

## Simulación espacial de *Claviceps gigantea* (Fuentes, de la Isla, Ullstrup y Rodríguez) en el Estado de México

Ana Verónica Lara Díaz<sup>1</sup>  
José Francisco Ramírez Dávila<sup>1§</sup>  
Fátima Iraís Maldonado Zamora<sup>1</sup>  
Dulce Karen Figueroa Figueroa<sup>1</sup>  
Agustín David Acosta Guadarrama<sup>1</sup>  
Roberto Rivera Martínez<sup>1</sup>  
Xanat Antonio Némiga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrícolas y Geografía-Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. AP. 5020. (sakua\_02@hotmail.com; irita\_3@hotmail.com; davinn@hotmail.com; rob\_m@live.com.mx; xantonion@uaemex.mx).

<sup>§</sup>Autor para correspondencia: jframirez@uaemex.mx.

### Resumen

El cultivo de maíz en México es uno de los más importantes destacando los Valles Altos de México, en esta región la principal problemática del cultivo son las enfermedades, principalmente las que originan la pudrición de la mazorca lo que disminuye el rendimiento y representa grandes pérdidas económicas. Una de estas enfermedades es causada por el hongo *Claviceps gigantea* que comúnmente se conoce como diente de caballo. Esta enfermedad puede invadir toda la mazorca impidiendo la formación de grano; en los últimos años, las condiciones climáticas han favorecido la proliferación de este hongo en predios cultivados con maíz *Zea mays* L. El presente trabajo se llevó a cabo en parcelas de una hectárea de cinco municipios del Estado de México, con la incidencia natural del hongo durante tres ciclos de cultivo (2013-2015) usando técnicas geoestadísticas y realizando el proceso de simulación condicionada y no condicionada para predecir el comportamiento espacial de la enfermedad a través del tiempo. Los resultados muestran que las técnicas de simulación usadas para predecir el comportamiento de *Claviceps gigantea*, son una herramienta eficaz para prevenir las infestaciones producidas por este hongo este tipo de estudio pretende ayudar a la elaboración de programas de manejo integrado.

**Palabras clave:** diente de caballo, enfermedad fúngica, maíz, simulación.

Recibido: enero de 2018

Aceptado: febrero de 2018

## Introducción

El hongo *C. gigantea* ocasiona la enfermedad llamada diente de caballo que afecta el maíz en los Valles Altos de México y según lo reportado por Fucikovsky y Moreno (1971) puede reducir el rendimiento en 50%. White (1999) la dispersión se lleva a cabo a través del aire o posiblemente por algunos insectos que se pueden encontrar consumiendo la mielecilla que genera este hongo el mismo autor, en 2003 reportó que esta enfermedad no es diseminada por insectos.

El esclerocio que genera este hongo es alargado en forma de coma de hasta 8 cm. de largo y dos de diámetro, al inicio se puede encontrar una masa suave color blanca que conforme pasa el tiempo se endurece y cambia a un color púrpura de este esclerocio emergen varios estromas de hasta 5.8 cm de largo, capitados, globosos en donde se encuentran peritecios inmersos. De estos peritecios emergen ascosporas filiformes, hialinas y aceptadas (Fuentes, 1964). Los esclerocios pueden mantenerse por más de un ciclo de cultivo en el suelo conservando su viabilidad.

Fucikovsky y Moreno (1971), indican que el desarrollo del hongo se ve favorecido por temperaturas de 13-15 °C y una precipitación alta (1 000 mm por año), condiciones que coinciden con las temperaturas medias anuales del Estado de México (INEGI, 2015). Esta enfermedad ha sido reportada en diversos municipios del Estado de México, como son Calimaya, Villa Victoria, Metepec, Almoloya de Juárez entre otros dichos municipios no se aplica ningún control para evitar la diseminación de la enfermedad (CIMMYT, 2015).

Por ello, autores como Campbell y Benson (1994) señalan que un correcto control va ligado al conocimiento de la distribución espacial de las enfermedades. Oliver y Webster (1991) e Isaaks y Srivastava (1988), mencionan que la geoestadística permite caracterizar la distribución espacial de un microorganismo en un espectro de escalas y direcciones múltiples; además, según Sciarretta *et al.* (2001); Bloom y Fleischer (2001); Speight *et al.* (1998), afirman que los métodos geoestadísticos proporcionan una medida más directa de la dependencia espacial, ya que tienen en cuenta la naturaleza bidimensional de la distribución de los organismos y permiten elaborar mapas de gran utilidad formando gradientes de la intensidad de la enfermedad y es posible establecer mapas de distribución y su porcentaje de infección, lo que permite generar ahorros económicos y disminución de riesgos ambientales al direccionar las alternativas de control hacia las zonas específicas donde se presenta la enfermedad.

Los trabajos realizados respecto a la simulación son pocos, Lantuéjoul (1997) señala que los métodos de simulación, han jugado un papel relevante en la aplicación de la geoestadística. Es una herramienta introducida por Matheron, quien desde 1970 introdujo en sus cursos en la escuela de matemáticas Fontainebleau estas teorías sobre la simulación, mismas que fueron desarrolladas en diversos estudios por Journel, quien en 1974 publicó un estudio sobre la simulación condicionada de depósitos minerales usando el método de las bandas rodantes en tercera dimensión, en este estudio se pueden encontrar las bases de la simulación condicionada aplicada a la metalurgia.

Otro ejemplo de la aplicación de métodos de simulación no condicionada, es el trabajo sobre la modelación de reservorios hidrogeológicos realizada en 1995 y 1993 aplicando el método de bandas rodantes en el primer caso y el método de simulación estocástica multidimensional

gaussiano en 1993. En todos los trabajos anteriores, los modelos de simulación han demostrado ser eficientes para predecir la presencia o ausencia de ciertos fenómenos, y que pueden ser aplicables en la agricultura de precisión.

*C. gigantea* es considerada de baja importancia económica para las instituciones gubernamentales, pero a decir de los productores la enfermedad representa graves pérdidas de hasta 90%, debido a que se reduce significativamente la producción de grano opini3n que concuerda con la de Warham *et al.* (1999) quien menciona las pérdidas económicas en el cultivo de maíz ocasionadas por este hongo *C. gigantea* son muy severas, así como la disminución total de la calidad del grano. *C. gigantea* reemplaza los granos sanos por esclerocios que afectan el rendimiento del grano.

