

SISTEMAS DE LABRANZA: ANALISIS GEOESTADISTICO DE PROPIEDADES DE UN SUELO¹

Tillage systems: geostatistic analysis of some properties of a soil

Claudia Sainato², Nilda Arrigo², Lidia Giuffré², Beatriz Svidovsky²,
Susana Orden² y Marta Palma²

SUMMARY

The spatial variability of humidity, pH, oxidable carbon, total nitrogen and available phosphorus were studied, through a geostatistic analysis, for a Typic Argiudoll soil cultivated with maize, in plots with conventional tillage (LC) and no tillage (SD). Three different stages of the cultivation were analysed: fallow, flowering and harvest. From the semivariograms and their fitting models, carbon, nitrogen, and phosphorus were correlated with similar ranges (about 3 m), for SD and LC in fallow. Then a unique sampling is sufficient to describe the properties, measuring them every 3 m. The absence of spatial correlation for the variables in flowering would indicate the need of a more intensive sampling than the one made on the most limiting variables. In harvest, there was correlation only in nitrogen and carbon, for LC. Moreover, these ones presented cross-correlation for LC and SD in fallow and harvest. This is probably due to the high association between nitrogen and organic material. Humidity and phosphorus had only inverse correlation in flowering, for LC. Carbon and phosphorus were positively correlated for LC.

Key words: tillage, soil properties, geostatistics, spatial correlation, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Para establecer el impacto que tiene sobre un suelo la implantación de un cultivo o la óptima aplicación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas, se requiere analizar la variabilidad espacial de sus propiedades.

Kachanosky *et al.* (1985) destacan, entre otras causas de la variabilidad, el efecto de las labores culturales. En Argentina, Conti *et al.* (1980), Di Pietro *et al.* (1986) y López Camelo *et al.* (1993), investigaron diferentes propiedades físicas y químicas.

La geoestadística, permite diseñar un óptimo muestreo, evaluando la distancia entre observaciones, ubicación, número y tamaño apropiado de las muestras. Permite, además, cuantificar relaciones espaciales entre los valores de las propiedades y usarlas para realizar interpolaciones ("kriging" y "cokriging") (Trangmar *et al.*, 1985).

Svidovsky *et al.* (1994) aplicaron estas técnicas al estudio de factores del ambiente edáfico en ensayos realizados en invernaderos y a campo.

Las variaciones de las propiedades contienen componentes sistemáticos y aleatorios; fuentes de variabilidad sistemática pueden ser la textura y manejo de los suelos (O'Halloran *et al.*, 1985), desmonte y cultivo (Mueller-Harvey *et al.*, 1985), y nivelación de tierras (Knighton y James, 1985), entre otras. El componente aleatorio no se relaciona con causas conocidas y está vinculado a una heterogeneidad no explicable.

El objetivo de este trabajo fue: i) estudiar, mediante métodos geoestadísticos, la variabilidad espacial de la humedad, pH, carbono oxidable, nitrógeno total y fósforo disponible de un suelo cultivado con maíz y su dependencia con los sistemas de labranza; ii) analizar la dependencia temporal de los parámetros geoestadísticos en tres etapas del cultivo y, iii) analizar la correlación espacial entre pares de variables diferentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo del ensayo es un Argiudoll típico, cultivado con maíz, implantado con labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Marcos Juárez, Provincia de Córdoba, Argentina). Las muestras se tomaron en transectas de 17 m perpendiculares a los

¹Recepción de originales: 23 de junio de 1995.

²Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Avenida San Martín 4453 (1417). Buenos Aires, Argentina.

surcos, coincidiendo con el ancho de las parcelas, a 10 cm de profundidad y cada 50 cm. Este muestreo se efectuó en tres etapas del cultivo: barbecho (junio), floración (octubre-noviembre) y cosecha (febrero) (campaña agrícola 1993/94).

La humedad se determinó con el método gravimétrico; pH, por potenciometría, en relación suelo agua 1:2,5; fósforo disponible, por la técnica de Bray y Kurtz Nº 1; carbono oxidable, por Walkley y Black y nitrógeno total por micro-Kjeldhal (Page *et al.*, 1982).

