



ECOLOGÍA DE PRECISIÓN: UNA DESCRIPCIÓN BREVE DE SU APLICACIÓN PRÁCTICA

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN GENERAL

Daniel A. Emmen

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Edificio de Laboratorios Científicos, Laboratorio de Ensayos Biológicos Contra Plagas Agrícolas (Lab. 116) y Departamento de Zoología.

Email: demmen@cwpanama.net

RESUMEN

Se describen los Sistemas de Información Geográfica (GIS), de Posicionamiento Global (GPS) y la adaptación de los principios de la Geoestadística. Estas son tecnologías usadas en la Ecología de Precisión para el análisis de la densidad y distribución espacial y temporal de poblaciones de organismos. De igual manera, se comentan las ventajas de esas tecnologías con respecto a los métodos estadísticos tradicionales, para estudios similares, empleando índices de dispersión. Como ejemplo, se presenta el análisis de la estructura y continuidad espacial de *Empoasca fabae*.

PALABRAS CLAVES

Empoasca fabae, índice de dispersión, análisis espacial, covariograma, semivariograma, correlograma, “nugget”, “sill”, rango de dependencia espacial.

ABSTRACT

The Geographic Information Systems (GIS), Global Positioning Systems (GPS) and the adaptation of the principles of the Geostatistics are described. They are technologies used in Precision Ecology in order to analyze density and spatio-temporal organisms distribution. Likewise, the advantages of these technologies, with respect to other traditional statistical methods for similar studies, using dispersion indexes, are discussed. As an example, the analysis of the structure and spatial continuity of *Empoasca fabae*, is presented.

KEYWORDS

Empoasca fabae, dispersion, spatial analysis, covariogram, semivariogram, correlogram, nugget, sill, range of spatial dependence.

INTRODUCCIÓN

“El espacio... la última frontera”. Esta expresión es apropiada para ser aplicada en ecología así como en dramas de ciencia ficción. Los mayores obstáculos que hemos encontrado para procesar datos en ecología se han debido a la falta de instrumentación y manejo analítico de datos. Nuevas tecnologías tales como los Sistemas de Información Geográfica (GIS), Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), la adaptación de la Geoestadística y el surgimiento de programas de computadoras para representar, espacial y temporalmente las densidades de poblaciones de organismos (por ejemplo, de insectos), se han empezado a utilizar con el fin de hacer cálculos más confiables y para tomar decisiones de manejo más rápidas y precisas en áreas como la conservación de la biodiversidad y en ecología aplicada (por ejemplo, en el Manejo Integrado de Plagas). Además, el incremento de estas técnicas espacio-temporales es una respuesta al aumento en la demanda por considerar el costo ambiental en las decisiones de manejo (por ejemplo, costo de la contaminación ambiental producida por los agroquímicos, etc.) (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O’keeffe 1989; Liebhold & Elkinton 1989; Liebhold et al., 1991; Liebhold et al., 1993; Weisz et al., 1995a, 1995b).

DISTRIBUCIÓN “ESTADÍSTICO-ESPACIAL” DE LOS ORGANISMOS

Históricamente, los ecólogos han caracterizado la frecuencia de distribuciones de las especies de diversos organismos usando los métodos tradicionales de dispersión o arreglo espacial a través de los índices de dispersión. Cada dispersión, distribución, o arreglo espacial puede ser estadística o matemáticamente descrita, una vez que la media o promedio aritmético de la población (\bar{x}) y la varianza (s^2) son conocidas (Ascombe 1949; Taylor 1961; Taylor 1984; Schotzko & O’keeffe 1989; Liebhold & Elkinton 1989; Liebhold et al., 1991; Rossi et al., 1992; Liebhold et al., 1993; Roberts et al., 1993; Weisz et al., 1995a; Fleischer et al., 1997; Fleischer et al., 1998). Pero esta

caracterización es meramente estadística y no expresa el arreglo espacial real de las poblaciones en estudio.

