

SELECCIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO PARA DETERMINAR LOS EFECTOS DEL USO Y PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN UN ÁREA PILOTO DE LA REGIÓN CENTRAL DE CÓRDOBA

PAOLA CAMPITELLI^{1*}; ANTONIO AOKI¹; OLGA GUEDELJ²; ANDREA RUBENACKER¹ & ROBERTO SERENO¹

1 Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC, Av. Valparaíso s/n Ciudad Universitaria, CC 509, (5000) Córdoba Capital.

2 INTA-EEA Marcos Juárez, Ruta 12 km 3, CP 2580, Marcos Juárez, Córdoba. *Correo electrónico: paolacam@agro.unc.edu.ar;

Recibido: 27-08-10

Aceptado: 28-11-10

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar los indicadores que mejor representan la calidad de un suelo del área central de la provincia de Córdoba. El estudio se realizó sobre un Haplustol típico. Se evaluaron seis tratamientos. En cada tratamiento se seleccionaron tres sitios de ensayo, en los que se determinó contenido de carbono orgánico (CO); nitrógeno total (NT); pH; conductividad eléctrica; fósforo extractable (PE); carbono liviano; carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos; densidad aparente; cambio en el diámetro medio ponderado de agregados (CDMP); espesor del horizonte superficial (HzA) y profundidad del CO_3Ca . Se utilizó análisis de componente principales para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo medidos, entre parámetros y tratamientos y entre tratamientos. Los resultados de este estudio muestran que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad de los mismos: materia orgánica (CO y sus fracciones), NT, PE y a la susceptibilidad a la erosión: CDMP, profundidad del CO_3Ca y espesor del HzA. La disminución de los contenidos de CO y sus fracciones, macronutrientes (NT y PE) y el aumento en la susceptibilidad a la erosión hídrica a medida que se prolongan los años de agricultura y se incrementan las prácticas tales como monocultivo de soja y siembra convencional, evidencian el deterioro de la calidad del suelo en relación a los sitios bajo bosque nativo que son los que presentan el máximo potencial. Bajo condiciones de semiaridez, la siembra directa no logró mejorar significativamente las características físicas del suelo ni el contenido de CO y sus fracciones cuando se realizó monocultivo de soja.

Palabras clave. Propiedades químicas, propiedades físicas, rotaciones, monocultivo, análisis de componentes principales.

SOIL QUALITY INDICATORS OF THE EFFECTS OF LAND USE AND AGRICULTURAL PRACTICES IN A PILOT AREA OF THE CENTRAL REGION OF CÓRDOBA

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the best indicators of soil quality in a central area of Córdoba Province. The study was carried out on a Typic Haplustol. Six treatments were evaluated in three sites for each treatment. Organic carbon content (CO), total nitrogen (NT), pH, electrical conductivity (CE), extractable phosphorus (PE), light carbon, humic and fulvic acids, bulk density, mean weight diameter change (CDMP), A-horizon thickness (HzA) and CaCO_3 depth were determined. Principal Component Analysis was used to evaluate the relationship between soil parameters, between parameters and treatments and between treatments. The results show that the most adequate soil quality indicators –and the simplest– are those related to soil fertility: organic matter, total nitrogen and extractable phosphorus; and to susceptibility to erosion (CDMP, CaCO_3 and A-horizon thickness). The decrease in CO content and its fractions and in macronutrients (NT and PE) and the increase in susceptibility to hydric erosion over the years as a consequence of agricultural practices such as soybean monoculture and traditional sowing have led to a deterioration in soil quality compared to native woodlands where the soil potential is higher. Under semi-arid conditions, direct sowing did not improve the physical properties of the soil or its organic content and fractions under a soybean monoculture.

Key words. Chemical properties, physical properties, rotations, monoculture, principal component analysis.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de producción de la región central de Córdoba, durante los últimos treinta años han ocurrido importantes cambios en el uso de la tierra dedicada a agricultura, además de un avance de esta sobre áreas ocupadas anteriormente por la ganadería. Fundamental-

mente en los últimos diez años se observó un importante cambio en el uso de la tierra y la producción de cultivos (Viglizzo *et al.*, 2001; Paruelo *et al.*, 2006).