Para estas propiedades, se estimaron las semivariaciones $\gamma(h)$ como función del lag h (vector separación entre localizaciones de muestras). Para un conjunto de observaciones $Z(x_i)$ tomadas en una transecta x y separadas una distancia Δx , $\gamma(h)$ se calculó de acuerdo a la expresión señalada por Trangmar *et al.* (1985):

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2}{2N(h)} \quad (1)$$

siendo $N(h)$ el número de pares de observaciones separadas una distancia h .

Los valores de $\gamma(h)$ en función de h (semivariograma), en algunos casos, se incrementan con h , alcanzando un valor constante llamado "umbral" a una distancia $h = a$, llamada "rango". Muestras separadas por distancias menores que a están relacionadas espacialmente (a es la distancia óptima de muestreo). En otros casos, los semivariogramas tienen un comportamiento lineal, creciente o con pendiente cero, por lo cual, no existe rango definido.

El valor de $\gamma(0)$ se llama variancia de "nugget" y representa una medida del error o microvariabilidad de la propiedad que no ha sido detectada en la escala de muestreo. Cuando el umbral (variancia total) es igual a la variancia de nugget, las variables se consideran espacialmente independientes y aleatorias (efecto de "nugget puro").

Los parámetros de los semivariogramas fueron determinados mediante el ajuste de los mismos, con modelos exponenciales:

$$\gamma'(h) = A - B \exp(-Cx)$$

donde el nugget es $A-B$, el umbral es A y el rango se estima como $3/C$; o bien con dos modelos lineales por tramo:

$$\gamma'(h) = D + Eh \quad \text{y} \quad \gamma'(h) = \text{cte}$$

donde el nugget es D , la constante (cte) es el umbral y el rango se establece en la intersección de las dos rectas.

Se estimaron las correlaciones cruzadas, $r_c(h)$, para carbono oxidable y nitrógeno, humedad y fósforo disponible y carbono y fósforo, a partir de la relación:

$$r_c(h) = \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} [F(x_i) - \bar{F}] [G(x_i + h) - \bar{G}]}{N(h) \sqrt{\text{var } F} \sqrt{\text{var } G}} \quad (2)$$

donde F y G son las variables medidas.

En este caso, el rango a señala la distancia dentro de la cual las dos variables están correlacionadas directa o inversamente (Nielsen *et al.*, 1983).

RESULTADOS

Los semivariogramas que no presentaron efecto de nugget puro y el ajuste de los modelos correspondientes se muestran en las figuras 1, 2 y 3. Los parámetros obtenidos de los modelos son: nugget, rango, umbral, nugget/umbral(%), y nivel de error (máxima desviación del ajuste). Estos resultados se muestran en el Cuadro 1. Las distintas variables, en barbecho, están correlacionadas con similares rangos para LC y SD (entre 3,5 y 4 m). Este comportamiento indica que la distancia óptima de muestreo es similar para todas las propiedades en la etapa de barbecho y un muestreo único para todas sería adecuado. La humedad tiene rangos mayores que las otras propiedades, al usar labranza convencional. Esto señala una distribución más homogénea del agua en el suelo en comparación con las otras propiedades. En floración, se pierde la correlación espacial de las variables, con efecto de nugget puro. Este hecho indica una alta variabilidad de todas las propiedades en esta etapa, señalando la necesidad de un muestreo a distancias menores que el realizado. En cosecha, sólo se presentó correlación espacial para nitrógeno y para carbono, en LC. El resto de las variables presentan gran variabilidad y un muestreo adecuado se impondría a distancias más pequeñas que la considerada inicialmente.

CUADRO 1. Valores de los parámetros de los semivariogramas

TABLE 1. Values of semivariograms parameters

	Labranza	Nugget	Rango (m)	Umbral	N/U, %	Máximo error
Barbecho						
Carbono	LC	0,0034	3,40	0,024	14	0,003
pH	LC	0,037	2,94	0,071	52	0,017
Humedad	LC	1,3	6,67	5,47	24	2,00
Nitrógeno	LC	0,029	3,06	0,074	39	0,015
Fósforo	LC	133,63	3,50	313,51	43	38
Carbono	SD	0,011	3,80	0,075	15	0,019
Humedad	SD	0,87	2,74	12,52	7	3,00
Nitrógeno	SD	9,10 ⁻⁵	3,95	0,0008	12	0,00015
Fósforo	SD	24,09	5,36	286,9	8	44,4
Cosecha						
Carbono	LC	0,005	8,30	0,038	13	0,005
Nitrógeno	LC	4,10 ⁻⁵	3,20	0,0006	6	0,0001