TECNOLOGÍAS PARA LA MODELIZACIÓN ESPACIAL DE DISTRIBUCIONES DE ORGANISMOS EN UNA POBLACIÓN

Un énfasis especial debería ser puesto en la evaluación real de las distribuciones espaciales de las poblaciones de organismos, lo cual es diferente a las inferencias resultantes de los índices de dispersión y de las distribuciones de frecuencias. El primer paso para establecer y utilizar las técnicas de distribución espacial real es establecer y entender las definiciones conceptuales relativas a las técnicas y metodologías de estos nuevos procedimientos. El análisis espacial puede ser definido como *cualquier análisis cuantitativo que evalúa la variación o cambios en distribución de densidades basado en la orientación dentro de un área o volumen definido* (Isaaks & Shrivastava 1989; Rossi et al., 1992). Cuando se conduce un análisis espacial, debe ponerse especial atención a las coordenadas geográficas (“X”, “Y”), ya que sería prácticamente imposible entender el concepto de distribución espacial de las poblaciones (ya sea si una población en particular está distribuida uniformemente, al azar o si se encuentra agregada) de cualquier tipo de cualquier especie, si no se respeta la integridad de las coordenadas reales de las muestras espaciales. Desde este punto de vista, los métodos que tratan de evaluar la distribución de las poblaciones de organismos y que no incorporen la geo-localización relativa de las muestras y de los puntos de muestreo en el espacio, serán de poco valor cuando se intenta estudiar dicha distribución espacial. La mayoría de los métodos ecológicos tradicionales caen dentro de esta última categoría (Isaaks & Shrivastava 1989; Rossi et al., 1992).

TECNOLOGÍAS PARA REPRESENTAR Y MODELAR LA DISTRIBUCIÓN GEO-ESPACIAL DE LOS ORGANISMOS

Nuevas tecnologías para representar y modelar espacialmente las densidades de poblaciones de organismos (especialmente de insectos), se han empezado a utilizar con el fin de tomar decisiones de manejo más rápidas y precisas. Además, el incremento de estas técnicas espaciales es una respuesta al aumento en la demanda por considerar el costo ambiental en las decisiones de manejo (contaminación ambiental por el uso de plaguicidas, etc.) (Liebhold et al., 1993; Roberts et al., 1993).

1. Sistemas de Información Geográfica (GIS). Son programas de computadoras capaces de reunir, almacenar, manipular y representar información geográficamente referenciada. Datos geo-referenciados tales como densidad de insectos, tipo de cultivo, o tipos de suelos, pueden ser incorporados para producir diferentes mapas con varias capas (Liebhold et al., 1993). Un mapa de una capa, que generalmente está compuesto de un solo tipo de datos, constituye un *tema* (mapa temático). Por consiguiente, temas que representan áreas similares pueden ser combinados para formar una base de datos de GIS. El GIS sirve como una herramienta para analizar interacciones entre y dentro de varios temas que representan una serie de juegos de datos espacialmente referenciados (Liebhold et al., 1993). El manejo y análisis de bases de datos numerosos podría resultar imposible sin este tipo de programas (Liebhold et al., 1993). Una característica esencial de cualquier sistema GIS es su habilidad de representar en forma digitalizada, datos espaciales en la forma de mapas. Aunque el advenimiento del GIS ha permitido a los entomólogos y ecólogos compilar y manipular datos espacialmente geo-referenciados, la caracterización y modelización de patrones espaciales aún es difícil sin un adecuado conjunto de herramientas estadísticas.

2. Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Consisten de una constelación de 24 satélites orbitando la Tierra a más de 14,000 kilómetros de altitud. El GPS se utilizó para localizar puntos en la superficie de la Tierra en forma de coordenadas geográficas u otras formas de localización. El sistema fue desarrollado y ejecutado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y fue utilizado originalmente para operaciones militares de defensa. Un receptor portátil con su antena en Tierra, capta constantemente las señales de localización que envían los satélites. Al establecerse una comunicación continua entre el receptor en la Tierra y los satélites se pueden geo-localizar puntos sobre la superficie terrestre. El GPS trabaja con el principio de triangulación. Se necesitan tres satélites para efectuar una triangulación y así obtener datos de geo-localización. Cuatro satélites son requeridos para obtener datos de altitud sobre el nivel del mar. Hoy día, las aplicaciones y usos del GPS en diversos campos tales como la ecología aplicada, superan las aplicaciones y usos militares (Liebhold et al., 1993).

