

Efecto de la distribución espacial de las propiedades edáficas sobre el manejo de la fertilidad de dos suelos agrícolas

A study of spatial variability of the physical, chemical and biological properties of two agricultural soils for site specific fertilization management

María Teresa MORENO ARAUJO

Departamento de Ingeniería, Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia, Ciudad Universitaria, Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. E-mail: mariamoreno1968@hotmail.com

Recibido: 17/06/2009
Primera revisión recibida: 10/12/2009

Fin de primer arbitraje: 13/08/2009
Aceptado: 21/12/2009

RESUMEN

La investigación fue desarrollada en la Finca Experimental de la IRDA (Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement), en Saint-Lambert de Lauzon (Quebec, Canadá). Se seleccionaron dos suelos gleysol, frigid Aeric Haplaquept; el suelo A de la serie Le Bras fase franco-limosa, con un horizonte profundo franco arcilloso y drenaje imperfecto. El suelo B de la serie Le Bras, fase ligera y gruesa, con presencia de pedregosidad. En cada parcela experimental de 4000 m² se tomaron dos tipos de muestras de suelo en una red de muestreo de 10 x 10 m: Una de 0 – 20 cm de profundidad, y la otra cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad. Se determinó el potencial de mineralización del nitrógeno, respiración microbiana, actividad enzimática, textura, densidad aparente, pH (1:2), nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, carbono orgánico, fósforo disponible, potasio, calcio y magnesio intercambiable. A las muestras tomadas cada diez centímetros se les determinó la densidad aparente, carbono orgánico y nitrógeno total. Los análisis geoestadísticos se realizaron con el programa GS⁺ (Gamma Design Software, 2000) y los mapas de distribución espacial fueron hechos por interpolación puntual (kriging). La distribución espacial de la densidad aparente y el carbono orgánico mostraron una relación muy estrecha, incluso con la profundidad del suelo. El nitrógeno total del suelo, la relación C/N, el potencial de mineralización del nitrógeno, el contenido de nitratos y la respiración microbiana mostraron un patrón de distribución espacial similar al del carbono orgánico.

Palabras clave: Geoestadística, fertilidad de suelos, distribución espacial de propiedades del suelo, interpolación, kriging.

ABSTRACT

A study was carried out at the IRDA's Experimental Farm, located in Saint-Lambert de Lauzon (Quebec, Canadá). Two Gleysols were selected (frigid Aeric Haplaquept), soil A belongs to Le Bras series, silty loam, imperfectly drained and with a deep loamy clay horizon. Soil B belongs to Le Bras series, with coarse sandy and skeletal texture. The size of the experimental plots was about 4000 m² each. In early spring soil samples were taken in a 10 x 10 m grid resulting in forty sample sites. Two kinds of samples were taken, one of the toplayer between 0 and 20 cm and the other of each 10 cm. between 0 and 40 cm. Nitrogen mineralization potential, soil respiration, enzyme activity, texture, bulk density, pH (1:2), total nitrogen, N-NH₄, N-NO₃, organic carbon, available phosphorus, exchangeable potassium, calcium and magnesium of the samples taken from the toplayer and bulk density, organic carbon and total nitrogen of the samples from each of the 10 cm. layers were determined. Geostatistical analysis was performed by GS⁺ software (Gamma Design Software, 2000). Spatial distribution maps of soil properties were made by interpolation (kriging). Spatial variability of bulk density and organic carbon showed a close relationship, even in deep horizons. Total nitrogen, C/N and nitrogen mineralization potential, nitrates and soil respiration showed a spatial distribution pattern likes organic carbon spatial distribution.

Key words: Geostatistics, soil fertility, spatial distribution of soil properties, interpolation, kriging.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola intensiva ha elevado el consumo mundial de fertilizantes a más de 195 millones de toneladas anuales (FAO, 2008), generando serios problemas de residuos de nitratos (>

50 mg.L⁻¹) y fosfatos (> 0,1 mg.L⁻¹) en suelos y acuíferos, y emisiones anuales a la atmósfera de 1400 Gg de dióxido de carbono, 749 Gg de metano y 81 Gg de óxido nitroso (Brethour *et al.*, 2006). En la provincia de Quebec, las aplicaciones anuales de fuentes fertilizantes orgánicas (estiércol de bovino y

purín de cerdo) e inorgánicas, han originado acumulaciones de nitratos y fosfatos en el suelo que sobrepasan en 33% los requerimientos de nitrógeno y en 40% los requerimientos de fósforo de la mayoría de los cultivos cerealeros de la zona (Bachand, 1996). Esta situación plantea la necesidad de aplicar programas de fertilización racionales afín de emplear las cantidades estrictamente necesarias de fertilizantes para la producción óptima y rentable de los cultivos, disminuyendo el impacto ambiental negativo. Una manera de disminuir los excedentes de fertilizantes en el medio ambiente sería a través de la fertilización sitio-específica, es decir, la aplicación de diferentes cantidades de estos insumos teniendo en cuenta las características de fertilidad del suelo en distintas zonas del área cultivada. Para ello, se requiere evaluar la distribución espacial de las propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo agrícola, afín de determinar áreas con características similares de fertilidad, con el objetivo de obtener superficies de manejo homogéneo de la fertilización de los cultivos.

Esta investigación se realizó con el propósito de establecer zonas con características de fertilidad similares en dos suelos agrícolas de la provincia de Quebec, para el manejo de la fertilización de los cultivos en forma diferencial en cada zona y disminuir así las aplicaciones excedentarias de fertilizantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Finca Experimental del Instituto de Investigaciones de Desarrollo Agroambiental de Quebec (Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, IRDA), localizada en Saint-Lambert de Lauzon, 46° 05' N y 71° 02' O. La temperatura promedio anual es de 4 °C con una precipitación promedio de 1126 mm al año (Estación meteorológica de Beauséjour, del Ministerio del Ambiente de Quebec (Canadá), localizada a aproximadamente cuatro kilómetros del sitio experimental (46°40' N, 71°10' O). Se seleccionaron dos suelos gleysol (frigid Aerice Haplaquept), serie Le Bras, de la planicie de desborde del río de la Chaudière, siendo el suelo A de textura franco limosa, con fragmentos gruesos, horizonte profundo franco arcilloso y drenaje imperfecto. El suelo B tiene una fase ligera y gruesa, con pedregosidad (Rompré, 1985). Ambos suelos venían de una rotación cebada – trébol (pradera). A inicios de la primavera, se realizó un muestreo de suelo de 10 x 10 m en cada parcela experimental de 4000 m². Se

tomaron dos tipos de muestras: Una de 0 – 20 cm de profundidad, y otra cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad. A las muestras tomadas de 0 – 20 cm de profundidad se les determinó potencial de mineralización del nitrógeno (incubación y KCL 2N), respiración microbiana (evolución del CO₂), actividad de la ureasa (colorimetría), actividad de la fosfatasa (espectrofotometría), textura (Bouyucos), densidad aparente (Uhland), pH (suelo:agua, 1:1), nitrógeno total (Kjeldahl), nitrógeno nítrico y amoniacal (KCL 2N), carbono orgánico (Walkley-Black), fósforo disponible, potasio, calcio y magnesio intercambiable (Mehlich III).

