



Revista de Geografía Agrícola
ISSN: 0186-4394
rev_geoagricola@hotmail.com
Universidad Autónoma Chapingo
México

Ramírez Dávila, José Francisco; González Andujar, José Luis
Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera
sur del Parque Nacional Nevado de Toluca
Revista de Geografía Agrícola, núm. 38, enero-junio, 2007, pp. 19-32
Universidad Autónoma Chapingo
Texcoco, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75703803>

- [Cómo citar el artículo](#)
- [Número completo](#)
- [Más información del artículo](#)
- [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium sp.*) en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca

José Francisco Ramírez Dávila¹
José Luis González Andujar²

Recibido: 10 de noviembre de 2006

Aceptado: 30 de mayo de 2007

Resumen

En el presente trabajo se logró determinar la distribución espacial del muérdago enano, parásito de coníferas, en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. Dicha distribución se estableció tanto por métodos de Estadística No Espacial, como de Estadística Espacial (Geoestadística y Análisis Espacial por Índices de Distancia, SADIE por sus siglas en inglés). Los resultados demostraron que las poblaciones de muérdago enano de la región estudiada presentaron una distribución agregada, dispersándose en varios centros de agregación. Se elaboraron mapas de densidad del muérdago enano mediante la técnica del Krigeado, mismos que corroboraron el tipo de distribución mencionado. Se halló que la infestación de este parásito de coníferas no alcanzó 100% de las parcelas de estudio, situación interesante para establecer medidas de control enfocadas a las zonas de real infestación. No se logró determinar una estabilidad espacial y temporal de las poblaciones del parásito.

Palabras Clave: muérdago enano, distribución espacial, geoestadística, SADIE, infestación, estabilidad espacial y temporal.

Modeling and mapping of spatial distribution of dwarf mistletoe (*Arceuthobium sp.*) in the Southern slope of the National Park Nevado de Toluca

Summary

The present work aimed at determining the spatial distribution of dwarf mistletoe, a coniferous parasite, in the Southern slope of the National Park Nevado de Toluca. The distribution was determined both by non-spatial and spatial statistic methods. (Geostatistics and Spatial Analysis by Distance Index (SADIE)). Results demonstrated that dwarfed mistletoe populations in the studied region displayed a clustered distribution, dispersed in several cluster centers. Maps of density of dwarfed mistletoe were elaborated by means of the Kriging technique which corroborated the mentioned distribution type. Infestation by this co-

1 Profesor Investigador de la Facultad de Geografía, UAEM. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, México. C.P. 50110. Tel. y Fax 01 722 22 14 31 82. Correo e: jfrd@uaemex.mx

2 Departamento de Protección de Cultivos, Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC), Apdo. 4080, Córdoba, España. Correo e: Andujar@cica.es

niferous parasite did not reach 100% of the studied plots, an important situation for establishing control measures focused on the real-infestation zones. Spatial and temporal stability could not be determined for the populations Profit does not to determine a space and temporary stability of the parasite's populations.

Key words: Dwarf mistletoe, spatial distribution, Geostatistics, SADIE, infestation, spatial and temporal stability.

El Nevado de Toluca es una elevación localizada en el Estado de México, que limita en su porción suroeste el extenso Valle de Toluca, es la planicie de mayor extensión en la entidad y la que registra mayor altitud en la República Mexicana.

En el estudio de la Protectora e Industrializadora de Bosques, PROTIMBOS (1972), se señala que de un total de 48 571 ha, 77.24 % es netamente forestal y de éste, más de la mitad corresponde a bosques poco densos, talados y mezclados con zonas agrícolas y ganaderas.

El muérdago enano es una de las plantas parásitas más importantes del grupo de las heterófitas debido a que causa serios perjuicios sobre otros vegetales. A pesar de que se sabe que existe una relación parcial de alimentación entre huésped y hospedero, tal situación nunca podrá ser benéfica y sí, a menudo, muy dañina para este último (González, 1984).

Los daños que causa el muérdago enano a los árboles incluyen: a) hipertrofia del fuste y de las ramas en el punto infestado; b) atrofia y posterior rotura del fuste y de las ramas de las partes infestadas hacia la cúspide, debido al peso del parásito, de tal manera que los puntos del sujeto parasitado fácilmente terminan en penachos de muérdagos; c) deformación de las ramas de los árboles afectados al culminar el ataque; d) mata rápidamente al arbolado joven, y retarda grandemente el crecimiento tanto en altura como en diámetro de los árboles de mayor edad; e) interfiere seriamente en la vida normal del árbol, provocándole a la postre la muerte al adquirir frondosidad el parásito y, por consiguiente, aumentar sus necesidades de sostén y nutrimentos; f) al iniciar la primavera, época de mayor crecimiento de los árboles, se retardan las funciones nulificando el desarrollo, altura y diámetro del sujeto, lo que le da a la postre una apariencia de achaparramiento; g) los árboles debilitados, quedan predispuestos al ataque de insectos y microorganismos; h) en aquellos lugares

donde se han aplicado cortes como medida de control en árboles intensamente atacados por el muérdago enano, se da una propagación extraordinaria en las plantas con parasitismo incipiente como consecuencia del aclareo que sufrió la masa y la mayor cantidad de luz que reciben, e i) reduce considerablemente la producción de semillas fértiles de los sujetos atacados y en muchas ocasiones llega a nulificarla totalmente (Verduzco, 1976).

En la zona de la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca, las poblaciones de muérdago enano han aumentado en forma considerable, sin embargo, actualmente no existe ningún estudio que manifieste de manera precisa las proporciones de dicha infestación; ya que los estudios realizados sólo indican la presencia abundante del parásito, pero no en términos cuantitativos. Por lo anterior, es necesario recabar información oportuna que proporcionen datos fehacientes y cuantificables a fin de poder construir un programa de toma de decisiones enfocado a controlar el problema que representan las poblaciones de muérdago enano en la región.