3. Geoestadística. Es una de las ramas de la estadística que nos permite estudiar la distribución espacial de poblaciones de organismos. Las bases teóricas de la Geoestadística fueron desarrolladas sobre los datos colectados en minas de oro y de diamantes en Sudáfrica por Daniel Krige en la década de 1950. Este método cuantifica y modela las correlaciones espaciales y temporales entre un juego de muestras que representan una población. A través de este método, se analizan y modelan las variaciones espaciales de las poblaciones de organismos como una función de la distancia y dirección entre muestras para así determinar el grado de asociación y dependencia espacial de muestras geo-referenciadas. A través de este método, la integridad espacial, dentro del marco de referencia dado por las coordenadas "X" e "Y" en un plano cartesiano, permanecen intactas de modo que una medida directa de la dependencia espacial puede ser llevada a cabo, resultando así en un verdadero análisis espacial. Así, la Geoestadística, es una medida directa del análisis de la dependencia espacial más que una inferencia de las relaciones espaciales extraídas de los índices de dispersión (inferidos por la relación varianza/promedio) y las distribuciones de frecuencias. Este método explica el significado de dependencia espacial o "autocorrelación espacial": muestras cercanas unas de las otras serán más similares en valor que las más alejadas (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O'keeffe 1989; Liebhold et al., 1993; Emmen et al., 1997; Fleischer et al., 1998; Emmen 1999).

HERRAMIENTAS GEOESTADÍSTICAS

El *semivariograma* (Fig.1), es la herramienta tradicional más usada en los procedimientos geoestadísticos para analizar dependencia espacial (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O'keeffe 1989; Williams et al., 1992; Rossi et al., 1992 Liebhold et al., 1993). Esta herramienta grafica la varianza de la muestra en relación con las diferencias de los pares de muestras contra la distancia entre los puntos de muestreo (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O'keeffe 1989; Williams et al., 1992; Rossi et al., 1992). El semivariograma asume que los promedios y varianzas poblacionales locales son estables a lo largo del área que está siendo estudiada. Pero este no es el caso de la mayoría de los fenómenos ecológicos (incluyendo la distribución espacial de las poblaciones de insectos). El *covariograma* y *correlograma* son otras dos importantes herramientas geoestadísticas, que son utilizadas (aunque con menos frecuencia), en el análisis espacial para la modelización de las distribuciones de poblaciones de organismos (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O'keeffe 1989; Rossi et al., 1992).

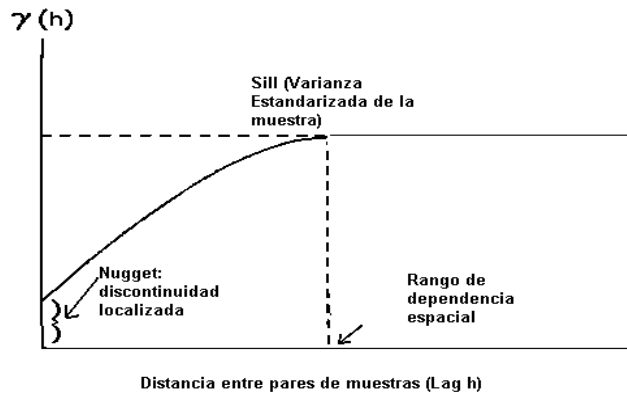


Fig. 1. Un semivariograma típico mostrando sus tres estructuras interactivas (Modificado de Liebhold et al., 1993).

Características Interactivas de un Semivariograma

En un semivariograma podemos observar tres elementos interactivos:

1. Nugget: o “discontinuidad localizada”: es el valor que intercepta la ordenada (Y) en el semivariograma modelo (Fig. 1). Este término fue acuñado por ingenieros de minas que encontraban “nuggets” de oro en minas que fueron previamente geo-refenciadas. El nugget es el mejor estimador de agregación cuando la forma del semivariograma experimental no refleja el tipo de agregación de una población en particular.

2. Sill: es la asíntota a la cual las semivarianzas no se incrementan más o ya no son influenciadas (las semivarianzas) por la distancia (Fig.1). El valor del “sill” es usualmente equivalente al de la varianza tradicional de la muestra (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O’keeffe 1989; Rossi et al., 1992).

