

MODELAJE ESPACIAL DE LA INFLUENCIA DE COMBUSTIBLES FORESTALES SOBRE LA REGENERACIÓN NATURAL DE UN BOSQUE PERTURBADO

SPATIAL MODELING OF THE INFLUENCE OF FOREST FUELS ON NATURAL REGENERATION OF A DISTURBED FOREST

J. Germán Flores-Garnica y D. Arturo Moreno-González

Centro de Investigaciones del Pacífico Centro (INIFAP). Parque Los Colomos s/n. Colonia Providencia. 44660. Guadalajara, Jalisco. (german@cirpac.inifap.conacyt.mx)

RESUMEN

Los combustibles forestales son uno de los principales factores que determinan el establecimiento y el desarrollo adecuado de la regeneración forestal. Por tanto, en este estudio se modela la relación espacial entre la presencia de combustibles forestales y el establecimiento de regeneración. Los datos se obtuvieron de 79 sitios de muestreo distribuidos sistemáticamente en una cuenca hidrográfica de 1400 ha en Tapalpa, Jalisco, México. Con base en su dominancia, se definieron seis clases de regeneración. Se probaron y compararon tres alternativas de interpolación: Distancia Inversa Ponderada [DIP], Kriging Ordinario (interpolación estocástica simple) y Cokriging (interpolación estocástica multivariada). Para Cokriging se usaron nueve variables de combustibles. La regeneración de arbolado fue representada por individuos entre 0.30 y 2.50 m de altura. Las técnicas geostatísticas (principalmente Cokriging) presentaron los mejores resultados, aunque en un caso fue mejor la DIP. No se debe usar una sola técnica de interpolación para todos los casos. Los resultados apoyarán estrategias de manejo de combustibles forestales.

Palabras clave: Cokriging, distancia inversa, interpolación, Kriging, regeneración forestal.

INTRODUCCIÓN

Frecuentemente hay problemas para la regeneración natural en áreas forestales con aprovechamiento maderable. Esto repercute en: 1) la alteración de planes de manejo; 2) la necesidad de inversiones extraordinarias; 3) la alteración de la continuidad del ecosistema forestal. Los combustibles forestales son uno de los principales factores que determinan el establecimiento y el desarrollo adecuado de la regeneración natural (Flores y Benavides, 1993). Aunque los combustibles protegen al suelo, es necesario que la capa que forman en el piso forestal permita que la semilla esté en contacto directo con el suelo y pueda establecerse la plántula (Flores, 1996). Por tanto, se requieren estrategias

ABSTRACT

Forest fuels are one of the main factors that define an adequate establishment and development of forest regeneration. Therefore, in this study, the spatial relationship between regeneration, establishment and presence of forest fuels is modeled. The data was obtained from 79 sample plots systematically distributed in a watershed of 1400 ha at Tapalpa, State of Jalisco, México. Based on dominance, six regeneration classes were defined. Three interpolation alternatives were tested and compared: Inverse Distance Weighting (IDW), Ordinary Kriging (simple stochastic interpolation) and Cokriging (multivariate stochastic interpolation). For Cokriging, nine fuel variables were defined. Individuals between 0.3 and 2.5 m of height represented natural tree regeneration. Geostatistics techniques (mainly Cokriging) showed the best results; however, in one case IDW was better. No single interpolation technique has to be used in all situations. The results will support fuel management strategies.

Key words: Cokriging, inverse distance, interpolation, Kriging, forest regeneration.

INTRODUCTION

Frequently, there are problems for natural regeneration in forest areas under lumbering. This has repercussions in: 1) the alteration of management plans; 2) the need for extraordinary investments; 3) the alteration of the continuity of the forest ecosystem. Forest fuels are one of the main factors that determine the adequate establishment and development of natural regeneration (Flores and Benavides, 1993). Although the fuels protect the soil, it is necessary for the layer they form on the forest floor to allow the seed to be in direct contact with the soil and to permit the establishment of the seedlings (Flores, 1996). Therefore, fuel management strategies that favor conditions for the adequate establishment of natural regeneration are required. For this purpose, the fuels can be characterized and their spatial distribution known (fuel maps). However, the generation of forest fuel maps has been costly and difficult (Flores, 2001). In fact, the definition of the spatial

Recibido: Septiembre, 2003. Aprobado: Marzo, 2005.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 39: 339-349. 2005.

de manejo de combustibles que favorezcan condiciones para el adecuado establecimiento de la regeneración natural. Para ello se puede caracterizar los combustibles y conocer su distribución espacial (mapas de combustibles). Sin embargo, la generación de mapas de combustibles forestales ha sido costosa y difícil (Flores, 2001). De hecho, la definición de la distribución espacial de los combustibles forestales es uno de los retos más complicados para los científicos forestales (Flores, 2001).

En teoría se espera que tarde o temprano se presente un incendio en las áreas con alta carga de combustibles que podría propiciar un alto nivel de regeneración. Un estudio sobre los regímenes del fuego en el área aportaría información valiosa para apoyar estas interpretaciones. Además, debe estudiarse la función ecológica del fuego en sus relaciones con la regeneración, lo cual podrá ser más provechoso si se considera una perspectiva espacial como en este trabajo. En estos estudios deberá incluirse la temporalidad y la distribución de los disturbios (básicamente cortas e incendios), así como la presencia de zacates y hierbas (que compiten con la regeneración).

En consecuencia, se requieren opciones para determinar la variación espacial de los combustibles forestales, como las técnicas de interpolación usadas con éxito en la minería, la meteorología o las ciencias de suelos (Laslett *et al.*, 1987; Webster y Oliver, 1989). Sin embargo en el ámbito forestal su uso ha sido esporádico (Hunner, 2000). El presente estudio muestra los resultados del uso de estas técnicas para determinar la relación espacial que potencialmente existe entre la presencia de combustibles forestales y la regeneración natural. Además, con base en las características del complejo de combustibles, se buscó determinar las mejores condiciones para el establecimiento y desarrollo inicial de la regeneración.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se ubica en la cuenca hidrológica El Carrizal ubicada aproximadamente 6 km al suroeste de Tapalpa, Jalisco (Figura 1). La altitud varía de 2060 a 2420 m. El clima de la zona está clasificado como templado subhúmedo, la oscilación térmica es 6 °C y va de 19.3 °C en mayo a 13.3 en enero y la precipitación media anual es 901 mm (Benavides, 1987)². La superficie arbolada de la cuenca es 912 ha, caracterizada por pendientes de 5 a 65%. Las principales especies arbóreas son *Pinus devoniana*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *P. leiophylla*, *Quercus rugosa*, *Q. resinosa* y *Alnus arguta*. La cuenca ha sido perturbada por varias causas, como aprovechamientos maderables,

distribución de forest fuels is one of the most complicated challenges for forestry scientists (Flores, 2001).