Matheron (1962), padre de la geoestadística, la definió como "la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales". La función aleatoria se puede visualizar como una variable aleatoria definida en todos los puntos del espacio, o lo que es igual, cada realización de la función aleatoria es una función espacial. Según Journel (1986), el concepto de función aleatoria es la "piedra angular" de la geoestadística y menciona que este concepto hay que entenderlo más como un modelo que como un ente con una significación física. Entendiéndolo como un modelo de la realidad física, el concepto de función aleatoria proporciona la herramienta más completa para el análisis de muchos fenómenos naturales distribuidos espacialmente. Lo característico de las funciones aleatorias es que cada realización se puede concebir como suma de

una componente estructurada y otra aparentemente errática (Chica *et al.*, 1995). La geoestadística, además, permite elaborar mapas de gran utilidad de la distribución espacial de un organismo (Isaaks y Srivastava, 1988; Rossi *et al.*, 1992; Speight *et al.*, 1998; Sciarretta *et al.*, 2001; Blom y Fleischer, 2001 y Ramírez *et al.*, 2002).

Dentro de los nuevos desarrollos de la estadística espacial ha aparecido recientemente una nueva metodología llamada Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE por sus siglas en inglés) desarrollada por el Dr. Joe N. Perry del Departamento de Entomología y Nematología de la Rothamsted Experimental Station (Reino Unido). SADIE identifica el modelo espacial para datos bidimensionales, con un índice asociado de la agregación y con una prueba para la desviación de la aleatoriedad basada en un algoritmo de atracción, el cual incorpora un modelo biológico para la dispersión de individuos de un origen en el que a cada individuo se le asigna un territorio dinámico (Perry, 1995a; Perry *et al.*, 1996). Con este método se hace uso de los datos concernientes a cada muestreo y no hay restricción en la ubicación de las unidades muestrales.

Cabe señalar que el presente estudio se realizó exclusivamente en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca, que forma parte de la cuenca del Río Balsas; por lo tanto, el objetivo general de este estudio fue establecer el tipo de distribución espacial de las poblaciones de muérdago enano en dicha zona durante el año 2005.

Materiales y métodos

Para el presente estudio, se establecieron cinco parcelas experimentales de una hectárea de extensión cada una, a lo largo de la mencionada cuenca y a diferentes altitudes.

En cada parcela se utilizó una malla rectangular y se muestreó cada diez metros en ambas direcciones; cuando se dio el caso de que a tal distancia no existía una conífera se buscó un árbol localizado a una distancia máxima de un metro en cualquier dirección. De este modo en cada parcela se muestrearon alrededor de 100 árboles. Cada árbol muestreado se georreferenció utilizando un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS, por sus siglas en inglés) para establecer sus coordenadas espaciales. Se realizó un conteo del número

de muérdagos enanos presentes en cada árbol muestreado. Cada árbol fue debidamente etiquetado para conocer su posición exacta. Los muestreos se realizaron catorcenalmente y cada parcela fue completamente muestreada en dos sesiones.

Se realizó una exploración estadística de los datos originales de las poblaciones de muérdago enano en los muestreos correspondientes a cada una de las parcelas. Utilizando la Prueba de Curtois se determinó que no existía normalidad en los datos recolectados, por lo que fue necesario realizar una transformación logarítmica de los datos $[\log_{10}(n+1)]$ para normalizarlos.

Existen dos métodos generales para establecer la distribución espacial de los organismos: las distribuciones estadísticas (Binomial Negativa y Poisson) y los índices de dispersión (de dispersión y de Green); ambos se utilizaron en este estudio para realizar la comparación pertinente entre lo hallado con la estadística no espacial y la estadística espacial.

Para todas las distribuciones estadísticas se utilizó el programa MLP de máxima verosimilitud (Ross, 1987) para ajustar los modelos a los datos obtenidos. La bondad del ajuste se examinó con una prueba de χ^2 (Sokal y Rohlf, 1995).

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE)

En el presente trabajo se empleó el índice basado en la distancia para la regularidad I_a y el índice J_a , basado en la distancia del agrupamiento Perry (1995a, 1995b) para establecer el modelo de distribución de las poblaciones de muérdago enano, en cada una de las parcelas de estudio.

Estimación de los índices I_a y J_a

Los datos recolectados en una cuadrícula prediseñada (conformada por unidades de muestreo), se asumen como un sistema de conteo de individuos, donde $i = 1, \dots, n$ unidades de muestreo. Se asumen además, por ser conocidas, la posición bidimensional (x_i, y_i) de cada unidad de muestreo y su conteo asociado, N_i . La distancia para la regularidad, D , es el valor mínimo de la distancia total que los individuos en la muestra pueden estar distanciados, de una unidad de muestreo a otra, de modo que todas las unidades de muestreo tuvieran un

número idéntico de individuos. Si la distancia media aritmética para la regularidad de las muestras aleatorias se denota como E_a , entonces el índice de agregación, denominado I_a , está definido como $I_a = D/E_a$. 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 $I_a < 1$. Un número total de 2 000 aleatorizaciones son suficientes para derivar los valores de los índices correspondientes.

El término C denota la distancia para el agrupamiento, que es el valor mínimo de la distancia total que los individuos de la muestra deben moverse para congregarse en una unidad. Si la distancia media para el agrupamiento para muestras aleatorias se denota como F_a , entonces el índice de agregación J_a , se define como $J_a = F_a/C$. Como en el caso del índice I_a , los valores de $J_a > 1$ usualmente indican una muestra agregada, $J_a = 1$ representan datos espacialmente aleatorios y $J_a < 1$ muestras regulares. 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 para los cuales su valor es significativamente diferente de la unidad o incluso menor que ella. Para determinar la significación con respecto a la unidad se utiliza su probabilidad respectiva (Q_a) (Perry, 1998). El programa empleado en este trabajo para determinar los valores y las probabilidades de ambos índices fue el SADIE 1.22.

Análisis Geoestadístico

Estimación del semivariograma

El denominado semivariograma experimental se estimó con base en los datos recolectados en los distintos muestreos de la población de muérdago enano en cada parcela experimental. El valor experimental del semivariograma se calculó con la siguiente expresión (Journel y Huijbregts, 1978; Isaaks y Srivastava, 1989):

$$y^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} z(x_i, h) z(x_{i+1})^2$$

donde: $\hat{\gamma}(h)$ es el valor experimental del semivariograma experimental para el intervalo de distancia h ; $N(h)$ es el número de pares de puntos muestrales separados por el intervalo de distancia h ; $z(x_i)$ es el valor de la variable de interés en el punto muestral x_i y $z(x_{i+1})$ es el valor de la variable de interés en el punto muestral x_{i+1} .