Las muestras tomadas cada diez centímetros de profundidad se analizaron para obtener la densidad aparente, carbono orgánico y nitrógeno total. El programa GS⁺ (Robertson, 2000) fue empleado para realizar las evaluaciones geoestadísticas (semivariogramas) y crear los mapas de distribución espacial utilizando interpolación por kriging puntual.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los semivariogramas de las propiedades de los suelos A y B.

La mayoría de las propiedades del suelo A no mostraron una clara dependencia espacial, salvo la densidad aparente, el pH, el contenido de arcilla, el fósforo disponible, así como el calcio y magnesio intercambiables (cuadro 1). En contraste, en el suelo B se observó una más clara dependencia espacial en la mayor parte de sus propiedades (cuadro 2). Posiblemente, las diferencias marcadas entre la granulometría de ambos suelos, habrían afectado las variaciones espaciales y los patrones de distribución espacial de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Los parámetros de ambos suelos mostraron una estructura espacial isotrópica ajustada a una ecuación esférica, y en algunos casos, a un modelo exponencial. Estos resultados concuerdan por aquellos reportados en suelos aluviales por Peña *et al.*, (2009).

En ambos suelos, tanto la densidad aparente como el contenido de arcilla mostraron un efecto pepita cercano a cero, indicando la ausencia de variabilidad aleatoria a cortas distancias y la existencia de una fuerte estructura espacial (> 80%). Contrariamente, el fósforo disponible y las bases

intercambiables presentaron un marcado efecto pepita indicando la existencia de una alta variabilidad a cortas distancias. No obstante, se observó una moderada a fuerte estructura espacial en estas variables (> 50%). Investigaciones precedentes han destacado que el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio intercambiable muestran un comportamiento aleatorio en distancias menores a 10 m (Henríquez y Vilorio, 1999; Fernández *et al.*, 2007).

Del mismo modo, Sun *et al.*, (2003) explicaron que la variabilidad del fósforo en cortas distancias, obedecería a su alta interacción con la fase sólida del suelo. En contraste con las bases intercambiables de ambos suelos, las interacciones entre éstas presentaron un comportamiento regionalizado aún a cortas distancias (efecto pepita alrededor de cero), manteniendo una fuerte estructura espacial (> 80%).

Cuadro 1. Parámetros de los semivariogramas omnidireccionales de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A), a una profundidad de 20 cm.

Propiedad	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta ⁽¹⁾ (Co + C)	Rango ⁽²⁾ (Ao)	Proporción ⁽³⁾ C/(Co+C)	R ²
Ca (mg.kg ⁻¹ ss)	Esférico	5750,0	21830,0	44,000	0,737	0,958
Mg (mg.kg ⁻¹ ss)	Exponencial	14,00	48,92	12,900	0,714	0,833
Ca/Mg	Esférico	0,130	17,350	33,900	0,993	0,836
P (mg.kg ⁻¹ ss)	Esférico	58,50	217,60	148,100	0,731	0,911
pH (1:2)	Esférico	0,0227	0,0904	44,700	0,749	0,934
Arcilla (%)	Esférico	0,0010	3,0200	47,300	1,000	0,905
Da (g.cm ⁻³)	Esférico	0,00968	0,00968	189,100	0,855	0,803

⁽¹⁾ Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).

⁽²⁾ Distancia de dependencial espacial, en metros.

⁽³⁾ Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

Cuadro 2. Parámetros de los semivariogramas omnidireccionales de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), a una profundidad de 20 cm.

Propiedad	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta ⁽¹⁾ (Co + C)	Rango ⁽²⁾ (Ao)	Proporción ⁽³⁾ C/(Co+C)	R ²
RM ⁽⁴⁾ (mg CO ₂ . g ⁻¹ ss)	Exponencial	0,00224	0,01033	144,50	0,783	0,886
AU (μg N-NH ₄ . g ⁻¹ ss)	Esférico	25,8000	170,300	138,80	0,849	0,975
AFAc (μg P.N.P. g ⁻¹ ss)	Esférico	1590,000	4763,000	40,60	0,666	0,977
AFAI (μg P.N.P. g ⁻¹ ss)	Esférico	1,0000	459,300	46,30	0,998	0,933
PMN (mg N-NO ₃ .kg ⁻¹ ss)	Esférico	0,8300	7,12500	55,10	0,884	0,973
Carbono orgánico (%)	Esférico	0,00010	0,13820	49,100	0,999	0,972
Nitrógeno total (%)	Esférico	0,0000	0,00050	37,400	0,998	0,969
N-NO ₃ (mg.kg ⁻¹ ss)	Exponencial	3,7200	8,99600	132,50	0,586	0,885
C/N	Esférico	0,2260	1,03100	64,90	0,781	0,983
P Disponible (mg.kg ⁻¹ ss)	Esférico	11,4000	83,7500	32,00	0,864	0,958
K ⁺ (mg.kg ⁻¹ ss)	Esférico	370,000	1250,900	143,20	0,704	0,987
Ca ²⁺ (mg.kg ⁻¹ ss)	Esférico	22550,00	45110,00	146,60	0,500	0,873
K/(Ca +Mg) ^{1/2}	Esférico	0,00027	0,00119	198,20	0,773	0,805
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	Esférico	0,00128	0,00802	52,700	0,840	0,974
Arcilla (%)	Esférico	0,94000	9,8100	30,90	0,904	0,936
pH (1:2)	Esférico	0,06910	0,19220	134,60	0,640	0,856

⁽¹⁾ Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).

⁽²⁾ Distancia de dependencial espacial, en metros.

