

2.2. Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura

Dario E. Fernández y Manel Ribes i Dasi

Dario E. Fernández

INTA Alto Valle, Río Negro, ARGENTINA

fernandez.dario@inta.gob.ar

Manel Ribes i Dasi

UdL, Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal, Catalunya, ESPAÑA.

manelo@eagrof.udl.cat

La geoestadística es una metodología utilizada para la evaluación de recursos, a la que se ha recurrido por más de cuarenta años en las compañías mineras. Su aplicación a las ciencias biológicas es más reciente y se basa fundamentalmente en que en general, los datos colectados en puntos cercanos tienden a ser más similares que los colectados a mayor distancia. Este hecho lleva a considerar un modelo de variación espacial que contiene al menos tres componentes: una estructura general, que puede ser definida como una tendencia; una segunda estructura superimpuesta, relacionada con la correlación espacial y con una variación gradual y, finalmente; un tercer componente que consiste en una variación al azar causada por errores de muestreo o variaciones espaciales a escalas menores que la red de muestras.

El desarrollo de la geoestadística comienza a partir de la labor de D. G. Krige en 1951, quien trabajando con datos de concentraciones de oro,

demonstró que las varianzas observadas solo podían tener sentido si se consideraba la distancia entre muestras. Matheron (1963), basándose en estas observaciones, desarrolló la teoría de las variables regionalizadas, que contiene los principios fundacionales de la geoestadística.

Aplicada esta teoría a las ciencias agronómicas, la geoestadística considera cada valor muestral (variable aleatoria z) asociado a una posición (coordenadas x,y) y se vale de esta misma dependencia para hacer inferencias sobre la distribución de los datos, lo que ha permitido resolver el problema de dependencia espacial que compromete el cálculo de ciertos índices de distribución que no consideran la ubicación espacial de las muestras y generalmente dependen fuertemente de su tamaño.

En forma sintética se puede afirmar que, haciendo uso de la dependencia espacial que tienen los datos de una muestra, la geoestadística emplea un algoritmo para cuantificar una variable dada, en lugares no muestreados. Luego, la descripción de la distribución espacial de esa variable se realiza mediante el uso de mapas con datos interpolados, unidos por isolíneas.

El método de interpolación más comúnmente utilizado es el de la distancia inversa ponderada (DIP o IDW por su sigla en inglés), debido a la sencillez de los cálculos. Sin embargo, la técnica de *kriging* ordinario (KO) ha probado su utilidad y ventaja sobre la mayoría de los métodos de interpolación, las cuales derivan de la capacidad de este método para proveer el mejor estimador no sesgado. Este método de interpolación se denomina *kriging*, en honor a D.G. Krige.

Caso práctico de uso de la geoestadística para el monitoreo de plagas en cultivos agrícolas

La necesidad de determinar la densidad poblacional de las plagas mediante métodos sencillos, rápidos, fiables y económicos, ha sido siempre uno de los objetivos perseguidos en el manejo integrado de plagas.

Para desarrollar una táctica adecuada para el control de una plaga es necesario, en primer lugar, conocer el riesgo potencial (daño económico) que una determinada población puede causar al cultivo y, además, establecer puntos de referencia biológica para predecir ciertos eventos de su ciclo de vida.

La relación entre la densidad de una plaga y el daño que produce, constituye la base del manejo integrado de plagas. Esta problemática ha sido abordada con el desarrollo de métodos de monitoreo absolutos (por ejemplo número de individuos por m²), relativos (por ejemplo, número de individuos por trampa) o mediante índices de población (por ejemplo, porcentaje de plantas dañadas).

Las tareas de monitoreo necesarias para la detección temprana de una plaga –antes de que alcance el nivel de daño económico– requieren de una adecuada capacitación de los productores y/u operarios y consumen excesivo tiempo y esfuerzo. Esta actividad, por tanto, tiene un elevado costo de implementación.

La incorporación en los últimos años de diferentes herramientas de la agricultura de precisión, como la fotografía aérea o las imágenes satelitales, solo ha servido para la evaluación de los daños causados por las plagas o, en el mejor de los casos, para el desarrollo de modelos de predicción

de ese daño en algunos cultivos forestales y más frecuentemente en bosques naturales.

En los cultivos agrícolas utilizados para la producción de alimentos, ya sean para consumo fresco o procesado, ésta metodología de monitoreo de plagas (fotografía espectral, térmica, etc.) no ha tenido hasta el momento un desarrollo que permita su utilización en forma práctica.