Para la realización del semivariograma experimental correspondiente a cada muestreo de las parcelas experimentales se empleó el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New York, USA) y el WinGslib 2002.

Estimación de los parámetros del modelo de Semivariograma

Una vez que se estimó el correspondiente semivariograma experimental, considerando el muestreo de las poblaciones de muérdago enano en cada parcela correspondiente, se ajustó a algún semivariograma teórico. Los semivariogramas teóricos no son más que funciones con una expresión analítica sencilla y que, por ello, se emplean frecuentemente para representar semivariogramas reales (Englund y Sparks, 1988). Los modelos teóricos más comunes y a los cuales se ajustaron los semivariogramas experimentales realizados fueron el Modelo Esférico y el Modelo Exponencial (Samper y Carrera, 1996; Chilés y Delfiner, 1999).

Para ajustar los correspondientes semivariogramas experimentales a los semivariogramas teóricos de los muestreos en cada parcela experimental se utilizó la extensión Geoestadística del Programa ArcGis 9.

Validación

Una vez que los semivariogramas experimentales fueron ajustados a alguno de los modelos descritos fue necesario validarlos mediante el procedimiento denominado validación cruzada (Isaaks y Srivastava, 1989). Los parámetros del modelo a validar (C_0 , efecto pepita, C , meseta y a , rango o alcance) se van modificando en un procedimiento de prueba y error hasta la obtención de estadísticos de validación cruzada adecuados, los cuales son los siguientes:

a) Media de los errores de estimación (MEE)

$$MEE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z^*(x_i) - z(x_i)$$

donde: $z^*(x_i)$ es el valor estimado de la variable de interés en el punto x_i ; $z(x_i)$ es el valor medido de la variable de interés en el punto x_i y n es el número de puntos muestrales utilizado en la interpolación.

El MEE debe ser no significativamente distinto de 0 (prueba de t), en cuyo caso, indicaría que el modelo de semivariograma permite el cálculo de estimaciones no sesgadas.

b) Error cuadrático medio (ECM).

Un modelo de semivariograma se considera adecuado si, como regla práctica, el ECM es menor que la varianza de los valores muestrales (Hevesi *et al.*, 1992).

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2$$

c) Error cuadrático medio adimensional (ECMA).

$$ECMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(z^*(x_i) - z(x_i))^2}{k}$$

donde: k es la desviación estándar del error esperado en la estimación con el kriging.

La validez del modelo se satisface si ECMA está comprendido entre los valores $1 - 2(2/N)^{0.5}$.

d) Además se debe cumplir que la varianza de los errores de estimación debe de ser que la varianza muestral (Samper y Carrera, 1996).

Nivel de dependencia espacial

Para conocer el grado de relación entre los datos correspondientes resulta importante establecer el nivel de dependencia espacial. Este valor se obtiene al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje el 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 de 76 % el nivel de dependencia es bajo (Cambar-della *et al.*, 1994).

Elaboración de mapas

Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes fueron validados, se empleó el método geoestadístico denominado Kriging como método de interpolación que permite la estimación insesgada de valores asociados a puntos no muestreados.

En el presente trabajo se utilizó el Kriging Ordinario para obtener las estimaciones correspondientes de las poblaciones del muérdago enano en cada parcela experimental, mediante el programa WinGslib 2002.

Una vez obtenidas las estimaciones correspondientes con el método del Kriging para cada muestreo de las parcelas experimentales, se elaboraron los mapas que indicaron la distribución espacial en el campo de las poblaciones del muérdago enano en la ladera sur del Parque Nacional Nevado de Toluca. Las estimaciones obtenidas se representaron en forma de mapa mediante el uso del programa Surfer 8.0. A partir de los mapas elaborados se determinó el porcentaje de superficie infestada por el muérdago enano, para los resultados obtenidos con ambos métodos.

Estabilidad espacial y temporal a corto plazo

Uno de los objetivos de este trabajo fue estudiar la existencia de una estabilidad espacio-temporal a corto plazo (un año), de las poblaciones del muérdago enano. Para tal efecto se compararon las estimaciones obtenidas con los métodos del Kriging y SADIE.

La comparación se realizó utilizando en el caso de los resultados analizados con el Kriging, una modificación de la prueba estadística no paramétrica de Cramér von Mises (Syrjala, 1996); en el caso de los resultados obtenidos mediante el método del SADIE, la comparación para establecer la estabilidad espacio-temporal de los mismos se llevó a cabo mediante el índice de asociación del SADIE llamado I_m (Perry y Klukowsky 1997 y Korie *et al.*, 2000). Si $I_m > 0$, indica que existe una asociación o una estabilidad espacio-temporal entre los mapas si existe un nivel de significación de $P_m < 0.025$. La determinación de la estabilidad se realizó con el programa SADIE 1.22.

Cuadro 1. Resumen estadístico del parásito muérdago enano.

Parcelas		S	S ²	Coef. de Curtosis, datos reales (1a)	Coef. de Curtosis, datos transformados (2a)
P1	3.803	3.706	13.734	5.926	-0.117
P2	12.273	4.635	21.483	7.612	-1.319
P3	1.400	2.701	7.297	10.576	0.671
P4	2.790	5.275	27.825	30.302	0.278
P5	5.469	8.483	71.955	11.281	-1.295
P6	3.018	5.042	25.430	8.228	1.429
P7	2.900	4.535	20.567	14.936	1.081
P8	3.509	4.721	22.288	21.034	0.527
P9	3.410	3.357	29.308	18.625	-0.491
P10	3.427	5.311	28.210	6.184	2.011

Resultados y Discusión

El objetivo general planteado en este estudio fue modelizar y generar mapas de la distribución espacial del muérdago enano. Para ello, se utilizaron tres métodos que aclararon y especificaron dicho comportamiento espacial. Los resultados obtenidos en cada una de las diez parcelas, se observan en el cuadro 1.

Estadística No Espacial

Resumen estadístico del muérdago enano

En el cuadro 1 se observa el resumen estadístico del número de muérdagos enanos presentes en los árboles de coníferas muestreados.