3. Rango de Dependencia Espacial (“Range” o RDE): es la distancia a la cual los valores del semivariograma se nivelan a un valor constante (Fig.1). El rango designa la distancia promedio dentro de la cual, las muestras permanecen espacialmente correlacionadas. Cuando los semivariogramas no alcanzan un nivel a una distancia determinada implica que el rango está más allá de la máxima distancia apropiada representada (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O’keeffe 1989; Rossi et al., 1992).

Interpretaciones hechas con base en semivariogramas dependen del tamaño del nugget ya que las diferencias entre el nugget y el sill representan la proporción de la varianza total de la muestra que puede ser modelada como variabilidad espacial. Aquellos semivariogramas con valores cercanos o idénticos a la varianza de la muestra a través de todas las distancias entre muestras, carecen de total estructura espacial. En Geoestadística, estos modelos espaciales son conocidos como *semivariogramas de efecto nugget puro* (Isaaks & Shrivastava 1989; Schotzko & O'keeffe 1989; Rossi et al., 1992).

TIPOS MÁS COMUNES DE SEMIVARIOGRAMAS (Schotzko & O'keeffe 1989).

1. Modelo de Distribución al Azar: el modelo es linear y con poca o ninguna pendiente. El nugget es igual al sill (Fig. 2A).

2. Modelo de Distribución Uniforme: muy parecido al modelo al azar. La mayor diferencia entre estos dos modelos son los valores bajos de r (coeficiente de correlación) (Fig. 2B).

3. Modelo Esférico de Distribución Agregada: presenta una gradual disminución de dependencia espacial a medida que aumenta la distancia hasta el punto en que el sill (independencia espacial) es alcanzado (Fig. 2C).

4. Modelo de Poder de Distribución Agregada: indica una buena continuidad espacial sobre distancias cortas con una rápida reducción en continuidad espacial a distancias largas (Fig. 2D).

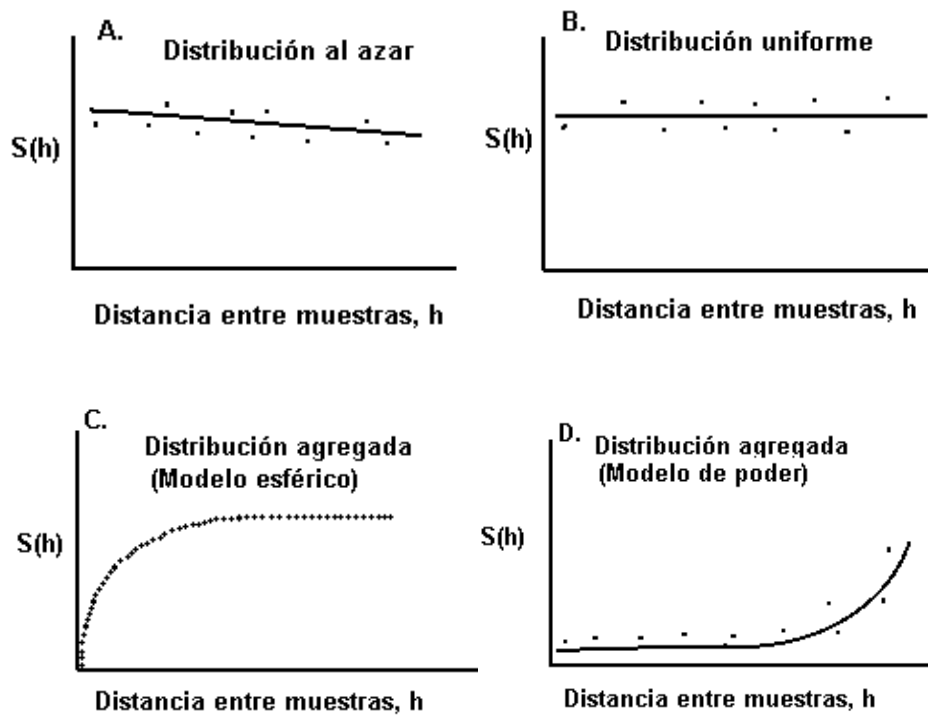


Fig. 2. Los tipos más comunes de modelos de semivariogramas $[S(h)]$: semivarianzas (Modificado de Schotzco & O'keeffe 1989).