De esta enfermedad se conoce poco por lo que existe una gran falta de información sobre el comportamiento de la enfermedad, y su distribución espacial, por ello es importante la generación de referencias que permitan explicar el comportamiento del hongo dentro de las parcelas donde se presenta, ya que con estas herramientas es posible dirigir certeramente las medidas de control en el cultivo de maíz. Adicionalmente, encontramos técnicas geoestadísticas que pueden adecuarse en la agricultura para la prevención y control de esta enfermedad; es así como la simulación espacial es un proceso que se lleva a cabo mediante el uso de dos técnicas: 1) geoestadística clásica; y 2) simulación condicionada. La primera utiliza el krigeado puntual y por bloques, teniendo como principal ventaja, el uso de la información contenida en el semivariograma, los mapas de los valores estimados son óptimos, en el sentido de que se obtiene la mejor estimación lineal posible.

Por otro lado, la simulación condicionada es una técnica de generación de campos aleatorios que reproduce localmente la información disponible, al tiempo que globalmente da cuenta de la variabilidad observada. Este tipo de interpolación toma también como base el semivariograma, pero, al contrario de lo que ocurre con el krigeado, no lleva a cabo una estimación, sino que efectúa una simulación.

El presente trabajo tuvo por objetivo hacer uso de técnicas geoestadísticas como una herramienta para obtener los valores representativos de la incidencia de *C. gigantea* del maíz en Valles Altos de México, y hacer simulaciones del comportamiento de esta enfermedad en las parcelas de estudio. Para el estudio se realizaron muestreos anuales en cosechas de los ciclos (2013 -2015), con los datos obtenidos se evaluó el comportamiento de la enfermedad observando si su proceder estaba determinado por la propia enfermedad o agentes externos; se hicieron evaluaciones anuales para conocer la actuación de la enfermedad era progresiva en cada localidad estudiada.

## **Materiales y métodos**

Para el desarrollo de este trabajo se hizo una recolección de base de datos obtenidos de muestreos en campo en parcelas de maíz *Zea mays* L, que presentaron daños por la enfermedad. En los ciclos de cultivo (2013-2015) en cinco parcelas de municipios del Estado de México (Almoloya de Juárez Calimaya, Metepec, Ocoyoacac y Villa Victoria) en el mes de noviembre, los muestreos se realizaron cuando los sembradíos estaban a punto de cosecha. El área objeto de estudio consto de parcelas de una hectárea cada una, usando el método por transectos, cuadrantes

de 10x10 m<sup>2</sup>, dentro de cada cuadrante se seleccionaron 10 plantas al azar para conocer la presencia o ausencia de la enfermedad, así como el grado de severidad, en cada intersección se definió su georeferencia, para ello se utilizó un navegador modelo e Trex Vista HCx2007.

Análisis geoestadístico. El procedimiento realizado con los datos de muestreo y su ubicación geográfica consistió en: 1) estimación del semivariograma experimental; 2) estimación de los parámetros del modelo del semivariograma; y 3) estimación de la superficie (mapas) utilizando puntos (estimados) a partir del krigado. El semivariograma experimental se estimó con datos recolectados de la incidencia de la enfermedad en los cinco municipios muestreados. Dicho semivariograma fue ajustado a un modelo teórico (esférico, gaussiano o exponencial) a través del programa Model de Variowin 2.1. (Software for spatial data analysis in 2D. Spring Verlag, New York, USA).

La estimación de los parámetros del modelo de semivariograma se realizó al estimar los semivariogramas experimentales, correspondientes a cada muestreo de la población de *C. gigantea* ajustándose a algún semivariograma teórico. Con este procedimiento no paramétrico, se elimina un valor de muestreo y se emplea el método de interpolación geoestadístico denominado krigado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto de muestreo, a partir de los restantes valores muestrales. Este proceso se efectúa sucesivamente en todos los puntos de muestreo (Isaaks y Srivastava, 1989).

Para conocer el grado de relación entre los datos correspondientes se estableció el nivel de dependencia espacial, el cual se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje su resultado. Si el resultado es menor de 25%, el nivel de dependencia espacial es alta; si se encuentra entre 26 y 75% el nivel de dependencia espacial es moderado, y si es mayor del 76% el nivel de dependencia es bajo (Cambardella *et al.*, 1994). Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes fueron validados se utilizó el método geoestadístico denominado krigado ordinario para obtener las estimaciones correspondientes, basado en lo establecido por Samper y Carrera (1996) para la elaboración de los mapas y obtener la estimación de la densidad de *C. gigantea* en puntos donde no se contabilizó la presencia del hongo. Finalmente se estableció la superficie infestada de los mapas elaborados, utilizando el programa Surfer 9.0. (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14<sup>th</sup> Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA).

Simulación geoestadística. Los métodos de simulación geoestadística estocástica intentan reproducir versiones de la realidad conservando sus estadísticos básicos y su variabilidad espacial conocida a partir de la información disponible (puntos medidos). Esta aproximación no es cumplida por los métodos de estimación en los que su objetivo es la inferencia espacial de las características medidas de la variable. El valor estimado es el valor más probable de la propiedad a estudiar y se produce coincidencia entre el modelo y la realidad en los puntos medidos, pero no coincidencia de sus estadísticos (histograma) ni de su variabilidad espacial (variograma) como consecuencia del efecto de suavizado que se introduce en el propio proceso de estimación. (Delgado, 2007).

La elección del método de simulación debe realizarse según lo planteado por Deutsch (1994) quien toma en cuenta el tiempo de cálculo, la información disponible para el proceso de condicionamiento, la precisión y exactitud requerida a la predicción probabilística que se desea

plantear. Así la simulación constituye técnicas para imitar el funcionamiento de sistemas o procesos reales mediante programas de ordenador. Para estudiar el sistema suele ser necesario hacer algunas suposiciones sobre su forma de operar; estas hipótesis constituyen un modelo que no es más que una representación simplificada de un sistema que se construye para estudiar su comportamiento.

