

Caracterización Espacial de los Tipos de Cobertura de Suelo usando Técnicas Geoestadísticas a partir de Información Satelital

M. I. ALPERÍN, V. G. BORGES & R. SARANDÓN¹

⁽¹⁾ *Gabinete de Ecometría, Cátedra de Estadística; Facultad de Ciencias Naturales y Museo; Universidad Nacional de La Plata. Museo de La Plata
E-mail: sarandon@museo.fcnym.unlp.edu.ar*

ALPERÍN, M. I., V. G. BORGES & R. SARANDÓN. 2002. Caracterización Espacial de los Tipos de Cobertura de Suelo usando Técnicas Geoestadísticas a partir de Información Satelital. *Rev. Fac. Agron.* 105(1): 40-51.

A fin de caracterizar los patrones espaciales de los diferentes tipos de cobertura del suelo (TCS), se analizó por métodos geoestadísticos un mapa de TCS, derivado de la clasificación de una imagen satelital de un sector de la provincia de Buenos Aires, que incluía 7 tipos de coberturas: Pastizales Alta Cobertura (PAC), Pastizales Baja Cobertura (PBC), Cultivo (CUL) Vegetación Palustre y/o Agua (VPA), Montes (MON), Pradera Húmeda (PRH) y Urbano (URB). Se evaluaron los componentes espaciales de cada TCS a partir de variogramas omnidireccionales experimentales, ajustándolos a modelos de referencia. La heterogeneidad de cada TCS exigió utilizar una estrategia que implicó el muestreo de la imagen temática con diferentes grado de resolución y dimensión del área de análisis. La distribución espacial de los TCS en la imagen es irregular sin ser aleatoria; mientras que la dimensión de cada uno es relativamente estable, aunque diferentes entre sí. Los modelos que mejor ajustan los variogramas experimentales son distintos según el TCS, siendo exponencial para PBC, PAC, PRH y CUL; esférico para URB, aleatorio para VPA y exponencial o aleatorio para MON. Los parámetros geoestadísticos de los modelos de ajuste calculados para cada TCS, indican diferencias estructurales en su distribución espacial a escala de parche (proporción no explicada por el modelo), paisaje (modelo) o región (diferencias entre sectores), que pueden relacionarse con el uso. La aplicación de técnicas geoestadísticas a información derivada de imágenes satelitales permite identificar y diferenciar los patrones espaciales de los TCS existentes en la misma, por lo que puede servir de base para definir estrategias de análisis y monitoreo del uso del suelo.

Palabras claves: variograma, patrón espacial, sensores remotos, uso del suelo, evaluación ecológica

ALPERÍN, M. I., V. G. BORGES & R. SARANDÓN. 2002. Land cover spatial analysis using geostatistical tools on remote sensing data. *Rev. Fac. Agron.* 105(1): 40-51.

In order to characterize the spatial pattern of different land cover types (TCS) we applied geostatistical analysis on a land cover map obtained from a classification of a satellite image of a sector of the Buenos Aires province. The map included 7 land cover types (TCS): high cover grassland (PAC), low cover grassland (PBC), agriculture (CUL), wetland vegetation and/or water (VPA), forest (MON), humid prairie (PRH) and urban areas (URB). We evaluated the spatial components of each TCS on the basis of omnidirectional experimental variograms, adjusted to specific models. Due to the high heterogeneity of the TCS we used a strategy based on sampling the thematic image with different degree of resolution and extension. The spatial distribution of the TCS in the image is irregular but no random; while the size of each TCS is quite stable but different among each other. The models that best adjust the variograms are different depending on the TCS: exponential for PBC, PAC, PRH and CUL; spherical for URB, random for VPA and exponential or random for MON. The geostatistical parameters for the model calculated for each TCS, show structural differences in the spatial distribution at a patch (non explained proportion of the model), landscape (model) and regional scale (differences among sectors), which may be related to land use. The use of geostatistical analysis on information derived from satellite images allows the identification and differentiation of the TCS's spatial pattern, and may be used to develop strategies for the analysis and monitoring of land use.

Key words: variogram, spatial pattern, remote sensing, land use, environmental assessment

Recibido: 28/11/01. Aceptado: 17/3/03.

INTRODUCCIÓN

El uso del suelo para distintas actividades humanas, ya sean productivas, vivienda o infraestructura de desarrollo, es uno de los factores que más condiciona las características estructurales y funcionales de los ecosistemas terrestres a escala regional (Forman & Godron, 1995). El patrón de usos del suelo responde a causas socioeconómicas y ecológicas y tiene importantes consecuencias sobre el paisaje regional, modificando los procesos ecológicos (Treweek, 1999) y los patrones de biodiversidad (Matteucci *et al.*, 1999). Más aún, el patrón de uso del suelo es una característica dinámica del territorio, variando en función del tiempo y del espacio, por lo que su caracterización y análisis representa un desafío en sí mismo.

Los sensores remotos, especialmente las imágenes satelitales, constituyen una importante fuente de información para mapear y caracterizar el uso del suelo y la estructura del paisaje a escala regional. Por otro lado, la geoestadística constituye una herramienta adecuada para efectuar el análisis espacial de la información (Isaaks & Srivastava, 1989). Desarrollada originalmente para aplicaciones en geología de minas, recientemente se ha utilizado también en estudios ecológicos y para la evaluación de recursos naturales (Rossi *et al.*, 1992; Goovaerts, 1997). Por ejemplo, Rossi *et al.* (1992) analizan distintas herramientas geoestadísticas útiles para examinar el patrón espacial de organismos y genotipos en relación con diversos componentes ambientales. El análisis espacial de la información ecológica contenida en las imágenes satelitales puede estar orientado hacia la clasificación de los tipos de cobertura (Atkinson & Lewis 2000), al mapeo de los ecosistemas (Treweek, 1999) o hacia la caracterización de los patrones espaciales tanto de paisajes (Curran, 1988, Woodcock *et al.*, 1988a; 1988b) como de comunidades vegetales (Cohen *et al.*, 1990, Wallace *et al.*, 2000).