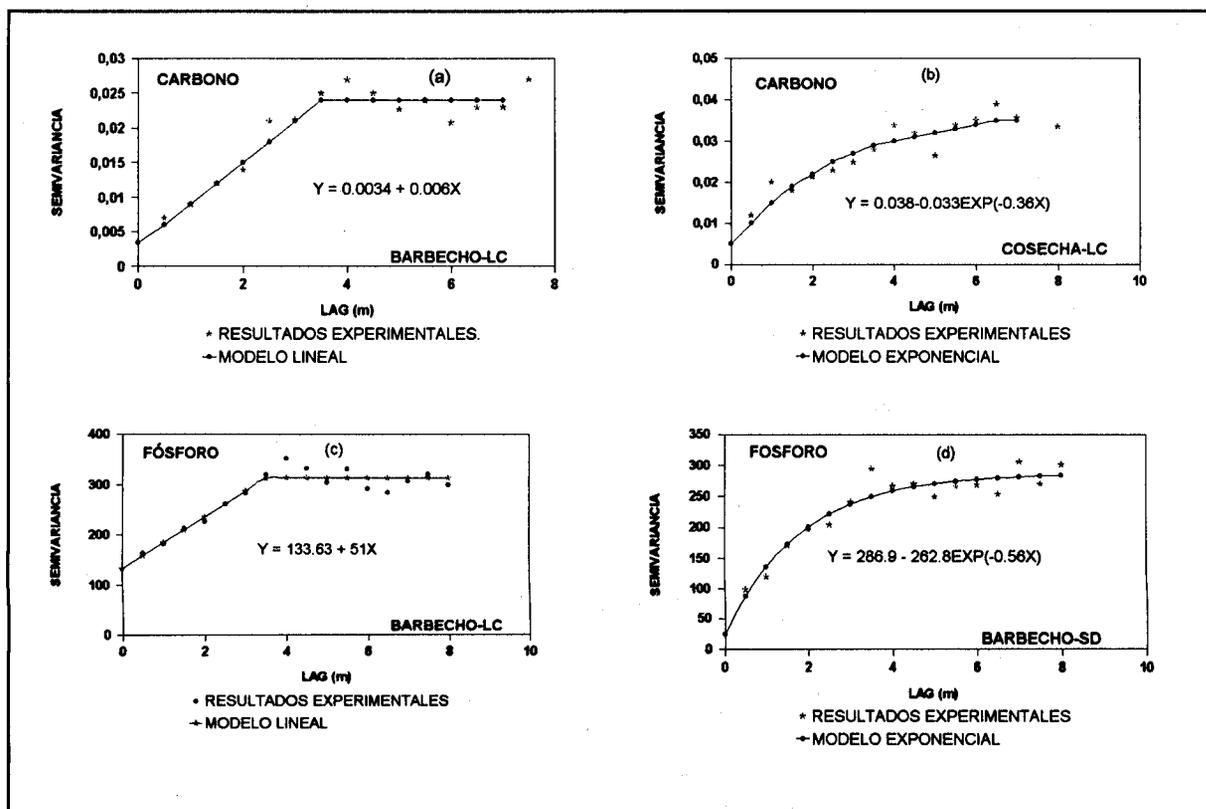


FIGURA 1. Semivariogramas de: carbono (a) barbecho-LC; carbono (b) cosecha-LC; fósforo (c) barbecho-LC; fósforo (d) barbecho-SD.

FIGURE 1. Semivariograms of: carbon (a) fallow-LC; carbon (b) harvest-LC; phosphorus (c) fallow-LC; phosphorus (d) fallow-SD.