In theory, a forest fire is expected sooner or later in the areas with a high amount of fuels which could propitiate a high level of regeneration. A study of the fire regimens in the area would provide valuable information for supporting these interpretations. Furthermore, studies should be made of the ecological role of fire in its relationship with regeneration, which could be more useful if a spatial perspective is considered such as the one in this work. These studies should include the temporality and distribution of the disturbances (basically logging and fires), as well as the presence of grasses and weeds (which compete with regeneration).

As a consequence, some options are required to determine the spatial variation of the forest fuels, such as the interpolation techniques which have been used successfully in mining, meteorology, or soil sciences (Laslett *et al.*, 1987; Webster and Oliver, 1989). However, in the area of forestry, its use has been sporadic (Hunner, 2000). The present study shows the results of the use of these techniques to determine the spatial relationship which potentially exists between the presence of forest fuels and natural regeneration. Furthermore, based on the characteristics of the fuel complex, an attempt was made to determine the best conditions for the establishment and initial development of the regeneration.

METHODOLOGY

Area of study

The area of study is located in the El Corral watershed, situated approximately 6 km southwest of Tapalpa, Jalisco (Figure 1). The altitude varies from 2060 to 2420 m. The climate of the zone is classified as subhumid temperate, the thermal oscillation is 6 °C going from 19.3 °C in May to 13.3 in January, and the mean annual precipitation is 901 mm (Benavides, 1987)². The treed surface of the watershed is 912 ha, characterized by slopes from 5 to 65%. The principal forest species are *Pinus devoniana*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *P. leiophylla*, *Quercus rugosa*, *Q. resinosa* and *Alnus arguta*. The watershed has been disturbed due to various causes, such as logging, tapping, pests and fires. The first two occur each year, whereas the other two occur in periods of 3 to 5 years (Flores and Benavides, 1993). The intensity and frequency of these disturbances has not been documented.

Sampling design

The distribution of the sampling sites was made systematically, in a grid 250 m by 500 m. In all, 79 circular sites of 200 m² were

² Benavides S., J. D. 1987. Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio del *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el A. D. F. Tapalpa, Estado de Jalisco. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 80 p.

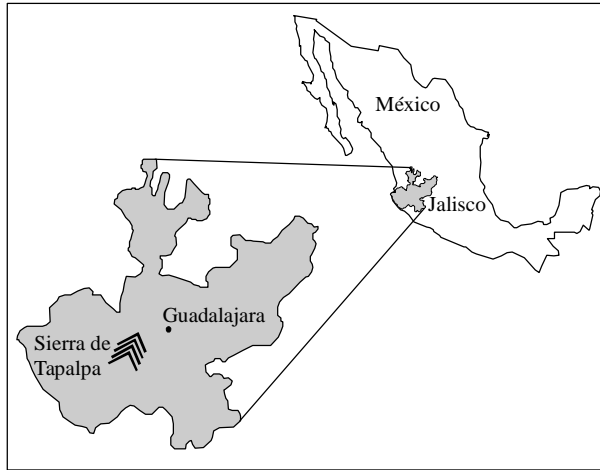


Figura 1. Ubicación aproximada de la sierra de Tapalpa, Jalisco, donde se localiza la cuenca de El Carrizal.
Figure 1. Approximate location of the sierra of Tapalpa, Jalisco, where the El Carrizal watershed is located.

resinación, plagas e incendios. Las dos primeras ocurren cada año, mientras que las dos últimas en periodos de 3 a 5 años (Flores y Benavides, 1993). La intensidad y frecuencia de estos disturbios no está documentada.

Diseño de muestreo

La distribución de los sitios de muestreo se hizo en forma sistemática, en una cuadrícula de 250 m por 500 m. En total se muestrearon 79 sitios circulares, de 200 m². La ubicación geográfica de cada sitio se determinó a través de un sistema de posicionamiento global. A partir del centro del sitio se trazaron diferentes distancias radiales (Figura 2). La primera a 1.27 m (área circular de 5 m²), para contar las plántulas de pino emergidas en los últimos tres años. La segunda distancia radial fue 5.64 m (100 m²), donde se contaron los individuos de tipo brinzal (de pino y de latifoliadas), separándolas por especie en tres categorías de altura. Las especies encontradas por orden de importancia en referencia a su densidad relativa fueron: *Pinus devoniana*, *P. oocarpa*, *P. leiophylla*, *P. lumholtzii*, *P. douglasiana*, *Quercus rugosa*, *Q. resinosa* y *Alnus arbuta*.

Los combustibles forestales se evaluaron y muestrearon con base en la metodología de Brown *et al.* (1982). Las variables de combustibles fueron: PROF-HU, profundidad de humus (cm); PROF-HO/HU, profundidad de hojarasca y humus (cm); PE-1HR, peso de combustibles con tiempo de retardo de 1 h (t⁻¹ ha); PE-10HR, peso de combustibles con tiempo de retardo de 10 h (t⁻¹ ha); PE-100HR, peso de combustibles con tiempo de retardo de 100 h (t⁻¹ ha); FIRMES, peso de combustibles firmes >7.5 cm en diámetro (t⁻¹ ha) y PODRIDOS, peso de combustibles podridos > 7.5 cm en diámetro (t⁻¹ ha). En la tercera distancia radial de 7.98 m (200 m²), se contaron los individuos de regeneración correspondientes a la categoría de brinzales (entre 0.60 y 2.5 m) (Moreno *et al.*, 1993), por clase diamétrica para cada especie arbórea.

sampled. The geographic location of each site was determined through a system of global positioning. From the center of the site, different radial distances were fixed (Figure 2). The first distance was fixed at 1.27 m (circular area of 5 m²), to count the pine seedlings emerged in the last three years. The second radial distance was 5.64 m (100 m²), where the brinzal type (pine and latifoliated) individuals were counted, and separated according to species in three height categories. The species that were found by order of importance in reference to their relative density were: *Pinus devoniana*, *P. oocarpa*, *P. leiophylla*, *P. lumholtzii*, *P. douglasiana*, *Quercus rugosa*, *Q. resinosa* and *Alnus arbuta*.

The forest fuels were evaluated and sampled based on the methodology of Brown *et al.* (1982). The fuel variables were: PROF-HU, humus depth (cm); PROF-HO/HU, depth of duff and humus (cm), PE-1HR, weight of fuels with time lag of 1 h (t⁻¹ ha); PE-10HR, weight of fuels with time lag of 10 h (t⁻¹ ha); PE-100 HR, weight of fuels with time lag of 100 h (t⁻¹ ha); FIRMES (SOUND), weight of firm fuels >7.5 cm in diameter (t⁻¹ ha) and PODRIDOS (ROTTEN), weight of decayed fuels >7.5 cm in diameter (t⁻¹ ha). In the third radial distance of 7.98 m (200 m²), a count was made of the regeneration individuals corresponding to the category of brinzals (0.60 to 2.5 m) (Moreno *et al.*, 1993), by diametric class for each tree species.