El objetivo del presente trabajo es caracterizar el patrón espacial de diferentes tipos de cobertura del suelo (TCS) aplicando herramientas geoestadísticas sobre información obtenida de una imagen satelital. Específicamente abordamos la cuestión de si existen distintos patrones espaciales para los distintos tipos de cobertura del suelo que se diferencian por el tipo de uso o grado de influencia antrópica. O, lo que es lo mismo, qué aspectos o parámetros del patrón espacial cambian en función del tipo de uso de cada TCS. Nuestra intención es lograr una caracterización cuantitativa del patrón espacial de cada TCS, la que puede ser utilizada posteriormente para analizar las causas socioeconómicas que lo generan o sus consecuencias ecológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Area de Estudio

El estudio se realizó sobre un mapa de usos o TCS derivado de la clasificación de una imagen satelital Landsat TM correspondiente a un sector del partido de General Brandsen, provincia de Buenos Aires, Argentina. El área tiene una superficie de 421,48 km², correspondiendo a una planicie de pastizales naturales bajo un uso predominantemente agrícola-ganadero, con depresiones ocupadas por bañados y lagunas y centros urbanizados de diferente importancia. Se identificaron en este sector 7 tipos de cobertura del suelo: Pastizales Alta Cobertura (PAC), Pastizales Baja Cobertura (PBC), Cultivo (CUL) Vegetación Palustre y/o Agua no permanente (VPA), Montes (MON), Pradera Húmeda (PRH) y Urbano (URB) (Guerrero Borges *et al.*, información no publicada).

Análisis y caracterización espacial

El análisis geoestadístico se utilizó para evaluar los componentes espaciales de cada TCS por medio del variograma que constituye

una síntesis espacial promediada de las diferencias en los valores numéricos de pares de pixeles distantes entre sí un vector h (Figura 1) y que representa gráficamente la variabilidad espacial de un grupo de datos (Isaaks & Srivastava, 1989).

Los variogramas se calcularon a partir de un modelo que considera los objetos (i.e., cada TCS) ubicados sobre un fondo o "background" único. En este contexto los valores que puede asumir cada unidad de información (i.e., el pixel) puede pertenecer sólo a una de las dos categorías posibles, objeto o fondo, por lo que se convierten en variables categóricas o indicadores ("indicator coding" *sensu* Rossi *et al.*, 1992). Se calcularon variogramas unidimensionales omnidireccionales, con un paso (i.e., "lag") de uno.

Se utilizó una estrategia que implicó tomar ventanas del mapa temático con diferente grado de resolución según el TCS que se estuviera caracterizando (distintos soporte en términos geoestadísticos). Las ventanas se seleccionaron al azar dado que para nuestro estudio se asume que los TCS son variables regionalizadas que cumplen con la hipótesis de estacionariedad. En todos los casos cada ventana incluía 1089 pixeles de diferente ta-

maño para cada TCS. Dada la marcada interrelación entre escala y textura, el tamaño de pixel se seleccionó de forma tal que permitiera conservar el patrón espacial de cada TCS (Curran & Atkinson, 1999). El número de ventanas utilizadas varió en cada TCS a fin de incluir un área que en conjunto ocupara al menos un 10% del área cubierta por cada TCS. Así para PRH se analizaron 3 ventanas con resolución 90 m, seis para CUL (60 m), tres para VPA (90 m), tres para MON (60 m), tres para URB (30 m) correspondiente a la ciudad de Brandsen, cuatro para PBC y tres para PAC, ambas de 180 m de resolución. En cada una de las ventanas muestreadas para cada TCS, se tomaron todos los valores de una grilla regular de 33 x 33 pixeles (dando un total de 1089 unidades de información). Se consideró una tolerancia de 0,5 para incluir en cada paso los 8 pixeles vecinos (no sólo los pixeles ubicados en los ejes de la grilla x-y, sino también los de los vértices vecinos).

Para poder definir y cuantificar las características espaciales de cada TCS, una vez calculados los variogramas experimentales (a partir de los datos de la imagen temática), se ajustaron a modelos de referencia cuyos parámetros se relacionan al patrón de distribución espacial del objeto (i.e., TCS): la proporción del área ocupada, la variabilidad en el tamaño de los objetos (Goovaerts, 1997; Woodcock *et al.*, 1988a; 1988b). Tal como lo aconseja la literatura geoestadística (Samper Calvete & Carrera Ramírez, 1990; Goovaerts, 1997), el ajuste se realizó en forma visual ("visual approximation" o "visual modeling"). Esto permitió estimar y comparar los parámetros de variación espacial de cada TCS obteniéndose información cuantitativa sobre: el patrón regional (diferencias en los parámetros del variograma experimental obtenido en distintas ventanas); el patrón espacial (a través del modelo de ajuste), incluyendo el tamaño máximo de parche, la variabilidad en los tamaños del parche, la densidad y la forma del parche.

Todos los cálculos se hicieron utilizando

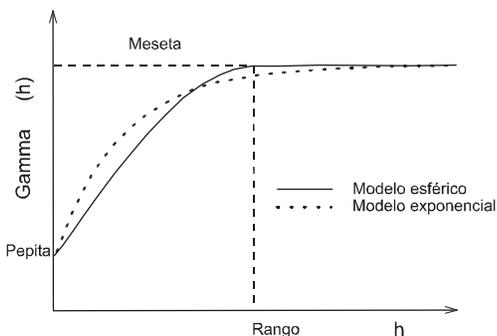


Figura 1. Variograma genérico indicando para un modelo esférico y uno exponencial, la estimación de los valores de meseta, rango y pepita.