⁽³⁾ Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

⁽⁴⁾ RM = Respiración microbiana; AU = Actividad de la ureasa; AFAc = Actividad de la fosfatasa ácida; AFAI = Actividad de la fosfatasa alcalina y PMN = Potencial de Mineralización del Nitrógeno lábil (t = 20 días).

El pH de ambos suelos mostró una clara dependencia espacial, lo cual coincide con los resultados comúnmente obtenidos por otros investigadores (Delcourt *et al.*, 1996; Sun *et al.*, 2003; Fernández *et al.*, 2007).

La respiración microbiana, la actividad enzimática, el potencial de mineralización del nitrógeno lábil, el carbono orgánico, el nitrógeno total, la relación C/N y los nitratos del suelo B mostraron una fuerte estructura espacial (> 65%). Cabe destacar, que la actividad enzimática y la concentración de nitratos en el suelo mostraron una alta variabilidad espacial a una distancia menor a 10 m.

En los dos suelos, los rangos (Ao) de dependencia espacial fueron muy variables para los distintos parámetros edáfico estudiados, El menor rango lo mostró el magnesio intercambiable (12,9 m), en tanto que la mayor distancia de dependencia espacial (198,2 m) fue observado para la interacción $K/(Ca+Mg)^{1/2}$, El fósforo disponible, la densidad aparente y el contenido de arcilla del suelo A mostraron rangos de dependencia espacial más elevados que aquellos mostrados por estas variables en el suelo B.

En el suelo A, el nitrógeno total y la relación C/N mostraron un comportamiento aleatorio con la profundidad del suelo; en tanto que el carbono orgánico presentó una estructura espacial descrita por una ecuación exponencial a partir de los 20 cm de profundidad, La densidad aparente mantuvo una continuidad espacial con una estructura esférica hasta

los 20 cm de profundidad, a partir de la cual tuvo un comportamiento aleatorio (cuadro 3), En el suelo B, la dependencia espacial del nitrógeno total, carbono orgánico, la relación C/N y la densidad aparente a distintas profundidades fue descrita por modelos esféricos y exponenciales, En el estrato de 20 - 30 cm hubo ausencia de dependencia espacial para estas variables (cuadro 4).

El carbono orgánico y la densidad aparente del suelo A mostraron un aumento gradual en su dependencia espacial con la profundidad; en contraste, en el suelo B se apreció una notable disminución de la dependencia espacial en los estratos más profundos, La drástica disminución en la proporción de dependencia espacial, con un notable acrecentamiento del efecto pepita del nitrógeno total y la relación C/N a partir de los 30 cm de profundidad en el suelo B, indicarían un cambio significativo en la naturaleza de los compuestos orgánicos incorporados al suelo, tal como lo sugirieran los trabajos de Chevalier *et al.*, (2000), Tal variación en estos compuestos orgánicos probablemente es el producto de un proceso de humificación muy avanzado de aquellas fuentes orgánicas que han sido incorporadas al suelo en ciclos productivos anteriores, formando estructuras orgánicas más estables,

Mapas de distribución espacial de las propiedades del suelo A

Los mapas de distribución espacial de las propiedades de ambos suelos mostraron la existencia de diferentes zonas con características de fertilidad muy variables, De esta forma, en la zona Sur-oeste de la parcela, la

Cuadro 3. Parámetros de los semivariogramas isotrópicos del carbono orgánico y la densidad aparente del suelo de la serie Le Bras fase franco-limosa (suelo A), hasta 40 cm de profundidad.

Propiedad	Profundidad (cm)	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta ⁽¹⁾ (Co + C)	Rango ⁽²⁾ (Ao)	Proporción ⁽³⁾ C/(Co+C)	R ²
Carbono orgánico (%)	0 - 10	-	-	-	-	-	-
	10 - 20	-	-	-	-	-	-
	20 - 30	Exponencial	0,25800	0,68500	136,60	0,623	0,775
	30 - 40	Exponencial	0,06900	0,51100	144,80	0,865	0,938
Densidad aparente (g,cm ⁻³)	0 - 10	Esférico	0,00208	0,01602	206,80	0,870	0,821
	10 - 20	Esférico	0,00073	0,00884	142,10	0,917	0,966
	20 - 30	-	-	-	-	-	-
	30 - 40	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).
⁽²⁾ Distancia de dependencial espacial, en metros.
⁽³⁾ Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

predominancia de texturas finas y los valores de densidad aparente han originado ciertos problemas de drenaje interno, e incluso, encharcamiento periódico en épocas lluviosas (Figuras 1 y 2), Consecuentemente, en esta área los procesos biológicos aeróbicos estarían limitados por la disminución del oxígeno en el suelo, por lo que la oxidación de la materia orgánica sería más lenta, afectando entre otras cosas, la disponibilidad de nitrógeno mineral para los cultivos. Del mismo modo, los procesos de desnitrificación serían más acentuados en esta área por lo que la eficiencia en la fertilización con fuentes nitrogenadas nítricas se afectaría negativamente.

En esta área es recomendable el establecimiento de drenajes para sacar los excedentes de agua en la época de precipitaciones, Otra alternativa de manejo es la incorporación al suelo de fuentes orgánicas de fácil mineralización, tales como el estiércol de bovino y los purines de cerdo, afín de mejorar la aireación del suelo, la actividad de los microorganismos y la disponibilidad de nitrógeno a corto plazo. Del mismo modo, el uso de fuentes fertilizantes amoniacales, disminuirían las emisiones de óxido nitroso a la atmósfera por efecto de la desnitrificación.