Con la información base (datos georreferenciados, semivariogramas y mapas) se procedió a hacer los mapas de simulación, se usó la base de datos del año 2014 como año cero, para proceder al simulado del año 2015 y su comprobación de las corridas en campo, esto a través del programa GS+ Geostatistics Software, procedimiento: 1) un análisis de auto correlación conocido como: análisis de variografía lo que da como resultado una auto-similitud espacial esto representado como un variograma; 2) ajuste del variograma, encontrando la curva que describe mejor el comportamiento del objeto de estudio y el cual nos ayuda a predecir las ubicaciones sin muestreo a través de kriging o simulación condicional, con ello se obtuvo estimaciones imparciales y no sesgadas de la propiedad a través del área muestreada; y 3) uso de datos temporales (temperatura, humedad, precipitación, severidad en mazorca) para ayudar al programa a realizar las interpolaciones a través del tiempo, de una manera óptima y obtener mapas de simulación.

## Resultados y discusión

El uso de técnicas geoestadísticas permitió modelizar e ilustrar mediante mapas obtenidos por el método del krigeado el comportamiento de *C. gigantea* durante los tres ciclos de cultivo que se detallan, además los métodos de simulación condicionada a factores como temperatura y humedad, así como la simulación no condicionada permitieron predecir asertivamente el comportamiento de la enfermedad.

Durante la realización de los muestreos se pudo observar que las parcelas con mayor incidencia de *C. gigantea* fueron las ubicadas en municipios como Calimaya, Almoloya de Juárez y Villa Victoria las cuales presentaron una infestación de hasta 93%. En todas las parcelas estudiadas, las mayores densidades de *C. gigantea* del hongo se presentan en los bordes de las parcelas, ya que las zonas arboladas que delimitan los predios favorecen la presencia del hongo por acumulación humedad información que se corrobora con estudios realizados por (Moreno *et al.*, 2016). Donde usaron un tratamiento en frío (4 °C) durante 3 meses, la humedad del carbón residual y el cambio de temperatura a 22 - 24 °C por 2 meses simulan las condiciones naturales del campo donde se encuentran los esclerocios, facilitando su germinación (Figura 1-10). Una situación similar reportó Ferguson y colaboradores en 2000, en su trabajo acerca de las distribuciones de larvas y adultos de *Ceutorhynchus assimilis* encontraron una distribución de tipo agregada y estos centros de agregación se ubicaron de los bordes hacia el centro de la parcela y nunca llegaron a infestar 100% las parcelas estudiadas.

Los modelos a los que se ajustó la presencia de *C. gigantea* en las parcelas durante los tres años de muestreos se apegaron en su mayoría a modelos gaussiano, esto señala que la enfermedad se da de manera constante dentro de las parcelas de maíz y año con año se puede apreciar el avance de la enfermedad en parcelas colindantes de maíz, con estas representaciones a través de los mapas y en base a las observaciones se infiere, que los factores medioambientales (humedad y temperatura) favorecen la proliferación de *C. gigantea*, los modelos esféricos nos muestran a

través de mapas áreas más focalizadas donde los centros de agregación son aleatorios pero con gran manifestación de diente de caballo, esto puede deberse a las zonas de mayor acumulación de esclerocios o bien a que las condiciones de temperatura son las adecuadas para una mayor proliferación de la enfermedad.

La alta dependencia espacial permite suponer que las poblaciones de gusano soldado dependen entre sí y su nivel de agregación es alto Rossi *et al.* (1992) lo que implica que existe una distribución estable dentro de la parcela tal como lo señalan los trabajos realizados por Jiménez y colaboradores en 2013 quien determinó que los huevecillos de trips que afectan el tomate de cascara presentan una infección de forma continua dentro de la parcela, infiriendo la existencia de diversos factores que intervienen en la diseminación de las hembras para ovipositar, en este trabajo, se pudo observar que las poblaciones de huevos de trips se distribuyen de forma agregada dentro de la parcela.

El valor de la pepita en todos los casos fue cero, lo que logro determinar una estructura espacial de tipo agregado y en conjunto con los bajos valores obtenidos de la varianza de los datos, refleja que la escala de muestreo elegida para la realización del trabajo fue la adecuada, lo cual se corrobora con estudios realizados por Ramírez y González (2006); Ramírez y Porcayo (2010); Sánchez (2011); Solares *et al.* (2011); Rossi *et al.* (1992); en todos los casos, se observaron valores de la pepita menores. El nivel de dependencia espacial fue determinado según lo establecido por Cambardella *et al.* (1994), en todos los casos, el resultado es cero, lo cual indica una dependencia alta al igual que Ramírez y Porcayo (2010) en el trabajo realizado en muérdago enano en la zona ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca. En la realización del ajuste estadístico no se reportaron dificultades como las reportadas por Gutiérrez (1970) en su análisis sobre el efecto del parasitismo de muérdago enano sobre el desarrollo de dos especies de pino en el cerro de Telarón en el Estado de México.

Según los datos mostrados en el Cuadro 1, las poblaciones de diente de caballo se agrupan en más de un centro de agregación dentro de cada una de las parcelas en las diferentes fechas de muestreo, situación que es confirmada en las Figuras 1, 2, 3, 4 y 5, donde se pueden observar claramente los diversos centros de agregación de *C. gigantea*, de igual manera podemos ver que la enfermedad se incrementa o disminuye en cada año, esto debido a que en parcelas como la de Calimaya, Villa Victoria los materiales utilizados en la siembra son los mismos cada año lo que aumenta la susceptibilidad de la enfermedad aunado a ello la cosecha mecanizada hace que la enfermedad proliferen al dejar más esclerocios en las parcelas, a diferencia de lo que ocurre en las parcelas de Metepec y Ocoyoacac donde las parcelas aún son cosechadas de forma manual y se siembran materiales criollos que han mostrado mayor resistencia a la enfermedad, para el caso de Almoloya de Juárez a pesar de que aun la cosecha no es mecanizada, factores como el uso de híbridos susceptibles anualmente hace que proliferen más la enfermedad.

El valor de la meseta para el caso de todos los muestreos se encontró dentro de un rango que osciló entre 0.02 y 1.08. En el caso del rango, es la distancia entre la que hay dependencia espacial entre los puntos muestreados, osciló entre 1.83 m (Mina México) y 25 m (Metepec) lo que permite explicar los tipos de agregación de *C. gigantea*, en las diferentes zonas de estudio, los estadísticos de validación cruzada permitieron validar los modelos de los semivariogramas, estos análisis arrojaron un nivel de dependencia espacial alta para las cinco parcelas de estudio.