Esta agriculturización se caracterizó, a partir de la década del 80, por un creciente predominio de soja en monocultivo en reemplazo de otros cultivos como sorgo,

maíz, trigo, girasol y maní. Inicialmente ocurrió en sistemas convencionales de labranza, caracterizados por la remoción del suelo y la escasa o nula permanencia de rastros en superficie. El predominio de este manejo por más de tres décadas derivó en la degradación del recurso suelo, principalmente por la pérdida en la fertilidad, alteraciones en los procesos biológicos, disminución en el contenido de carbono orgánico, disminución en la disponibilidad de nutrientes, cambio en la estructura del suelo e incremento del escurrimiento superficial. Hacia fines de la década de los 80, los sistemas fueron evolucionando hacia los llamados conservacionistas, dentro de los cuales el sistema de siembra directa, caracterizado por el no laboreo, es actualmente el de mayor adopción en la región (Wilson *et al.*, 2000; Elisondo *et al.*, 2001; Salas *et al.*, 2005; Ferraras *et al.*, 2007; Steinbach & Álvarez, 2007).

La productividad y sustentabilidad agronómica están determinadas por los efectos interactivos de la calidad del suelo, de los factores ambientales y del manejo. Interpretar y predecir los efectos del manejo sobre la calidad del suelo a través de indicadores confiables y sensibles constituye una de las principales finalidades de la ciencia del suelo moderna (Quiroga & Funaro, 2003).

La calidad de suelo, desde un punto de vista agronómico, es la capacidad que tiene el mismo para funcionar efectivamente, tanto en el presente como en el futuro (Doran & Parkin, 1994; Larson & Pierce, 1994). Puede ser medida a través de sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas, conocidas como indicadores de calidad de suelo. Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante (Cantú *et al.*, 2007). En la actualidad existe interés en identificar indicadores de calidad de suelo que logren: a) integrar procesos y propiedades físicas, químicas y/o biológicas, b) ser aplicados bajo diferentes condiciones de campo, c) complementar bases de datos ya existentes o datos fácilmente medibles y d) responder a cambios en el uso del suelo, a prácticas de manejo y a factores climáticos o humanos (Doran & Parkin, 1994).

Monitoreando los cambios en el tiempo de los indicadores de calidad de suelo se podría determinar si un sistema de manejo está en una situación de estabilidad, mejora o degradación (Shukla *et al.*, 2006).

La evaluación de la sustentabilidad de un sistema de manejo se puede realizar comparando dicho sistema en relación a otros alternativos conducidos al mismo tiempo (Larson & Pierce, 1994). Sin embargo, la evaluación de la calidad de un suelo, a través de propiedades claves que sirvan como indicadores de las funciones de ese suelo, constituye una tarea dificultosa debido a la multiplicidad de factores que controlan los procesos biogeoquímicos

y su variación en el tiempo y en el espacio (Larson & Pierce, 1994).

Muchos estudios concuerdan en que la materia orgánica del suelo (MOS) es el indicador que ejerce una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad (Galantini & Rosell, 2006; Quiroga & Funaro, 2003). Sin embargo, variaciones en el promedio de las precipitaciones, en la capacidad de retención de agua y la textura afectan la magnitud y dirección de los cambios en el contenido de la MOS. Debido a esto, las comparaciones de calidad de suelo entre diferentes sitios usando la MOS como indicador se restringe a sitios con similares condiciones de clima y suelo (Quiroga & Funaro, 2004).

Varios autores sostienen que deberían seleccionarse y cuantificarse un número mínimo de características de suelo con el fin de evaluar la calidad (Larson & Pierce, 1994; Govaerts *et al.*, 2006). En este sentido, se han propuestos diferentes características de suelo que incluyen propiedades tales como: MOS, capacidad de infiltración, estabilidad de los agregados, sellado superficial, porosidad, pH, densidad aparente, resistencia a la penetración, salinidad, textura, capacidad de almacenamiento de agua, nitrógeno, fósforo disponible, biomasa microbiana y respiración del suelo (Karlen & Stott, 1994; Doran & Parkin, 1996; Aparicio & Costa, 2007).