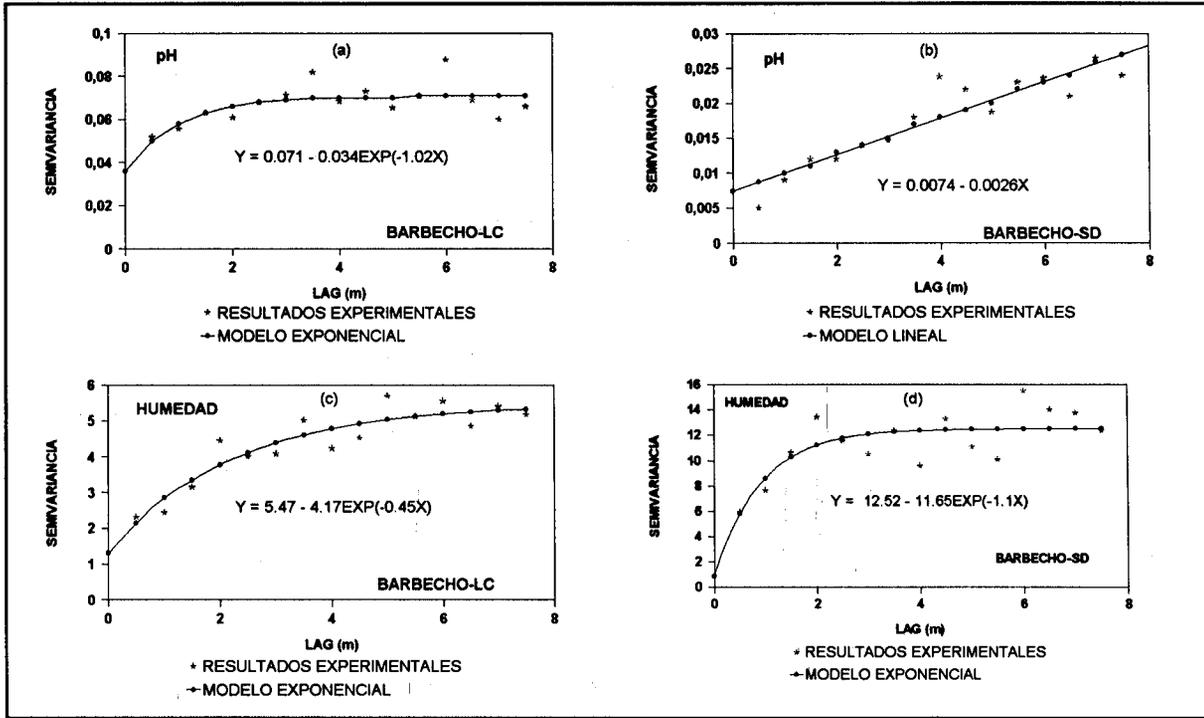


FIGURA 2. Semivariogramas de: pH (a) barbecho-LC; pH (b) barbecho-SD; humedad (c) barbecho-LC; humedad (d) barbecho-SD.

FIGURE 2. Semivariograms of: pH (a) fallow-LC; pH (b) fallow-SD; humidity (c) fallow-LC; humidity (d) fallow-SD.