Although initially three diametric categories and three dominant species were considered, sufficient information was available only for the following classes of brinzals: 1) individuals of dominant species (with respect to their primary height (with respect to their relative density) with height <60 cm (B-1A)(mainly *Pinus devoniana*); 2) individuals of primary dominant species with a height between

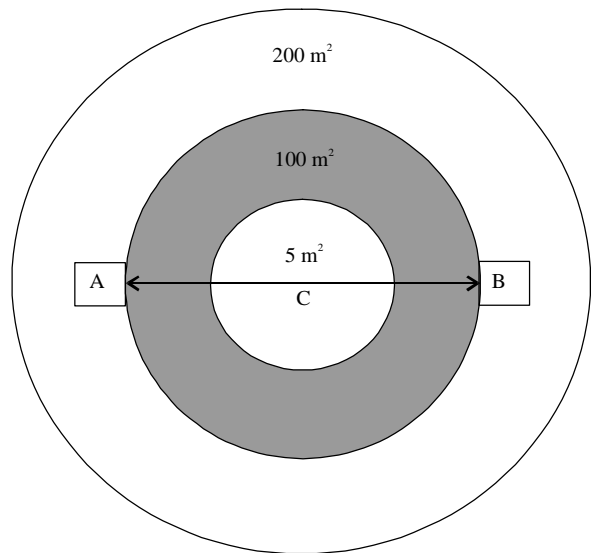


Figura 2. Diseño del sitio de muestreo basado en sitios circulares concéntricos: A y B [30×30 cm] representa la muestra de combustibles finos (hojarasca y humus); C [dos transectos de 5.64 m] es el material leñoso.
Figure 2. Design of the sampling site based on concentric circular sites: A and B [30×30 cm] represent the sample of fine fuels litter (duff and humus); C [two transects of 5.64 m] is the woody material.

Aunque inicialmente se consideraron tres categorías diamétricas y tres especies dominantes, sólo se tuvo suficiente información para las siguientes clases de brinzales: 1) individuos de especies dominantes (en relación con su altura primaria (con relación a su densidad relativa) con altura <60 cm (B-1A)(principalmente *Pinus devoniana*); 2) individuos de especies dominantes primarias con altura entre 0.6-2.5 m (B-1B) (*Pinus devoniana*); 3) individuos de especies dominantes, todas las alturas (B1); 4) individuos de especies co-dominantes primarias, todas las alturas (B2) (*Pinus oocarpa*); 5) individuos de especies co-dominantes secundarias, todas las alturas (B3) (*Pinus oocarpa* y *Pinus leiophylla*); 6) todos los individuos considerados como brinzales (BT). No se encontró ninguna representación de regeneración natural en condición muerta.

Técnicas de interpolación

Se usaron tres técnicas de interpolación:

Distancia Inversa Ponderada (DIP)

Donde el valor de un punto no muestreado es el promedio de la distancia inversa ponderada de los valores de los puntos muestreados que se encuentran alrededor (Burrough y McDonnell, 1998), lo cual se define con la siguiente función lineal (Flores, 2001):

$$\hat{\beta} * \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \beta \mathbf{a}_{x_i} \mathbf{f}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

donde $\hat{\beta} * \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f}$ es el valor estimado en un sitio no muestreado en la ubicación x_0 ; $\beta(x_i)$ es el valor observado en la ubicación x_i ; d_i son las distancias de cada una de las sitios observados hacia el punto no muestreado; p es el exponente del valor de la distancia; n es el número de sitios muestreados.

Kriging Ordinario (KO)

Es el mejor estimador lineal insesgado (Hunner, 2000; Isaaks y Srivastava, 1989): 1) lineal, pues sus estimadores son combinaciones lineales ponderadas de los datos disponibles; 2) insesgado, ya que tiene una media residual igual a cero; 3) mejor, porque minimiza la varianza de los errores. La siguiente fórmula se utiliza para calcular los estimadores de KO (Hunner, 2000; Isaaks y Srivastava, 1989):

$$\hat{\rho}_{OK} \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \lambda_i * \rho \mathbf{a}_{x_i} \mathbf{f}$$

donde $\hat{\rho}_{OK} \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f}$ es la estimación de Kriging ordinario en la ubicación x_0 ; λ_i es el peso para el punto de muestreo i en la ubicación x_i ; $\rho(x_i)$ es el valor de la variable ρ , para un punto muestreado i , en la ubicación x_i ; n es el número de puntos muestreados. El proceso general

0.6-2.5 m (B-1B)(*Pinus devoniana*); 3) individuals of dominant species, all heights (B1); 4) individuals of primary co-dominant species, all heights (B2) (*Pinus oocarpa*); 5) individuals of secondary co-dominant species, all heights (B3) (*Pinus oocarpa* and *Pinus leiophylla*); 6) all the individuals considered to be brinzals (BT). No representation of natural regeneration was found in dead condition.

Interpolation techniques

Three interpolation techniques were used:

Inverse Distance Weighting (IDW)

Where the value of an unsampled point is the average of the inverse distance weighting of the values of the sampled points which are found in the surroundings (Burrough and McDonnell, 1998), which is defined by the following linear function (Flores, 2001):

$$\hat{\beta} * \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \beta \mathbf{a}_{x_i} \mathbf{f}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

where $\hat{\beta} * \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f}$ is the estimated value in an unsampled site in the location x_0 ; $\beta(x_i)$ is the observed value in the location x_i ; d_i are the distances of each of the sites observed towards the unsampled point; p is the exponent of the distance value; n is the number of sites sampled.

Ordinary Kriging (OK)

This is the best unbiased linear estimator (Hunner, 2000; Isaaks and Srivastava, 1989): 1) linear, given that its estimators are weighted linear combinations of the available data; 2) unbiased, as it has a residual medium equal to zero; 3) the best, because it minimizes the variance of the errors. The following formula is used to calculate the OK estimators (Hunner, 2000; Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\hat{\rho}_{OK} \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \lambda_i * \rho \mathbf{a}_{x_i} \mathbf{f}$$

where $\hat{\rho}_{OK} \mathbf{a}_{x_0} \mathbf{f}$ is the ordinary Kriging estimation in the location x_0 ; λ_i is the weight for the sampling point i in the location x_i ; $\rho(x_i)$ is the value of the variable ρ , for a sampled point i , in the location x_i ; n is the number of sampled points. The general process of ordinary Kriging begins with the data of the samples, which are used to calculate the empirical variogram. Afterwards, a model is adjusted to the empirical variogram, whose values of range, asymptote (sill) and nugget effect are used to calculate the covariance defined by the points observed from each other, and with respect to the point to be estimated. This covariance helps to weight the grouping of the observed points, which is added to the weighting based on the inverse distance criteria.

de Kriging ordinario empieza con los datos de la muestra, los cuales se usan para calcular el variograma empírico. Posteriormente se ajusta un modelo al variograma empírico, cuyos valores de rango, asintota (sill) y efecto pepita (nugget) se usan para calcular la covarianza definida por los puntos observados entre sí, y respecto al punto a estimar. Esta covarianza ayuda a ponderar la agrupación de los puntos observados, lo cual se adiciona a la ponderación basada en el criterio de distancia inversa.