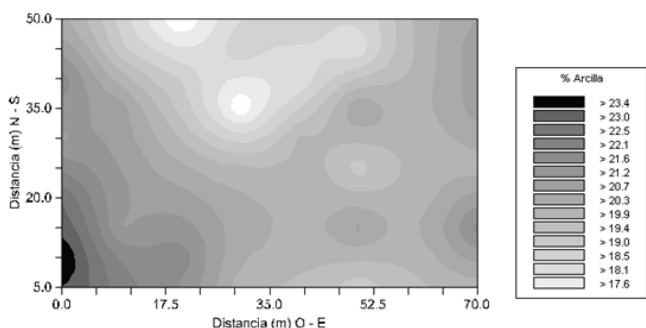


Figura 1. Distribución espacial del contenido de arcilla del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

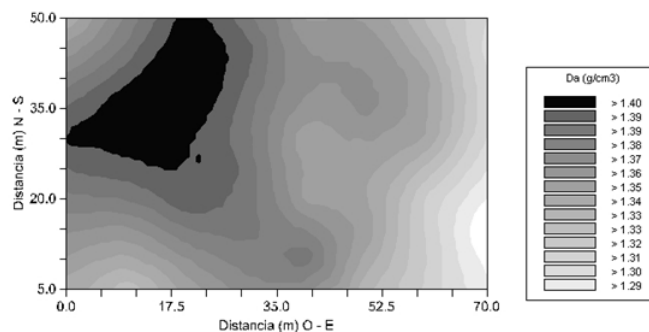


Figura 2. Distribución espacial de la densidad aparente del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

Cuadro 4. Parámetros de los semivariogramas isotrópicos de las propiedades del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), hasta 40 cm de profundidad,

Propiedad	Profundidad (cm)	Modelo	Efecto Pepita (Co)	Meseta ⁽¹⁾ (Co + C)	Rango ⁽²⁾ (Ao)	Proporción ⁽³⁾ C/(Co+C)	R ²
Carbono orgánico (%)	0 - 10	Esférico	0,00010	0,15020	43,60	0,999	0,964
	10 - 20	Exponencial	0,01000	0,43900	141,60	0,977	0,943
	20 - 30	-	-	-	-	-	-
	30 - 40	-	-	-	-	-	-
Nitrógeno total (%)	0 - 10	Esférico	0,00011	0,00067	39,40	0,834	0,976
	10 - 20	Esférico	0,00022	0,00107	138,00	0,794	0,954
	20 - 30	-	-	-	-	-	-
	30 - 40	Esférico	0,00031	0,00096	42,30	0,677	0,656
C/N	0 - 10	Esférico	0,02600	0,70200	32,20	0,963	0,994
	10 - 20	Exponencial	0,20800	2,15800	98,70	0,904	0,986
	20 - 30	-	-	-	-	-	-
	30 - 40	Esférico	1,40000	7,65000	79,00	0,817	0,975
Densidad aparente (g,cm ⁻³)	0 - 10	Exponencial	0,00410	0,01990	134,30	0,794	0,905
	10 - 20	Esférico	0,00203	0,00712	33,20	0,715	0,970
	20 - 30	-	-	-	-	-	-
	30 - 40	Exponencial	0,00351	0,03132	132,80	0,888	0,865

⁽¹⁾ Umbral de semivarianza donde existe dependencia espacial (C), y en ocasiones, comportamiento aleatorio de la variable (Co).

⁽²⁾ Distancia de dependencial espacial, en metros.

⁽³⁾ Proporción de dependencia espacial (C) del total de la estructura aleatoria (Co) más la regionalizada (C) de la variable.

La distribución espacial del carbono orgánico y de la densidad aparente mostró una correlación inversa entre ambos parámetros, ya que los valores más bajos de la densidad aparente se localizaron en el Este de la parcela, donde había una mayor acumulación de compuestos orgánicos incorporados al suelo en períodos productivos anteriores (rotación cebada – trébol). El suelo de esta zona presentó menos aguachinamiento debido a mejoras en el drenaje interno por la incorporación de estos restos de vegetales. También se observó una disminución gradual del contenido de carbono orgánico en los estratos subsuperficiales del suelo (Figura 3).

El mapa de distribución espacial mostró una drástica disminución del carbono orgánico en el Sur-oeste de la parcela, lo cual unido a las condiciones de drenaje imperfecto, afectarían la actividad biológica del suelo en esta zona. Estos patrones de distribución espacial sugieren la necesidad de mejorar el laboreo del suelo, afin de realizar una incorporación más uniforme de las fuentes orgánicas en la superficie cultivada,

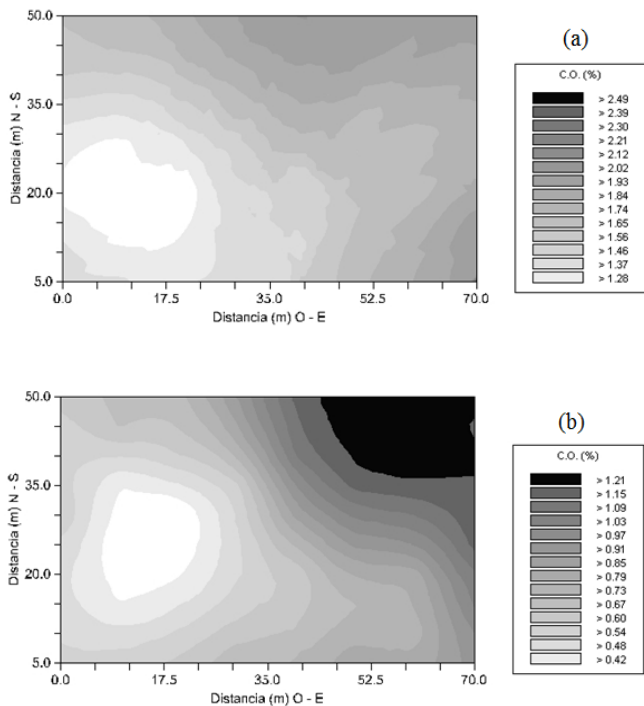


Figura 3. Distribución espacial del carbono orgánico del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limoso (suelo A), entre 20-30 cm (a) y 30-40 cm (b) de profundidad. Profundidad de muestreo: 20-30 cm (a) y 30-40 cm (b).

El pH, fósforo disponible, calcio y magnesio intercambiables demostraron una clara correlación en su distribución espacial. Las mayores concentraciones de calcio se localizaron al Sur-este de la parcela donde se observaron los más elevados rangos de pH (Figuras 4 y 5). La concentración de magnesio y fósforo fue menor en las áreas de mayor concentración de calcio, siendo más baja la disponibilidad de estos nutrientes en la zona cuya relación Ca/Mg fue la más elevada, es decir, hacia el Sur-este de la parcela (Figuras 6, 7 y 8). La alta saturación del complejo de intercambio catiónico con calcio y la formación de fosfatos cálcicos con baja hidrosolubilidad, originarían estas relaciones.

