específicos en donde se presenta la enfermedad. Tales acciones permiten el uso de las técnicas de la agricultura de precisión para controlar los daños causados

por *S. reilianum*, además permitiría la eliminación de la enfermedad en la zona productora de Maíz de Ixtapan del Oro, Edo. de México.

#### Asociación espacio temporal a largo plazo

Utilizando la prueba bivariable de Cramer-von Mises ( $\Psi$ ) para comparar las diferentes estimaciones de la distribución espacial del carbón de la espiga realizadas con el krigeado, se determinó que los mapas de los años 2006 y 2007, 2007 y 2008 no son estadísticamente diferentes lo que indica asociación espacial y temporal (Tabla 4) del carbón de la espiga. La asociación espacio temporal obtenida en las comparaciones realizadas, indican la fuerte asociación o similitud de los patrones espaciales que existió de un año con otro, lo que sugiere que se careció de la formación de nuevos focos de infección de la enfermedad dentro de la localidad o fueron de menor importancia respecto a los puntos o focos de la enfermedad establecidos en el año anterior, es decir, los centros de agregación son consistentes en los dos años comparados; así mismo indica la permanencia y estabilidad del inoculo de un año a otro; tal situación, permite la

Tabla 3. Estadísticos de validación cruzada en los modelos de agregación y superficie infestada estimada de *Sporisorium reilianum* obtenidos durante los años 2006 a 2009

Año	Tamaño de la muestra	Media muestral (%)	Varianza muestral	MEE	Varianza de los errores	ECM	SMSE	Superficie infestada estimada (%)
2006	100	0.042	0.03224	0.12 <sup>ns</sup>	0.02117	0.16	1.07	44
2007	100	0.022	0.01352	0.08 <sup>ns</sup>	0.01130	0.02	1.10	39
2008	100	0.022	0.01112	0.14 <sup>ns</sup>	0.00801	0.05	1.10	84
2009	100	0.012	0.00706	0.11 <sup>ns</sup>	0.00126	0.03	1.07	39

$1 \pm 2 (2/N)0.5 = 1 \pm 0.45$ , ns: diferencia no significativa  $P < 0.05\%$ ; MEE: Media de los errores de estimación; ECM: Error cuadrático medio; SMSE: Error cuadrático medio adimensional.

Tabla 4. Comparación de mapas con la prueba bivariable de Cramer-von Mises ( $\Psi$ ) e índices de asociación ( $I_m$ ) de SADIE de la distribución espacial de *Sporisorium reilianum* durante los años 2006 a 2009 en Ixtapan del Oro

Años comparados	$\Psi$	Valor de P	Diferencia (5%)	$I_m$
2006 vs. 2007	0.33	0.51	No Significativo	0.23
2007 vs. 2008	0.14	0.49	No Significativo	2.63
2008 vs. 2009	0.70	0.03	Significativo	-0.79

Valores de  $I_m > 0$  indican asociación espacial.

posibilidad de contar con una predicción anticipada de la ocurrencia de *S. reilianum* y con ello dirigir nuestro esfuerzo de control o muestreo hacia las zonas específicas de infestación desde la perspectiva del sitio específico, dichos resultados concuerdan con lo encontrado por Scott *et al.* (2003) quienes lograron determinar la estabilidad espacio-temporal de *Peronospora arborescens* (Berkeley) de Bary, y con lo reportado (Rodríguez *et al.*, 2009) con *Verticillium dahliae* Kleb. en olivo al comparar periodos sucesivos de la enfermedad con el uso de SADIE.

En la comparación de los mapas de los años 2008-2009 se careció de asociación espacial (Figura 1b), lo cual es indicativo de la existencia de parcelas infestadas con puntos geográficos diferentes entre la comparación, debido a la presencia de nuevos centros o focos de la enfermedad por la adquisición y siembra de semilla de maíz infestada o el uso de maquinaria agrícola contaminada, o bien por la rotación con otro cultivo en las parcelas con antecedentes de la enfermedad que originó la ausencia del foco de infestación detectado en el año anterior. Resultados similares se encontraron con el índice de asociación de distribución espacial ( $I_m$ ) del análisis SADIE.