El rango de densidad de muérdagos enanos por conífera varió entre 12.273 y 1.400. Las parcelas con mayor densidad de muérdagos (P2 y P5) se encuentran ubicadas a altitudes más bajas que las otras tres, por lo que habría que determinar si la altitud en realidad juega algún papel importante para determinar la densidad de este parásito, situación que no se determinó en el presente estudio. En este ambiente heterogéneo, donde se ubicaron las diferentes parcelas y por lo tanto donde se llevaron a cabo los diferentes muestreos, era de esperarse que existiera una considerable variabilidad de la distribución espacial de este parásito. La varianza de los datos se ubicó entre 71.955 y 7.297.

Distribución espacial del muérdago enano

Los resultados acerca del tipo distribución espacial de los muérdagos enanos encontrada en cada una de las parcelas experimentales, se hallan registrados en el cuadro 2.

El índice de dispersión señala que en todas las parcelas se encontró una distribución agregada del muérdago enano, con excepción de las parcelas 4, 7 y 10 donde existe una distribución aleatoria. Por su parte, el índice de Green confirmó dicha agregación, pero en este caso para todas las parcelas, indicando, en función de su bajo valor (cuadro 2), que la agregación fue leve. Aquí se puede apreciar alguna limitación de tales métodos para detectar de manera precisa y unívoca la distribución espacial del muérdago enano.

Con base en las distribuciones estadísticas los resultados indican que en las parcelas 1, 2, 4, 5, 7, 8 y 10 se ajustó una distribución Binomial Negativa (agregación) a los datos. En las parcelas 2, 5 y 8 también se presentó un ajuste a la distribución de Poisson (aleatoria) por lo que no es posible discernir la real distribución espacial del muérdago enano en estas parcelas. Quizás la explicación a dicha dualidad puede encontrarse en que para valores altos del parámetro k , la Binomial Negativa tiende a la distribución de Poisson, por lo que al realizar el ajuste estadístico por máxima verosimilitud ambos

Cuadro 2. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas del parásito muérdago enano.

Parcelas	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	K
P1	2.45 ^s	0.001	NS	S	1.55
P2	1.41 ^s	0.003	S	S	7.23
P3	3.77 ^s	0.005	NA	NA	-
P4	0.85 ^{ns}	0.001	NS	S	4.84
P5	5.12 ^s	0.009	S	S	9.43
P6	2.76 ^s	0.007	NA	NA	-
P7	0.67 ^{ns}	0.002	NS	S	3.82
P8	1.94 ^s	0.003	S	S	6.25
P9	4.43 ^s	0.008	NA	NA	-
P10	0.76 ^{ns}	0.002	NS	S	1.68

S = significativa; NS = no significativa; nivel de significación al 5%, NA = No Ajustada

modelos se ajusten a los datos indistintamente. Los resultados del índice de dispersión y el índice de Green apuntan a que en esta parcela los datos recolectados presentan más bien una distribución agregada leve.

Los datos obtenidos en las parcelas 3, 6 y 9 no se pudieron ajustar a ninguna distribución estadística, ya que no fue posible obtener la convergencia de los algoritmos de ajuste por máxima verosimilitud. Esto ejemplifica una de las limitaciones cuando se desea ajustar distribuciones estadísticas a nuestros datos.

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE) (Estadística Espacial)

Se puede observar en el cuadro 3 que en el caso del índice I_a el valor más alto (1.70) se registró en la parcela 2, y el más bajo (1.32) en la parcela 3. En todos los casos el índice I_a fue significativamente superior a 1 (cuadro 3) lo que indica una distribución espacial agregada.

En lo referente al índice J_a el valor mayor 1.22 se dio en la parcela 2, y el más bajo 1.08 en la parcela 4. El índice J_a en todas las parcelas experimentales también fue superior a la unidad, confirmando la agregación.

Otra información que es posible recabar con el índice J_a , es la cantidad de centros de agregación presentes en cada muestreo. A este respecto, el valor del índice J_a en todas las parcelas no fue sig-

nificativamente superior a 1, lo que indica que la distribución de las poblaciones de muérdago enano se extendió en más de un centro de agregación.

Análisis Geoestadístico (Estadística Espacial)

En el cuadro 4 se señalan los modelos y parámetros de los semivariogramas ajustados para cada una de las parcelas experimentales en lo que se muestreo el muérdago enano.

Con base en los resultados de la validación cruzada se halló que para las parcelas 1, 3, 4 y 5 el modelo ajustado fue un modelo exponencial con efecto pepita en tres de ellos. En la parcela 3 el modelo exponencial ajustado tuvo efecto pepita nulo (0). En el caso de la parcelas 2, 6, 7, 8, 9 y 10 se ajustó un modelo esférico con efecto pepita (cuadro 4). Estos resultados permiten afirmar que se registró una estructura espacial agregada en las poblaciones del muérdago enano en las diez parcelas experimentales, coincidiendo parcialmente con lo hallado con los índices de dispersión y los modelos de distribución estadística. Por otro lado, estos resultados coinciden plenamente con lo detectado por los índices I_a y J_a del SADIE. En el cuadro citado se aprecia el nivel de dependencia espacial, el cual en la mayoría de los casos fue alto.

En el cuadro 4 se distingue que, en lo concerniente al efecto pepita, los valores fluctuaron entre 0.060 en la parcela 5 y 0 en la parcela 3. En todos los casos el valor del efecto pepita de los distintos semivariogramas fue menor a 60 % del valor de la meseta, y en el caso de las parcelas 1, 3 y 4, el valor de la pepita fue menor de 10 % de la meseta. Este valor del efecto pepita supone que por lo menos más de 40 % de la variación total era debido a la dependencia espacial encontrada en el rango de la escala de muestreo utilizado; dicho de otra manera, más de 40 % de la variación de la distribución del muérdago enano se logró explicar por la estructura espacial establecida con los semivariogramas. El bajo valor de la pepita encontrada en la mayoría de los casos y la pequeña varianza de los errores (cuadro 5) parecen indicar que la escala de muestreo que elegida era la apropiada para las poblaciones de muérdago enano.

El hecho de que la dependencia espacial en la gran mayoría de los casos haya sido alta, señala que el patrón de comportamiento espacial del pará-

Cuadro 3. Valor de los índices I_a y J_a y sus respectivas probabilidades P_a y Q_a en la población de muérdago enano.