Claramente puede deducirse que el manejo del programa de fertilización de cultivos debe prever mayores aplicaciones de fuentes fosfatadas altamente hidrosolubles hacia el Sur-este de la parcela para evitar deficiencias de este elemento, especialmente en los cultivos cerealeros al momento de la siembra,

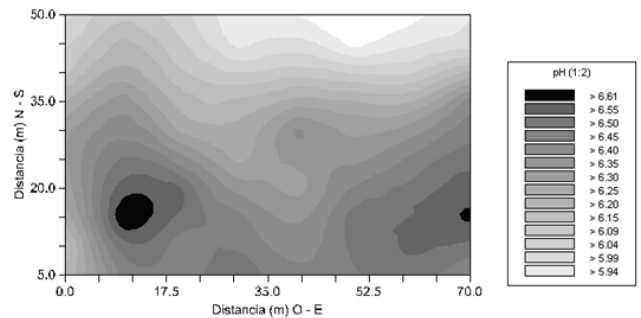


Figura 4. Distribución espacial del pH del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limoso (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

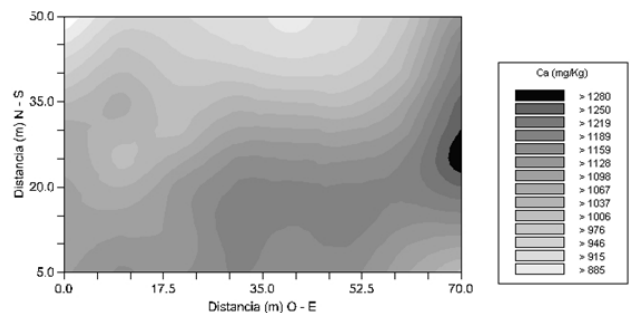


Figura 5. Distribución espacial del calcio intercambiable del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limoso (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

Mapas de distribución espacial de las propiedades del suelo B

Caso contrario al suelo A, la granulometría arenosa predomina en el suelo B, observándose hacia el centro de la parcela una zona con mayor contenido de arenas finas y mayor retención de humedad, En la mayor parte de la parcela el buen drenaje interno del suelo ha favorecido la actividad biológica (datos no publicados),

El patrón de distribución espacial de la densidad aparente mostró variaciones importantes

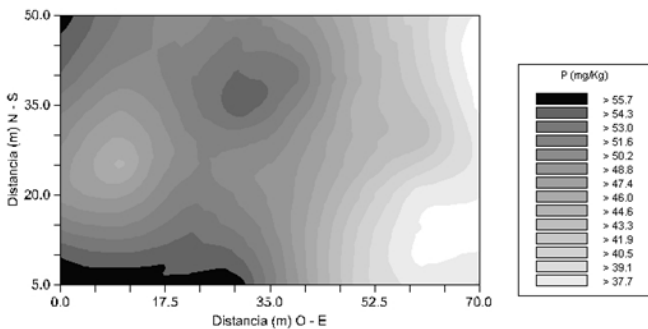


Figura 6. Distribución espacial del fósforo disponible del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

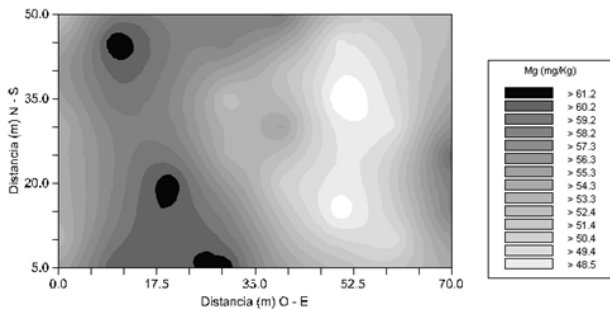


Figura 7. Distribución espacial del contenido de magnesio intercambiable del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

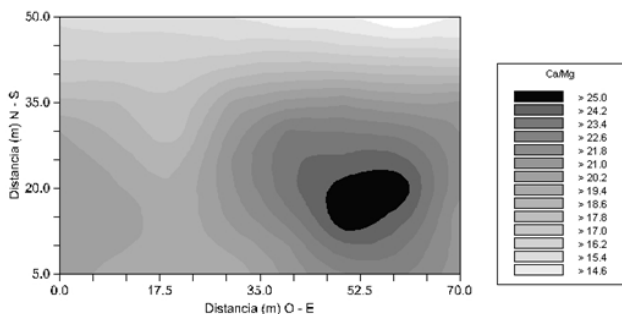


Figura 8. Distribución espacial de la relación Ca/Mg del suelo de la serie Le Bras, fase franco-limosa (suelo A). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

con la profundidad del suelo, ya que en los primeros 20 cm se verificaron sus valores más elevados, los cuales disminuyeron notablemente a partir de los 30 cm de profundidad, originando un cambio drástico en la estructura espacial de esta variable en la zona central de la parcela (Figuras 9 y 10). Del mismo modo, en el Este de la parcela se observó un incremento significativo de la densidad aparente ($D_a = 1,80-1,86 \text{ g.cm}^{-3}$), dando indicios de una posible compactación del suelo en los estratos más profundos.

Semejante a lo ocurrido en el suelo A, el patrón de distribución espacial de la densidad aparente estuvo fuertemente correlacionado con la estructura espacial del carbono orgánico, ya que los valores de esta variable disminuyeron en las áreas con mayor acumulación de compuestos orgánicos, De igual manera, la estructura espacial del nitrógeno total, nitratos y propiedades biológicas del suelo fue similar a aquella mostrada por el carbono orgánico (Figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19), La baja actividad microbiana produjo una disminución en la actividad enzimática en la zona Norte-central de la parcela, debido a los bajos niveles de carbono orgánico y a las condiciones anaeróbicas observadas en el suelo de esta área a inicios de primavera.