Dada la multiplicidad de variables que se han considerado como indicadores de calidad se hace imprescindible el uso de metodologías que permitan identificar las que tengan mayor incidencia (Quiroga & Funaro, 2003). Un mejor conocimiento del proceso suelo-ecosistema necesita de la evaluación de varias propiedades y de herramientas analíticas multivariadas (Sena *et al.*, 2002). Los métodos no supervisados de estadística multivariada tienen en cuenta las correlaciones entre numerosas variables que son analizadas simultáneamente, de tal modo que permite sintetizar e interpretar la información. La utilización de la técnica estadística multivariada de análisis de componentes principales (ACP), ha hecho posible la resolución de numerosos problemas como por ejemplo la determinación de propiedades discriminantes de manejo en suelos semiáridos (Quiroga *et al.*, 1998), la evaluación de los impactos de las labranzas sobre la calidad del suelo (Wander & Bollero, 1999), la relación de la compactabilidad del suelo con las propiedades físicas y orgánicas (Ball *et al.*, 2000). El ACP es usado para agrupar suelos de una población estudiada y permite la interpretación de las potenciales causas de las diferencias observadas en las propiedades del suelo.

El objetivo de este estudio fue determinar los indicadores que mejor representan la calidad de un suelo del área central de la provincia de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los ensayos se realizaron en un establecimiento ubicado 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31°19' lat. Sur; 64°13' long. Oeste), Argentina. El área posee un clima semiárido con alrededor de 700 mm de precipitación anual, con inviernos secos. El establecimiento se considera representativo de unas 20.000 ha afectadas por erosión hídrica (Zamora & Jarsun, 1985). El suelo es un *Haplustol típico* de textura franco limosa cuya pendiente media oscila entre 0,2 y 1,8%.

Descripción de los tratamientos

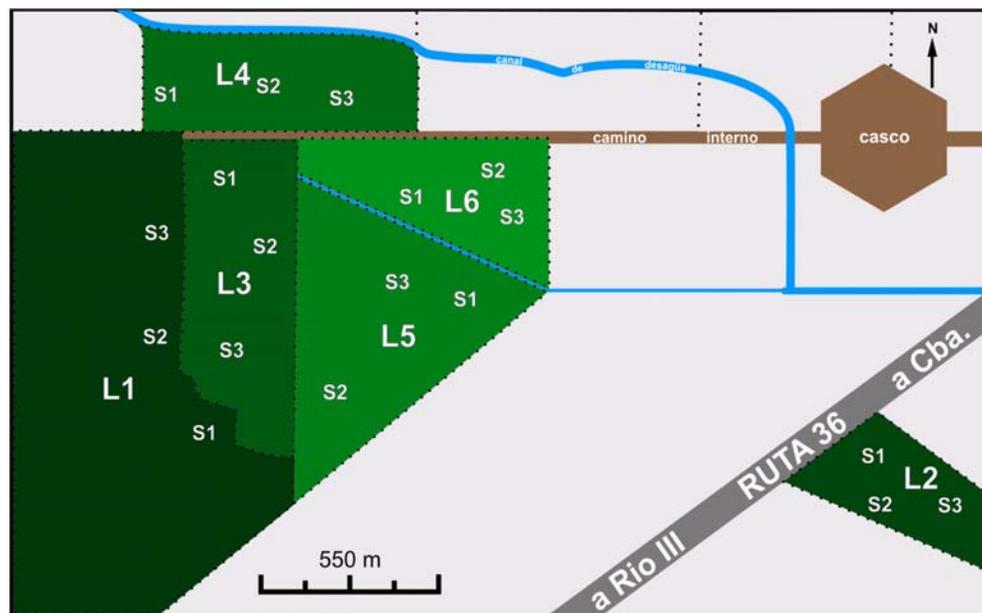
Se evaluaron seis tratamientos (Fig. 1): 1) situación testigo correspondiente a un suelo bajo bosque nativo (L1), 2) lote recientemente desmontado con tres años de cultivo de soja bajo siembra directa (L2), 3) lote con diez años de rotación 2:1 (soja-maíz) conducido en siembra directa, con mínima erosión hídrica previa al ensayo (L3), 4) lote con diez años de rotación 2:1 (soja-maíz) conducido en siembra directa, parcela con moderada erosión hídrica previa al ensayo (L4), 5) lote con diez años de monocultivo de soja conducido en siembra directa (L5), 6) lote con trece años de monocultivo de soja conducido con labranza convencional y dos años de siembra directa, con erosión hídrica actual (L6). En la campaña previa al muestreo todos los lotes fueron sembrados con soja (*Glicine max* (L.) Merr.).