Parcelas	I_a	P_a	J_a	Q_a
P1	1.61	0.008 ^s	1.16	0.233 ^{ns}
P2	1.70	0.013 ^s	1.22	0.305 ^{ns}
P3	1.32	0.004 ^s	1.10	0.261 ^{ns}
P4	1.35	0.015 ^s	1.08	0.217 ^{ns}
P5	1.43	0.002 ^s	1.20	0.147 ^{ns}
P6	1.47	0.017 ^s	1.14	0.139 ^{ns}
P7	1.40	0.009 ^s	1.09	0.274 ^{ns}
P8	1.66	0.019 ^s	1.19	0.281 ^{ns}
P9	1.55	0.005 ^s	1.15	0.199 ^{ns}
P10	1.65	0.011 ^s	1.17	0.205 ^{ns}

ns = no significativo al 5%; s = significativo al 5%.

sito es estadísticamente robusto. En estudios posteriores habrá que determinar si la escala de muestreo o el tamaño de las parcelas de estudio influyeron en el nivel de dependencia espacial registrado.

En el caso de la meseta, los valores se encontraron entre 0.170 y 0.019 (cuadro 4). En lo referente al alcance o rango los valores se hallaron entre 51.645 m y 16.088 m (cuadro 6), por lo que éste fue el rango de distancia hasta donde hubo dependencia espacial de los datos muestreados, pues más allá del valor máximo de la distancia, la dependencia espacial es prácticamente nula.

Los resultados de la validación cruzada están concentrados en el cuadro 7. Los valores de los estadísticos estuvieron dentro del rango que permitió la validación de los modelos ajustados.

Los semivariogramas correspondientes (modelos ajustados) para las poblaciones de muérdago enano en las respectivas parcelas experimentales se aprecian en la figura 1.

Elaboración de mapas de densidad

Se elaboraron mapas de densidad con base en las estimaciones realizadas con la técnica del Krigeado Ordinario (Análisis Geoestadístico). Los mapas se observan en la figura 2. En ellos, se puede apreciar la distribución espacial agregada del muérdago enano en las diferentes parcelas experimentales.

En este grupo de mapas se distinguen los focos de agrupamiento del muérdago enano en cada una de las parcelas experimentales. En ellos también

Cuadro 4. Parámetros (Efecto Pepita, Meseta y alcance de los modelos ajustados a sus semivariogramas del número de muérdagos enanos.

Parcelas	Modelo	Pepita	Maseta	Alcance	Pepita/Maceta	Nivel de dependencia espacial
P1	Exponencial	0.010	0.138	32.887	7.24	Alta
P2	Esférico	0.029	0.120	16.088	24.16	Alta
P3	Exponencial	0	0.019	40.103	0	Alta
P4	Exponencial	0.009	0.100	30.842	9	Alta
P5	Exponencial	0.060	0.106	21.428	56.60	Moderada
P6	Esférico	0.002	0.188	40.968	19	Alta
P7	Esférico	0.032	0.156	45.500	18.80	Alta
P8	Esférico	0.53	0.140	51.645	19.30	Alta
P9	Esférico	0.033	0.170	38.590	20.30	Alta
P10	Esférico	0.039	0.153	43.549	19.20	Alta

Cuadro 5. Valores de los estadísticos de la validación cruzada: media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM) y error cuadrático medio adimensional (ECMA), del muérdago enano.

Parcelas	Tamaño de muestra	Media muestral	Varianza muestral	MEE	Varianza de los errores	ECM	ECMA
P1	143	0.329	0.242	0.11 ^{ns}	0.145	0.179	1.10
P2	143	0.820	0.346	0.10 ^{ns}	0.288	0.256	1.12
P3	143	0.233	0.100	0.13 ^{ns}	0.062	0.084	1.05
P4	143	0.319	0.174	0.10 ^{ns}	0.107	0.128	1.08
P5	143	0.452	0.304	0.09 ^{ns}	0.249	0.272	1.07
P6	121	0.344	0.199	0.01 ^{ns}	0.144	0.151	1.01
P7	121	0.392	0.153	0.08 ^{ns}	0.122	0.131	1.04
P8	121	0.421	0.206	0.12 ^{ns}	0.191	0.179	1.11
P9	121	0.373	0.217	0.03 ^{ns}	0.198	0.187	1.13
P10	121	0.393	0.207	0.05 ^{ns}	0.195	0.170	1.06

1 $2/(2/n)^{0.5} = 1$ 0.45, NS = Diferencia no significativa al 5%.

