

ESTUDIO GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES DEL SUELO EN UN CULTIVO DE TRIGO CON DISTINTOS SISTEMAS DE LABRANZA

¹BEATRIZ LOSINNO*; CLAUDIA SAINATO*; NILDA ARRIGO**;
LIDIA GIUFFRÉ** y CARLA PASCALE**

Recibido: 06/06/99

Aceptado: 20/03/00

RESUMEN

Sobre un suelo Argiudol típico cultivado con trigo (*Triticum aestivum* L.) con dos sistemas de labranza siembra directa (SD) y labranza reducida (LR) sobre una transecta de 9m, se evaluó la variabilidad espacial del carbono oxidable (Co), pH, nitrógeno total (Nt), fósforo extraíble (P) y humedad actual en muestras de suelo extraídas en diferentes estadios del cultivo.

Mediante metodología geoestadística se calcularon los semivariogramas de las distintas propiedades que permitieron determinar los rangos de muestreo óptimo de las que presentaron correlación espacial, mientras que en otros casos se observó efecto de nugget puro (variable no correlacionada). Los rangos, determinados por la correlación espacial, permitieron establecer cómo realizar un muestreo representativo para cada estado fenológico. Se estableció que para LR en el estado de grano lechoso, se puede obtener un muestreo representativo de pH y humedad con un intervalo de muestreo de 2 m.

Para SD, en barbecho, la humedad puede muestrearse en forma óptima con una sola extracción en la transecta. El resto de las propiedades edáficas presentaron una alta variabilidad, en la escala de muestreo utilizada.

Se establecieron las correlaciones cruzadas entre todas las variables, resultando: Nt-Co, Humedad-PH y Humedad -P, con una correlación que no supera el valor 0,5.

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

GEOSTATISTICAL STUDY OF SOIL PROPERTIES IN A «WHEAT CROP» WITH DIFFERENT TILLAGE SYSTEMS

SUMMARY

The spatial variability of oxidable carbon, pH, total nitrogen, available phosphorus and humidity in a Typic Argiudoll soil cultivated with *Triticum aestivum* L. with reduced tillage (LR) and no-tillage (SD), over a 9 m transect was evaluated for different stage of the crop. The Semivariograms of the different property calculated with geoestatistical analysis were used to determine the different ranges for optimal sampling distance for the ones that showed spatial correlation, except in the cases where a pure nugget effect was present (a non-correlated variable). For LR, at the stage in milky grain, a representative sampling of pH and humidity may be obtained with an interval of 2m.

For SD, at fallow, humidity may be optimally sampled with only one extraction in the transect. The rest of soil properties showed high variability at the sample scale used.

The properties that showed some case of spatial correlation were humidity, Nt, pH and P for different tillages and stages.

The cross-correlations between all the variables were investigated, resulting: Nt-Co, Humidity-pH and Humidity-P with a correlation less than 0,5.

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

¹*Cátedra de Física, **Cátedra de Edafología-Fac. de Agronomía-Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453. (1417) Buenos Aires, Argentina.

INTRODUCCION

El estudio de la variabilidad espacial de propiedades del suelo ha reactualizado su aplicación, debido a nuevas tecnologías de manejo de lotes por sitio específico con sistemas GIS.

Para la determinación óptima de número de muestras, se pueden utilizar técnicas de la estadística clásica en función de un error permitido (precisión) o bien mediante los métodos geoestadísticos. Estos últimos permiten la evaluación de las relaciones espaciales entre las muestras estableciendo un rango óptimo de muestreo que defina la distancia entre observaciones, ubicación, número y tamaño apropiado de las muestras.

El análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo conduce a la posibilidad de realizar interpolaciones por Krigging, es decir, estimar valores desconocidos de las propiedades dentro de una grilla basándose en los datos conocidos de las mismas en sitios cercanos (Webster, 1985).

Esto es de suma utilidad para el monitoreo de las propiedades del suelo y la aplicación adecuada de fertilizantes, herbicidas y pesticidas.

Kachanosky *et al.* (1985) destacan, entre otras causas de la variabilidad, el efecto de las labores culturales. 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, y el componente aleatorio no se relaciona con causas conocidas y está vinculado a una heterogeneidad no explicable.

Con el objeto de hacer un análisis preliminar de la distribución espacial de las propiedades edáficas para distintos sistemas de labranza, se estudió la variabilidad espacial del pH, el contenido de carbono oxidable (Co), la humedad gravimétrica (% H₂O), el nitrógeno total (Nt) y fósforo extraíble (P) en un suelo Argiudol típico cultivado con trigo (*Triticum aestivum* L.), con labranza reducida (LR) y siembra directa (SD).