El valor de cero en el efecto pepita se ve permanente en las cinco parcelas, esto es un indicativo de que el error de muestreo fue mínimo y que la escala de muestreo para cada zona de estudio fue el correcto. Rong *et al.* (2006) (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Modelos a los que se ajustaron los semivariogramas por municipio y año de muestreo *Claviceps gigantea* y estimación de la superficie infestada en cinco municipios del Estado de México.**

Municipio	Año	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pepita/ meseta	Dependencia espacial	Media Muestral	Incidencia <i>C. gigantea</i> (%)
Almoloya de Juárez	2013	Gaussiano	0	0.77	1.83	0	Alta	0.225	42
	2014	Gaussiano	0	0.65	18.2	0	Alta	2.01	89
	2015	Esférico	0	0.72	19.78	0	Alta	0.984	65
Calimaya	2013	Esférico	0	1.08	14.64	0	Alta	1.92	81
	2014	Gaussiano	0	0.79	15.96	0	Alta	2.09	91
	2015	Esférico	0	0.828	19.53	0	Alta	1.13	93
Metepéc	2013	Gaussiano	0	0.33	11.56	0	Alta	0.38	32
	2014	Gaussiano	0	0.05	9.35	0	Alta	0.06	26
	2015	Gaussiano	0	0.062	25	0	Alta	0.092	23
Ocoyoacac	2013	Gaussiano	0	0.39	11.76	0	Alta	0.383	36
	2014	Gaussiano	0	0.02	14.4	0	Alta	0.05	38
	2015	Gaussiano	0	0.756	11.9	0	Alta	0.08	31
Villa Victoria	2013	Esférico	0	0.12	12.84	0	Alta	0.125	62
	2014	Gaussiano	0	0.70	11.53	0	Alta	0.5	62
	2015	Gaussiano	0	0.828	11.2	0	Alta	0.814	41

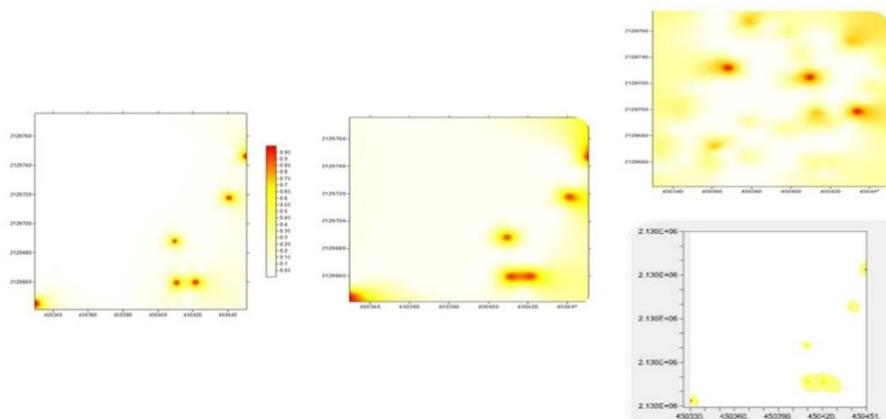
Para corroborar la gravedad de la infección que realizó esta enfermedad dentro de las parcelas, se llevó a cabo el cálculo de la superficie infestada en base a los mapas de densidad obtenidos de los muestreos realizados durante los tres ciclos de cultivo, la mayor infección se observó en el municipio de Calimaya, ya que en al menos 93% de la superficie evaluada, se encuentran esclerocios generando infección, y la severidad de la infección ha llegado a afectar el umbral económico de la producción.

Otra de las parcelas con mayor severidad se encuentra en el municipio de Almoloya de Juárez, específicamente en la zona conocida como Mina México, en esta parcela se ha determinado una superficie infestada de hasta 89% para el segundo año de muestreo y como se muestra en el Cuadro 1, la menor afectación fue 42% en esta localidad, esto en el ciclo 2013, debido a las condiciones medioambientales presentadas durante ese ciclo de cultivo. Situación similar a lo sucedido con la superficie infestada en el municipio de Villa Victoria, que disminuyó 62% en el año 2013 a 41% en 2015. Para el caso del municipio de Metepéc, el porcentaje de infección se vio reducido durante los muestreos. En el municipio de Ocoyoacac, durante los tres muestreos, el área infestada varió entre 31% y 38% pero la incidencia máxima era una mazorca infestada con esclerocios y aunque se encontraba en más de 30% de la parcela, su severidad era mínima comparada con la severidad de la parcela ubicada en Calimaya.

Durante los tres muestreos, se pudo observar en todos los municipios, que la infección sigue el mismo patrón de desarrollo, y de acuerdo a las observaciones que se hicieron en campo desde la siembra hasta la cosecha siendo en esta época de muestreo, se puede decir, que la infestación se realiza durante la primavera esto debido a que el esclerocio pasa en el suelo aproximadamente un periodo de 6 meses bajo condiciones de bajas temperaturas y en primavera tiene las condiciones ideales de alta temperatura y humedad para la proliferación de la enfermedad.

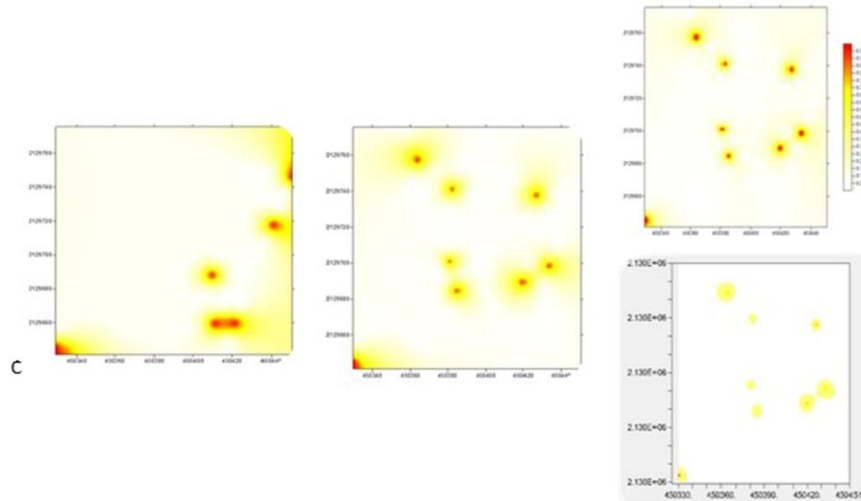
En todas las parcelas de estudio se observa que el desarrollo de la enfermedad se da dentro de la mazorca infectando los óvulos sin fecundar y segrega un tipo de “mielecilla” que probablemente sea una fuente de inóculo para otras plantas esto a través de insectos, debido a que aún no se tiene el conocimiento necesario del ciclo biológico de la enfermedad se vuelve más complejo el poder determinar con exactitud los factores bióticos y abióticos están involucrados, a continuación se presentan las proyecciones obtenidas para los años 2014-2015, las que están centradas en valores obtenidos de variables climáticas que pueden estar interviniendo en la enfermedad.