Cokriging

Las estimaciones se derivan usando una combinación lineal de los datos de una variable primaria con los de variables auxiliares (Flores, 2001). Su uso requiere la generación de variogramas para la variable primaria y las variables auxiliares, así como de los correspondientes variogramas-cruzados. Las estimaciones se calculan con la fórmula siguiente (Hunner 2000):

$$\hat{\alpha}_{CK} \mathbf{d}_{x_0} \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \lambda_i^a * \alpha \mathbf{d}_{x_i} \mathbf{f} + \sum_{j=1}^m \lambda_j^w * W \mathbf{C}_{x_j} \mathbf{h}$$

donde, $\hat{\alpha}_{CK} \mathbf{d}_{x_0} \mathbf{f}$ es la estimación Cokriging en el sitio x_0 ; λ_i^a son los pesos para el número n de valores de la variable primaria α ; λ_j^w son los pesos para el número m de valores de la variable primaria W ; $\alpha(x_i)$ es el valor de la variable primaria α , para un punto muestreado i , en la ubicación x_i ; $W(x_j)$ es el valor de la variable secundaria W , para un punto muestreado j , en la ubicación x_j . Antes de estimar la correlación-cruzada, se seleccionaron variables secundarias con base en el coeficiente de correlación entre ellas y cada una de las variables primarias. El programa de cómputo usado en este proceso fue S-PLUS® (Insightful Corp., 2002).

Validación

Para evaluar la efectividad de las técnicas de interpolación se usó la técnica de validación-cruzada (Goovaerts, 1997). Posteriormente se calcularon las diferencias (residuales o errores [Hunner, 2000]) entre los valores interpolados y los valores observados. Se usó como criterio de selección el menor cuadrado medio del error (CME), resultante de la comparación de los valores observados con los valores estimados. Este criterio se conoce también como error cuadrático medio de un estimador, el cual incorpora el sesgo [$b^2(\hat{\alpha})$], y la dispersión de la distribución del error [$V(\hat{\alpha})$]. Es decir, CME es igual a la varianza del error más el sesgo al cuadrado del error, y se calcula mediante la siguiente expresión (Armstrong, 1998):

$$CME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r^2$$

donde n es el número de puntos de muestreo, r son los residuales (errores de estimación). Se usa el menor CME posible como criterio de selección (Al-Subaihi, 2000). No se considera la variación muestral

Cokriging

The estimations are derived using a linear combination of the data of a primary variable with those of auxiliary variables (Flores, 2001). Its use requires the generation of variograms for the primary variable and the auxiliary variables, as well as the corresponding cross-variograms. The estimations are calculated with the following formula (Hunner, 2000):

$$\hat{\alpha}_{CK} \mathbf{d}_{x_0} \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \lambda_i^a * \alpha \mathbf{d}_{x_i} \mathbf{f} + \sum_{j=1}^m \lambda_j^w * W \mathbf{C}_{x_j} \mathbf{h}$$

where $\hat{\alpha}_{CK} \mathbf{d}_{x_0} \mathbf{f}$ is the Cokriging estimation in the site x_0 ; λ_i^a are the weights for the number n of values of the primary variable α ; λ_j^w are the weights for the number m of values of the primary variable W ; $\alpha(x_i)$ is the value of the primary variable α , for a sampled point i , in the location x_i ; $W(x_j)$ is the value of the secondary variable W , for a sampled point j , in the location x_j . Before estimating the cross-correlation, secondary variables were selected based on the coefficient of correlation between these and each one of the primary variables. The computer program used in this process was S-PLUS® (Insightful Corp., 2002).

Validation

To evaluate the effectiveness of the interpolation techniques, the cross-validation technique was used (Goovaerts, 1997). Next, the differences were calculated (residuals or errors [Hunner, 2001]) between the interpolated values and the observed values. The selection criteria consisted of the least mean square of the error (MSE), resulting from the comparison of the observed values and the estimated values. This criteria is also known as mean square error of an estimator, which incorporates the bias [$b^2(\hat{\alpha})$], and the dispersion of the distribution of the error [$V(\hat{\alpha})$]. That is, MSE is equal to the variance of the error plus the squared bias of the error, and is calculated by means of the following expression (Armstrong, 1998):

$$CME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r^2$$

where n is the number of sampling points, r are the residuals (estimation errors). The least possible MSE should be used as selection criteria (Al-Subaihi, 2000). Neither the sample variation nor the variation inherent to the phenomenon are considered, given that the estimations are local and not populational.

RESULTS AND DISCUSSION

Contrary to what was expected, there was not much natural regeneration in the form of seedling (<30 cm height) (an average of 253 seedlings ha⁻¹, with standard deviation = 1372.52), found mainly in the northern part

ni la inherente al fenómeno, ya que las estimaciones son locales y no poblacionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contrario a lo esperado, no hubo mucha regeneración natural en forma de plántula (<30 cm altura) (253 plántulas ha⁻¹ en promedio, con desviación estándar=1372.52), encontrándose principalmente en la parte norte de la cuenca. Esta distribución coincide con la ubicación del arbolado de mayores dimensiones (diámetro medio 32.52 cm y altura media 17.60 m). En estas áreas también se ubican, aunque no en forma única, altas densidades de arbolado de pino (169.20 árboles ha⁻¹). Dada la poca presencia de plántulas menores a 30 cm, se trabajó con la regeneración entre 0.60 y 2.5 m de altura (brinzal) (525.32 árboles ha⁻¹).

Las variables de combustibles seleccionadas que mejor correlación presentaron (independientemente de su posición) con cada variable de regeneración (clases de brinzales) fueron: PROF-HU, PROF-HO/HU, PE-1HR y PODRIDOS (Cuadro 1).

Como base de los procesos de Kriging y Cokriging, se definieron los variogramas correspondientes a las clases de brinzales. Las gráficas resultantes se muestran en la Figura 3, donde se observa una baja autocorrelación espacial. Esta condición es más marcada en la variable B3, donde la varianza es constante sin importar la distancia de separación de los sitios muestreados. Los modelos que mejor ajuste tuvieron a la distribución de semivarianzas, que definen los variogramas experimentales, fueron los correspondientes a las variables B-1A y B-1B. Esos modelos muestran un efecto pepita (nugget) (Isaaks y Srivastava, 1989) relativamente menor. La distancia máxima donde se tuvo autocorrelación fue alrededor de 1300 m. La mayoría de los variogramas se ajustaron a modelos esféricos, excepto B2 (exponencial) y B3 (lineal).