Colección de datos y métodos de análisis

En cada tratamiento se seleccionaron tres sitios de ensayo (S1, S2, S3) en cada uno de los cuales se efectuó un muestreo compuesto de diez submuestras en un espesor de 0-10 cm.

A cada muestra compuesta se le determinó contenido de carbono orgánico (CO) por el micrométodo (Nelson & Sommers, 1996); nitrógeno total (NT) por el método de Kjeldahl; pH actual; conductividad eléctrica en pasta saturada (CE); fósforo extractable (PE) por el método de Bray & Kurtz I (1945); carbono liviano (CL) por el método de Strickland & Sollins (1987) modificado por Janzen *et al.* (1992); carbono de ácidos húmicos (CAH) y carbono de ácidos fúlvicos (CAF) según Sims & Haby (1971). Mediante esta técnica se cuantifica carbono de sustancias húmicas (CSH) y CAF y por diferencia entre estos se obtiene CAH. Todas las determinaciones se llevaron a cabo por triplicado.

En cada sitio de ensayo, se midió por duplicado densidad aparente (DA) por el método del cilindro (Blake & Hartage, 1986) entre 2 a 7 cm de profundidad. Se extrajeron tres muestras no disturbadas superficiales (0-10 cm) por sitio para estimar estabilidad estructural por medio de la diferencia entre el diámetro medio ponderado de los agregados secos al aire y luego tamizados en agua (De Boodt & De Leenheer, 1967). Para el tamizado en seco se utilizaron tamices de mallas de 8; 4,76; 3,36 y 2 mm de abertura, obteniéndose tres fracciones de agregados: 8-4,76 mm; 4,76-3,36 mm y 3,36-2 mm. La fracción <2 mm fue descartada. Para el tamizado en húmedo se colocaron los agregados en una batería idéntica.



L1: bosque nativo, L2: desmonte reciente, L3: rotación 2:1 soja:maíz, erosión mínima previa, L4: Rotación 2:1 soja:maíz, erosión moderada previa, L5: monocultivo de soja, siembra directa, L6: monocultivo de soja, labranza convencional, erosión moderada actual. S1, S2, S3: sitios de ensayo.

L1: native forest, L2: recent clearance, L3: 2:1 soybean:corn rotation, previous minimal erosion, L4: 2:1 soybean:corn rotation, previous moderate erosion, L5: soybean monoculture, no tillage, L6: soybean monoculture, conventional tillage, actual moderate erosion. S1, S2, S3: experiment sites.

Figura 1. Ubicación geográfica de los tratamientos.

Figure 1. Treatments geographic location.

tica de tamices, agregando los de aberturas de 1 y 0,5 mm. Se obtuvieron así las fracciones 8-4,76 mm; 4,76-3,36 mm; 3,36-2 mm; 2-1 mm y 1-0,5 mm. La estabilidad estructural se expresó como valores de cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), que es la diferencia entre el diámetro medio ponderado en seco (DMPs) y en húmedo (DMPh).

También se calculó el índice de estabilidad relativa (IER) como sigue:

$$\text{IER (\%)} = \frac{\text{CDMP}_r}{\text{CDMP}_m} \times 100 \quad (1)$$

donde IER es el índice de estabilidad relativa, CDMP_r es el cambio en el diámetro medio ponderado del suelo de referencia (parcela con bosque nativo) y CDMP_m es el cambio en diámetro medio ponderado del tratamiento.

Por último, se determinó en cada sitio el espesor del horizonte superficial (HzA) y profundidad del CO_3Ca .