Municipio de Ocoyoacac se observó que la incidencia estaba en la parte derecha del mapa para los dos primeros años de muestreo, mientras que para el año 2015 se registró una incidencia distribuida al centro de la parcela (Figura 1). 2014-2015, los centros de agregación se encontraron en la parte inferior derecha del mapa en mayor medida. La simulación 2013, la simulación condicionada fue la más cercana a la realidad (Figura 2), ya que los centros de agregación se ubicaron distribuidos en la parte central de la parcela, situación que fue reflejada en el mapa de distribución logrado mediante el proceso de simulación donde se utilizaron condiciones de temperatura y humedad para realizar la simulación condicionada. Los focos de agregación que se observan en los años posteriores van de moderada a fuerte esto debido a que debido al cambio de maíz criollo blanco a maíz criollo amarillo una selección que hace el propio productor en el año 2015.



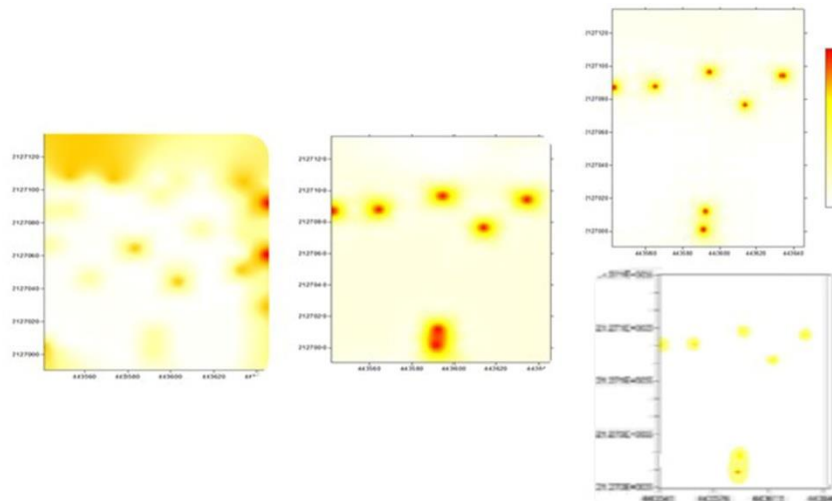
**Figura 1. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Ocoyoacac obtenidos ciclo 2013-2014. Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2014 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.**





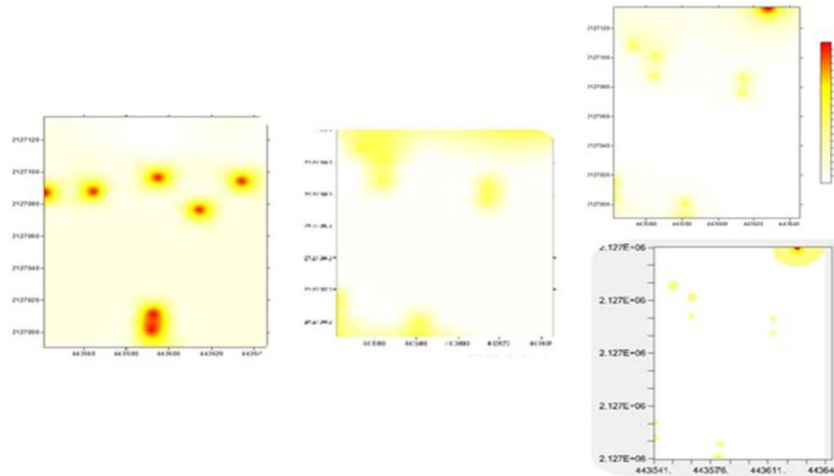
**Figura 2. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Ocoyoacac obtenidos ciclo 2014-2015.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

Durante el primer muestro, en el municipio de Metepec la agregación se ubicó principalmente en la orilla de la parcela muestreada, mientras que en el segundo muestreo los centros de agregación se ubicaron en una franja situada en la parte superior e inferior de la parcela, siendo la simulación condicionada a factores ambientales la que más se ajustó a lo encontrado en la realidad (Figura 3).



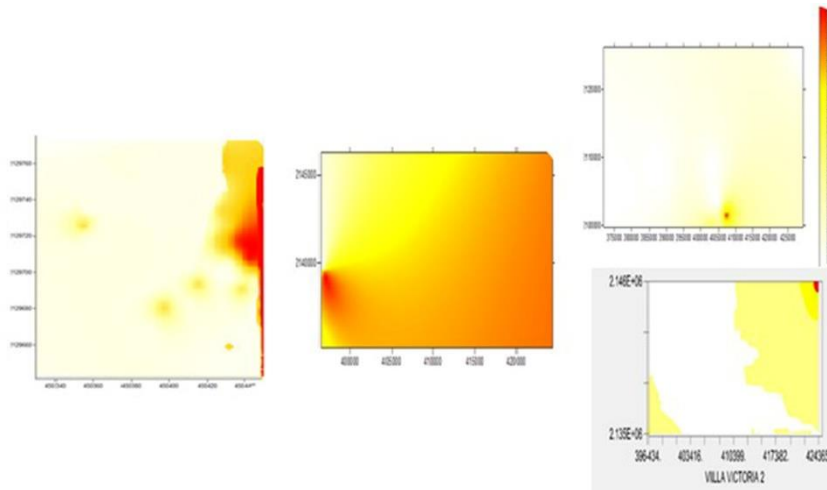
**Figura 3. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Metepec obtenidos ciclo 2013-2014.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2014 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

Durante el muestreo realizado en 2013, se encontraron en la parte superior e inferior nuevamente, aunque redujo su incidencia, situación que fue corroborada por la simulación condicionada nuevamente, ya que los centros de agregación y la severidad de la presencia del hongo se apegó en 90% a lo encontrado durante el muestreo, esta situación puede observarse en la (Figura 4).