Los variogramas de combustibles se usaron para apoyar las correlaciones-cruzadas (Cokriging). Al igual que en las variables de regeneración, las variables de combustibles presentan una baja definición en la variabilidad espacial. En todos los casos el efecto pepita es proporcionalmente muy marcado, lo cual no permite definir bien el grado de autocorrelación en distancias menores. No obstante, es posible apreciar que estas variables definen su máxima distancia de autocorrelación alrededor de 1800 m. Los modelos que mejor se ajustaron a la distribución de los variogramas experimentales de los combustibles fueron en su mayoría exponenciales, excepto para el caso de los combustibles PODRIDOS.

Para realizar las estimaciones de las variables de regeneración a través del proceso Cokriging, se definieron los variogramas cruzados correspondientes. En la Figura 4

of the watershed. This distribution coincides with the location of the stand of greatest dimensions (mean diameter 32.52 cm and mean height 17.60 m). Also located in these areas, although not exclusively, are high density pine stands (169.20 trees ha⁻¹). Given the scarcity of seedlings under 30 cm, the regeneration used was between 0.60 and 2.5 cm height (brinzal) (525.32 trees ha⁻¹).

The variables of fuels selected that presented the best correlation (independently of their position) with each variable of regeneration (classes of brinzals) were: PROF-HU, PROF-HO/HU, PE-1HR and PODRIDOS (ROTTEN) (Table 1).

As a base of the Kriging and Cokriging processes, the variograms corresponding to the classes of brinzals were defined. The resulting graphs are shown in Figure 3, where a low spatial correlation is observed. This condition is more pronounced in the variable B3, where the variance is constant regardless of the distance of separation of the sampled sites. The models which had the best fit to the distribution of semivariances, that define the experimental variograms, were those corresponding to the variables B-1A and B-1B. Those models show a relatively lower nugget effect (Isaaks and Srivastava, 1989). The maximum distance where there was autocorrelation was around 1300 m. The majority of the variograms were adjusted to spherical models, except B2 (exponential) and B3 (linear).

The variograms of fuels were used to support the cross-correlations (Cokriging). As with the regeneration variables, the fuel variables present a low definition in the spatial variability. In all cases the nugget effect is proportionally very pronounced, which does not allow a good definition of the degree of autocorrelation in smaller distances. However, it is possible to notice that these variables define their maximum distance of autocorrelation around 1800 m. The majority of models

Cuadro 1. Estadísticos definidos por la relación entre las variables de regeneración y cargas de combustibles.

Table 1. Statistics defined by the relationship between the variables of regeneration and the fuel loadings.

Clase de brinzal	Tipo de combustible	CR	EECR	COV	CC
B-1A	PE-1HR	22.87	23.52	82.93	0.11
B-1B	PROF-HU	-18.91	10.55	-20.06	-0.20
B1	PE-1HR	72.88	33.36	264.24	0.24
B2	PODRIDO	-1.35	1.37	-185.4	-0.11
B3	PODRIDO	-1.21	1.11	-165.66	-0.12
BT	PROF-HU	-156.56	67.2	-166.07	-0.26

CR = coeficiente de regresión; COV = covarianza; EECR = error estándar de CR; CC = coeficiente de correlación.

PE-1HR = peso de combustible y 1 h tiempo de retardo; PROF-HU = profundidad de humus; PODRIDO = peso de combustibles podridos.

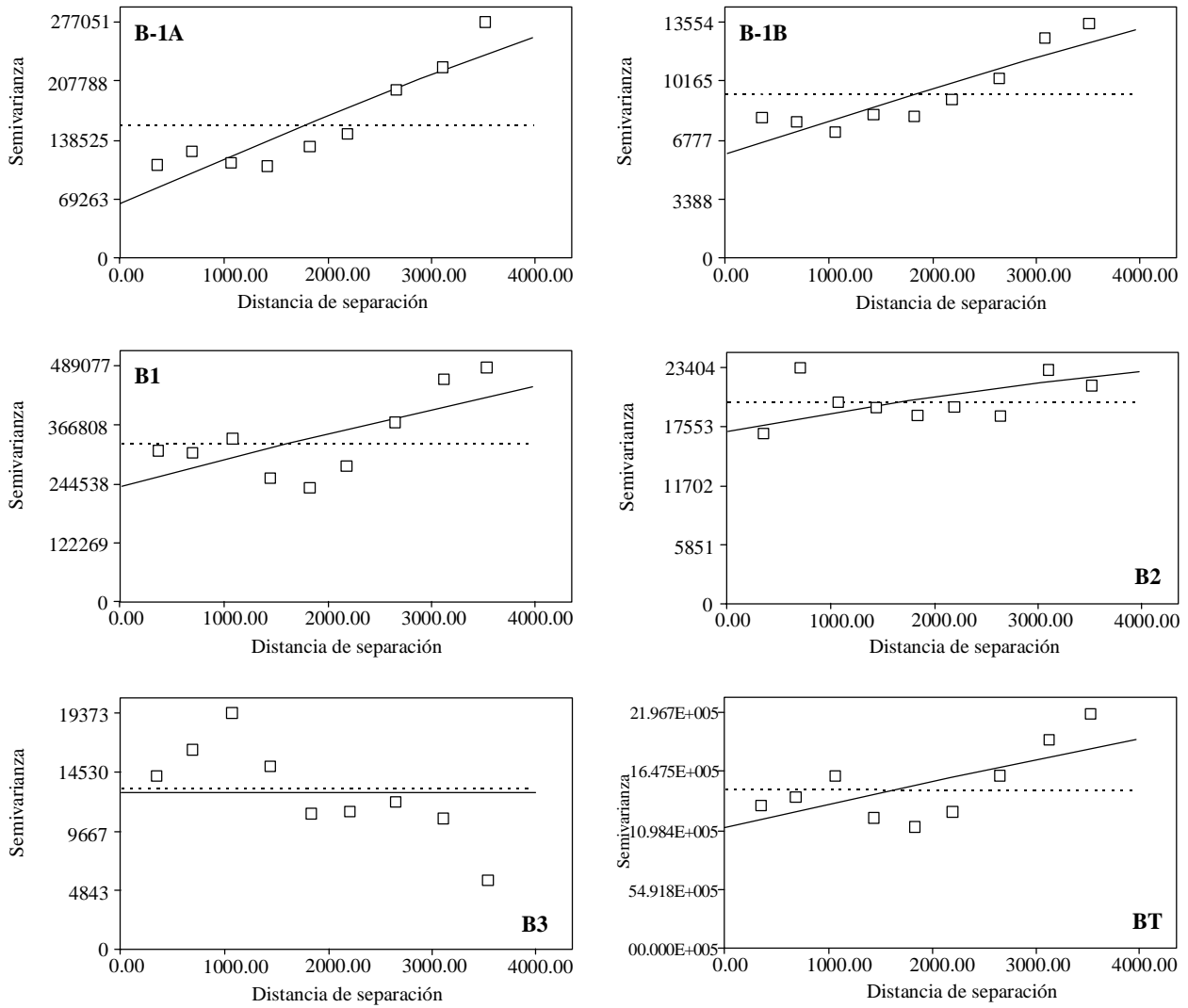


Figura 3. Variogramas de las autocorrelaciones espaciales de las variables de regeneración. La línea continua muestra el modelo de ajuste, la línea punteada muestra el nivel de la varianza (semivarianza) de la población.
Figure 3. Variograms of the spatial autocorrelations of the regeneration variables. The continuous line shows the fitted model, the dotted line shows the level of variance (semivariance) of the population.