La aplicación de la Geoestadística en Ecología para cuantificar y modelar patrones espaciales de organismos, es relativamente nueva y hay relativamente pocas publicaciones de su aplicación, incluyendo las nuestras. Los modelos espaciales usando semivariogramas, correlogramas y covariogramas son útiles para producir mapas con valores interpolados de los datos obtenidos en un muestreo, con el fin de inferir los tipos de arreglos espaciales reales que presentan las poblaciones de una especie en particular (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

Para ilustrar cómo se efectúa un análisis espacial real y cómo se deben utilizar e interpretar las herramientas geoestadísticas con el fin de representar y modelar la distribución espacial de las densidades poblacionales en series temporales de organismos, utilizaremos algunos datos de nuestro estudio sobre la estructura y continuidad espacial de *Empoasca fabae* ("Potato Leafhopper", por su nombre común en inglés), realizado en Pennsylvania, EEUU (Emmen 1999). En este estudio se utilizó un campo de alfalfa de cuatro hectáreas, el cual fue dividido en 75 celdas, parcelas o "rasters" (Fig. 3).

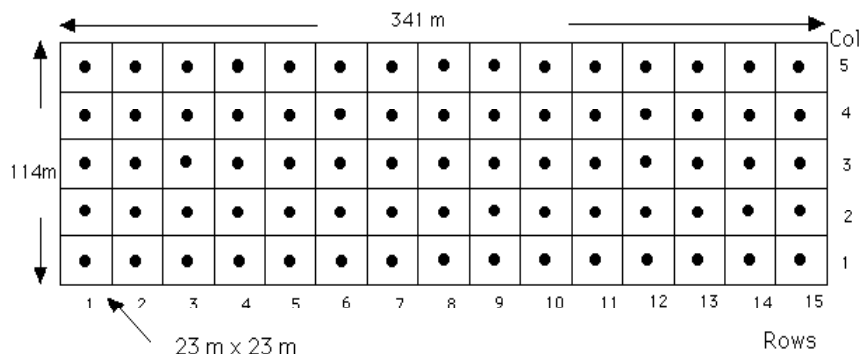


Fig. 3. Configuración del área de estudio (campo de alfalfa de 4-ha) utilizado para el estudio de la distribución temporal y espacial de *E. fabae*. Los puntos en las áreas centrales de cada celda (“raster”) muestran los puntos de control o sitios de muestreo (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

El sistema de coordenadas ("X", "Y") fue utilizado para geo-referenciar las densidades poblacionales de insectos (serie o variable Z) y otras variables importantes en los puntos centrales de cada celda. Se utilizó el algoritmo de interpolación de la distancia inversa pesada ($1/d^q$ de la serie $1/d^4$), con el fin de ubicar puntos no muestreados en el espacio, con base en 75 puntos de control (“postings”), para luego construir mapas de contorno (Fig. 4) que ilustran la distribución espacial de *E. fabae* a través del tiempo (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

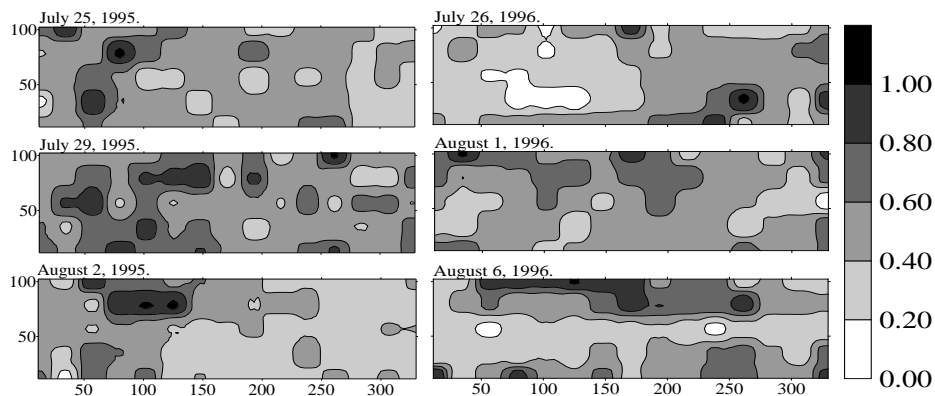


Fig. 4. Mapas de contorno de la distribución espacial de adultos de *E. fabae* en un campo de 4-ha de alfalfa durante el tercer ciclo de crecimiento del cultivo en 1995 y 1996. Los mapas muestran la proporción de la densidad total para cada fecha de muestreo en unidades de 20 percentiles. Las densidades promedio de *E. fabae* para el campo entero fueron: 62, 59, 92 para 1995 y 12, 13, 18 para 1996 por 0.90 m^2 , respectivamente, en las fechas representadas (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