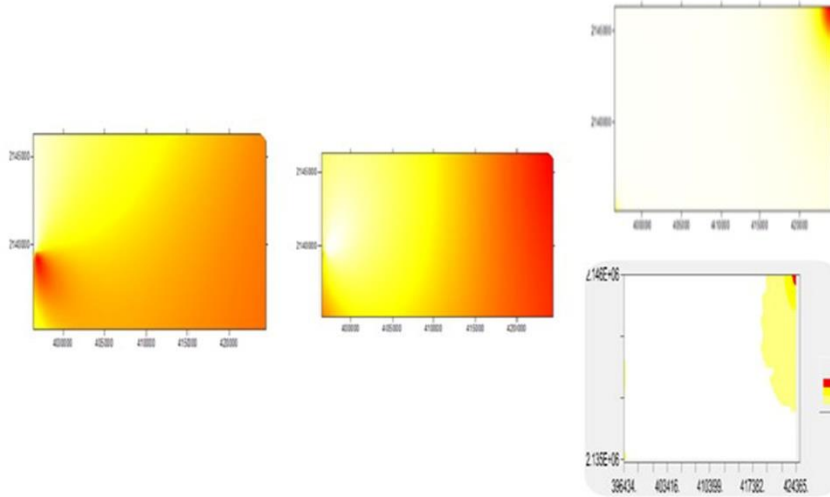
**Figura 4. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Metepec obtenidos ciclo 2014-2015.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

En la Figura 5 podemos observar que, para el caso de Villa Victoria, los principales centros de agregación se ubicaron en la parte derecha del mapa para el año 2013. Una vez realizada la simulación se observó que la simulación no condicionada es la que más se apega al mapa real tomado en 2014, solo que en la realidad, la severidad fue mayor que al resultado de la simulación. Para el año 2015, la simulación que más se apegó fue nuevamente la simulación no condicionada, aunque la severidad en la realidad fue mayor.



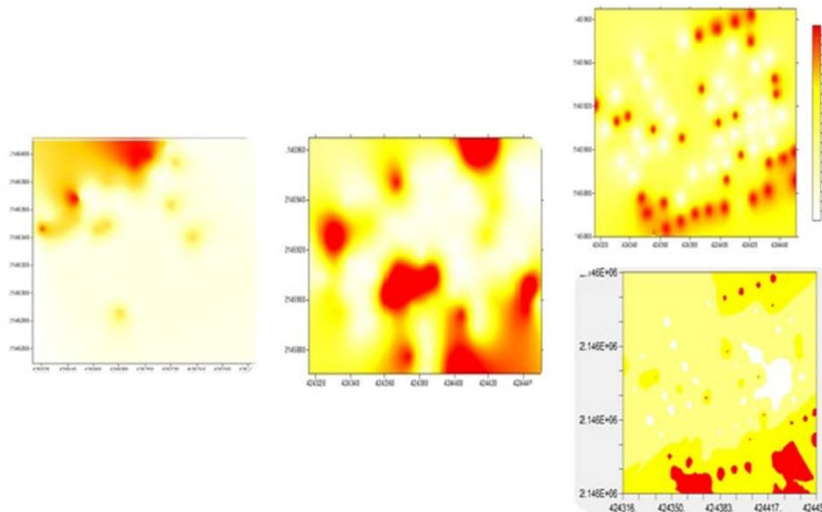
**Figura 5. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Villa Victoria obtenidos ciclo 2013-2014.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2014 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

En esta localidad el foco de infestación está muy bien identificado, en los años 2013 y 2014 la severidad es mayor esto debido probablemente a las bajas temperaturas registrada en esta zona lo que afecto la incidencia estas observaciones son similares a las reportadas por Gupta *et al.* (1983) en un estudio sobre (*Claviceps microcephala*), donde menciona que temperaturas bajas provocan mayor incidencia del cornezuelo (Figura 6).

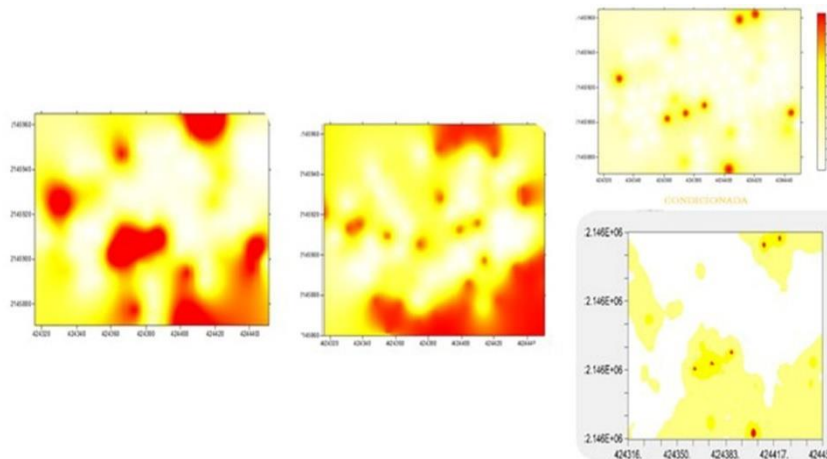


**Figura 6. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Villa Victoria obtenidos ciclo 2014-2015.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

En el municipio de Almoloya de Juárez, para el año 2013, se encontraron centros de agregación en la parte superior izquierda del mapa, lo que corresponde a la zona noreste de la parcela y durante el 2014 las orillas de las parcelas fueron las más afectadas por la enfermedad, así como la parte central de la parcela que cuenta con un leve hundimiento. Para este año, la simulación que más se asemeja a la realidad fue la simulación no condicionada (Figura 7). En el caso del 2015, en la (Figura 8) podemos observar que la simulación más precisa fue la simulación no condicionada, ya que los centros de agregación principalmente se ubican en la parte inferior y superior del mapa al igual que la realidad observada durante el muestreo, situación que resulto más grave en la realidad, con una severidad mayor hasta 40%.