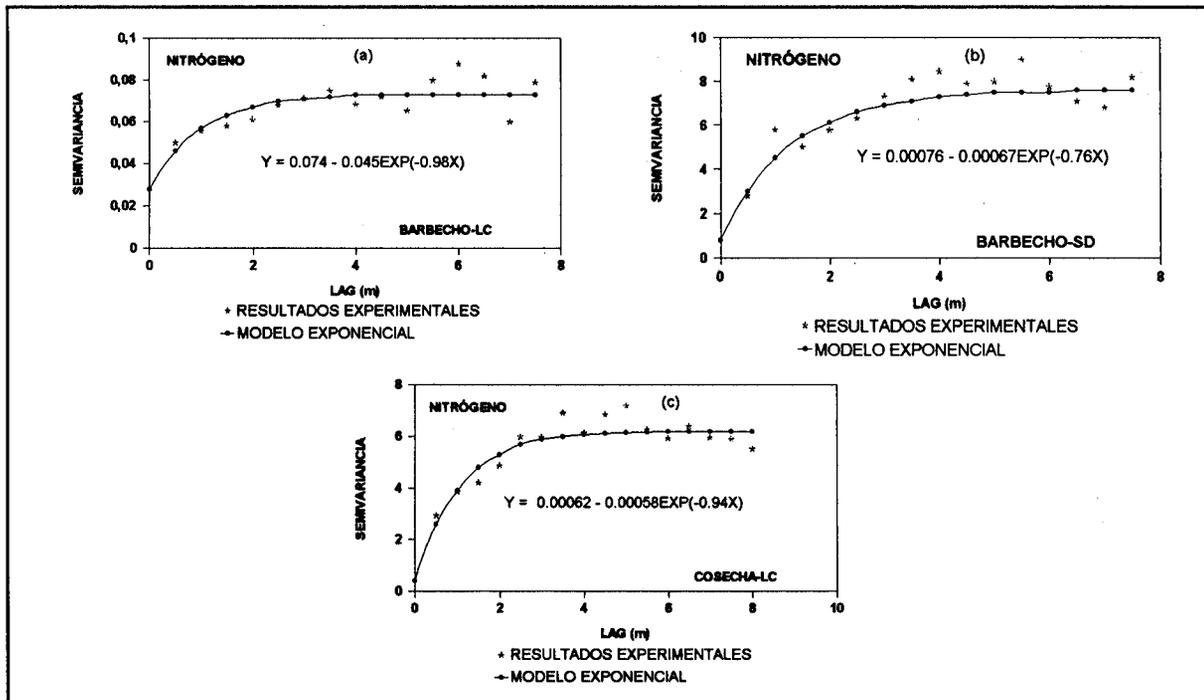


FIGURA 3. Semivariogramas de nitrógeno: (a) barbecho-LC; (b) barbecho-SD; (c) cosecha-LC.

FIGURE 3. Semivariograms of nitrogen: (a) fallow-LC; (b) fallow-SD; (c) harvest-LC.

La semivariancia de nugget expresada como un porcentaje del valor umbral (semivariancia total) permite una comparación del tamaño relativo del efecto nugget en las propiedades del suelo (Trangmar *et al.*, 1985). Cambardella *et al.* (1994) utilizaron esta razón para definir distintas clases de dependencia espacial de las variables del suelo: si la razón es $\leq 25\%$, la variable se la considera fuertemente dependiente espacialmente; si este coeficiente está entre el 25 y 75% la variable es moderadamente dependiente y si el valor es $> 75\%$ se la considera débilmente dependiente. De acuerdo a esta clasificación, considerando los porcentajes de nugget/umbral, en el caso de esta investigación, se puede observar que carbono es fuertemente dependiente espacialmente en barbecho para LC y SD y en cosecha para LC. También lo es humedad (barbecho, LC y SD), nitrógeno (barbecho (SD) y cosecha (LC)) y fósforo (barbecho, SD). Presentan moderada dependencia pH, N, y P en barbecho (LC). La presencia de correlación fuerte o moderada en las propiedades que presentan rango definido, asegura que tomar este último como distancia óptima de muestreo es bastante adecuado.

Los correlogramas cruzados de carbono y nitrógeno en LC y SD para barbecho y cosecha se

muestran en la Figura 4 (a, b, c, d). Se observó correlación espacial cruzada entre carbono y nitrógeno para LC, en barbecho ($r_c(0) = 0,8$) y en cosecha ($r_c(0) = 0,5$), mientras que para SD, se le observó en las tres etapas. Carbono y fósforo presentaron correlación positiva para LC (Figura 5 a, b, c). En estos dos casos, el muestreo de una sola de estas propiedades daría información sobre el comportamiento de la otra. Humedad y fósforo sólo exhibieron una correlación inversa en floración para LC (Figura 5 d).

DISCUSIÓN

En las condiciones de esta experiencia, considerando todas las propiedades en conjunto, un único muestreo inicial en barbecho resulta muy apropiado, ya que las distintas variables presentan prácticamente el mismo rango de influencia (distancia a la cual las muestras pueden considerarse independientes), por lo que un muestreo cada 3 m permitiría describirlas totalmente. Además, en el posible caso de alguna deficiencia nutricional ésta podría ser subsanada al implantar el cultivo siguiente.