Se propuso determinar rangos de correlación espacial de las propiedades, a fin de evaluar los comportamientos para diferentes estadíos bajo distintos sistemas de labranza. Estos resultados conforman un trabajo preliminar del estudio de la variabilidad espacial de las propiedades edáficas dado el

carácter local y de pequeña escala del experimento. Sabiendo que los resultados geoestadísticos dependen fuertemente del tamaño de las transectas, los resultados aquí obtenidos tienen vigencia en la escala utilizada. Sin embargo, estos resultados preliminares sirven de base para encarar estudios a mayor escala en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo del ensayo es un Argiudol típico, cultivado con trigo (*Triticum aestivum*, L.), implantado con labranza convencional (LR) y siembra directa (SD) en la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Marcos Juárez, Provincia de Córdoba, Argentina). Los tratamientos fueron: labranza reducida y siembra directa, se utilizó como testigo una pastura degradada de *Festuca arundinacea* L. y *Medicago sativa* L., adyacente al ensayo.

La labranza reducida se efectuó con cincel a 15 cm de profundidad, rastra de discos a 10 cm de profundidad y rastra de dientes.

La siembra directa se realizó con una sembradora especial.

El control de malezas se realizó con Misil y 2-4 D durante el barbecho, y luego se aplicó Misil al cultivo en ambos tratamientos.

Se muestreó en una transecta perpendicular a las labranzas, según lo indicado por Chung *et al.* (1995), obteniéndose 30 muestras por tratamiento, (cada 30 cm), de 0-5 cm de profundidad.

En el caso del testigo se hizo un muestreo con idéntico patrón.

Los puntos de muestreo se identificaron mediante estacas, obteniéndose muestras en las siguientes épocas: 2-3 hojas de trigo, grano lechoso, y cosecha; durante la cosecha 1994 - 1995.

En la pastura se realizó un procedimiento idéntico de muestreo.

Los análisis realizados en las muestras de suelo fueron: humedad (método gravimétrico); pH (potenciometría, en relación suelo agua 1:2,5); fósforo extraíble (Bray y Kurtz N°1); carbono oxidable (Walkley y Black) y nitrógeno total (micro-Kjeldhal) (Page *et al.*, 1982).

Análisis geoestadístico de las propiedades del suelo

Las propiedades del suelo antes citadas fueron analizadas mediante el método geoestadístico, a fin de evaluar las posibilidades de aplicación de esta metodología a superficies de mayor escala y con un superior número de muestras.

Fundamentos básicos del análisis geoestadístico

Las variaciones espaciales con interdependencia se describen en geoestadística con correlogramas y semivariogramas.

Para un conjunto de observaciones Z tomadas en una transecta x y separadas una distancia Δx se estima la autocorrelación como función del lag h (vector separación entre localización de muestras) con:

$$r(h) = \frac{\sum [Z(x_i) - \bar{Z}] [Z(x_i+h) - \bar{Z}]}{[N(h)-1] \text{var}[Z(x_i)]}$$

siendo $N(h)$ el número de pares de observaciones separadas una distancia h . (Trangmar *et al.*, 1985)

El lag h se refiere a la distancia involucrada entre dos muestras, que puede variar entre el valor correspondiente a 2 muestreos contiguos hasta un valor que se estimó conveniente en un valor igual a la mitad de la transecta.

El correlograma (gráfico de $r(h)$ en función de h), permite establecer la distancia máxima entre las observaciones más allá de la cual no habrá correlación entre pares de valores.

Se requiere para su cálculo suposiciones de estacionariedad fuerte. Estas son las siguientes:

1) La esperanza de Z en cualquier x es el valor medio.
 $E[Z(x)] = \bar{Z}$

2) Para cualquier h la diferencia $[Z(x) - Z(x+h)]$ tiene una varianza finita, que es independiente de x .

En el caso de fuerte estacionariedad, se puede estimar la semivarianza como:

$$\gamma(h) = S^2 [1 - r(h)], \text{ donde } S^2 \text{ es la varianza de } Z$$

Cuando estas condiciones no pueden asegurarse, como lo es el presente caso la semivarianza se estimó como:

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

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

Para las propiedades del suelo analizadas, se estimaron las semivarianzas $\gamma(h)$ como función del lag h (vector separación entre localizaciones de muestras).

Los valores de $\gamma(h)$ en función de h (semivariograma), en algunos casos, se incrementan con h , alcanzando un valor constante asintótico llamado «umbral»

a una distancia $h = a$ llamada «rango». Muestras separadas por distancias menores que «a» están relacionadas espacialmente (es decir «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.

En la práctica, muchas propiedades del suelo indican $\gamma \neq 0$ cuando $h \rightarrow 0$. Este valor se llama varianza de «nugget» y representa una medida del error experimental de la medición o microvariabilidad de la propiedad dentro de la muestra que no ha sido detectada en la escala de muestreo, esto significa que existe una fuente de variación espacial con un rango mucho menor que el intervalo de muestreo. Cuando el umbral (varianza total) es igual a la varianza de nugget, las variables se consideran espacialmente independientes y aleatorias (efecto de «nugget puro»).