Por tanto, para el desarrollo de un sistema de monitoreo económico y eficaz, se deben utilizar herramientas que permitan hacer una estimación indirecta de las densidades poblacionales (método de monitoreo relativo) y a partir de unas pocas muestras, realizar inferencias sobre el potencial de daño económico de las plagas.

Es aquí donde dos herramientas desarrolladas en forma independiente pueden ser usadas en conjunto para simplificar tanto el monitoreo como el proceso de toma de decisión en el contexto del manejo integrado de plagas: la geoestadística y los SIG.

Distribución espacial de los insectos

El estudio de la dispersión de una población y sus patrones de distribución tiene gran relevancia ecológica. Esta información es útil para determinar los métodos de análisis de los datos, estimar el tamaño de la población, evaluar los programas de monitoreo y hacer inferencias sobre la condición de la población.

A través del tiempo, han sido propuestos diferentes modelos de distribución para ajustar a datos ecológicos. Como modelo teórico se ha sugerido la distribución *Poisson*, en la que se considera que cada individuo se comporta en forma independiente de los demás y que la probabilidad de

encontrar a un individuo en una muestra es la misma para todas las muestras. Esta situación rara vez se da en la naturaleza, ya que normalmente los individuos se relacionan con otros de su misma especie, con otras especies y también interactúan con el ambiente. Por tanto, existe una desviación de la distribución de una población real, respecto de la ideal de *Poisson*.

Sin embargo, las distribuciones probabilísticas (por ejemplo *Poisson*) que permiten calcular medidas de agregación de los individuos, tienen un limitado valor para hacer inferencias sobre la estructura espacial de los datos. Para esto es necesario utilizar otros métodos que permitan evaluar la correlación espacial de los insectos. Debido a que estos métodos son difíciles de interpretar, diferentes autores proponen que es necesario redefinir el objetivo del monitoreo hacia el concepto de “mapear” la población en vez de estimar o categorizar la media, aún a costa de resignar cierta robustez en el cálculo.

La rápida visualización y sencillez de interpretación que proporciona un mapa, difícilmente pueda ser superada por ningún índice o dato calculado por otros medios. Sin embargo, como se mencionó previamente, no es posible fotografiar una población de insectos para describir su dispersión. En cambio, sí se pueden coleccionar muestras puntuales y transformar éstas en mapas de isolíneas con iguales densidades mediante técnicas de interpolación.

La geoestadística, por su parte, permite resolver dos de las principales limitantes de los índices de dispersión: la dependencia espacial que comprometía el cálculo de éstos y además, mediante el *kriging*, permite la generación de datos en zonas no muestreadas, y producir un mapa en dos

o tres dimensiones que describe la distribución espacial de la plaga estudiada. Este análisis puede proveer información crucial para mejorar el uso de técnicas sustentables de control de plagas o de programas de monitoreo, particularmente en el contexto del manejo integrado de plagas de precisión.

A partir de la década de 1990, la geoestadística ha sido utilizada por diversos investigadores en el desarrollo de programas de monitoreo y control de varias plagas, tanto de lepidópteros, coleópteros, áfidos y otros insectos, como así también para realizar mapas de isolíneas de otros aspectos relevantes de los cultivos y suelos agrícolas.

Estos estudios pueden realizarse a escala parcelaria o a una escala mayor. A escala de la parcela, conocer la distribución espacial de la plaga permite optimizar la toma de decisiones para su control; a media-gran escala, permite también planificar su muestreo, definir los puntos de muestreo y tomar decisiones en la aplicación de programas regionales de control y seguimiento.

El objetivo del muestreo de individuos o datos discretos debe ser redefinido en el sentido de “mapear” las poblaciones, al considerar que este enfoque puede reducir notablemente el uso de agroquímicos en programas de manejo integrado de plagas de precisión, en comparación con los programas de control tradicionales.

El desarrollo del análisis espacial de las poblaciones de insectos en la Entomología Aplicada, ha abierto nuevas posibilidades para el estudio y el manejo de plagas que, al ser complementado por los SIG, permite el manejo de gran cantidad de datos de manera rápida, sencilla y visualmente muy práctica.