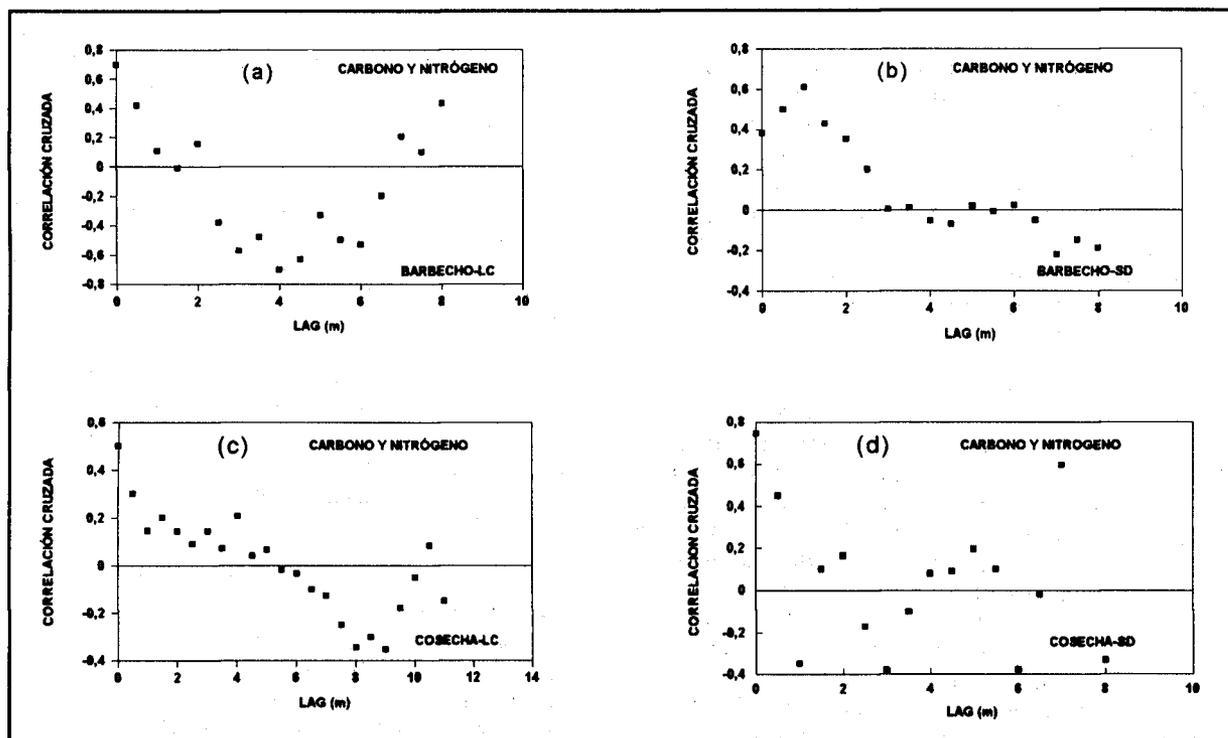


FIGURA 4. Correlogramas cruzados de carbono y nitrógeno: (a) barbecho-LC; (b) barbecho-SD; (c) cosecha-LC; (d) cosecha-SD.

FIGURE 4. Cross-correlograms of carbon and nitrogen: (a) fallow-LC; (b) fallow-SD; (c) harvest-LC; (d) harvest-SD.