La semivarianza de nugget expresada como un porcentaje del valor umbral (semivarianza 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 $< 25\%$, la variable se la considera fuertemente dependiente espacialmente; si este coeficiente está entre 25 y 75% la variable es moderadamente dependiente y si el valor es $> 75\%$ se la considera débilmente dependiente.

Dadas las características de las curvas de los semivariogramas, estos fueron ajustados con modelos exponenciales del tipo

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

donde el nugget es $A - B$, el umbral es A y el rango se estima como $3/C$.

Se estimaron las correlaciones cruzadas, $r_c(h)$, para todo el conjunto de propiedades, a partir de la relación:

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

Un correlograma cruzado para dos variables correlacionadas linealmente hasta una distancia «a» deberá tomar valores ± 1 para $h \rightarrow 0$ y valores 0 para $h > a$. El rango «a» señala la distancia dentro de la cual las dos variables están correlacionadas directa o inversamente (± 1).

El correlograma cruzado permite estimar la correlación entre dos variables F y G , y es especialmente útil cuando una de las dos variables es difícil de obtener (Nielsen *et al.*, 1983).

En los cálculos se suele tomar como máximo valor de h la mitad de la transecta. Las estimaciones, cálculos de semivariogramas y correlaciones cruzadas fueron realizadas mediante un programa elaborado en lenguaje Basic (Sainato *et al.*, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis de los semivariogramas

Se calcularon los semivariogramas de todas las propiedades analizadas, presentando distintas características: efecto de nugget puro, semivariograma

lineal, semivariograma asintótico que fue modelado con una función exponencial.

Los semivariogramas que presentaron efecto de Nugget puro son los presentados en el Cuadro N°1.

Los restantes semivariogramas se muestran, con los ajustes correspondientes, en la Figura 1, para pH y fósforo; en la Figura 2 para humedad y en la Figura 3, para nitrógeno y carbono. Los parámetros obtenidos de los modelos son: nugget, rango, umbral, nugget/umbral(%), y nivel de error (máxima desviación del ajuste) (Cuadro N°2). Analizando estos resultados para los distintos estadios del cultivo se puede observar:

Cuadro N° 1. Parámetros característicos obtenidos de la modelización de los semivariogramas que no presentaron Nugget Puro. Donde Vn= Varianza de Nugget, r = rango, U =umbral.

1er. Muestreo	Labranza	Nugget	Rango	Umbral	N/U%	Error Max
Humedad						
N	SD	2,71	Tendencia	11	18	1,39
	LR	2	1,8			2,6
N	SD	0,00014	Tendencia			0,5
	2do. Muestreo					
Humedad						
PH	T	0,83	2,05	8,95	9	1,5
	LR	0,01	2,4	10	0,1	1,7
PH	T	0,01	2,4	0,055	18	0,014
	LR	0,0003	2,4	0,02	1,5	0,004
Carbono						
N	T	0,005	3	0,025	20	0,006
	T	0,001	1,2	0,0033	3	1,007
3er. Muestreo						
P						
PH	SD	14	1,7	107	13	30
	LR	0,008	1,2	0,01	80	0,005
N	SD	0,00002	2,7	0,00057	3,5	0,56

Cuadro N° 2. Resultados experimentales, propiedades que presentaron Nugget puro.

	Siembra Directa	Labranza Reducida	Testigo
1er. Muestreo	pH-P-Co	pH-P-Nt	Humedad-P-Nt-Co
2do. Muestreo	Humedad-pH-P-Nt-Co	P-Nt-Co	P
3er. Muestreo	Humedad-pH-Co	Humedad-P-Nt-Co	Humedad-P-Nt-Co