Generic variogram showing for a spherical and an exponential model the estimation of sill, rank and nut.

el programa Variowin (Pannatier, 1994) que permite estimar: i) el grado de ajuste (IGF: Indicative Goodness of Fit) de los datos al modelo (valores cercanos a cero indican un buen ajuste); ii) el efecto Pepita (nugget value) correspondiente a la variabilidad aleatoria inherente; iii) el rango de influencia o alcance (range of influence) que corresponde a la distancia a la cual las muestras se tornan independientes; iv) la meseta (sill) correspondiente a la varianza estructural; v) el porcentaje de la variabilidad debido al componente aleatorio ($\%NE = EP * 100 / \text{Meseta}$); y vi) la varianza estadística de la muestra (s^2).

RESULTADOS

Los tipos de coberturas dominantes en el área de estudio están representados por los pastizales de alta y baja cobertura (PAC y PBC), con un 42,64% y 27,08% respectivamente los que corresponden a paisajes en donde predomina la actividad ganadera. Las coberturas de uso agrícola (CUL) ocupan un 22,15% del área total, mientras que el resto de los TCS presenta bajas frecuencias relativas.

Visualmente se observa que la distribución espacial, el tamaño y la forma de cada TCS determina una textura heterogénea de la imagen, en la que se entremezclan grano grueso, mediano y fino. Más aún, se observa que el patrón espacial cambia según el TCS considerado (Figura 2): tiende a ser aleatorio en PAC y VPA; mientras que en los restantes el patrón se muestra agrupado en manchones. En CUL y PBC los agregados o manchones son de diferentes formas y tamaños; mientras que en PRH y MON son entre sí de tamaño similar pero de forma diferente. Sólo CUL y PRH presentan cierta linealidad paralela a los cursos de agua permanentes; mientras que URB está restringido a las ciudades y poblados existentes en el área (ie., Brandsen en el noroeste y Jeppener en el centro del área de

estudio).

El resultado del análisis geoestadístico indica que los diferentes TCS muestran distintos patrones espaciales en la imagen temática analizada (Figura 3). En seis de los siete TCS estudiados los variogramas experimentales obtenidos para las distintas ventanas analizadas fueron similares entre sí (Figura 3). Cuatro de los TCS ajustan mejor al modelo exponencial: PAC, PBC, CUL y PRH; sólo URB ajustó mejor al modelo esférico; mientras que en VPA es totalmente aleatorio. Finalmente, el MON mostró en dos ventanas un modelo aleatorio y en otros ajustó a un modelo exponencial. Los modelos de ajuste se diferencian por la manera que se alcanzan los parámetros del variograma experimental (Figura 1). El modelo exponencial es lineal en su origen, se torna redondeado y alcanza el valor de la meseta en forma asintótica; el rango se define en forma práctica al 95% de la meseta. El modelo esférico, en cambio, es lineal en su inicio y alcanza el valor de la meseta a la distancia que corresponde al rango. Finalmente, el modelo aleatorio se caracteriza por mostrar un valor de gamma prácticamente constante (i.e., efecto pepita puro). La Tabla 1 sintetiza los valores de los parámetros de ajuste de los variogramas experimentales para cada TCS, cuyas características se describen a continuación.

Los PAC mostraron variogramas experimentales similares en las diferentes ventanas, ajustando a un modelo exponencial. La forma del variograma redondeada, indica que las superficies cubiertas por los PAC son de tamaño variable. El efecto pepita varía entre 0,12 y 0,18, mientras que la meseta se alcanzó a un rango entre los 4 y 5,5 píxeles. Considerando que el tamaño de pixel utilizado en este TCS fue de 180 m, esto indica un tamaño de parche máximo entre 720 y 990 m, es decir un área aproximada de 52 a 98 ha.

En los variogramas de los PBC se observan dos estructuras una de menor escala (que corresponde a la que efectivamente ha sido modelada), y otra a una escala mayor. La pri-