#### Estimación de los índices $I_x$ y $J_x$

El análisis espacial por índices de distancia (SADIE) determinó que en el índice  $I_x$  el valor más alto (1.60) se obtuvo en el año 2009 y el más bajo (1.46) en 2006. En todos los años el valor de  $I_x$  fue significativamente mayor a uno (Tabla 1) lo que indica una distribución espacial agregada del carbón de la espiga del maíz en los cuatro años de estudio; en lo referente al índice  $J_x$ , el mayor valor (1.16) se encontró en 2009 mientras que el menor valor (1.11) se presentó en 2007. El hecho que sus valores sean superiores a uno indicativo que la distribución de las poblaciones de la enfermedad presentan varios centros de agregación.

Debido a que el valor de la probabilidad ( $Q_x$ ) del índice  $J_x$  no fue significativamente diferente a la unidad, es

indicativo que la distribución espacial de las poblaciones de la enfermedad se expresó en varios centros de agregación dentro de la localidad. Los índices  $I_x$  y  $J_x$  corroboran la existencia de una distribución agregada del carbón de la espiga del maíz; es decir, la enfermedad se presentó en puntos geográficos específicos dentro de la localidad de Ixtapan del Oro durante el periodo analizado; dichos resultados concuerdan con lo establecido por Xu y Madden (2004) quienes indicaron que la técnica de SADIE es adecuada para determinar los patrones espaciales que presentan las enfermedades en plantas; si bien, el análisis SADIE es de reciente incursión en el área fitopatológica, su utilidad se ha demostrado en la determinación de los patrones espaciales de los patógenos *Verticillium dahliae* (Navas-Cortés *et al.*, 2008) y *Citrus leprosis virus* (CiLV) (Bassanezi y Laranjeira, 2007).

## Conclusiones

El índice de asociación del análisis SADIE ( $I_m$ ) y la prueba bivariable de Cramer-von Mises ( $\mathcal{P}$ ) permitieron determinar la asociación espacio temporal de *S. reilianum* en maíz durante tres ciclos de cultivo.

## Literatura citada

- Allen, T.W., H.W. Maples, F. Workneh, J.M. Stein, C.M. Rush, 2008. Distribution and recovery of *Tilletia indica* teliospores from regulated wheat fields in Texas. *Plant Disease* 92:344-350.
- Bassanezi, R.B., F.F. Laranjeira, 2007. Spatial patterns of leprosis and its mite vector in commercial citrus groves in Brazil. *Plant Pathology* 56:97-106
- Campbell, C., D. Benson, 1994. Importance of the spatial dimension for analyzing root disease epidemics. In: Campbell, C.L., D.M. Benson (eds.), *Epidemiology and management of root diseases*. First Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 195-243.
- Fleischer, J., E. Blom, R. Weisz, 1999. Sampling in precision IPM: when the objective is a map. *Phytopathology* 89:115-118.
- Franke, J., S. Gebhardt, G. Menz, H.P. Helfrich, 2009. Geostatistical analysis of the spatiotemporal dynamics of powdery mildew and leaf rust in wheat. *Phytopathology* 99:974-984.
- Hevesi, J., J. Istok, A. Flint, 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I. Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology* 31:661-676.
- Isaaks, E.H., R.M. Srivastava, 1989. *An Introduction to applied Geostatistics*.