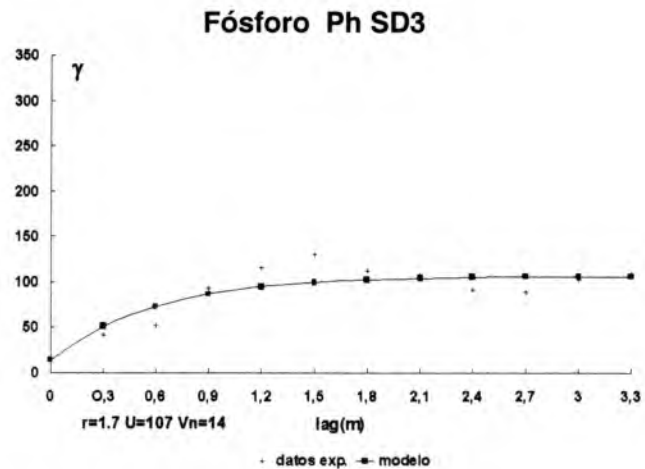
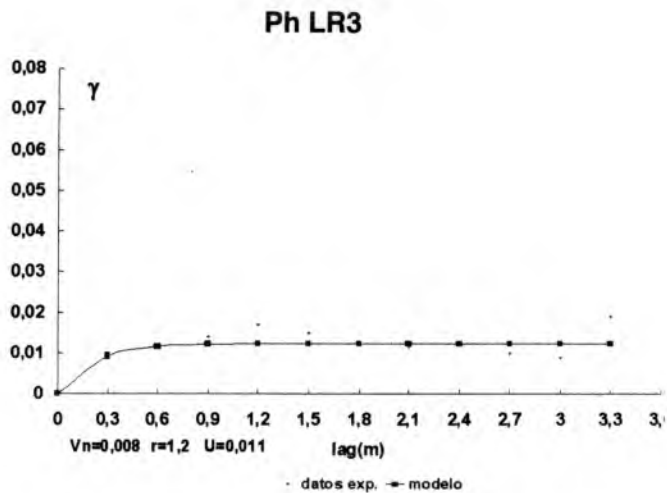
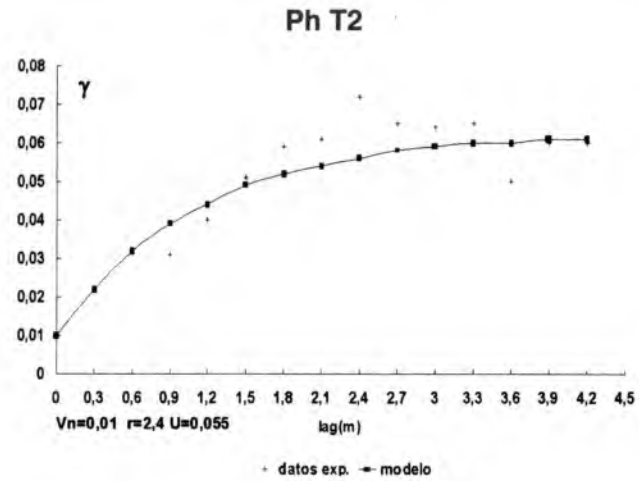
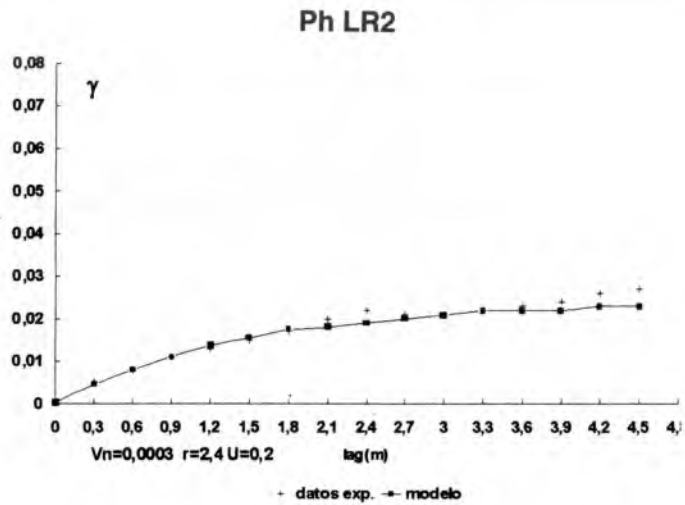


Figura 1. Semivariograma de: Ph (2do.muestreo)-LC, (2do.muestreo)-T, (3er. muestreo)-LC; Fósforo (3er. muestreo)-SD.