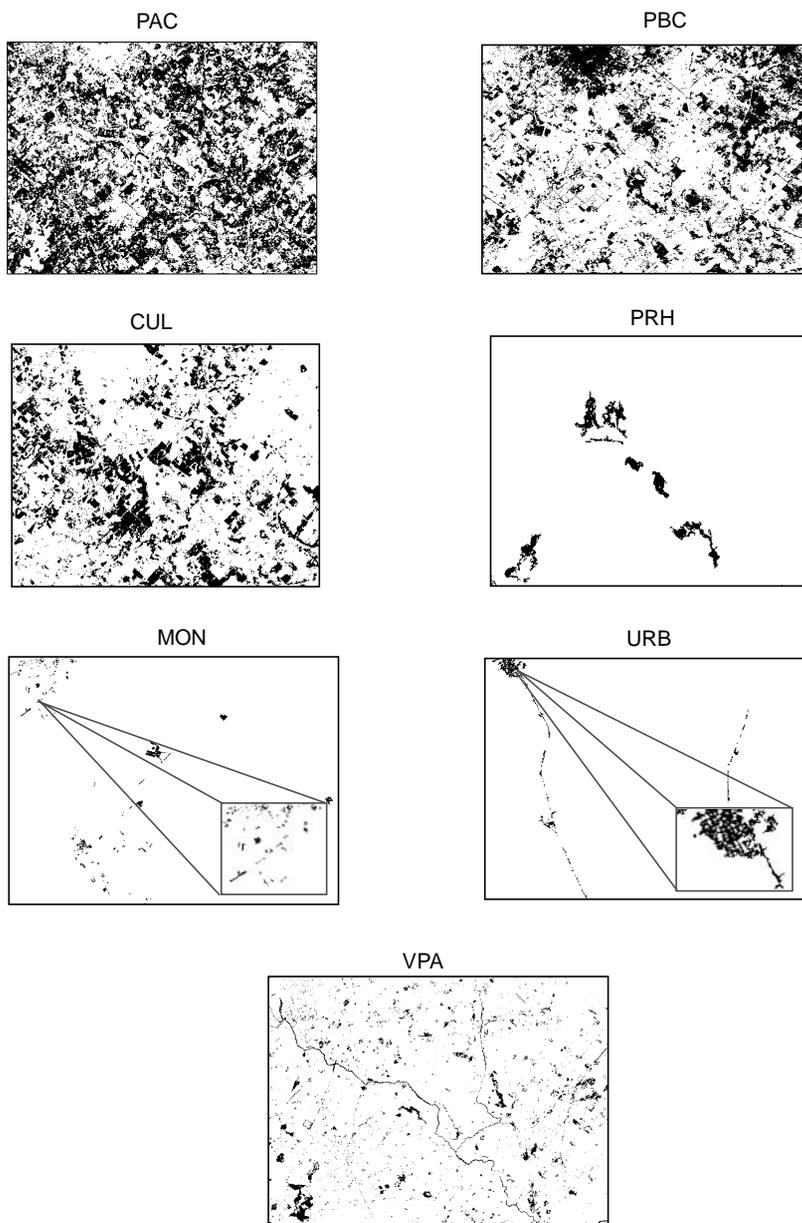


Figura 2. Sector de la imagen (resolución 30 m) mostrando el patrón espacial de cada TCS (valor del pixel 1, en negro) sobre el fondo (valor 0, en blanco). La escala de cada una se ha variado para facilitar la interpretación visual. PAC (pastizal alta cobertura), PBC (pastizal baja cobertura), CUL (cultivo), PRH (pradera húmeda), MON (monte), URB (urbano), VPA (vegetación palustre y/o agua).

Portion of a satellite image (30 m resolution) showing the spatial pattern for each TCS (pixel value 1, in black) on a background (value 0 in white). The scale for each TCS has been adjusted to improve the visual interpretation. PAC (high cover grassland), PBC (low cover grassland), CUL (agriculture), PRH (humid prairie), MON (forest), URB (urban areas), VPA (wetland vegetation and/or water).

Tabla 1. Síntesis de los valores de los parámetros de ajuste de 3 de los variogramas experimentales para cada uno de los TCS (V1 a Vi ventana 1 a i). Exp: Exponencial; Esf: Esférico; EP: Efecto Pepita; C: Variabilidad estructurada; %NE: Porcentaje de variabilidad No explicada (EP/Meseta)*100; IGF: Índice de mejor ajuste.

Summary of model parameters for 3 of the experimental variograms estimated for each TCS (V1 to Vi window 1 to i). Exp: Exponential; Esf: Spheric; EP: nugget effect; C: Structural variability; %NE: proportion of Non explained variability (EP/Meseta)*100; IGF: Index of good fit.

TCS	Modelo	EP	Rango	C	Meseta	% NE	IGF	σ^2
PAC V1	Exp	0,12	5,6	0,07	0,19	63,16	1,09 10 ⁻³	0,25
PAC V2	Exp	0,18	5,6	0,06	0,24	75,00	2,60 10 ⁻³	0,24
PAC V3	Exp	0,15	5,2	0,08	0,23	65,22	1,80 10 ⁻³	0,24
PBC V1	Exp	0,12	7,47	0,07	0,19	63,16	1,01 10 ⁻³	0,25
PBC V2	Exp	0,09	4,41	0,10	0,19	47,37	3,20 10 ⁻³	0,23
PBC V3	Exp	0,15	5,55	0,09	0,24	62,5	1,04 10 ⁻³	0,24
CUL V2	Exp	0,07	4,23	0,18	0,25	28,00	9,01 10 ⁻³	0,25
CUL V4	Exp	0,05	13,09	0,17	0,22	22,73	4,68 10 ⁻³	0,21
CUL V5	Exp	0,02	8,82	0,19	0,21	9,52	3,17 10 ⁻³	0,19
PRH V1	Exp	0,03	15,29	0,23	0,26	11,54	2,60 10 ⁻³	0,19
PRH V2	Exp	0,04	12,39	0,17	0,21	19,05	1,76 10 ⁻³	0,18
PRH V3	Exp	0,02	7,55	0,08	0,10	20,00	8,80 10 ⁻³	0,09
MON V1		Puro						0,03
MON V2	Exp	0,03	17,9	0,07	0,10	30,00	5,65 10 ⁻³	0,07
MON V3		Puro						0,02
URB V1	Esf	0,09	3,67	0,11	0,20	45,00	3,36 10 ⁻³	0,25
URB V2	Esf	0,10	3,11	0,17	0,27	37,04	3,80 10 ⁻³	0,23
URB V3	Esf	0,09	3,14	0,13	0,22	40,91	4,28 10 ⁻³	0,24
VPA V1		Puro						0,05
VPA V2		Puro						0,05
VPA V3		Puro						0,03

mera estructura se ajusta a un modelo exponencial, mientras que la segunda insinúa un modelo lineal. Debido a la forma suavemente redondeada existe una alta heterogeneidad del tamaño de los parches. El efecto pepita varía entre 0,10 y 0,15 alcanzando la meseta a un valor de rango entre 4,5 y 8 píxeles, a partir del cual se evidencia un incremento lineal ascendente. Considerando que el píxel utilizado en este TCS fue también de 180 m, el tamaño de parche sería entre 810 y 1440 m, es decir un área aproximada de 65 a 207 ha.