La Fig. 5A muestra el comportamiento espacial de los valores de las diferentes funciones o herramientas geoestadísticas utilizadas (semivariograma, covariograma y correlograma). Estos valores son bastante similares dada la forma de las gráficas. El “nugget” o discontinuidad localizada en el semivariograma fue de 0.8, indicando que sólo 20% del total de la variación de la distribución del insecto (diferencia entre la varianza total de la población y el nugget), estuvo influenciada por la distancia entre muestras hasta 90 m. El correlograma sugiere un alto grado de dependencia espacial dado el valor del “nugget” (0.68) (Fig. 5A). Estos resultados cuantitativos son corroborados por el mapa de contorno y la proyección ortogonal (mapa tridimensional) en la figura 5B, los cuales demuestran que la distribución espacial de la población de *E. fabae*, en esa fecha de muestreo, estuvo moderadamente agregada.

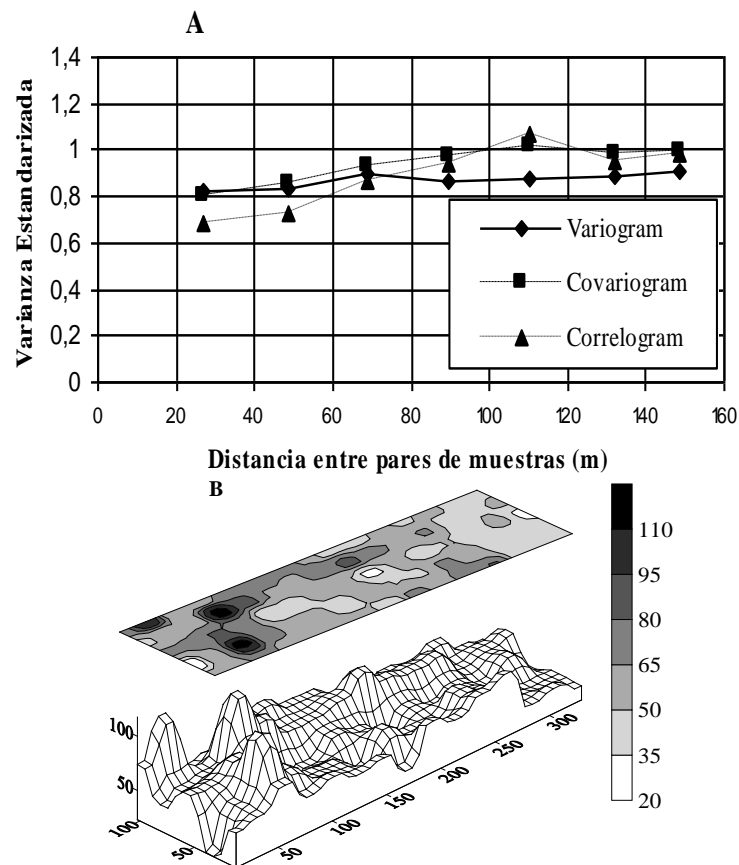


Fig. 5. Semivariograma, covariograma, correlograma (A) y mapas tridimensionales y de contorno de la serie inversa $1/d^4$ de densidades poblacionales (B) de *E. fabae* adultos en Julio 25 de 1995. Las unidades para los mapas son en metros para las coordenadas "X" e "Y" y para la coordenada "Z", número de insectos por cada 0.90 m^2 (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

Un mes después, la población de *E. fabae* presentó una distribución marcadamente agregada, lo cual es puesto de manifiesto por la forma esférica de las funciones geoestadísticas (semivariograma, covariograma y correlograma) y los mapas de superficie de contornos y la imagen tridimensional, mostrados en las figuras 6A y 6B, respectivamente.