**Figura 7. Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Almoloya de Juárez obtenidos ciclo 2013-2014.** Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2014 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

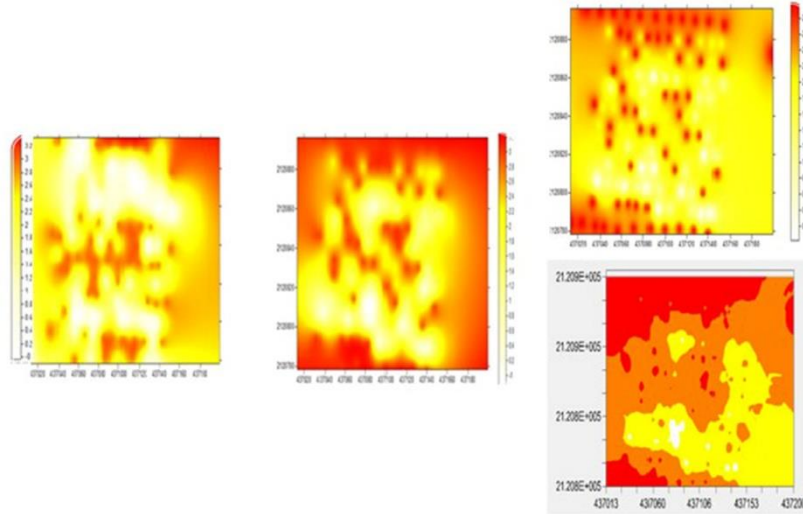


**Figura 8.** Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Almoloya de Juárez obtenidos ciclo 2014-2015. Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

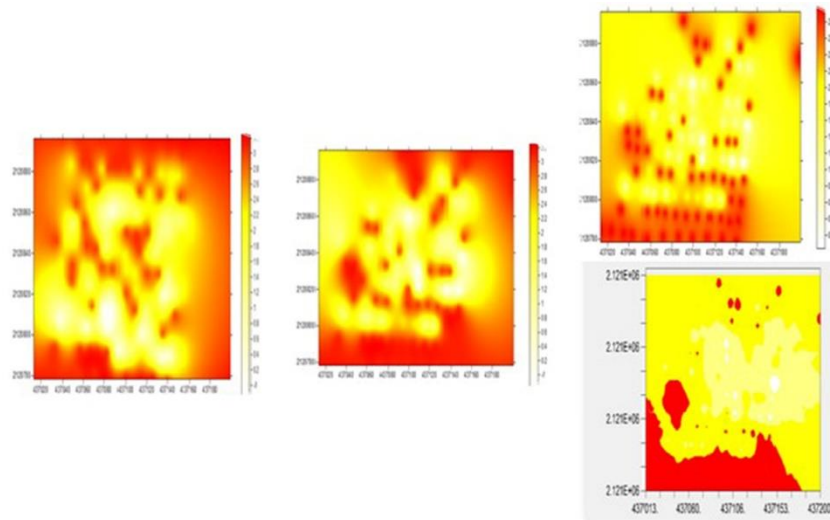
Los mapas obtenidos de simulaciones revelaron que habrá una reducción del área favorable para la enfermedad en la zona de estudio, debido a una reducción en la humedad relativa a niveles por debajo de 30% en el futuro se prevé que esta reducción será gradual en 2016, 2017. En estas parcelas se sembraban híbridos Quetzal (De Kalb) en años anteriores que han sido muy susceptibles a *C. gigantea*, pero se ha visto que cuando cambio a (Aspros HC8) la susceptibilidad bajo hasta un 42% en el año 2014 no así en los siguientes años de estudio donde el clima jugo un papel importante; esto concuerda con estudios realizados por (Pecina, 2007) quien observo híbridos y líneas experimentales fueron susceptibles al cornezuelo, el genotipo NC+8R18 presentó menor incidencia (5.1%) debido a que su polinización fue más rápida y efectiva (95% de grano) lo que permitió escapar de la infección.

En el municipio de Calimaya, durante 2013 se pudo observar la mayor severidad e incidencia, ya que en este municipio se mostraron las mayores superficies infestadas durante los tres muestreos con una superficie superior a 85% infestado por *C. gigantea*. En el mapa encontrado en la (Figura 9) se puede observar que la incidencia se ubica distribuida a lo largo de la parcela y se agrava en las orillas del predio para 2013. Situación similar se reflejó en las simulaciones obtenidas para el periodo 2014, donde la simulación condicionada es la que se apega más a lo observado para el periodo.

Durante los muestreos realizados en 2015, la distribución se volvió a colocar en las orillas y distribuidas al centro de la parcela aleatoriamente y la precisión de la simulación condicionada fue mucho mayor a la simulación no condicionada hay estudios como los de Ghini *et al.* (2011c) donde simularon escenarios futuros para las epidemias de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en Brasil mediante el uso de un modelo que estima el periodo de incubación de agentes patógenos donde de igual manera que este estudio se observa que uno de los factores determinantes de la detonación o reducción de agentes patógenos es los efectos climáticos (Figura 10).



**Figura 9.** Mapa de densidad de *C. gigantea* del maíz en el municipio de Calimaya obtenidos ciclo 2013-2014. Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.



**Figura 10.** Mapa de densidad de *Claviceps gigantea* del maíz en el municipio de Calimaya obtenidos ciclo 2014-2015. Izquierda, mapas obtenidos mediante simulación para 2015 bajo simulación condicionada superior derecha y no condicionada parte inferior derecha.

## Conclusiones

Los mapas obtenidos por medio de krigeado común e interpolación (simulación), representan una forma visual de cómo se disemina la enfermedad en las cinco parcelas de estudio, las simulaciones nos ayudaron a identificar posibles zonas de infestación siendo la principal estrategia de manejo. Se realizaron estudios sobre la naturaleza de la dispersión e interpolación del patógeno a partir de focos de infestación en campo, lo que permitirá un adecuado manejo para la enfermedad. Se ha identificado que la enfermedad en las plantas de maíz depende en gran parte

del material que se utilice al momento de la siembra siendo los maíces híbridos son los más susceptibles al daño por *Claviceps gigantea*, así como los factores bióticos que determinan las condiciones para la proliferación de la enfermedad. Se recomienda continuar con estudios que aporten información epidemiológica, esto con el fin de llevar a buen término las herramientas geoestadísticas que nos permitan en tiempo real hacer un análisis espacial y temporal de la enfermedad para poder brindar opciones de control y manejo adecuadas.