En los CUL, los variogramas presentan un comportamiento similar entre sí y se ajustan a un modelo exponencial. Muestra valores inicialmente bajos de gamma entre 0,02 y 0,10 alcanzando gradualmente la meseta a un rango que oscilan entre 4,23 y 13 píxeles. Considerando que el píxel utilizado en este TCS fue de 60 m, el tamaño de parche oscilaría entre 250 y 780 m, es decir un área aproximada de 6,4 a 60 ha. La forma del variograma suavemente redondeada indica que hay una alta heterogeneidad en el tamaño de las parcelas.

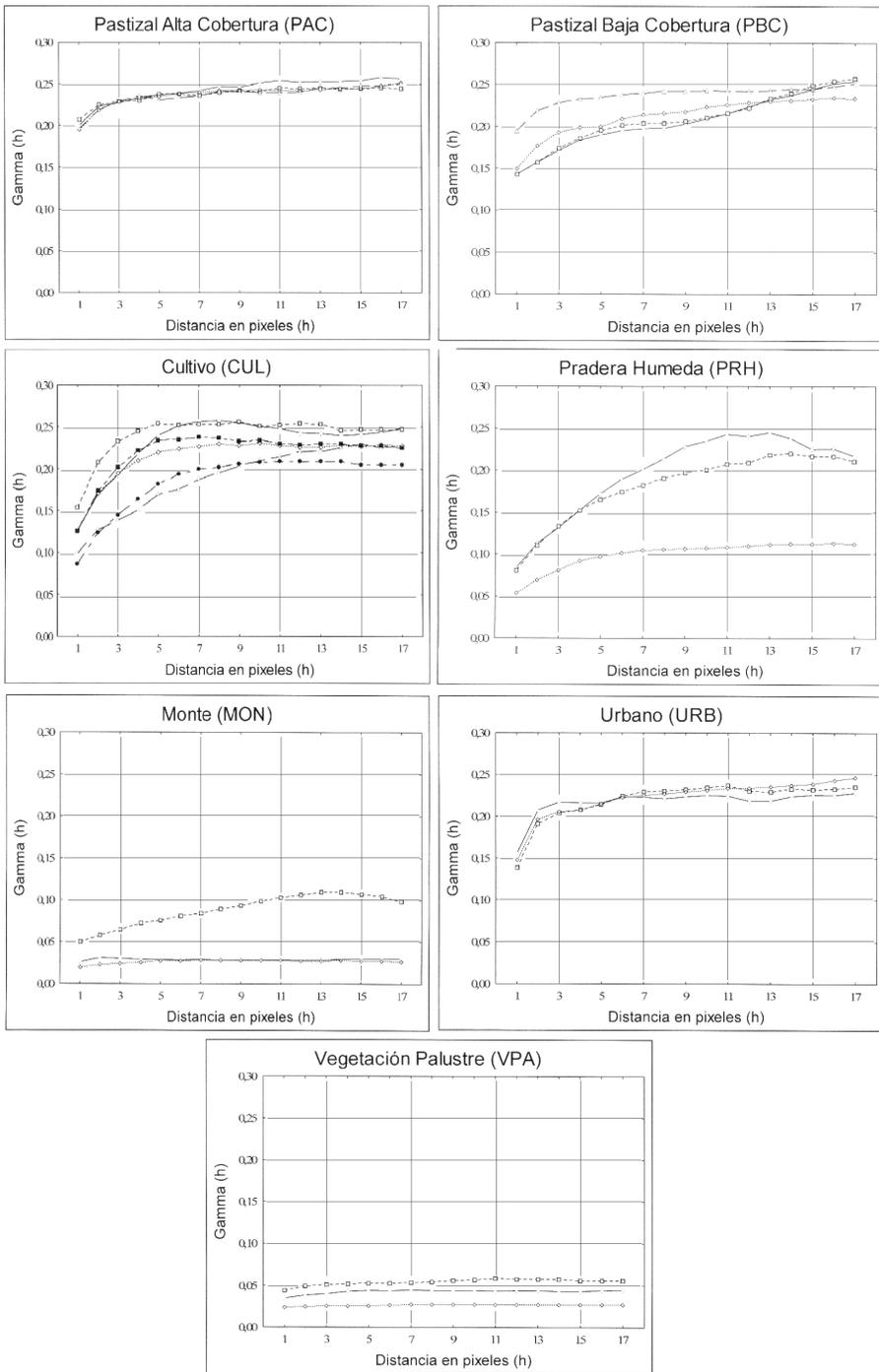


Figura 3. Variogramas experimentales de las diferentes ventanas para cada TCS.
Experimental variograms for each window and TCS.

La PRH muestra 2 tipos de variogramas, que se ajustan a un modelo exponencial. Ambos se caracterizan por valores muy bajos de efecto pepita, lo que indica una gran homogeneidad dentro del TCS. En ambos el incremento es gradual hasta alcanzar la meseta a un rango diferente en uno y otro: de 7,55 y 15,3 pixeles respectivamente. Considerando que el pixel utilizado en este TCS fue de 90 m, el tamaño de parche correspondiente a cada uno de ellos sería de 679 y 1377 m, es decir un área aproximada de 46 y 190 ha respectivamente.

Los MON incluyen a las plantaciones forestales, que son de formas macizas, y a las cortinas forestales que son de formas lineales. Esto tiene como resultado que algunos variogramas experimentales (correspondientes a las cortinas forestales) sean esencialmente planos y exhiban un comportamiento aleatorio (efecto pepita puro). Por otra parte, el variograma correspondiente a las plantaciones forestales, muestra un buen ajuste a un modelo exponencial. Considerando que el pixel utilizado en este TCS fue de 60 m, el tamaño del parche sería aproximadamente de 1080 m, es decir un área aproximada de 116 ha.