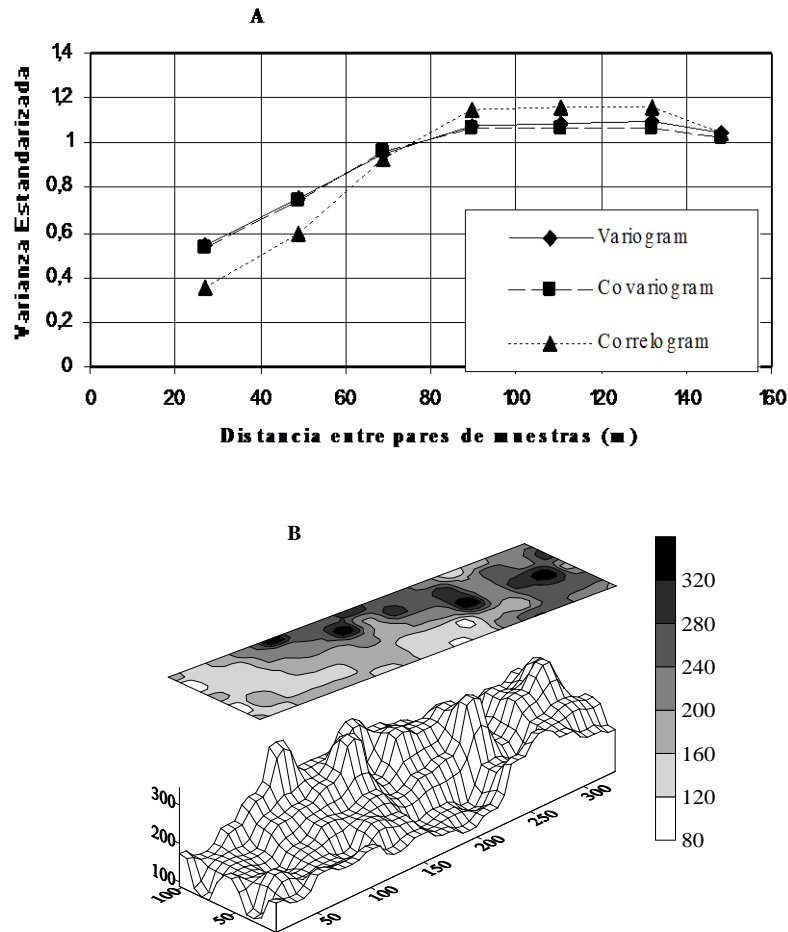


Fig. 6. Semivariograma, covariograma, correlograma (A) y mapas tridimensionales y de contorno de la serie inversa $1/d^4$, de densidades poblacionales (B) para *E. fabae* adultos en agosto 25 de 1995. Las unidades para los mapas son en metros para las coordenadas "X" e "Y" y para la coordenada "Z", número de insectos por cada 0.90 m^2 (Emmen et al., 1997; Emmen 1999).

El nugget o discontinuidad localizada en el correlograma para esta fecha fue de 0.35, lo cual sugiere que 65% del total de la variación en la distribución de la población de esta especie fue causada por la dependencia espacial (autocorrelación) existente entre las muestras. La agregación de la población en esta fecha es el resultado de una estructura o dependencia espacial óptima, fenómeno éste que se manifiesta cuando se llevan a cabo los procesos de reproducción, inmigración o cuando un gran segmento de la población encuentra lugares apropiados para la alimentación.

CONCLUSIÓN

La Ecología de Precisión frente a los métodos ecológicos tradicionales, ofrecen grandes ventajas. Por ejemplo, dentro del nuevo concepto de precisión en el manejo de plagas, a través de la generación de mapas tridimensionales y de contorno además del establecimiento de modelos de estructura poblacional, sólo los sitios específicos de agregación de la plaga serían tratados. De esta forma: (1) se reduce la contaminación ambiental ya que se disminuye la cantidad y frecuencia de aplicación de insecticidas, (2) se preservan los enemigos naturales y la diversidad de especies en el hábitat (por la reducción del uso de insecticidas), (3) se reduce la cantidad de residuos de insecticidas en los productos de cosecha y (4) se maximiza el retorno económico de la cosecha al productor. Por el contrario, utilizando el concepto tradicional de manejo de plagas, una vez que un insecticida es recomendado para controlar una plaga agrícola (y así disminuir sus niveles por debajo del umbral económico), éste es aplicado a todo el cultivo lo que trae como consecuencia un incremento de la contaminación ambiental, aumento de residuos de insecticidas en los productos, destrucción de los enemigos naturales de las plagas, etc.