se muestran los variogramas cruzados con mejores resultados en la estimación (menor CME). Los variogramas cruzados que presentaron una distribución espacial más definida en distancias cortas, tuvieron el menor CME de todas las estimaciones. Tal es el caso de la relaciones B-1A/PE-1HR y B-1B/PROF-HU, pero esto no se cumple para la relación BT/PROF-HU donde hubo poca dispersión en las distancias cortas, definiéndose gráficamente un buen ajuste (Stein, 1999). La relación B3/PODRIDOS mostró una gran dispersión de la variabilidad en todas las distancias de separación y, por tanto, el modelo de ajuste no fue suficiente para mejorar las estimaciones en comparación con las otras técnicas. Los modelos esféricos y exponenciales se ajustaron mejor a los

which best adjusted to the distribution of the experimental variograms of the fuels were exponential, except in the case of the PODRIDOS (ROTTEN) fuels.

In order to carry out the estimations of the regeneration variables by means of the Cokriging process, the corresponding cross variograms were defined. The cross variograms with best results in the estimation (least MSE) are shown in Figure 4. The cross variograms which presented a spatial distribution that was more defined in short distances, had the lowest MSE of all the estimations. Such is the case of the ratios B-1A/PE-1HR and B-1B/PROF-HU, but this is not fulfilled for the ratio BT/PROF-HU, where there was little dispersion in the short distances, graphically defining a good fit (Stein, 1999).

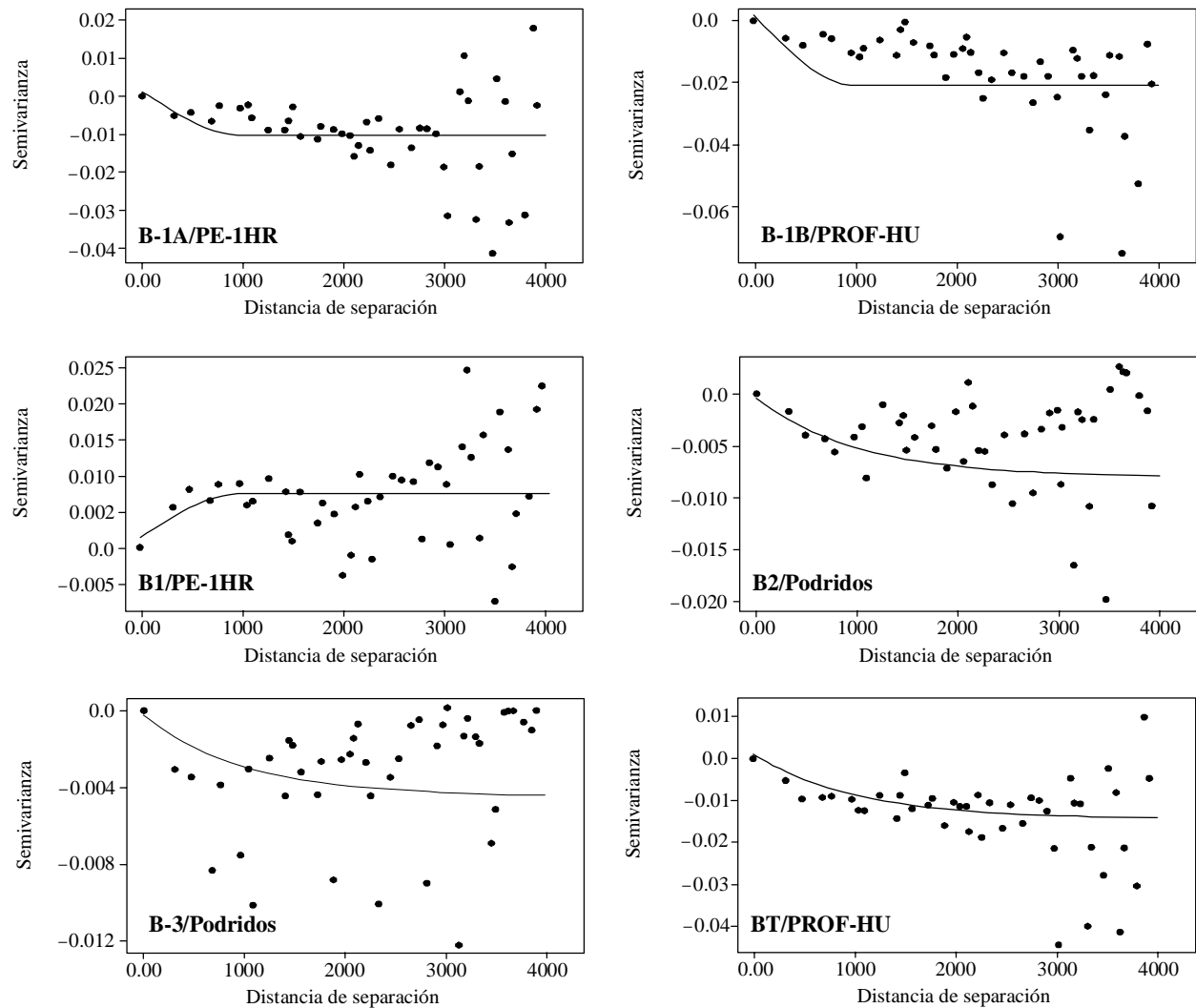


Figura 4. Variogramas cruzados de las correlaciones espaciales entre regeneración y combustibles que resultaron con el menor cuadrado medio del error. La línea continua muestra el modelo de ajuste.
Figure 4. Cross-variograms of the spatial correlations between regeneration and fuels which resulted with the least mean square error. The continuous line shows the fitted model.

variogramas cruzados. También se evaluaron modelos lineales y gaussianos.

En la Figura 5 se muestran las superficies continuas para cada una de las correlaciones espaciales cruzadas de la estimación de las variables de regeneración. Se distingue una menor variabilidad espacial en aquellas correlaciones donde no fue mejor el proceso Cokriging (B1/PE-1HR, B3/PODRIDOS y BT/PROF-HU). No obstante, puede observarse que en todos los casos existen áreas de la cuenca donde las dimensiones proporcionales de los valores de regeneración resaltan en forma de picos en las gráficas. Esta información permite definir las áreas con un mejor establecimiento de la regeneración natural.

No siempre las técnicas geostatísticas son mejores que las técnicas de interpolación tradicionales (Flores,

The ratio B3/PODRIDOS showed a great dispersion of the variability in all of the distances of separation, and therefore, the adjustment model was not sufficient for improving the estimations compared with the other techniques. The spherical and exponential models adjusted better to the cross-variograms. Linear and gaussian models were also evaluated.