Análisis estadístico

Para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo medidos y la variación entre diferentes tratamientos se utilizó la técnica estadística multivariada de ACP. Esta técnica permite examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables, identificando las propiedades más sensibles en los tratamientos estudiados. Con el ACP se construyen ejes artificiales llamados componentes principales (CP), que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables no correlacionadas con propiedades óptimas para la

interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente (Hair *et al.*, 1995). El ACP se realizó con los datos estandarizados, utilizando el software estadístico INFOSAT (2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 pueden observarse los valores medios obtenidos para cada propiedad de suelo medida en los seis tratamientos.

El ACP permitió cuantificar el efecto que los distintos sistemas de manejo presentan sobre las propiedades de suelo medidas. Las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explican el 77% de la variabilidad total, permitiendo la representación gráfica de todas las propiedades medidas en un mismo plano (Fig. 2).

Cada propiedad de suelo está representada por un autovector que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la CP considerada (Tabla 2). El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas.

Las correlaciones obtenidas muestran que la CP1 queda definida por las variables que se relacionan con el grado de fertilidad física y química de los suelos y la CP2 queda definida por variables relacionadas a la susceptibilidad a la erosión.

Tabla 1. Valores promedio de pH, conductividad eléctrica (CE), espesor del horizonte A (Hz A), carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT), cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), densidad aparente (DA), fósforo extractable (PE), carbono liviano (CL), carbono de ácidos fúlvicos (CAF) y carbono de ácidos húmicos (CAH) a nivel superficial (0-10 cm) en los seis tratamientos (Tr.). Profundidad del carbonato de calcio (CO_3Ca)

Table 1. pH, electrical conductivity (CE), A horizon thickness (HzA), organic carbon (CO), total nitrogen (NT), mean weight diameter change (CDMP), bulk density (DA), extractable phosphorus (PE), light carbon (CL), fulvic acids carbon (CAF) and humic acids carbon (CAH) means values at the surface (0-10 cm) in the six treatments (Tr.). Calcium carbonate depth (CO_3Ca).

Tr.*	pH	CE dS m ⁻¹	HzA cm	CO_3Ca cm	CO g kg ⁻¹	NT g kg ⁻¹	CDMP mm	DA Mg m ⁻³	PE mg kg ⁻¹	CL %	CAF %	CAH %
L1	5,7 a	0,42 b	27,0 a	83,0 a	16,7 a	2,17 a	0,45 a	1,09 a	41,35 a	0,53 a	0,43 a	0,92 a
L2	6,5 b	0,64 c	24,3 a	75,0 a	14,9 a	1,90 ab	0,72 ab	1,14 ab	41,10 a	0,31 b	0,29 ab	0,50 ab
L3	6,6 b	0,35 a	23,3 a	76,7 a	11,4 c	1,47 bc	0,84 bc	1,32 b	29,35 b	0,10 c	0,25 b	0,37 b
L4	6,5 b	0,42 b	20,7 a	85,3 a	11,0 c	1,50 bc	1,07 c	1,31 b	32,50 b	0,14 c	0,30 b	0,30 b
L5	6,5 b	0,44 b	25,0 a	89,3 a	9,6 c	1,17 c	1,45 d	1,32 b	30,80 b	0,08 c	0,27 b	0,24 b
L6	6,6 b	0,68 c	24,7 a	99,3 a	9,8 c	1,23 c	1,57 d	1,29 b	32,40 b	0,12 c	0,24 b	0,30 b

*Tratamientos: L1: bosque nativo, L2: desmonte reciente, L3: rotación 2:1 soja:maíz, erosión mínima previa, L4: Rotación 2:1 soja:maíz, erosión moderada previa, L5: monocultivo de soja, siembra directa, L6: monocultivo de soja, labranza convencional, erosión moderada actual. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$), test de Tukey.

*Treatments: L1: native forest, L2: recent clearance, L3: 2:1 soybean:corn rotation, previous minimal erosion, L4: 2:1 soybean:corn rotation, previous moderate erosion, L5: soybean monoculture, no tillage, L6: soybean monoculture, conventional tillage, actual moderate erosion. Different letters indicate significant differences ($p < 0,05$), Tukey test.