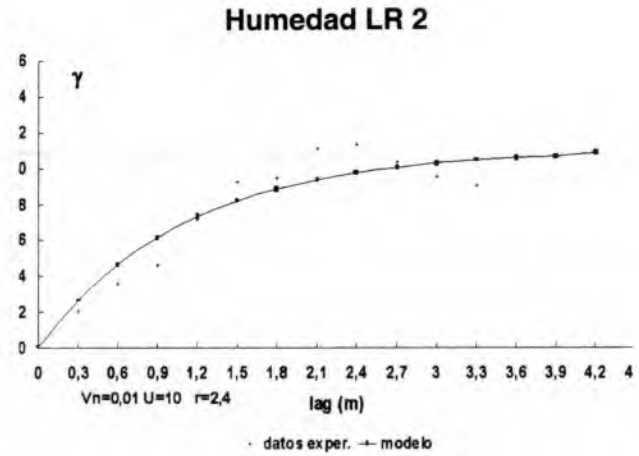
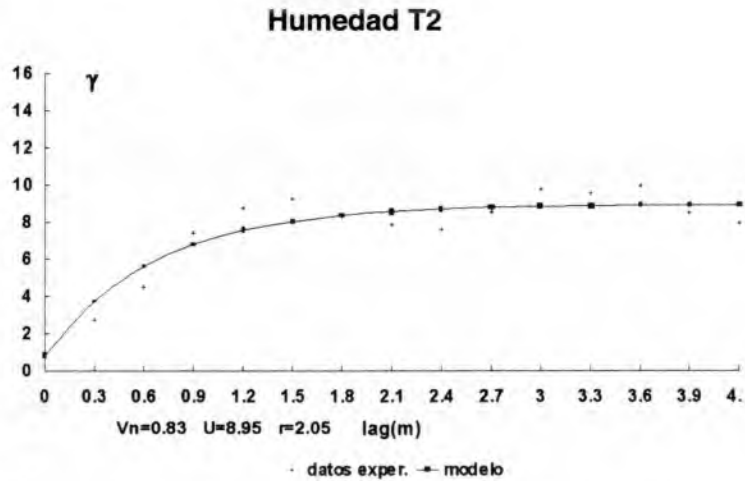
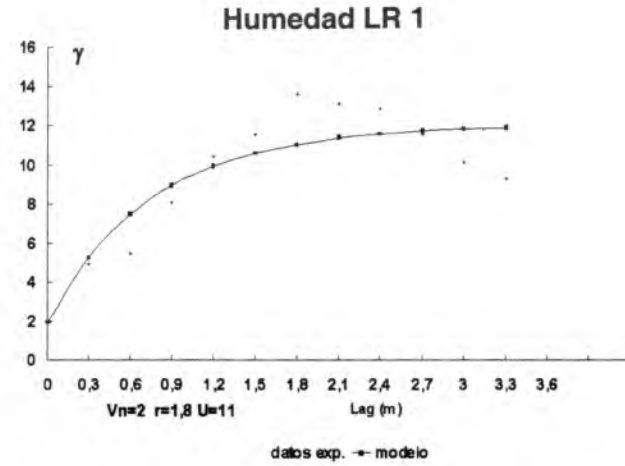
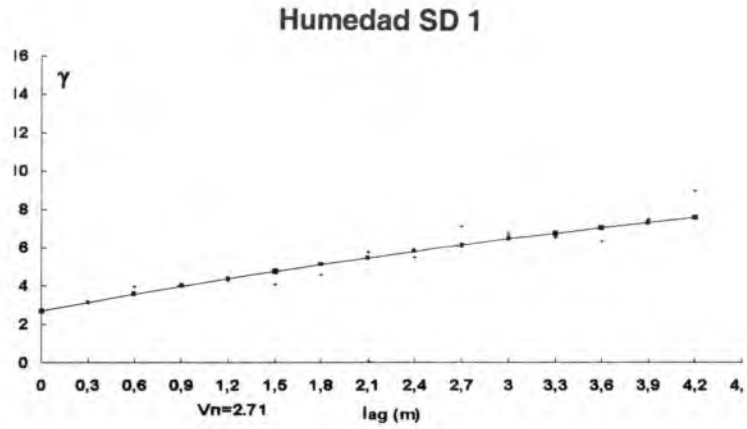


Figura 2. Semivariograma de: Humedad (1er.muestreo) -SD y -LC, (2do. muestreo) -T y -LC.