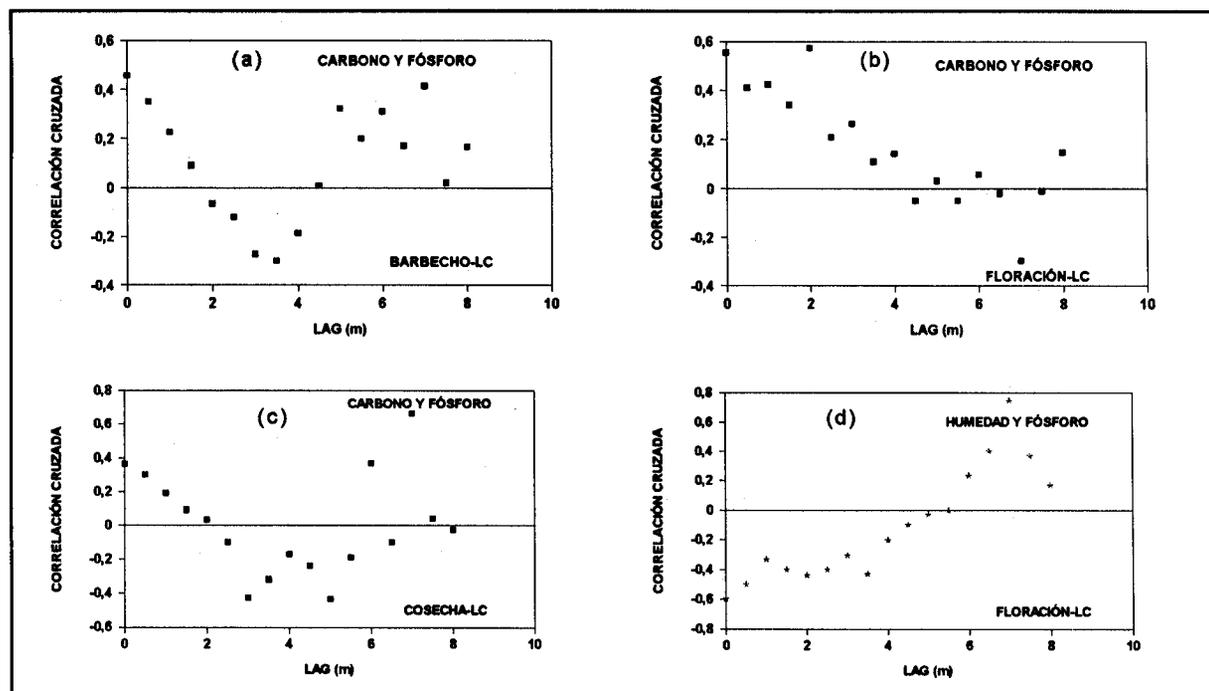


FIGURA 5. Correlogramas cruzados de carbono y fósforo: (a) barbecho-LC; (b) floración-LC; (c) cosecha-LC; humedad y fósforo (d) floración-LC.

FIGURE 5. Cross-correlograms of carbon and phosphorus (a) fallow-LC; (b) flowering-LC; (c) harvest-LC; humidity and phosphorus (d) flowering-LC.

Se observan semivariogramas lineales de pH (barbecho, SD) y humedad (cosecha, SD) (no se alcanza un valor umbral, estando la propiedad correlacionada para cualquier distancia). Esto sugiere la escasa variabilidad en esas propiedades, probablemente, debido a la homogeneidad de los valores de pH para este tipo de suelos y al elevado contenido hídrico, producto de las abundantes precipitaciones acaecidas en el año del ensayo.

La falta de correlación espacial de las propiedades en la etapa de floración señala que los valores muestreados son independientes para cualquier distancia de muestreo, lo cual implicaría la necesidad de un muestreo más intensivo que el realizado en esta experiencia, para todas las variables a estudiar. Esto podría deberse a que la gran demanda nutricional que se produce hasta la floración afectaría de distinta manera a los nutrientes del suelo, produciendo aleatoriedad en las propiedades del suelo en el momento de la cosecha (el efecto "nugget puro" también se observa en cosecha, exceptuando C y N). Además, concuerda con el hecho de considerar la aplicación de fertilizantes y la presencia del cultivo como fuentes de aleatoriedad y de debi-

lidad en la dependencia espacial de las propiedades del suelo propuesto por Cambardella *et al.* (1994).

La fuerte dependencia espacial que poseen C, por un lado y N por otro (exceptuando cosecha en SD), podría estar controlada por variaciones intrínsecas en las características del suelo, tales como textura y minerales (Cambardella *et al.*, 1994).

Se ha presentado gran correlación espacial cruzada entre carbono y nitrógeno para LC, en barbecho y en cosecha, mientras que para SD, se la observó en las tres etapas. Esto confirma la gran asociación existente entre nitrógeno y materia orgánica.

Se corroboró una correlación inversa entre humedad y la provisión de fósforo para las plantas en floración (LC). Estos resultados coinciden con los hallados por Magid y Nielsen (1992). Para estos suelos, ricos en fósforo, la provisión de este elemento en solución podría no estar limitada por la humedad del suelo, debido a la gran riqueza en apatitas del material original.

Carbono y fósforo están correlacionados espacialmente en LC, no así en SD. Esto podría estar vinculado con el aporte de otros fosfatos por una mayor mineralización del P, posiblemente al medio más oxidativo que crea la LC.

Las variaciones mínimas en las determinaciones de pH, probablemente, no alteren el ritmo de descomposición de la materia orgánica; debido a este efecto, no se presentó correlación cruzada entre carbono y pH.

Si bien Cambardella *et al.* (1994) han observado similitud en el comportamiento espacial de las propiedades del suelo para distintas zonas, lo que permitiría la extrapolación de los resultados, es de destacar que éstos dependen, en general, de la escala espacial utilizada. Por ello, es conveniente aplicarlos sólo a zonas con similares características de suelo y dimensiones espaciales.