Los variogramas experimentales de los sectores urbanos (URB) se ajustaron mejor al modelo esférico, elevándose abruptamente desde el inicio hasta alcanzar la meseta a un rango levemente por encima de 3 pixeles, lo que indicaría superficies de tamaños homogéneos. Considerando que el pixel utilizado en este TCS fue de 30 m, el tamaño del parche sería aproximadamente de 93 a 110 m, es decir un área aproximada entre 0,87 y 1,21 ha.

Finalmente, los variogramas experimentales de los sectores con Vegetación palustre y/o agua no permanente (VPA) no se ajustaron a ningún modelo mostrando un comportamiento aleatorio.

DISCUSIÓN

Una primera inspección visual de la imagen de los distintos TCS muestra una superficie heterogénea. Esto es debido a que en ella

se entremezclan TCS con diferente grado de cobertura y de agregación, y distintos tamaños y forma de los parches. Al aislar cada TCS y contrastarlos sobre un fondo homogéneo, transformando cada TCS en variable indicadora, se percibe que el patrón de distribución espacial es diferente para los distintos TCS. El patrón de distribución espacial de los TCS se muestra homogéneo y aleatorio en algunos casos, ya sea con una alta (i.e., PAC) o baja densidad (VPA), o agrupado en manchones de grano fino (i.e., PBC) o grano grueso (CUL).

El análisis geoestadístico de cada uno de ellos, efectuado a través del cálculo de variogramas experimentales de cada TCS como variable indicadora, confirma esta percepción, más aún, permite cuantificar las diferencias en el patrón espacial de cada TCS. La variabilidad espacial se modela y cuantifica por medio del ajuste de los variogramas experimentales a modelos de referencia, determinando luego los parámetros referentes a la varianza aleatoria o efecto pepita, al rango, a la meseta y la forma o tipo de modelo. Los resultados obtenidos indican que los modelos que mejor ajustan los variogramas experimentales son distintos según el TCS, siendo exponencial para PBC, PAC, PRH y CUL; esférico para URB, aleatorio para VPA y exponencial o aleatorio para MON (dependiendo los sectores muestreados).

Los parámetros del variograma pueden relacionarse con ciertas características que hacen al patrón de distribución espacial de los objetos (Woodcock *et al.*, 1988a; 1988b). En nuestro caso, los parámetros calculados indican diferencias estructurales en las propiedades espaciales de cada TCS. Los variogramas correspondientes a PAC, PBC, CUL y URB alcanzan altos valores de γ_h (i.e., meseta) que indica una alta densidad de los objetos o parches correspondientes a esos TCS. Por el contrario, PRH, MON y VPA muestran valores bajos de densidad. Por otro lado, los valores de rango se relacionan con el tamaño de los parches mientras que el modelo de ajuste se relaciona con su distribución de tama-

ños (Woodcock *et al.*, 1988a; 1988b). Esto ha posibilitado inferir el tamaño máximo de los parches de cada TCS y el grado de heterogeneidad en el tamaño de ellos. En este sentido, es llamativo el caso de URB que mostró un buen ajuste a un modelo esférico, que se asocia a una distribución homogénea de tamaños de parche de aproximadamente 1 ha lo que se relaciona con el típico parcelamiento de áreas urbanas en la región pampeana. Los valores correspondientes a los otros TCS indican, en todos los casos, una mayor heterogeneidad de tamaños de parches. Los tamaños de cada parche mostraron una clara relación con el uso, siendo menores en aquellos usos más intensivos, como la agricultura (CUL) y mayores en los usos más extensivos como son los campos naturales bajo ganadería (PAC y PBC).

Además, el porcentaje de variación aleatoria muestra valores altos (%NE en general mayores al 60 %) en los TCS correspondientes a actividades ganaderas (PAC y PBC) indicando una alta variabilidad interna debido probablemente a la presencia de sectores bajos, suelos azonales, pequeñas charcas temporarias, que incrementan la heterogeneidad de cada parche. Por el contrario, los TCS correspondientes a CUL y MON muestran un bajo porcentaje de variación aleatoria (%NE menor al 30 %), indicando una alta homogeneidad dentro de cada TCS. Esto puede deberse al patrón regular de disposición espacial propio de los campos agrícolas y plantaciones forestales plantadas. Es llamativo, en este sentido, la baja proporción de variabilidad aleatoria que muestra la PRH, posiblemente debido a una uniformidad en las condiciones ambientales limitantes o extremas propias de esos hábitats (i.e., anegamiento).

Tal como han sido descriptas más arriba, las propiedades estructurales del variograma se relacionan esencialmente con la distribución de los tamaños de los parches ocupados por cada TCS a una escala de paisaje. Como los variogramas obtenidos para cada TCS co-

rresponden a muestreos en distintas porciones de la imagen temática, sus diferencias permiten inferir el grado de heterogeneidad en esa distribución espacial a una escala regional. Los variogramas fueron muy similares entre sí en el caso de URB y PAC, lo que indicaría que el patrón de distribución espacial es similar en distintos sectores de la imagen. En el caso de URB esto se vincularía simplemente a un mismo patrón de parcelamiento en distintos pueblos de la región. En el caso de PAC, en tanto, podría estar indicando un patrón heterogéneo de tamaños de parches uniforme en todo el territorio. Por el contrario, los variogramas de CUL fueron diferentes entre sí respondiendo probablemente a la existencia de sectores agrícolas con diferente modelo de parcelamiento correspondiente a sectores cercanos a los centros poblados, donde predominan las actividades hortícolas, y sectores más alejados dedicados al cultivo de cereales.