Sistemas de Información Geográfica

Los SIG se basan en la utilización de un receptor de señales satelitales o GPS que permite ubicar un punto en el espacio en tres dimensiones (longitud, latitud y altura) y de un programa de ordenador (*ArcGis*, *MapInfo*, *Geomatics*, *gvSIG*, *Q-GIS*, etc.) que relaciona los datos colectados por el receptor GPS, con otros datos de interés. Los SIG, por tanto, permiten compilar y manipular una gran cantidad de datos espacialmente referenciados (ver mayor detalle en el capítulo 1.2).

Como dato práctico, es muy importante conocer perfectamente el sistema de coordenadas (x,y) de referencia y su unidad de medida. Debido a su sencillez de cálculo e interpretación se recomienda el uso del sistema UTM ya que se expresa en metros. Además, cuando se superponen mapas en un SIG, éstos deben tener el mismo sistema de referencia para poder hacer comparaciones y relacionar las capas de datos.

Una manera sencilla de mostrar los mapas de distribución de plagas es su incorporación al programa gratuito *Google Earth*. Si bien este *software* no constituye un SIG propiamente dicho, permite la superposición de los mapas en distintos formatos (el más común *.jpg) con imágenes satelitales del terreno y posee además, algunas herramientas rudimentarias de marcación y medición, que son muy sencillas y útiles.

Un aspecto interesante que permite analizar el programa *Google Earth* está relacionado con la posibilidad de superponer una imagen (*.jpg) plana, añadiendo el efecto 3D del terreno (Figura 3). Esta herramienta ayuda a interpretar algunas propiedades que pudieran estar ocultas o poco visibles, como por ejemplo, la influencia de la topo-

grafía (pendiente, altitud) en la distribución espacial de la variable.

Por otra parte, los programas de diseño (por ejemplo CAD) poseen una interfase muy sencilla con *Google Earth*, lo que posibilita trabajar desde el escritorio de la computadora e interrelacionar esta información con las imágenes del terreno.

Otros programas como *gvSIG* y *Quantum-GIS* están desarrollados en base a *software* libre, son de uso gratuito y poseen todas las herramientas necesarias para dar un tratamiento integral a los mapas y otros datos relevantes que se quiera analizar.

En términos generales, se puede concluir que en la actualidad se dispone de una extensa lista de programas para el uso de la cartografía digital, lo que permite trabajar con diferentes formatos y sistemas referenciales, que en la mayoría de los casos son compatibles entre sí.

En este marco, se presenta como una alternativa válida para programas de grandes áreas, en los que el análisis geoestadístico y su integración en los SIG, son complementos necesarios. Se asume que la aplicación de esta metodología permitirá un manejo más eficiente de la gran cantidad de datos generados en estos programas y una mejora del proceso de toma de decisiones.

Metodología práctica para el análisis geoestadístico y su integración a un SIG

- **Paso 1.** Realizar la colecta de datos georreferenciados y su ordenamiento en una planilla de cálculo en columnas ajustadas (x,y,z).
- **Paso 2.** Efectuar un primer análisis estadístico básico, obteniendo la media, la varianza, desviación estándar, etc.

- **Paso 3.** Realizar una prueba de normalidad de los datos. En caso de no ser normales, se procede a transformarlos. Se recomienda utilizar la función logarítmica. Como regla general se asume que si la desviación estándar es mayor que la media, se deben transformar los datos.
- **Paso 4.** Realizar la transformación inversa de los datos para el posterior proceso de *kriging* y obtención del mapa.
- **Paso 5.** Detectar la presencia de posibles valores atípicos (*outliers*). Éstos pueden ser distribucionales (cuando se alejan del valor medio de la muestra), o espaciales (cuando son muy diferentes del valor de sus vecinos). Se deben revisar, corregir y en última instancia, remover.
- **Paso 6.** Cuando se tienen suficientes datos (más de 500 o 1 000 puntos) se puede analizar la anisotropía (análisis de tendencia), es decir, evaluar si existe una mayor correlación en alguna dirección en particular. Si no existe evidencia de anisotropía, o se cuenta con pocos datos, se continúa con el análisis omnidireccional.
- **Paso 7.** Construcción del variograma (Figura 1). Dependiendo del *software* utilizado, se acepta el modelo obtenido por defecto o, si el programa lo permite, posteriormente se puede realizar un ajuste manual (prueba y error) intentando minimizar la suma de residuos al cuadrado (RSS).
- **Paso 8.** Chequear que el modelo ajustado tenga al menos 15 intervalos de distancia y no menos de 30-50 pares de datos por intervalo.
- **Paso 9.** Seleccionar el modelo que presenta el menor valor de k (relación entre la meseta y la pepita) y el menor valor de la sumatoria de los residuos al cuadrado (RSS).
- **Paso 10.** Realizar el *kriging* ordinario (KO). Se recomienda el *kriging* puntual ya que el *kriging* en bloques tiende a dar mapas más suavizados.
- **Paso 11.** Luego del *kriging* se debe realizar la validación cruzada, que consiste en dejar fuera del *kriging* un valor por vez y estimarlo con el resto de los valores vecinos.
- **Paso 12.** Se analizan los valores de z (reales) y z^* (estimados), esperando que el valor medio de $z-z^*$ sea cercano a cero y que la varianza normalizada de la diferencia esté próxima a la unidad.
- **Paso 13.** Con los valores z , apareados a las coordenadas (x,y) se construye el mapa de iso-líneas (Figura 2).
- **Paso 14.** Incorporar el mapa obtenido a un SIG. El mapa puede exportarse como una imagen o utilizar los datos generados a partir del *kriging* (x,y,z^*) , para generar el mapa en el programa de SIG seleccionado.