La generación de mapas a través de las técnicas de precisión en ecología, se ha ido intensificando en los últimos ocho años en áreas tales como el manejo de plagas agrícolas y de importancia médico-veterinaria, conservación de suelos, conservación de la biodiversidad, aplicación de fertilizantes en cultivos, manejo de resistencia a insecticidas y desarrollo de programas de muestreo.

REFERENCIAS

Ascombe, F. J. 1949. The statistical analysis of insect counts based on the negative binomial distribution. *Biometrics* 5: 165-173.

Emmen, D. A., A. A. Hower, & S. J. Fleischer. 1997. Alfalfa colonization by the potato leafhopper. Proceedings of the Entomological Society of America-Eastern Branch Meetings 31st Northeast Regional Field Crops Insect Conference. Burlington, Vermont, March 1997.

Emmen, D. A. 1999. Colonization patterns of the potato leafhopper, *Empoasca fabae* (Harris) (Homoptera: Cicadellidae) in alfalfa. Doctoral Thesis (Ph.D). Department of Entomology. The Pennsylvania State University, 233 pp.

Fleischer, S. J., R. Weisz, Z. Smilowitz, & D. Midgarden. 1997. Spatial variation in insects populations and site-specific Integrated Pest Management, pp. 101-130. In *The State of Site-Specific Management for Agriculture*. F.J. Pierce and E.J. Sadler (eds), 430 pp. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.

Fleischer, S. J., P. Blom, D.A. Emmen, & A. Hower. 1998. Dynamics in the spatial continuity of insect density. Proceedings of the Forth International Conference of Precision Agriculture. ASA/CSSA/SSSA. Minneapolis, Minnesota. July 18-22.

Isaaks, E. H. & R. M. Srivastava 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford Univeristy Press, New York. 561 pp.

Liebhold, A.M. & J.S. Elkinton. 1989. Characterizing spatial patterns of gypsy moth regional defoliation. *For. Sci.* 35: 557-568.

Liebhold, A. M., X. Zhang, M. E. Hohn, J. S. Elkinton, M. Ticehurst, G. L. Benzon & R. W. Campbell. 1991. Geostatistical analysis of gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg mass populations. *Environ. Entomol.* 20: 1407-1417.

Liebhold, A.M., R.E. Rossi & W.P. Kemps. 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Ann. Rev. Entomol.* 38: 303-327.

- Roberts, E.A., F.W. Ravlin & S.J. Fleischer. 1993. Spatial data representation for integrated pest management programs. *Am. Entomol.* 39: 92-107.
- Rossi, R. E., D. J. Mulla, A. Journel & E. H. Franz. 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monographs* 62: 277-314.
- Schotzko, D.J. & L.E. O'keeffe. 1989. Geostatistical description of the spatial distribution of *Lygus hesperus* (Heteroptera: Miridae) in lentils. *J. Econ. Entomol.* 82: 1277-1288.
- Taylor, L.R. 1961. Aggregation, variance, and the mean. *Nature.* 189: 732-735.
- Taylor, L.R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distribution of insect populations. *Ann. Rev. Entomol.* 29: 321-357.
- Weisz, R., S. Fleischer, & Z. Smilowitz. 1995a. Site-specific integrated pest management for high value crops: sample units for map generation using the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) as a model system. *J. Econ. Entomol.* 88: 1069-1080.
- Weisz, R., S. Fleischer, & Z. Smilowitz. 1995b. Map generation in high-value horticulture integrated pest management appropriate interpolation methods for the site-specific pest management of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Econ. Entomol.* 88: 1650-1657.
- Williams, L. III, D .J. Schotzko, & J. P. McCaffrey. 1992. Geostatistical description of the spatial distribution of *Limonius californicus* (Coleoptera: Elateridae) wireworms in the northwestern United States, with comments on sampling. *Environ. Entomol.* 21: 983-995.

Recibido noviembre de 2003, aceptado abril de 2004.