Como los diferentes TCS responden al uso actual del suelo para distintas actividades (productivas, residenciales, naturales), las características espaciales de los TCS dependen tanto de las características ecológicas del sitio como de factores socioeconómicos y tecnológicos. Los TCS más frecuentes (alta densidad) corresponden a PBC y PAC, en donde se desarrollan actividades ganaderas sobre campos naturales, generalmente de grandes extensiones (de 50 a 200 ha), en suelos que mayormente son altos y bien drenados. Como lo confirma el análisis, estas superficies no son homogéneas sino que presentan cierta heterogeneidad en las características topográficas (bajos, lomas), edáficas (contenido salino) y bióticas (comunidades azonales). En esta región cuya topografía general es plana, las pequeñas diferencias en la posición topográfica generan cambios importantes en la dinámica del agua, el desarrollo y tipo de suelo, la salinidad, el tipo de comunidad vegetal, incluyendo la composición específica y la dinámica temporal (productividad, fenología de las especies) (León *et al.*, 1979).

Por otro lado, en aquellos sectores altos y bien drenados, con suelos aptos para la agricultura los campos se dedican a los cultivos (CUL). Las parcelas son de menor tamaño (5 a 60 ha), aunque variables en el espacio (sectores hortícolas y agrícolas), mostrando una mayor uniformidad interior debido a la homogeneidad que imprimen las labores agrícolas (arado, siembra uniforme). Las áreas marginales, desde un punto de vista productivo, están relacionadas con los sectores topográficamente más bajos, anegables (PRH) u ocupadas temporaria o permanentemente por cuerpos de agua (VPA). Ambas son poco frecuentes en esta región (baja densidad), ocupando la PRH áreas relativamente grandes (50 a 200 ha) y mostrando llamativamente una alta homogeneidad interna. Las VPA, por su lado, no tienen un uso productivo específico mostrando coincidentemente, un patrón espacial sin estructura (i.e., modelo aleatorio). Los MON son poco frecuentes, siguiendo un modelo exponencial o aleatorio que corresponde a las distintas funciones (cortinas forestales, montes productivos) y cuyo patrón espacial resulta, en consecuencia, mas o menos estructurado.

Además, los diferentes TCS se diferencian por el grado de antropización, siendo mayor en URB y menor en VPA (extremos del gradiente de antropización). Los variogramas de cada uno de ellos mostraron también propiedades espaciales distintas. Los TCS más antropizados (URB) fueron los únicos que mostraron un buen ajuste a un modelo esférico, siendo además todos los variogramas experimentales obtenidos en las distintas ventanas similares entre sí, indicando un patrón espacial homogéneo a escala de paisaje y regional. Los TCS correspondientes a situaciones de antropización intermedia (PAC, PBC, CUL, PRH) se ajustaron mejor a un modelo exponencial; indicando una alta heterogeneidad a escala de paisaje. Su variabilidad espacial a escala regional, sin embargo, fue distinta: PAC y PBC mostraron mayor homogeneidad (i.e.,

similares variogramas experimentales) que CUL y PRH. Por otro lado, la variabilidad aleatoria (heterogeneidad dentro del parche) fue baja en CUL, MON y PRH, en tanto fue alta en PAC y PBC. El PRH mostró, en consecuencia, una alta heterogeneidad a escala de paisaje y a escala regional, siendo homogéneo a escala de parche.

Estas diferencias tienen condicionantes y consecuencias de importancia ecológica. Por un lado, las áreas menos modificadas son aquellas cercanas a cuerpos de agua, áreas anegables que permanecen inundadas por diferentes lapsos, por lo que están sometidas a una baja intensidad de uso actual. Coincidentemente estos sectores están ocupados por los TCS que mostraron una mayor heterogeneidad a escala de paisaje y regional (PRH) o cuyo patrón espacial fue estrictamente aleatorio (VPA). Por el otro, cada TCS comprende un conjunto de condiciones ambientales que determinan la calidad del hábitat para especies de la flora y fauna nativa, por lo que una mayor heterogeneidad de hábitat suele corresponderse a una mayor biodiversidad (Matteucci *et al.*, 1999). Los ambientes que mostraron una mayor variabilidad espacial a escala de paisaje o regional (PRH; VPA) corresponden a aquellos ambientes menos antropizados (de menor uso actual). Si bien estos TCS presentan una relativa baja densidad (son regionalmente raros en un ambiente relativamente modificado), su alta heterogeneidad espacial (a escala de paisaje y región) podría estar condicionando la alta densidad y diversidad específica en esta región, de ciertos grupos de especies que son dependientes de estos ambientes acuáticos (lagunas, charcas temporarias) como es la avifauna de ambientes de humedal (Gómez & Toresani, 1999).

El patrón de uso del suelo es dinámico, por lo que es dable esperar cambios en las características espaciales regionales en función del tiempo. Como el análisis geoespacial permite cuantificar dicho patrón espacial, es posible realizar comparaciones entre loca-

lidades (similar a lo realizado entre sectores de la imagen temática) o entre momentos (estaciones, años). Por otro lado, se ha puesto en evidencia que el patrón espacial a escala de parche, paisaje y región es diferente para los distintos TCS que tienen distinto grado de antropización y/o tipo de uso (urbano, agrícola, ganadero, forestal). En consecuencia, ciertas características espaciales de los TCS pueden utilizarse para monitorear sus cambios a través del tiempo. El monitoreo de los TCS puede estar enfocado tanto a los cambios en el uso del suelo en sí mismos, como a la calidad del hábitat para ciertas especies de la flora y fauna nativa, o para la biodiversidad a una escala regional. Esta capacidad de monitoreo es importante en relación con los cambios potenciales que pueden ocurrir en una región por una intensificación en las actividades productivas, tanto agrícolas como ganaderas o por el desarrollo de infraestructura y otros procesos de urbanización. Por ejemplo, existe actualmente una tendencia al incremento de las actividades agrícolas en la región pampeana, debido a que muchas áreas de producción ganadera (incluyendo la producción lechera) se están volcando hacia la producción de soja. Igualmente es probable un incremento de las áreas dedicadas a la producción forestal y a las urbanizaciones. Es de esperar, entonces, que los cambios ocasionen un aumento de la superficie cultivada (CUL), forestada (MON) o urbanizada (URB) en la región en desmedro de la actividad ganadera sobre campos naturales (PAC, PBC). Este cambio en el uso del suelo puede tener consecuencias sobre la biodiversidad regional de la fauna pampeana terrestre, por disminución de su hábitat natural (el pastizal pampeano) e incremento de hábitat más artificiales (cultivos, plantaciones). Por el contrario, es improbable que se produzcan modificaciones importantes en la superficie ocupada por los humedales (VPA, PRH) ya que ellos se encuentran en sectores marginales (improductivos), por lo que las comunidades animales (avifauna) re-