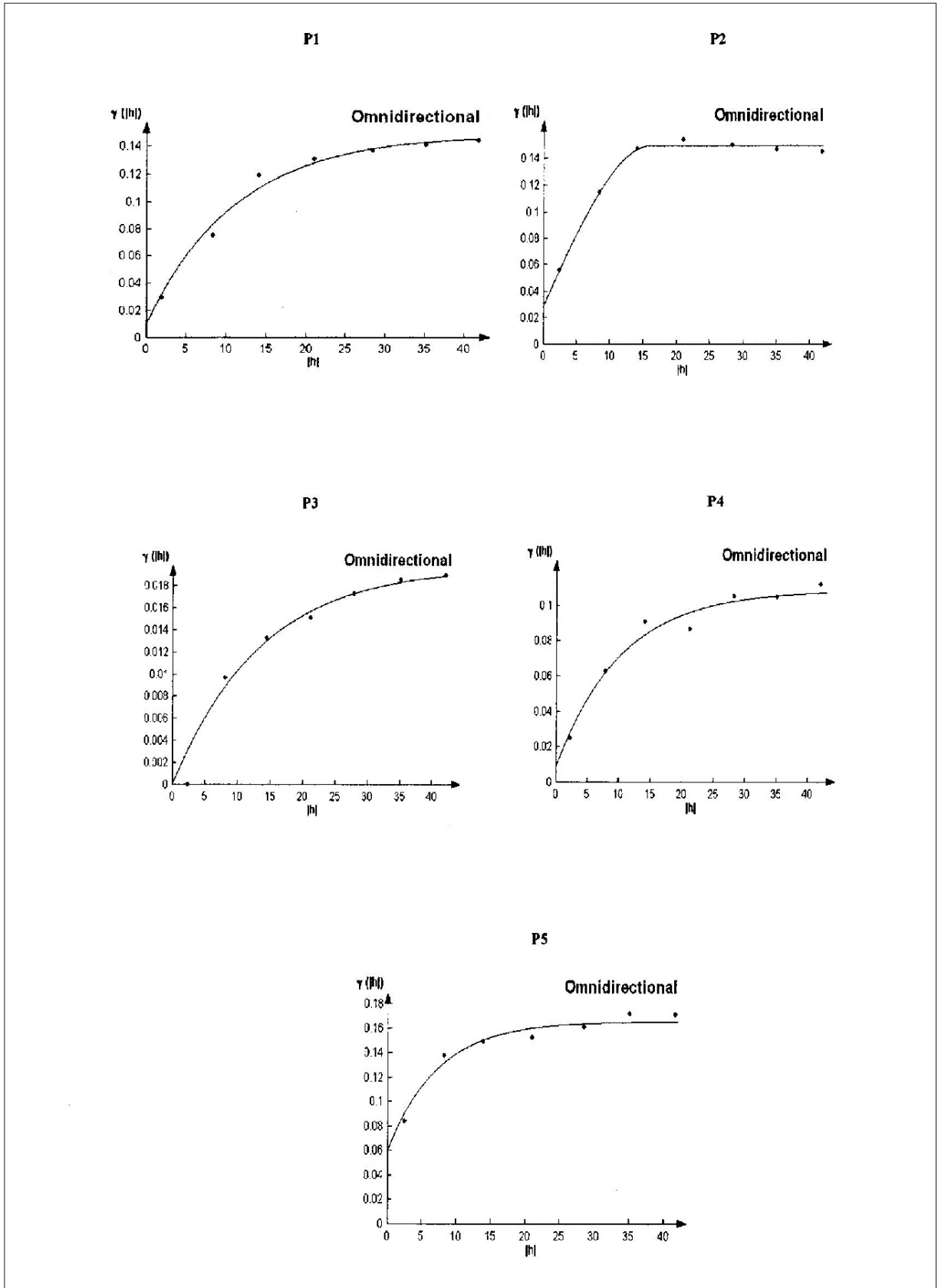
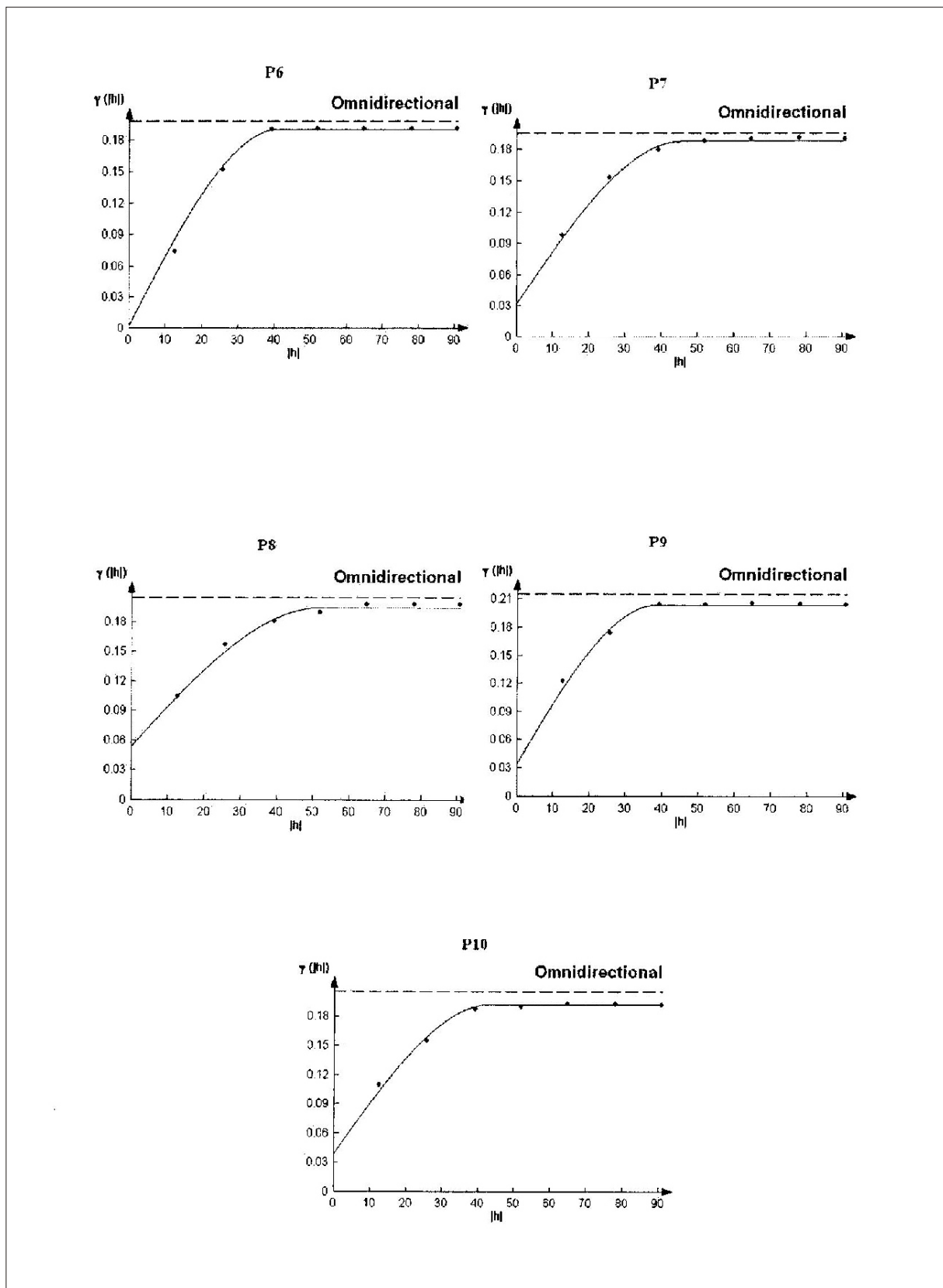


Figura 1. Semivariogramas de la distribución espacial del muérdago enano.



Continuación de la Figura 1.

Modelización y mapeo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.)