RESUMEN

Se estudió a través de un análisis geoestadístico, la variabilidad espacial de la humedad, pH, contenido de carbono oxidable, nitrógeno total y fósforo, para un Argiudol típico cultivado con maíz, en parcelas con labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Se realizaron análisis para tres etapas del cultivo: barbecho, floración y cosecha.

De los semivariogramas y modelos de ajuste, resultaron correlacionadas con rangos similares (del orden de 3 m), C, N y P, para SD y LC, en barbecho. Esto sugiere que un único muestreo es suficiente para describir las propiedades, midiéndolas cada 3 m. La falta de correlación

espacial en las variables en floración implicaría la necesidad de un muestreo más intensivo que el realizado para las variables más limitantes. En la etapa de cosecha, sólo hubo correlación en N y C, para LC. Además, estos últimos presentaron correlación cruzada en LC y SD, para barbecho y cosecha. Esto se debe, probablemente, a la gran asociación entre N y materia orgánica. Humedad y P sólo presentaron correlación inversa en floración, en LC, C y P se correlacionaron positivamente en LC.

Palabras claves: labranza, propiedades del suelo, geoestadística, correlación espacial, Argentina.

LITERATURA CITADA

- CAMBARDELLA, C., MOORMAN, T., NOVAK, J., PARKIN, T., KARLEN, R., TURCO, R. and KONOPKA, A. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal* 58(5): 1.501-1.511.
- CONTI, M.E., ARRIGO, N., PALMA, M. y VÁZQUEZ, M.E. 1980. Efecto de las variaciones estacionales, profundidad de muestreo e influencia de los distintos manejos sobre los resultados de C,N,P y pH de los suelos. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Actas IX Reunión Argentina de Ciencia del Suelo, Paraná, Argentina. II: 273-286.*
- DI PIETRO, L., DE RAVERA, L. y DE KLEBER, V. 1986. Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ciencia del Suelo* 2: 99-106.
- LÓPEZ CAMELO, L., FUMAGALLI, C., SIERRA, J. y RATTO, S. 1993. Variabilidad espacial de fósforo en suelo y planta en un argiudol típico bajo cultivo de maíz. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Actas del Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza, Argentina. p.: 211-212.*
- KACHANOSKI, R., ROLSTON, D. and JONG, E. 1985. Spatial variability of a cultivated soil as affected by past and present microtopography. *Soil Science Society of American Journal* 49: 1.082-1.087.
- KNIGHTON, R.E. and JAMES, D.W. 1985. Soil test phosphorus as a regionalized variable in leveled land. *Soil Science Society of American Journal* 49: 675-679.
- MAGID, J. and NIELSEN, N.E. 1992. Seasonal variation in organic and inorganic phosphorus fractions of temperate-climate sandy soils. *Plant and Soil* 144: 155-165.
- MUELLER-HARVEY, I., JUO, A. and WILD, A. 1985. Soil organic C,N,S and P after forest clearance in Nigeria: mineralization rates and spatial variability. *Journal of Soil Science* 36: 585-591.
- NIELSEN, D., TILLOTSON, P. and VIEIRA, S. 1983. Analyzing field-measured soil-water properties. *Agricultural Water Management* 6: 93-109.
- O' HALLORAN, I.P., KACHANOSKI, R.G. and STEWART, J.W.B. 1985. Spatial variability of soil P as influenced by soil texture and management. *Canadian Journal of Soil Science* 65: 475-487.

PAGE, A.L., MILLER, R.H. and KEENEY, D.R. (ed.). 1982. Methods of soil Analysis. Part 2, 2nd ed. Wisconsin, USA. p.: 1.159.

TRANGMAR, B.B., YOST, R.S. and UEHARA, G. 1985. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy 38: 45-94.

SVIDOVSKY, B., SAINATO, C. y ORDEN, S. 1994. Aplicación de la geoestadística al estudio de la temperatura y humedad del suelo con riego controlado en invernaderos y a campo. Asociación Argentina de Horticultura. XVII Congreso Argentino. VI Congreso Latinoamericano de Horticultura. Huerta Grande, Córdoba, Argentina. p.: 43.