- Oxford University Press. New York.
- Jaime-García, R., P.J. Cotty, 2003. Aflatoxin contamination of commercial cottonseed in south Texas. *Phytopathology* 93:1190-1200.
- Korie, S., J. Perry, M. Muggleston, S. Clark, C. F. Thomas, R. Mohamad, 2000. Spatiotemporal association in beetle and virus count data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 5:214-239.
- Lecoustre, R., D. Fargette, C. Fauquet, P. Reffye, 1989. Analysis and mapping of spatial spread of African cassava mosaic virus using geostatistics and the kriging technique. *Phytopathology* 79:913-920.
- Liebold, M., E. Rossi, P. Kemp, 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual Review Entomology* 38: 303-327.
- López-Granados, F., M. Jurado-Expósito, S. Atenciano, A. García-Ferrer, M. Sánchez, L. García-Torres, 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil* 246:97-105.
- Navas-Cortés, J.A., B.B. Landa, J. Mercado-Blanco, J.L. Trapero-Casas, D. Rodríguez-Jurado, R.M. Jiménez-Díaz, 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.
- Nava-Díaz, C., 2009. Definición de disposición espacial de patógenos vegetales. In: Bautista, N., L. Soto, R. Pérez (eds.), Tópicos selectos de estadística aplicados a la fitosanidad. Colegio de Postgraduados. Texcoco, pp. 110-114.
- Pataký, J.K., 1999. Smuts. In: White, D. G. (ed.), *Compendium of corn diseases*. Third edition. APS Press. St. Paul Minnesota. pp. 33-55.
- Pérez-Camarillo, J.P., M. Bobadilla-Meléndez, L.E. Zúñiga-Méndez, L. Núñez-Cien, 2008. El carbón de la espiga del maíz (*Sphacelotheca reilina*) y su impacto en la pérdida del ingreso neto en la producción de grano en el estado de Querétaro, México. Memorias. XXXV Congreso Nacional de Fitopatología. Sociedad Mexicana de Fitopatología, Monterrey
- Perry, J., 1998. Spatial Analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology*. 64:303-314.
- Perry, J., 1995. Measures of spatial pattern for counts. *Ecology* 79: 1008-1017.
- Perry, J., L. Winder, J.M. Holland, R.D. Alston, 1999. Red-blue plots for detecting clusters in count data. *Ecology Letters* 2:106-113.
- Ritchie, S. W., J.J. Hanway, 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa.
- Rodríguez, E., J.M. García-Garrido, P.A. García, M. Campos, 2009. Large-scale epidemiological study and spatial patterns of *r* wilt in olive orchards in southern Spain. *Crop Protection* 28:46-52.
- Rossi, R., J. Mulla, G. Journel, E. Franz, 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62:277-314.
- Samper, F.J., J. Carera, 1996. *Geostatística: Aplicaciones a la Hidrología subterránea*. 2ª Edición. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. Barcelona.
- Sánchez-Pale, J.R., J.F. Ramírez-Dávila, A. González-Huerta, C. De León, 2011. Modelization of the spatial distribution of corn head smut (*Sporisorium reilianum* Langdon and Fullerton) in Mexico. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9 (5): 882-893.
- Sciarretta, A., P. Trematerra, J. Baumgärtner, 2001. Geostatistical analysis of *Cydia funebrana* (Lepidoptera: Tortricidae) pheromone trap catches at two spatial scales. *American Entomologist* 47:174-184.
- Scott, J.B., F.S. Hay, C.R. Wilson, P.J. Cotterill, A.J. Fist, 2003. Spatiotemporal analysis of epiphytotics of downy mildew of oilseed poppy in Tasmania, Australia. *Phytopathology* 93:752-757.
- Stein, A., C.G. Kocks, J.C. Zadoks, H.D. Frinkin, M.A. Ruissen, D.E. Myers, 1994. A geostatistical analysis of the spatio-temporal development of downy mildew epidemics in cabbage. *Phytopathology* 84:1227-1239.
- Syrjala, E., 1996. A statistical test for a difference between the spatial distributions of two population. *Ecology* 77:75-80.
- Van de Lande H.L., J.C. Zadoks, 1999. Spatial patterns of spear rot in oil palm plantations in Surinam. *Plant Pathology* 48, 189-201.
- Wu, B.M., H.C. van Bruggen, K.V. Subbarao, G.G.H. Pennings, 2001. Spatial analysis of lettuce downy mildew using geostatistics and geographic information systems. *Phytopathology* 91:134-142.
- Xu, X. M., L. V. Madden, 2004. Use of SADIE statistics to study spatial dynamics of plant disease epidemics. *Plant Pathology* 53, 38-49.