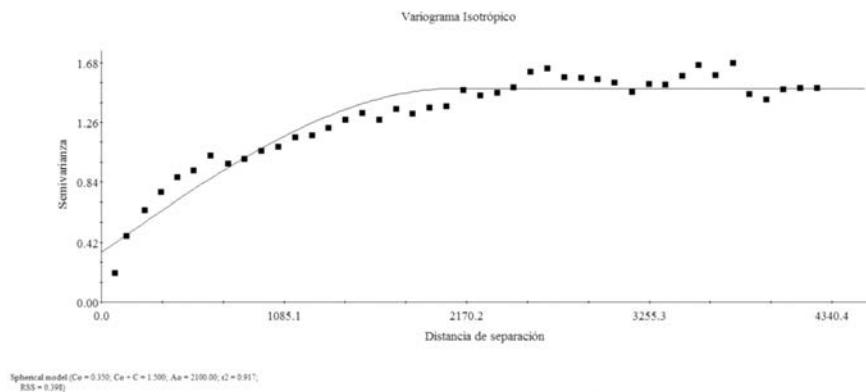


Figura 1. Semivariograma construido con datos de capturas anuales de *Cydia pomonella* en 760 trampas distribuidas en 65 km². Ajuste de un modelo esférico con 43 intervalos de distancia

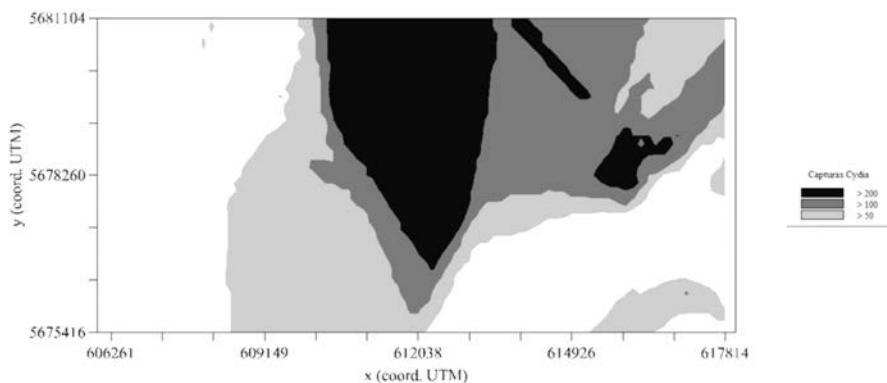


Figura 2. Mapa de iso-capturas de *Cydia pomonella* obtenido mediante el análisis geostatístico, que muestra áreas con diferentes umbrales de insectos acumulados