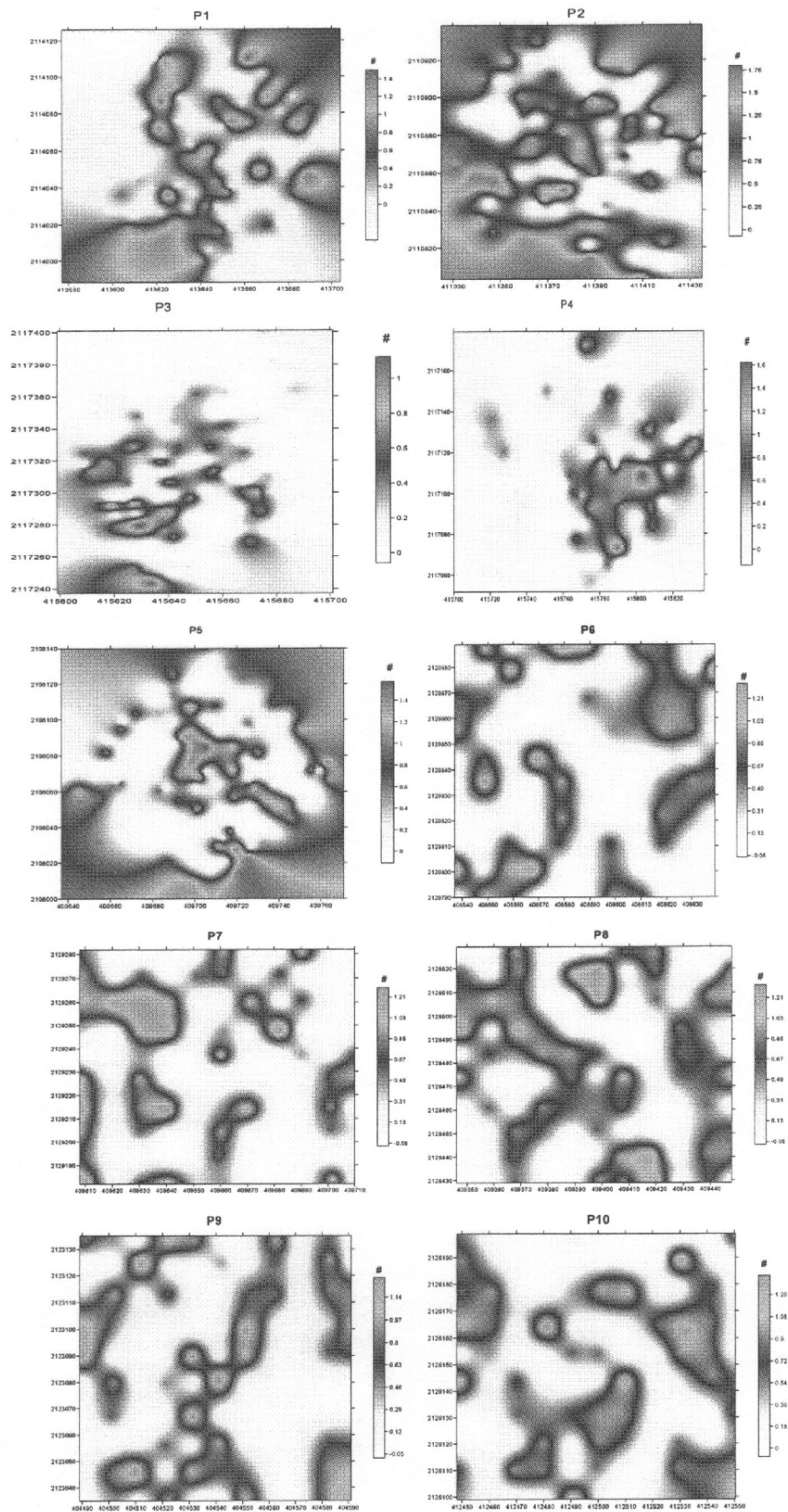


Figura 2. Mapas de densidad de las poblaciones del muérdago enano elaborados con el Krigado (Análisis Geostatístico) para cada una de las parcelas experimentales.

se observa una cierta relación entre el número de centros de agregación existentes y el promedio de muérdagos detectados en cada caso. A densidades mayores, mayor es la cantidad de centros de agregación detectados. La existencia de los mencionados centros de agregación confirman lo establecido con los índices I_a y J_a del SADIE y con el Análisis Geoestadístico para cada una de las parcelas experimentales. Además, los mapas elaborados confirman lo establecido con el índice J_a , cuyo valor respectivo indicó que en todas las parcelas experimentales existía más de un centro de agregación.

Algo debería determinarse en investigaciones posteriores es qué tan importante puede ser el efecto de la altitud y/o la ubicación de las parcelas, u otro factor no contemplado hasta el momento, sobre el comportamiento espacial de las poblaciones de muérdago enano.

Superficie Infestada (Mapas del Krigado)

Para conocer si las poblaciones de muérdago enano se distribuyen de forma global en las parcelas experimentales se calculó el porcentaje de superficie infestada en cada una de ellas.

En los mapas elaborados con el Krigado se observó que la superficie libre de infestación disminuyó de forma general conforme la densidad media era mayor. Por lo tanto, en las parcelas 2, 4 y 5 fue donde se detectó la menor superficie sin infestar y por el contrario en las parcelas 3, 6 y 7 la superficie sin infestar fue mayor. Los resultados del porcentaje de superficie infestada se concentraron en el cuadro 6.

El rango de superficie sin infestar fluctuó entre 30.3% y 10.8% del área total con un valor medio de 18.98%. También en estos mapas se observó que de manera general, en las parcelas con mayor densidad promedio la superficie infestada era mayor.

Es interesante resaltar que gracias a la detección de áreas libres de infestación se podría esta-

Cuadro 6. Porcentaje de superficie infestada y no infestada por el muérdago enano.

Parcelas	Krigado (Mapas)		Parcelas	Krigado (Mapas)	
	% infestado	% no infestado		% infestado	% no infestado
P1	86.9	13.1	P6	69.7	30.3
P2	89.2	10.8	P7	80.1	19.9
P3	70.1	29.9	P8	84.8	15.2
P4	68.6	31.4	P9	86.4	13.6
P5	89.1	10.9	P10	85.3	14.7

blecer la aplicación de métodos de control dirigidos hacia las zonas donde realmente existen poblaciones de muérdago enano y de este modo tener un ahorro económico y ambiental, al no dirigir de manera indiscriminada herbicidas en la región con el fin de disminuir las poblaciones de este parásito.