### Literatura citada

- Blom, E. and Fleischer, S. 2001. Dynamics in the spatial structure of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environ. Entomol.* 30(2):350-364.
- Cambardella, C.; Moorman, T.; Novak, J.; Parkin, T.; Karlen, D.; Turcoy, R. and Konopka, A. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(5):1501-1511.
- Campbell, C. L. and Benson, D. M. 1994. Spatial aspect of the development of root disease epidemics. In: Campbell, C. L. and Benson, D. M. (Eds.). *Epidemiology and management of root diseases*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. 21(3):344-356.
- Delgado, G. J. 2007. Aplicación del método de simulación secuencial directa para la evaluación de la incertidumbre local en modelos digitales de elevaciones. *Revista internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. GeoFocus.* 7:23-37
- Deutsch, C. V. 1994. Constrained modeling of histograms and cross plots with simulated annealing". Report 7, Stanford Center for Reservoir Forecasting, Stanford, California, USA.
- Ferguson, W.; Klukowski, Z.; Walczak, B.; Perry, J.; Muggleston, M.; Clark, S. and Williams, I. 2000. The spatio-temporal distribution of adult *Ceutorhynchus assimilis* in a crop of winter oilseed rape in relation to the distribution of their larvae and that of the parasitoid *Trichomalus perfectus*. *Entomol. Exp. Appl.* 95:161-171.
- Fuentes, S. F.; De la Isla, M. de L.; Ullstrup, A. J. and Rodríguez, A.E. 1964 *Claviceps gigantea*, a new pathogen of maize in México. *Phytopathology.* 54:379-381.
- Fucikovsky, L. and Moreno, M. 1971. Distribution of *Claviceps gigantea* and its percent attack on two lines of corn in the State of México, México. *Plant Dis. Repr.* 55:231-233.
- Gutiérrez, R. 1970. Efectos del parasitismo del muérdago enano (*Arceothobium* sp.) sobre el desarrollo en grosor del fuste de *Pinus moctezumae* Lamb. y *Pinus hartwegii* Lind. en el cerro de Telarón, Estado de México. INIF- SARH. Boletín técnico núm. 34. 22 p.
- Gupta, G. K.; Subbarao, K. V. and Saxena, M. B. L. 1983. Relationship between meteorological fact and the occurrence of ergot disease (*Claviceps microcephala*) of pearl millet. *Tropical Pest Management* 29:321-324.
- Ghini, R.; Hamada, E.; Pedro, J. M. J. and Gonçalves, R. R. V. 2011c. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica.* 38:85-93.
- INEGI. 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/>.
- Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. 1989. *Applied geostatistics*, New York, Oxford University Press.

- Jiménez, C. R. A.; Ramírez, D. J. F.; Sánchez, P. J. R.; Salgado, S. M. L. y Laguna, A. 2013. Modelización espacial de *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) en tomate de cáscara por medio de técnicas geoestadísticas. Rev. Colomb. Entomol. 39(2):183-192.
- Journel, A. G. 1974. Simulation conditionnelle de gisements miniers Theorie et Pratique: Paris, École des Mines de Paris, Thèse Docteur- Ingénieur. 110 p.
- Lantuéjoul, Ch. 1997. Interactive algorithms for conditional simulations. In: Baah, E. Y.; Ernest, Y.; Schohald, N. A. (Eds.). Geostatistics Wollongong '96: Dordrecht, Kluwer. 1:27-40.
- Matheron, G. 1970. La théorie des variables régionalisées, et ses applications: les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. 5-112 p
- Oliver, M. and Webster, R. 1991. How geostatistics can help you. Soil use and management. 206-217 p.
- Pecina, Q. V. 2007. Diversidad genética de aislamientos de cornezuelo (*Claviceps africana* Frederickson, Mantle y de Milliano) de Sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] en México. Rev. Mex. Fitopatol. 25(1):43-47.
- Ramírez, D. J. F y González, A. J. L. 2006. Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. Rev. Geogr. Agríc. 38:19-32.
- Ramírez, D. J. F. y Porcayo, E. 2010. Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. Utilizando el método de SADIE. Madera y Bosques 34: 93-111.
- Rong, J.; Dian, M. L.; Bao, Y. X.; Zhe, L. and Dong, L. M. 2006. Spatial distribution of oriental migratory locust (Orthoptera: Acrididae) egg pod populations: implications for site-specific pest management. Environ. Entomol. 35:1244-1248.
- Rossi R.; Mulla, J.; Journel, G. and Franz, H. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. Ecological Monographs. 62(2):277-314.
- Sánchez, P. J. R. 2011. Spatial distribution of head smut (*Sporisorium reilianum*) of corn in Mexico. Ciencia e Investigación Agraria. 38(2):253-263.
- Samper, F. J. y Carrera, J. 1996. Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea. 2ª (Ed.). Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. In: Isaaks, E. H. R. M. Barcelona, España. 484 p.
- Sciarretta, A.; Trematerra, P. and Baumgartner, F. 2001. Geostatistical análisis of *Cydia funebrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Pheromonetrappatches at twospatialscales. Am. Entomol. 47(3):174-184.
- Solares, V.; Ramírez, J. F.; Sánchez, R. 2011. Distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en el cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle. 12(2):1-12.
- Speight, M.; Hails, R.; Gilbert, M. and Foggo, A. 1998. Horse chestnut scale (*Pulvinaria regalis*) (Homoptera: Coccidae) and urban host tre invironment. Ecology. 79(5):1503-1513.
- Warham, E. J.; Butler, L. D. and Sutton, B. C. 1999. Seed testing of maize and wheat: a Laboratory Guide. CIMMYT. México. 84 p.
- White, D. G. 1999. Ergot. In: White D. G. Compendium of corn diseases. Third Edition (ed. by White DG) APS Press. St. Paul Minnesota, EUA. 78 p.