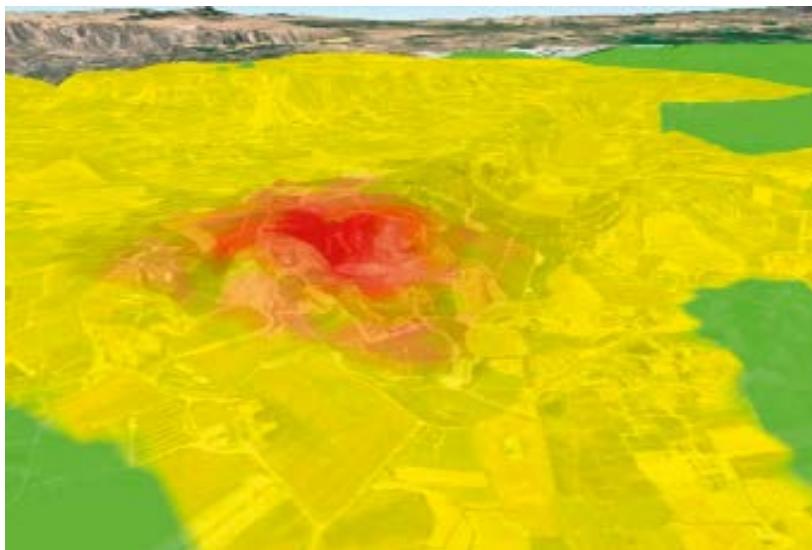


Figura 3. Ajuste del mapa de iso-capturas de insectos a la altimetría del terreno, utilizando el programa Google Earth™

Difusión de información

Uno de los mayores problemas que enfrenta la implementación de un programa de colecta y difusión de información es el establecimiento de un efectivo sistema de comunicación con los participantes y/o interesados. En general, los productores, monitores, asistentes y profesionales, reciben información de diferentes fuentes como servicios de extensión públicos y privados, compañías de servicios, etc., pero es difícil obtener información en tiempo real de diferentes variables productivas en el área de influencia de las parcelas de interés o incluso de toda la región.

En este contexto es posible implementar un sistema de vigilancia y monitoreo a nivel regional que sirva de alerta rápida en casos de detectarse la presencia de alguna plaga específica, un dato

agronómico de interés, etc. En los últimos años se observa más frecuentemente la incorporación de los SIG en sistemas más complejos de soportes de decisiones (SSD por su sigla en inglés) donde se incluyen también datos geofísicos, políticos, sociales, económicos y de manejo del hábitat.

En la actualidad las tecnologías de información y comunicación (TIC) están teniendo un desarrollo muy acelerado y es cada vez más frecuente el acceso a Internet y el uso de teléfonos celulares inteligentes. Estas herramientas pueden ser aprovechadas con un costo muy bajo, para poner a disposición de los usuarios información en tiempo real de la situación productiva de un determinado territorio o área de influencia.

Por tanto, se propone un sistema de vigilancia y monitoreo que consta de tres etapas específicas:

1. Colecta de datos en el campo mediante monitoreo directo, trampeo, etc. y transmisión de esos datos a un centro de cómputo.
2. Análisis de los datos mediante el uso de la geostatística y confección de los mapas de distribución o de riesgo para la generación de un SIG regional, mediante la superposición de datos catastrales, ubicación de sitios de muestreo, mapas de isolíneas, imágenes satelitales, etc.
3. Publicación de los mapas en un sitio web accesible y de rápida visualización por parte de los decisores.

En definitiva, lo que se pretende con estas herramientas es reducir el impacto negativo de la ocurrencia de ciertos fenómenos que afectan la producción agrícola, mediante la generación de información que sea útil tanto a los productores, técnicos, profesionales, como a los decisores políticos, y así reducir los tiempos de acción y los recursos involucrados en las tareas de mitigación.

2.3. Interpretación de informaciones espacializadas y definición de unidades de manejo

Ricardo Melchiori, Alejandra Kemerer y Susana Albarenque.

Melchiori, Ricardo J. M.

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, Argentina
melchiori.ricardo@inta.gob.ar

Kemerer, Alejandra C.

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA Argentina
kemerer.alejandra@inta.gob.ar

Albarenque, Susana M.

Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos
Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, Argentina
albarenque.susana@inta.gob.ar

Introducción

El estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la productividad del cultivo o de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales permite agrupar áreas de características similares dentro de los lotes de producción. Estas áreas diferenciadas constituyen zonas de manejo donde la combinación de los factores responsables de la variación del rendimiento del cultivo permite adecuar las prácticas de cultivo (Doerge, 1999), como por ejemplo la fertilización o la densidad de siembra.

El reconocimiento de la variabilidad espacial estableciendo manejos diferentes entre zonas, permite optimizar el uso de los insumos de acuerdo a