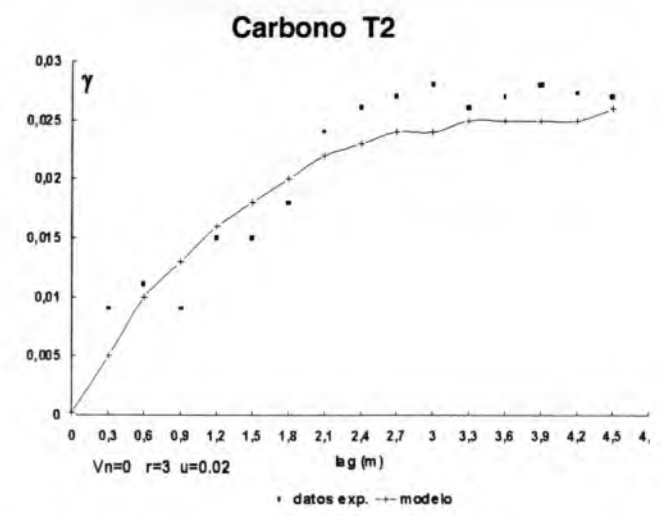
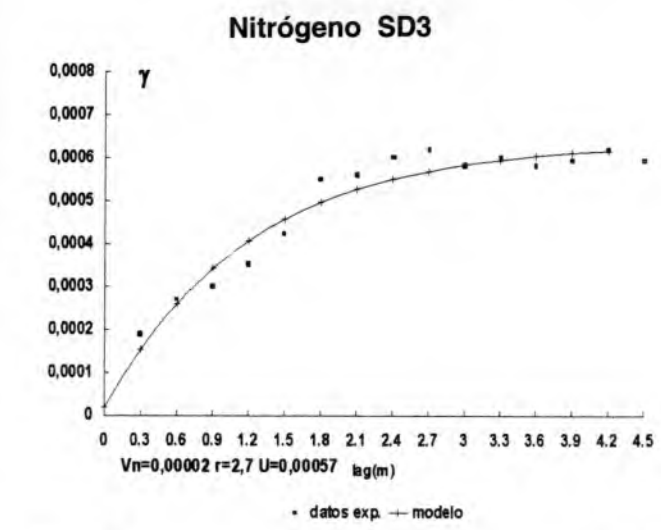
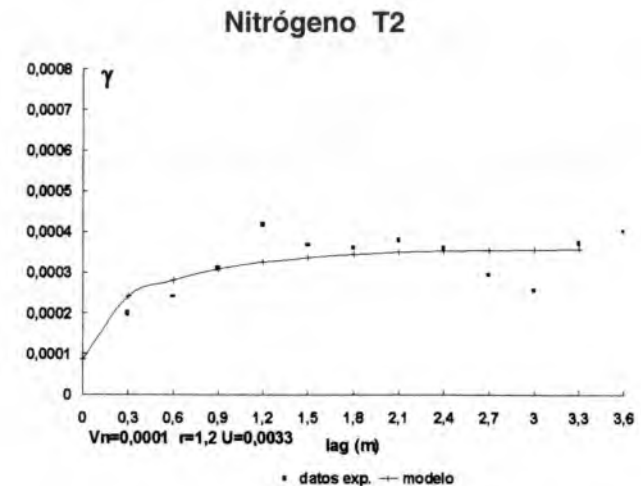
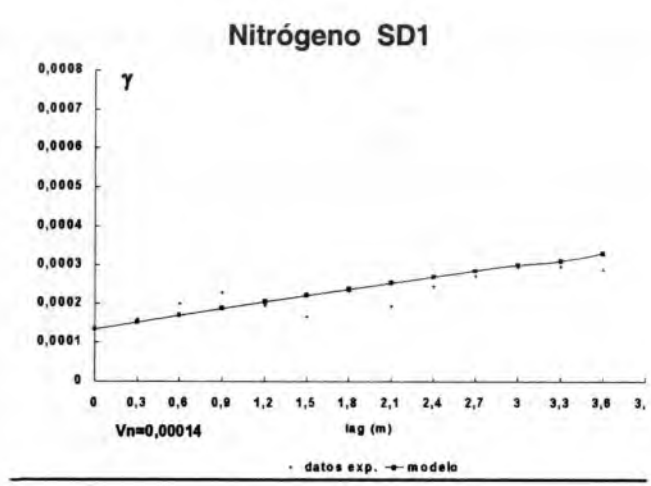


Figura 3. Semivariograma de: Nitrógeno (1er.muestreo)-SD, (2do. muestreo)-T, (3er.muestreo)-SD. Carbono (2do.muestreo)-T.

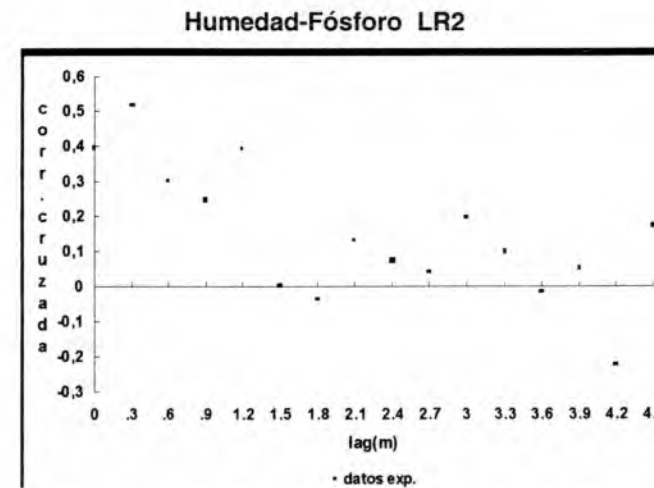
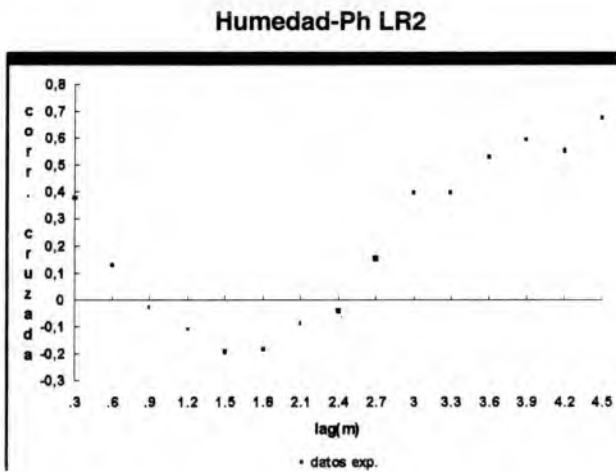
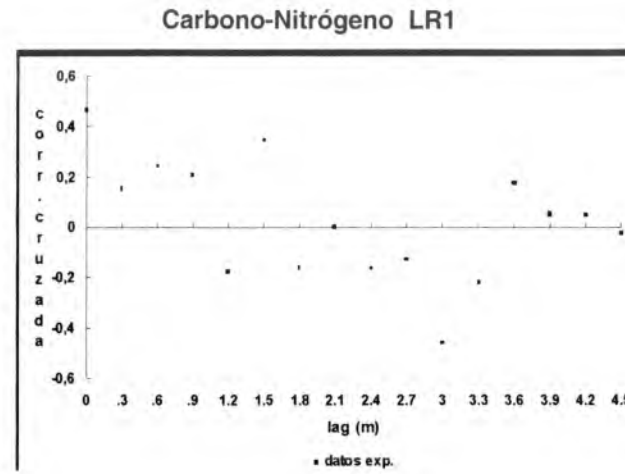
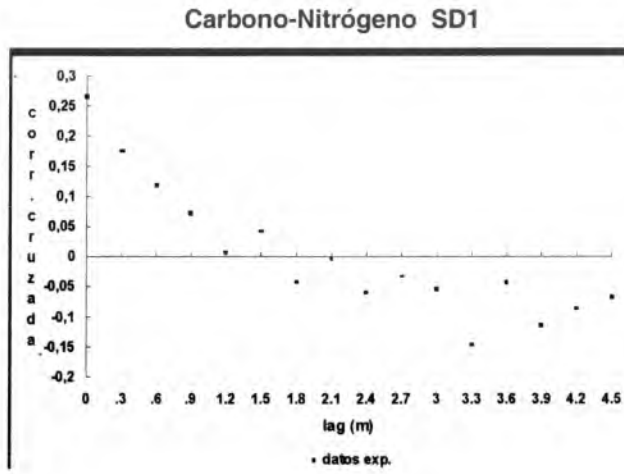