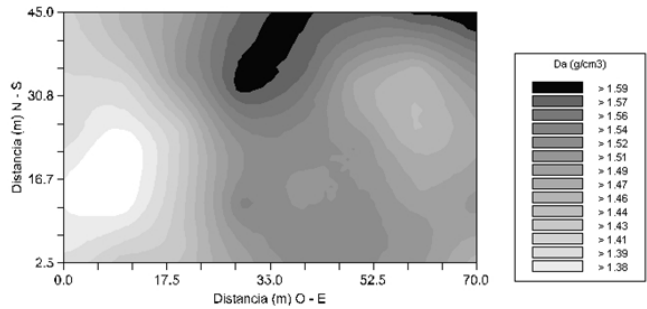


Figura 9. Distribución espacial de la densidad aparente del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

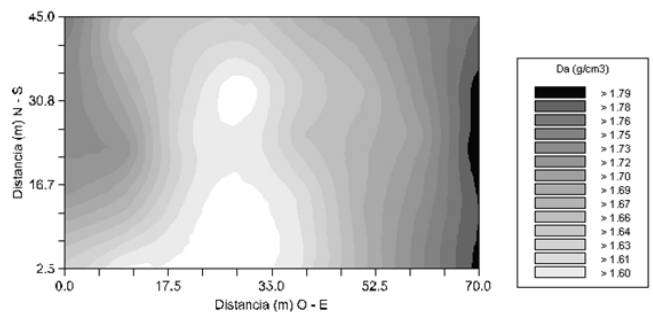


Figura 10. Distribución espacial de la densidad aparente del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), entre 30-40 cm de profundidad. Profundidad de muestreo: 30-40 cm.

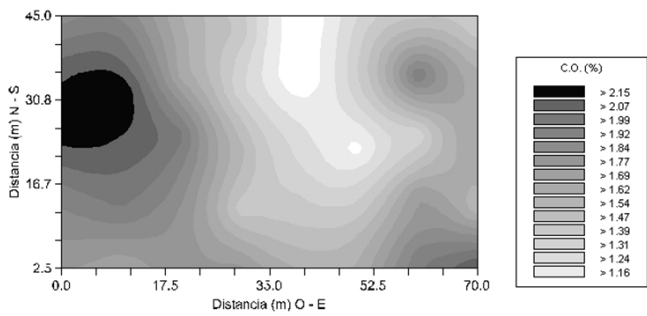


Figura 11. Distribución espacial del contenido de carbono orgánico del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

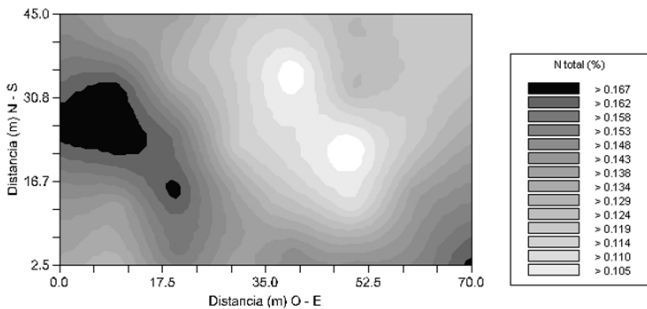


Figura 12. Distribución espacial del contenido de nitrógeno total del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), entre 0 – 20 cm de profundidad. Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

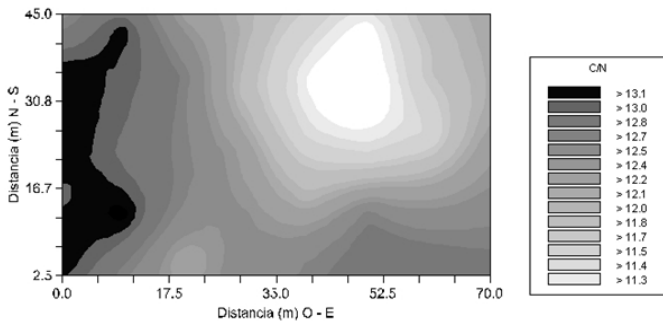


Figura 13. Distribución espacial de la relación C/N del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

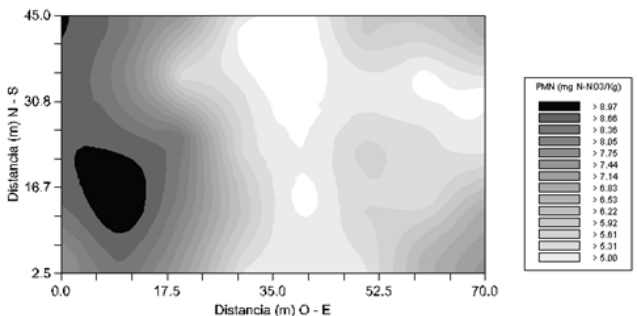


Figura 14. Distribución espacial del potencial de mineralización del nitrógeno del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

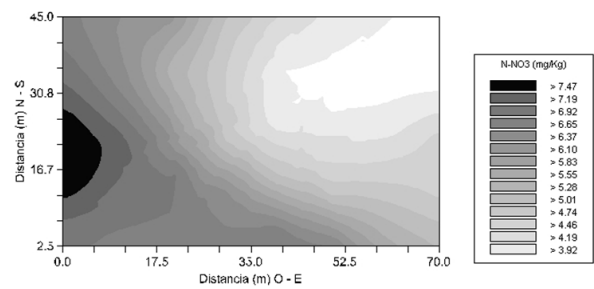


Figura 15. Distribución espacial del contenido de nitratos del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

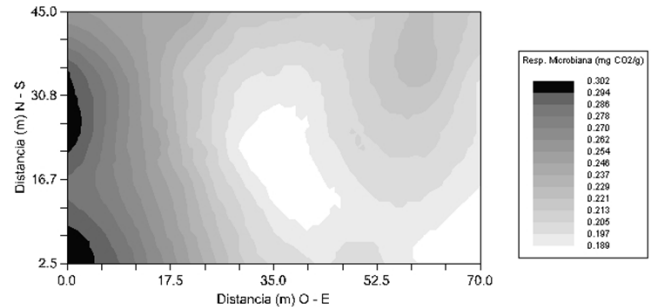


Figura 16. Distribución espacial de la respiración microbiana del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

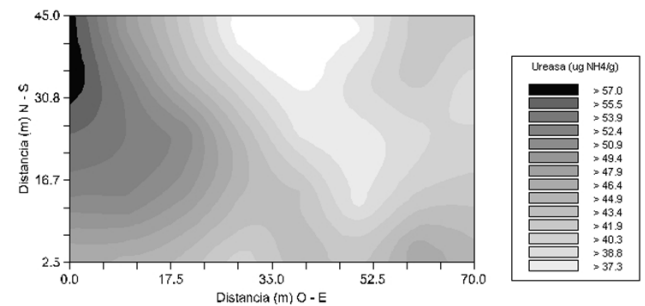


Figura 17. Distribución espacial de la actividad de la ureasa del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