The continuous surfaces for each of the spatial cross-correlations of the estimation of the regeneration variables are shown in Figure 5. A lower spatial variability can be observed in those correlations in which the Cokriging process was not better (B1/PE-1HR, B3/PODRIDOS and BT/PROF-HU). However, it can be observed that in all of the cases, there are areas of the watershed in which the proportional dimensions of the regeneration values

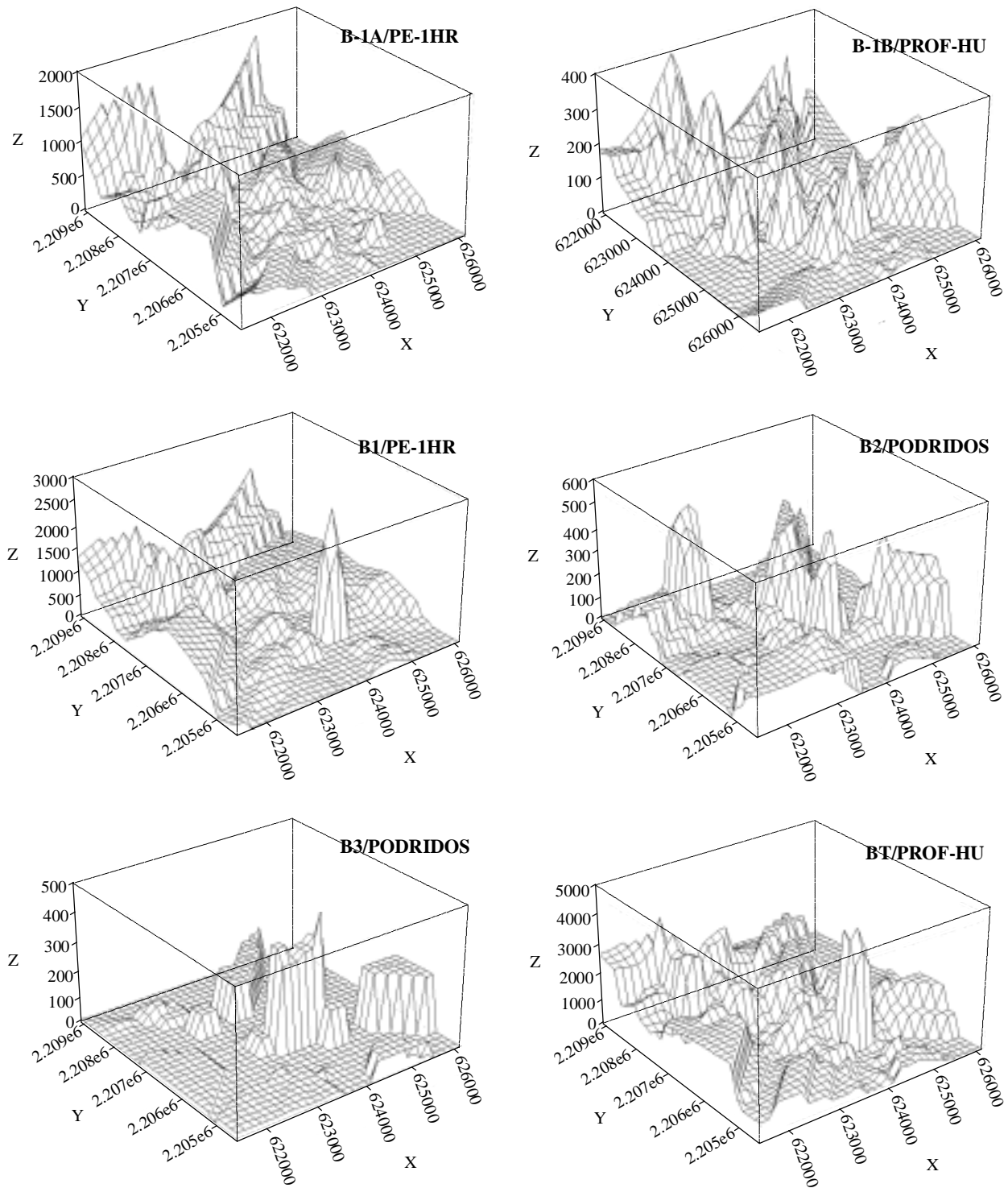


Figura 5. Superficies continuas de la distribución espacial de las estimaciones de las variables de combustibles resultantes del proceso Cokriging.

Figure 5. Continuous surfaces of the spatial distribution of the estimations of the fuel variables resulting from the Cokriging process.

2001; Hunner, 2000). En el presente estudio la técnica de Cokriging resultó mejor en tres casos (Cuadro 2), pero en todos ellos la variable auxiliar fue diferente. Al

stand out in the form of peaks in the graphs. This information makes it possible to define the areas with a better establishment of the natural regeneration.

considerar la estimación de todo el conjunto de individuos de regeneración (BT), la técnica de Cokriging produjo las diferencias proporcionales más altas. Las técnicas de DIP y Kriging presentaron valores del CME muy similares en cada variable de regeneración, lo que puede deberse a: 1) el alto valor de la relación efecto pepita/muestra; 2) la técnica de Kriging considera la condición de agrupamiento que pueden tener algunos sitios muestreados (Hunner, 2000). Dado que la muestra fue distribuida sistemáticamente, esta condición de agrupamiento influyó muy poco en el proceso Kriging.

El hecho de que DIP fue mejor que las dos alternativas de geostadística en el caso de B3, puede deberse a tres condiciones generales: 1) cuando los datos son abundantes, la mayoría de los sistemas de interpolación producen resultados similares; en este proyecto, debido a la variabilidad espacial representada, se considera que los datos fueron abundantes (79 sitios en 1400 ha); 2) las técnicas de geostadística toman en cuenta la agrupación de los sitios muestreados y si los sitios no mostraron agrupaciones, como es el caso del muestreo sistemático, este factor no es considerado; 3) las técnicas geostadísticas generan mejores resultados si la distribución de los datos es cercana a una distribución normal y aunque esto fue cierto en la mayoría de los casos, la condición de normalidad no fue muy fuerte.

CONCLUSIONES

La regeneración natural en un bosque obedece a varios factores ecológicos, como los combustibles forestales, cuyo grado de influencia se manifiesta en forma diferente en cada etapa de desarrollo de la regeneración. En etapas tempranas una carga excesiva de combustibles finos (hojarasca y acículas) dificulta el establecimiento de plántulas. La presencia de combustibles ligeros, como ramillas y ramas, propicia un microambiente favorable para el establecimiento y el desarrollo de la nueva regeneración. Inicialmente se pretendió ubicar espacialmente este tipo de relaciones, pero la ocurrencia de plántulas fue muy escasa. Por tanto, la interpretación causa-efecto, entre la relación combustibles-regeneración, en este trabajo se basa en que hubo una correlación cruzada negativa entre los combustibles y la regeneración (brinzales), lo cual sugiere que en las áreas con mayor carga de combustibles la regeneración no se ha establecido, ya que estas cargas no favorecen el establecimiento de las plántulas. Las áreas con cargas bajas podrían sugerir una mayor frecuencia de incendios, que ha favorecido el establecimiento y el desarrollo (menor competencia) de la regeneración.