Figura 4. Correlogramas cruzados de: Carbono y Nitrógeno (1er.muestreo) - SD y -LC. Humedad y ph (2do.muestreo)-LC, Humedad y Fósforo (2do.muestreo) LC.

1er MUESTREO

Las únicas propiedades que presentaron correlación espacial fueron humedad (LR y SD) y nitrógeno en SD. El comportamiento lineal en humedad y nitrógeno (SD) indica un elevado rango de correlación. Por lo tanto para un muestreo óptimo de las dos propiedades en SD es necesaria una muestra por transecta. Para LR en cambio es necesario tomar una muestra cada 2m.

El fósforo (P), Carbono (Co) y pH presentaron efecto de NP (Nugget Puro) con lo cual se deduce que estas propiedades resultan ser muy poco correlacionadas espacialmente.

Es decir, en la escala de investigación no hay dependencia espacial, dado que existe micro-variabilidad dentro de la escala de muestreo.

2do. MUESTREO

Humedad y pH presentaron correlación espacial en LR con un muestreo óptimo conjunto cada 2,4 m (3 muestras por transectas).

El resto de las propiedades en LR presentaron NP, evidenciando una alta variabilidad.

En SD ninguna propiedad estuvo correlacionada espacialmente. Es decir, que con este tipo de labranza, en el segundo muestreo existió una alta variabilidad en todas las propiedades estudiadas.

Esto implicaría que habría que descartar esta época de muestreo.

3er. MUESTREO

En SD, sólo fósforo (P) y nitrógeno (N) han resultado estar correlacionadas espacialmente. Un muestreo conjunto de las mismas cada 1,7 m asegura la independencia de las muestras. En LR sólo pH presenta una correlación espacial con rango de 1,2m, aproximadamente.

En general las propiedades que han resultado correlacionadas espacialmente, lo son en forma fuertemente dependiente dado que los valores de Nugget/Umbral ($N/U\%$) son menores del 25%, excepto pH que es débilmente dependiente dado que la razón ($N/U\%$) es del 80%, (Cambardella *et al.* 1994).

Se observó además que las propiedades estrechamente relacionadas con el contenido de materia orgánica (P, N, Co) en LR no presentaron correlación espacial alguna en ningún estadío.

En SD se verificó correlación espacial en nitrógeno en el 1er. y 3er. muestreo. Esta correlación desaparece en el 2do. muestreo y podría deberse a la mayor demanda nutricional del cultivo en esta etapa, siendo este hecho fuente de aleatoriedad y debilidad en la dependencia espacial de las propiedades del suelo (Cambardella *et al.*, 1994). La falta de correlación espacial en ambas labranzas, de P y Co especialmente, señalan la imposibilidad de obtener un muestreo representativo.

En cuanto a la Humedad se observa en la primera etapa un comportamiento diferente del semivariograma para SD y LR.

En el primer caso, el modelado lineal podría reflejar un rango mayor que la distancia máxima de lag, con lo cual la distribución de Humedad resulta ser bastante homogénea. Esta característica no se mantiene para LR donde se observa un rango de aproximadamente 1,8m. Es de destacar que dicha homogeneidad podría ser debida a la conocida tendencia de tener mayores contenidos de humedad para SD que para LR.