Estabilidad espacial y temporal (estimaciones con el SADIE y el Krigado)

Los resultados de la comparación entre las estimaciones de la distribución espacial de las poblaciones del muérdago enano, de cada parcela experimental elaboradas con el SADIE, demostraron que no existía estabilidad espacial y temporal a corto plazo entre los resultados hallados, ya que todos los valores de I_m fueron menores a 0.

Por otro lado, utilizando la prueba bivariable de Crámer-von Mises () para comparar las diferentes estimaciones de la distribución espacial del muérdago enano realizadas con el Krigado, tampoco se logró detectar que en alguna comparación no existiera diferencia no significativa entre algunas de las parejas de mapas comparadas, lo que indica que con base en esta prueba no se encontró estabilidad espacial y ni temporal del muérdago enano.

Los resultados sorprenden un poco, ya que debido al patrón de comportamiento establecido en este estudio pudiera existir algún tipo de estabilidad espacio-temporal. La razón de no ser así, puede estar en las dimensiones de las parcelas experimentales. Investigaciones posteriores con parcelas de mayor tamaño, podrían establecer resultados diferentes en este aspecto.

Conclusiones

1. Los índices de dispersión mostraron de manera general un comportamiento agregado de las poblaciones de muérdago enano.
2. Los métodos no espaciales presentaron serias deficiencias y limitaciones.
3. Los análisis con SADIE y Geoestadística presentaron un patrón espacial agregado, con las po-

blaciones distribuidas en varios centros de agregación y con un nivel de dependencia espacial alto, en general.

4. No se logró detectar estabilidad espacial y temporal de las poblaciones del parásito.

5. Se identificaron áreas libres de infestación lo que permitiría dirigir las medidas de control sobre áreas específicas de infestación.

Literatura citada

- Blom, E. y S. Fleisher. 2001. Dynamics in the spatial structure of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environ. Entomol.* 30 (2): 350-364.
- Cambardella, C.; T. Moorman; J. Novak; T. Parkin; D. Karlen; R. Turco y A. Konopka. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1501-1511.
- Chica O., M.; J. Delgado G. y E. Pardo I. 1995. *Introducción al análisis Geoestadístico de variables espaciales*. Omega. Logroño. 308 p.
- Chilés J., P. y P. Delfiner. 1999. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons. Nueva York. 695 p.
- Englund, E. y A. Sparks. 1988. GEO-EAS (*Geostatistical Environmental Assessment Software*) *User's Guide*. U.S. Environmental protection agency document EPA/600/4-88/033. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, NA, USA.
- González, C. E. 1984. Problemas de plagas y enfermedades del *Pinus radiata* D. Don., en la ciudad de México y áreas colindantes. *Ciencia Forestal SARH.* 49(9): 15-22.
- Isaaks, E. H. y R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press. Nueva York. 561 p.
- Isaaks, E. y M. Srivastava. 1988. Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology.* 20(4): 313 – 341.
- Journel, A. G. y C.J. Huijbregts. 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, London, Reino Unido. 600 p.
- Korie, S.; J. Perry; M. Mugglestone; S. Clark; C.F. Thomas y R. Mohamad. 2000. Spatiotemporal Association in beetle and virus count data. *Journal of Agricultural, Biological y Environmental Statics.* 5: 214-239.
- Matheron, G. 1962. *Traite de geostatistique appliquee*, tome 1 and 2, Memoires du bureau de recherches Geologiques Et minieres. Tecnip. Paris. 1962-3.
- Perry, J. 1995a. Spatial aspects of animal and plant distribution in patchy farmland habitats. En: *Ecology and Integrated Farming Systems*. Eds. D. M. Glen, M. A. Greaves, H. M. Anderson. Chichester, England. Wiley. pp. 221 – 242.
- _____. 1995 b. Spatial Analysis by Distance Indices. *Journal of Animal Ecology.* 64: 303-314.
- _____. 1998. Measures of spatial pattern for counts. *Ecology.* 79(3): 1008-1017.
- _____. E. Bell; R. Smith y I. Woiod. 1996. SADIE. Software to measure and model spatial pattern. *Aspects of Applied Biology.* 46: 95- 102.

- Perry, N. y Z. Klukowsky. 1997. Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. *VI Conferencia de la Sociedad de Biometría*. Córdoba, España. pp. 103-108.
- PROTIMBOS. 1972. Síntesis del Proyecto Nevado de Toluca; Reforestación a 8 años. PROTIMBOS. Estado de México. Julio. 34 p.
- Ramírez-Davila, J. F.; J.L. González-Andujar; R. Ocete y M.A.López. 2002. Descripción geoestadística de la distribución espacial de los huevos del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae), en viñedo: modelización y mapeo. *Boletín de Sanidad Vegetal-Plagas*. 28: 235-240.
- Ross, C. J. S. 1987. Maximum likelihood program. Rothamsted Experimental Station Harpenden. UK.
- Rossi, R; J. Mulla; G. Journel y H. Franz. 1992. Geostatistical Tools for Modeling and interpreting Ecological Spatial Dependence. *Ecological Monographs*. 62(2): 277-314.
- Samper, F. J. y J. Carrera. 1996. *Geoestadística: Aplicaciones a la Hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería. Barcelona. 484 p.
- Sciarretta, A.; P. Trematerra y Baumgärtner. 2001. Geostatistical análisis of *Cydia funebrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Pheromone trap catches at two spatial scales. *American Entomologist*. 47(3): 174-184.
- Sokal, R. y F. Rohlf. 1995. *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. Freeman, New York. 356 p.
- Speight, M.; T. Hails; M. Gilbert y A. Foggo. 1998. Horse chestnut scale (*Pulvinaria regalis*) (Homoptera: Coccidae) and urban host tree environment. *Ecology*. 79(5): 1503- 1513.
- Syrjala, E. 1996. A statical test for a difference between the spatial distributions of two population. *Ecology*. 77(1): 75-80.
- Verduzco, J. 1976. *Protección Forestal*. Ed. Patena. 369 p.