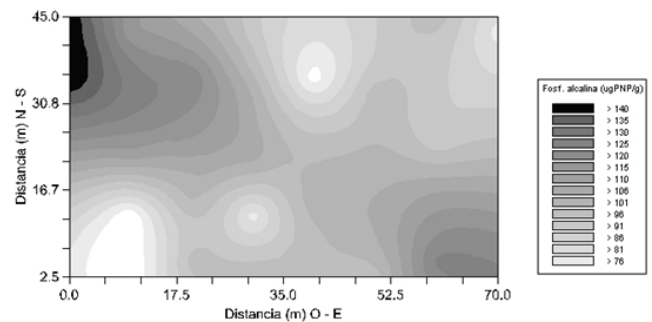


Figura 18. Distribución espacial de la actividad de la fosfatasa alcalina del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

Así mismo, una correlación negativa fue observada entre el pH y la estructura espacial de la actividad de la fosfatasa ácida, en tanto que el patrón de distribución espacial de la actividad de la fosfatasa alcalina mostró una relación positiva con esta propiedad del suelo (Figuras 18, 19 y 20). Las correlaciones observadas respectivamente entre la distribución espacial de la actividad microbiana, la actividad enzimática, el carbono orgánico y el pH del suelo, fueron también reportadas por Galviz *et al.*, (2007) en suelos agrícolas con altos contenidos de carbono orgánico. En general, la zona Oeste de la parcela se caracterizó por mostrar condiciones aeróbicas debido al predominio de texturas gruesas en el suelo, altos contenidos de compuestos orgánicos con una relación C/N que favorecería la mineralización de los mismos para la liberación de nutrientes y la formación de agregados (alto potencial de mineralización), Este escenario contribuye a una buena actividad de los microorganismos según lo indicaron los elevados valores de la respiración microbiana observados en este sector, favoreciendo la fertilidad del suelo.

Es de notar que el área que se extiende desde el centro hacia el Este de la parcela mostró baja concentración de carbono orgánico y nitrógeno total,

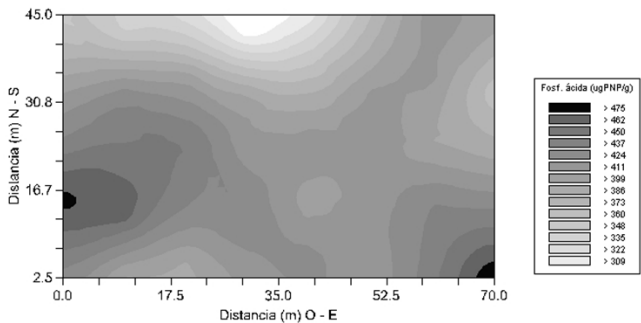


Figura 19. Distribución espacial de la actividad de la fosfatasa ácida del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

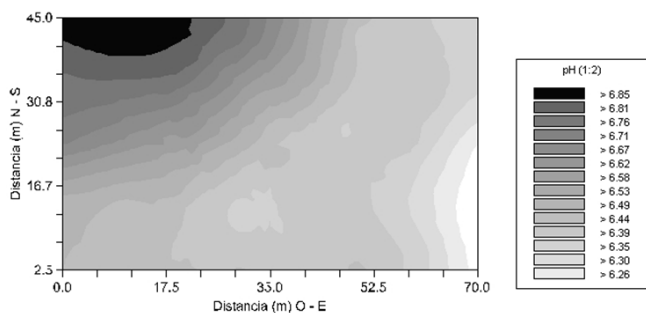


Figura 20. Distribución espacial del pH del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

por lo que se observó un descenso significativo en el potencial de mineralización de los compuestos orgánicos, originando una disminución del nitrógeno disponible para las plantas (nitratos). Esto implicaría que en esta zona las aplicaciones de nutrientes a un cultivo, especialmente de nitrógeno, deben ser más elevadas que aquellas a aplicar en el Oeste de la parcela. Del mismo modo, sería conveniente la aplicación frecuente de fuentes fertilizantes orgánicas afín de mejorar la actividad biológica del suelo, y por ende, la fertilidad natural del mismo a largo plazo.

Parecido a lo ocurrido con la densidad aparente, la distribución espacial del nitrógeno total y de la relación C/N cambió completamente a partir de los 30 cm de profundidad (Figuras 21 y 22), encontrándose elevados niveles de carbono orgánico, nitrógeno total y C/N hacia el centro de la parcela, en tanto que la densidad aparente descendió significativamente en esta zona. Las variaciones en los patrones espaciales de la relación C/N estarían ligados a un cambio en la naturaleza de los compuestos orgánicos (Chevallier *et al.*, 2000), debido a los procesos de humificación de fuentes orgánicas (estiércol de bovinos, purines de cerdos y restos de cosecha) incorporadas al suelo en períodos productivos precedentes.

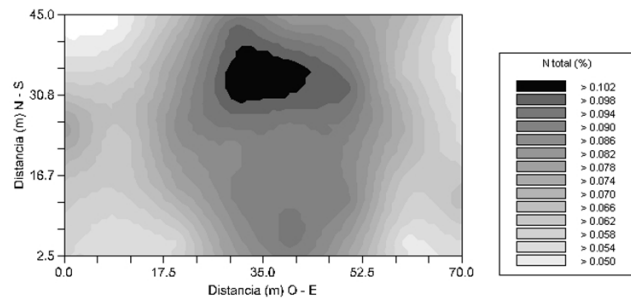


Figura 21. Distribución espacial del contenido de nitrógeno total del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), entre 30-40 cm de profundidad. Profundidad de muestreo: 30-40 cm.

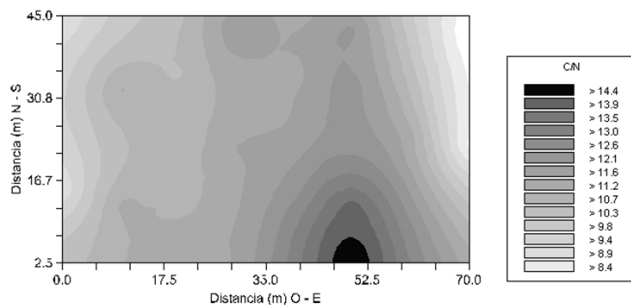


Figura 22. Distribución espacial de la relación C/N del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B), entre 30-40 cm de profundidad. Profundidad de muestreo: 30-40 cm.