Correlación Cruzada

Habiendo realizado la correlación cruzada entre todas las propiedades, se probó que las únicas que resultaron medianamente correlacionadas fueron Carbono-Nitrógeno, Humedad-pH y Humedad-Fósforo. (Figura 4)

Entre Co y Nt se observó una moderada correlación cruzada directa para LR y SD sólo en 1er. muestreo, hasta distancias de 1m. El testigo analizado presentó este comportamiento en el 1er. muestreo hasta 1,5 m y en el 2do. hasta 2,5 m. El análisis del testigo, refleja el comportamiento del suelo nativo e indica que la correlación cruzada entre ambos componentes orgánicos se mantiene hasta el 2do. muestreo. En cambio, la presencia del cultivo elimina la correlación cruzada en etapas posteriores al 1er. muestreo.

La humedad y fósforo presentaron correlación cruzada directa hasta aproximadamente 1,5m en LR en el 2do.muestreo.

Humedad y pH presentaron moderada correlación cruzada hasta aproximadamente 1m. en el 1er. y 2do. muestreo en LR.

Un estudio anterior de Sainato *et al.* (1996) sobre una parcela cultivada con maíz arrojó una mayor correlación de las propiedades edáficas, aunque no se puede establecer una comparación cuantitativa dado que el trigo es un cultivo de invierno y el maíz de verano.

CONCLUSIONES

Las propiedades del suelo estudiadas mostraron distinta correlación espacial según la época de muestreo y el tipo de labranza.

A partir de los resultados del estudio geoestadístico realizado se puede concluir que en labranza reducida (LR), la medición de pH y humedad, se puede optimizar con un único muestreo en el estado de grano lechoso con un intervalo de 2m, pero para el resto de las propiedades los muestreos deberían

ser lo más intenso posible aunque no pudieran cumplirse las pautas geoestadísticas por cuestiones económicas.

En SD, la humedad sólo presentó correlación en el 1er. Muestreo, considerándose representativa una muestra por transecta. La presencia de alta variabilidad del Nt evidenciada en el estado de grano lechoso (2do.muestreo) puede deberse a la mayor demanda nutricional del cultivo que provoca una fuente de aleatoriedad. El resto de las propiedades edáficas analizadas presentaron efecto de nugget puro, señalando falta de correlación espacial, para la escala de muestreo utilizada. Es decir, en general las propiedades del suelo considerado presentaron una altísima variabilidad espacial a nivel microescala. La alta variabilidad de algunas propiedades en el 2do. y 3er. muestreo podría estar relacionado con la influencia de la temperatura que afecta los procesos biológicos, con el efecto del cultivo debido a su etapa de desarrollo, etc. Las correlaciones cruzadas entre variables en general resultaron bajas no superando en ninguno de los casos el valor 0,5, debido a la gran variabilidad existente para cada una de ellas por separado.

BIBLIOGRAFIA

- CAMBARDELLA C., T. MOORMAN, J. NOVAK, T. PARKIN, R. KARLEN, R. TURCO and A. KONOPKA, 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58(5):1.501- 1.511.
- KACHANOSKI R., D.ROLSTON and E.JONG, 1985. Spatial variability of a cultivated soil as affected by past and present microtopography. *Soil Science Society of American Journal* 49:1082-87.
- CHUNG C.K., SK CHONG and E. C.VARSA 1995.Sampling strategies for fertility on a nety loan soil-commun. *Soil Sci Plant Anal* 26: 741-763.
- O' HALLORAN I.P., R.G.KACHANOSKI and J.W.B.STEWART, 1985. Spatial variability of soil P as influenced by soil texture and management. *Canadian Journal of Soil Science* 65: 475 -487.
- MUELLER-HARVEY, I., A.JUO and A.WILD, 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.
- KNIGHTON, R. E. and D.W.JAMES, 1985. Soil test phosphorus as a regionalized variable in leveled land. *Soil Science Society of American Journal* 49: 675 - 679.
- NIELSEN, D., P.TILLOTSON and S.VIEIRA, 1983. Analyzing field-measured soil-water properties. *Agricultural Water Management* 6 : 93-109
- SAINATO, C., N. ARRIGO, L. GIUFFRÉ, B. SVIDOVSKY, S. ORDEN and M. PALMA. 1996. Sistemas de Labranza: análisis geoestadístico de propiedades de un suelo. *Agricultura Técnica*, 56: 49-56.
- OR, D. and J. HANKS. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induced by irrigation nonuniformity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 56:226-233.
- PAGE, A.L., R.H.MILLER and D,R,KEENEY, (ED.).1982. Methods of soil Analysis. Part2, 2nd ed. Wisconsin, USA, p.:1.159.
- TRANGMAR, B.B., R.S.YOST and G.UEHARA, 1985. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45 -94.
- WEBSTER, R.1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In *Advances in Soil Science*, vol3. De. Springer-Verlag, New York Inc.