lacionadas con ellos es probable que no vean afectada la disponibilidad de su hábitat (aunque es posible que ocurran modificaciones en la calidad de los mismos por problemas de contaminación con agroquímicos). Este cambio en el patrón de uso del suelo repercutirá sobre los parámetros geoestadísticos de manera diferente. Por un lado, es de esperar que los parámetros no sean afectados significativamente a una escala de paisaje, ya que el modelo predominante seguirá siendo EXP, debido a que tanto PAC, PBC, CUL o MON responden a este modelo (salvo en las zonas urbanizadas que se hará ESF). Lo que sí se afectará significativamente, debido a las diferencias en la heterogeneidad interna de cada parche por la uniformidad que ocasionan tanto los cultivos como las plantaciones forestales, es la proporción de la varianza no explicada por el modelo (%NE). Este parámetro espacial muestra diferencias sustantivas entre los TCS de baja intensidad de uso (PAC y PBC muestran generalmente valores mayores a 60%) y los de mayor intensidad de uso (CUL y MON muestran valores menores a 30%), por lo que es de esperar que exista una disminución en este parámetro geoestadístico como consecuencia de una intensificación en el uso del suelo en la región. El monitoreo de los cambios en el patrón espacial de uso del suelo, debe concentrarse en aquellos parámetros geoestadísticos que muestren mayor sensibilidad a los factores o procesos predominantes en cada región. En este caso, el %NE sería recomendable para el monitoreo del patrón espacial regional en relación con una eventual intensificación de las actividades productivas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al revisor anónimo cuyos comentarios contribuyeron a mejorar significativamente el manuscrito. El presente traba-

jo fue realizado en el marco del proyecto indicadores ambientales para el desarrollo sustentable (Código 11/N303) gracias al financiamiento del Programa de Incentivos del Ministerio de Cultura y Educación de la Nación y de la Universidad Nacional de La Plata.

BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, P. M. & P. Lewis.** 2000. Geostatistical classification for remote sensing: an introduction. *Computers & Geosciences* 26: 361-371.
- Cohen, W. E., T. A. Spies & G. A. Bradshaw.** 1990. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. *Remote Sensing of Environment* 34: 167-178.
- Curran, P.** 1988. The semivariogram in remote sensing: an introduction. *Remote Sensing of Environment* 24: 493-507.
- Curran, P. & M. Atkinson.** 1999. Issues of scale and optimal pixel size. En Stein, A. (Ed.), *Spatial Statistics for Remote Sensing*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. pp: 115-133.
- Forman, R. T. T. & M. Godron.** 1995. *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons, New York. 619 pp.
- Gómez, S. E. & N. I. Toresani.** 1999. Región 3: Pampas. En: Canevari, P.; D. E. Blanco; E. H. Bucher; G. Castro y I. Davidson (Eds.), *Los humedales de la Argentina*. Wetlands International. Publicación N° 46 (2da. Edición). Buenos Aires. 208 pp.
- Goovaerts, P.** 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press., New York. 483 pp.
- Isaaks, E. & R. M. Srivastava.** 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York. 561 pp.
- León, R. J. C., S. Burkart & C. P. Movia.** 1979. Relevamiento fitosociológico del pastizal del norte de la "Depresión del Salado" (Partidos de Magdalena y Brandsen, Provincia de Buenos Aires). *INTA Serie Fitogeográfica* 17. La vegetación de la República Argentina. SEAGN-INTA, Bs. As. 78 pp.
- Matteucci, D. S., Solbrig O. T., Morello J. & G. Halffter** (Eds). 1999. *Biodiversidad y uso de la tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica*. Eudeba. UNESCO. Colección CEA No. 24, Buenos Aires. 580 pp.
- Pannatier, Y.** 1994. *Variowin 2.1. Geostatistical Software Programs*. Pannatier Institute of Mineralogy and Petrography. University of Lausanne. Springer. Switzerland.
- Rossi, R. E., D. J. Mulla & E. H. Franz.** 1992. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62: 277-314.
- Samper Calvete, F. J. & J. Carrera Ramírez.** 1990. *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrogeología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona. 484 pp.
- Treweek, J.** 1999. *Ecological Impact Assessment*. Blackwell Sc Ltd, Oxford. 351 pp.
- Wallace, C. S. A., J. M. Watts & S. R. Yool.** 2000. Characterizing the spatial structure of vegetation communities in the Mojave Desert using geostatistical techniques. *Computers & Geosciences* 26: 397-410.
- Woodcock, C. E., A. H. Strahler & D. L. B. Jupp.** 1988a. The use of variograms in remote sensing: I. Scene Models and simulated images. *Remote Sensing of Environment* 25: 323-348.
- Woodcock, C. E., A. H. Strahler & D. L. B. Jupp.** 1988b. The use of variograms in remote sensing: II. Real digital images. *Remote Sensing of Environment* 25: 349-379.