La búsqueda de la mejor técnica de interpolación fue iterativa. El uso de información auxiliar (proceso Cokriging), mejoró la calidad de las estimaciones; sin

The geostatistical techniques are not always better than the traditional interpolation techniques (Flores, 2001; Hunner, 2000). In the present study the Cokriging technique was better in three cases (Table 2), but the auxiliary variable was different in all of them. When considering the estimation of the entire set of individuals of regeneration (BT), the Cokriging technique produced the highest proportional differences. The techniques of DIP and Kriging presented MSE values which were very similar in each variable of regeneration, which may be due to: 1) the high value of the ratio nugget effect/sample; 2) the Kriging technique considers the condition of grouping that some sampled sites may have (Hunner, 2000). Given that the sample was distributed systematically, this grouping condition had very little influence on the Kriging process.

The fact that DIP was better than the two geostatistical alternatives in the case of B3, may be due to three general conditions: 1) when the data is abundant, most of the interpolation systems produce similar results; in this project, due to the spatial variability represented, it is considered that the data was abundant (79 sites in 1400 ha); 2) the techniques of geostatistics take into account the grouping of the sampled sites, and if the sites did not present groupings, as in the case of the systematic sampling, this factor is not considered; 3) the geostatistical techniques generate better results if the distribution of the data is close to a normal distribution, and although this was true in the majority of cases, the condition of normality was not very strong.

CONCLUSIONS

The natural regeneration in a forest is due to various ecological factors, such as forest fuels, whose degree of influence is manifested in a different form in each stage of development of the regeneration. In early stages an excessive amount of fine fuels (fallen leaves and pine needles) impedes the establishment of seedlings. The

Cuadro 2. Valores del cuadrado medio del error resultantes del proceso de validación cruzada por cada una de las técnicas de interpolación.

Table 2. Values of the mean square error resulting from the process of cross-validation for each one of the interpolation techniques.

Brinzal	IDW	Kriging	Cokriging 1	Cokriging 2
B1A	135 005.81	125 967.41	102 360.65 [†]	106 971.31
B1B	8858.21	8869.73	7887.39 [¶]	8053.69
B1	306 262.63	303 842.08	426 739.58	357 269.99
B2	20 676.40	21 259.80	19 212.89	18 972.96 [§]
B3	13 667.00	14 100.57	22 109.51	19 536.29
BT	729 924.72	715 040.54	1 238 894.00	1 292 948.75

[†] PE-1HR; [¶] PROF-HU; [§] PODRIDOS.

embargo, en BT, los mayores valores del CME se generaron con el proceso Cokriging. La visualización de la distribución espacial de cada variable fue un factor de apoyo para corroborar la selección de las variables auxiliares. El modelo esférico se ajustó mejor y más frecuentemente a los variogramas empíricos (tuvo los menores CME); esto implica un efecto pepita, aunque no es clara la aproximación gradual a la asíntota de la semivarianza (sill), por lo que tampoco está bien definido el rango de los variogramas.

A pesar de que las técnicas de geostatística produjeron los mejores resultados (principalmente a través del proceso de Cokriging), no se definió una técnica para cada caso en este estudio.

LITERATURA CITADA

- Al-Subaihi. 2000. Variable selection in multivariable selection using SAS/IML. <http://www.jstatsoft.org/v07/i12/mv.pdf>.
- Armstrong, M. 1998. Basic Linear Geostatistics. Springer, New York. 153 p.
- Brown, J. K., R. D. Oberheu, and C. M. Johnston. 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the interior West. USDA, Forest Service General Technical Report INT-129. 48 p.
- Burrough, P. A., and R. McDonnell. 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press. 333 p.
- Flores G., J. G. 1996. Aplicación de sensores remotos y sistemas de información geográfica para el mapeo de riesgo de incendios forestales. INIFAP, SAGAR. Campo Experimental Colomos. Folleto Informativo No. 1. 16 p.
- Flores G., J. G. 2001. Modeling the spatial variability of forest fuel arrays. Ph.D. Dissertation. Dept. For. Sc. Colorado State University. 184 p.
- Flores G., J. G., y S. J. D. Benavides. 1993. Quemadas controladas y su efecto en los nutrimentos del suelo en un rodal de pino. *Amatl* 6(1-2). pp: 24-25.
- Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied Geostatistics Series. New York. Oxford University Press. 483 p.
- Hunner, G. 2000. Modeling forest stand structure using geostatistics, geographic information systems, and remote sensing. Ph.D. Dissertation. Colorado State University. 217 p.
- Insightful Corp. 2002. S-PLUS® 6.1 for Windows. PROFESSIONAL TRIAL EDITION, Release 1. Copyright Lucent Technologies, Inc.
- Isaaks, E. H., and R. M. Srivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press. 561 p.
- Laslett, G. M., A. B., McBratney, P. J., Pahl, and M. F. Hutchinson. 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.* 38:325-341.
- presence of light fuels, such as twigs and branches, propitiates a microenvironment favorable for the establishment and development of the new regeneration. Initially, an attempt was made to spatially locate this type of relationship, but the occurrence of seedlings was vary scarce. Therefore, in this study, the cause-effect interpretation in the fuels-regeneration relationship is based on the fact that there was negative cross correlation between the fuels and the regeneration (brinzals), which suggests that in the areas with greater amounts of fuel cover, regeneration has not been established, given that these fuel covers do not favor the establishment of seedlings. The areas with light fuel cover could suggest a greater frequency of fires, which has favored the establishment and the development (less competition) of the regeneration.
- The search for the best interpolation technique was iterative. The use of auxiliary information (Cokriging process), improved the quality of the estimations; however, in BT, most of the highest values of the MSE were generated through the Cokriging process. The visualization of the spatial distribution of each variable was a support factor for corroborating the selection of the auxiliary variables. The spherical model adjusted better and more frequently to the empirical variograms (had the lowest MSE); this implies a nugget effect, although the gradual approximation to the asyntote of the semivariance (sill) is not clear, thus, neither is the range of the variograms well defined.
- Despite the fact that the geostatistics techniques produced the best results (mainly through the Cokriging process), a technique for each case was not defined in this study.

—End of the English version—



- Moreno, G., D. A., H. Manzanilla, y E. Talavera, Z. 1993. Método “tocón a tocón” para cortas de aclareo y regeneración. Folleto Técnico No. 2. Campo Forestal Colomos. CIRPAC. INIFAP. SARH. 16 p.
- Stein, M. L. 1999. Interpolation of Spatial Data. Some Theory for Kriging. Springer. New York. 247 p.
- Webster, R., and M. A. Oliver. 1989. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI Disjunctive kriging and mapping the conditional probability. *J. Soil Sci.* 40: 497-512.