Los valores más elevados de pH fueron observados en el cuadrante Nor-oeste de la parcela con una disminución gradual hacia el Sur-este (Figura 20). Se observó una correlación negativa entre la distribución espacial del pH y la del potasio intercambiable (Figura 23), posiblemente influenciada por la presencia de altos contenidos de calcio intercambiable, a juzgar por las observaciones encontradas en la parcela y el comportamiento espacial de la relación $K/(Ca+Mg)^{1/2}$ (Figura 24). Esto implicaría, realizar aplicaciones de fertilizantes potásicos en mayores dosis en la zona Nor-oeste de la parcela, afín de evitar deficiencias para los cultivos.

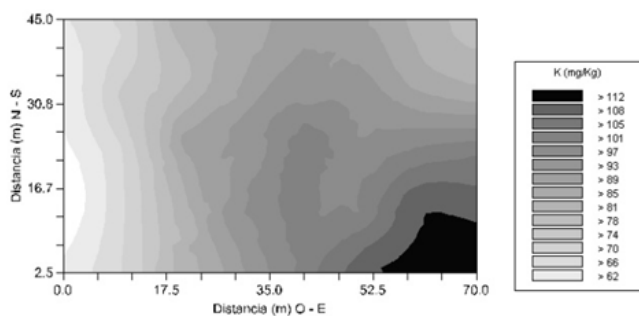


Figura 23. Distribución espacial del potasio intercambiable del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

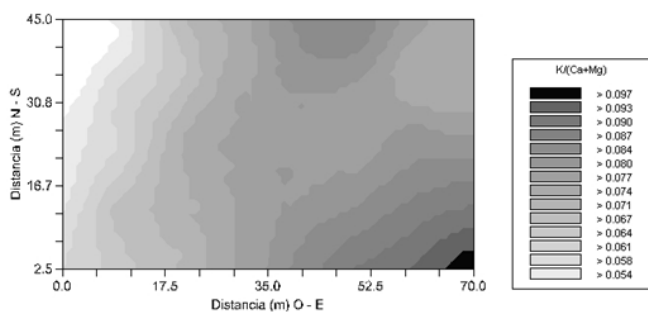


Figura 24. Distribución espacial de la relación $K/(Ca+Mg)^{1/2}$ del suelo de la serie Le Bras, fase gruesa y ligera (suelo B). Profundidad de muestreo: 0-20 cm.

CONCLUSIONES

La granulometría de los suelos estudiados habría afectado las variaciones espaciales y los patrones de distribución espacial de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La mayoría de las propiedades de ambos suelos mostraron una estructura espacial isotrópica ajustada a una ecuación esférica, y en algunos casos, a un modelo exponencial.

El fósforo disponible y las bases intercambiables, la actividad enzimática y los nitratos presentaron una alta variabilidad a cortas distancias.

El pH, la respiración microbiana, la actividad enzimática, el potencial de mineralización del nitrógeno, el carbono orgánico, el nitrógeno total, la relación C/N y los nitratos del suelo mostraron una fuerte dependencia espacial.

El carbono orgánico y la densidad aparente del suelo A mostraron un aumento gradual en su dependencia espacial con la profundidad; en contraste, en el suelo B se apreció una notable disminución de la dependencia espacial en los estratos más profundos.

La distribución espacial de la densidad aparente y el carbono orgánico muestran una relación muy estrecha, incluso con la profundidad del suelo.

La estructura espacial del carbono orgánico influyó los patrones de distribución espacial del nitrógeno total del suelo, la relación C/N, el potencial de mineralización del nitrógeno, el contenido de nitratos, la actividad microbiana y enzimática.

En el suelo A, la elevada relación Ca/Mg y la baja disponibilidad de fósforo disponible, indicaron la necesidad de aplicar mayores cantidades de fertilizantes fosfatados en la zona Este de la parcela, del mismo modo, en esta zona podría haber problemas de disponibilidad de magnesio para los cultivos.

En el suelo B, hubo una variación significativa en la estructura espacial de la relación C/N a partir de los 30 cm de profundidad, relacionada a un cambio en la naturaleza de los compuestos orgánicos. Por otra parte, la zona Nor-oeste de la parcela del suelo B tendría bajos contenidos de potasio, por lo que las mayores aplicaciones de fertilizantes potásicos se concentrarían en esta área que en el resto de la parcela,

LITERATURA CITADA

- Bachand, C. 1996. L'alimentation et les rejets d'azote et de phosphore, MAPAQ, Agri-Vision. Disponible en: <http://www.agr.gouv.qc.ca/dgpar/sites/r16e/champs/animal/texte1.htm>. Última visita 19/06/2009.
- Brethour, C.; T. Moore et D. Bucknell. 2006. Évaluation des incidences environnementales et économiques des règlements environnementaux pour le secteur agricole, Une étude de cas sur

- l'élevage de porcins, Agriculture et Agroalimentaire Canada, George Morris Centre, 179 p. Disponible en: http://www4.agr.gc.ca/resources/prod/doc/pol/pub/hog-porc/pdf/hog-porc_f.pdf. Última visita 23/06/2009.
- Chevallier, T.; M. Voltz, E. Blanchart, J. L. Chotte, V. Eschenbrenner, M. Mahieu and A. Albrecht. 2000. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol Martinique. *Geoderma* 94: 43-58.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2008. Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12, Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome. 57 p. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/cwfto11.pdf>. Última visita 27/06/2009.
- Fernández, O.; R. Pérez, A. Gubinelli y J. Matheus. 2007. Influencia de la variabilidad espacial del suelo sobre parámetros de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Monay, Estado Trujillo. *Agricultura Andina* 13: 39-52.
- Galviz, C.; H. Burbano y C. Bonilla. 2007. Actividad de fosfatasa ácida en suelos cultivados con papa y praderas del corregimiento de Catambuco, Pasto-Colombia. *Acta Agronómica* 56 (1): 13-16.
- Henríquez, M. y J. Vilorio. 1999. Número de observaciones para estimar semivariogramas de algunas propiedades del suelo y distancias de muestreo. *Agronomía Tropical* 49 (1): 5-17.
- Peña, R.; Y. Rubiano, A. Peña y B. Chaves. 2009. Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia). *Agronomía Colombiana* 27 (1): 111-120.
- Robertson, G. 2000. *Geostatistics for the Environmental Science, GS + User's Guide and software, Version 5.1*, Gamma Design Software.
- Rompré, M. 1985. Cartographie des sols de la station de recherche de Saint-Lambert Lévis, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca>.
- Sun, B.; S. Zhou and Q. Zhao. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115: 85-99.