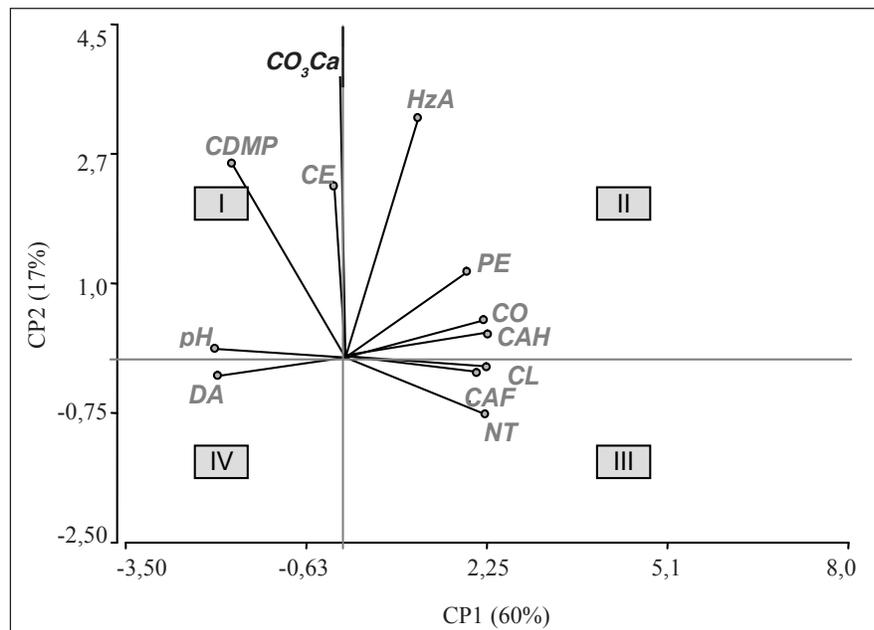


Figura 2. Distribución ortogonal del análisis de Componentes principales (ACP) de los parámetros analizados.

CP1 x CP2 explican el 77% de la variabilidad total. CE: conductividad eléctrica; HzA: espesor del horizonte superficial; CO_3Ca : profundidad del carbonato de calcio; CO: carbono orgánico; NT: nitrógeno total; CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado; DA: densidad aparente; PE: fósforo extractable; CL: carbono liviano; CAF: carbono de ácidos fúlvicos; CAH: carbono de ácidos húmicos.

Figure 2. Orthogonal distribution of the principal component analysis (ACP) for the analyzed parameters.

CP1 x CP2 explain 77% of the total variance. CE: electrical conductivity; HzA: A horizon thickness; CO_3Ca : calcium carbonate depth were determined; CO: organic carbon; NT: total nitrogen; CDMP: mean weight diameter change; DA: bulk density; PE: extractable phosphorus; CL: light carbon; CAF: fulvic acids carbon; CAH: humic acids carbon.

Tabla 2. Autovectores de los parámetros analizados para las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

Table 2. Autovectors of the analyzed parameters for the two first principal components (CP1 and CP2).

Variables	CP1	CP2
pH	-0,32	0,02
CE	-0,03	0,36
HzA	0,18	0,50
CO_3Ca	-0,02	0,63
CO	0,35	0,08
NT	0,35	-0,12
CDMP	-0,28	0,41
DA	-0,32	-0,04
PE	-0,30	0,18
CL	0,35	-0,02
CAF	0,33	-0,03
CAH	0,35	0,05

CE: conductividad eléctrica; HzA: espesor del horizonte superficial; CO_3Ca : profundidad del carbonato de calcio; CO: carbono orgánico; NT: nitrógeno total; CDMP: cambio en el diámetro medio ponderado; DA: densidad aparente; PE: fósforo extractable; CL: carbono liviano; CAF: carbono de ácidos fúlvicos; CAH: carbono de ácidos húmicos.

CE: electrical conductivity; HzA: A horizon thickness; CO_3Ca : calcium carbonate depth were determined; CO: organic carbon; NT: total nitrogen; CDMP: mean weight diameter change; DA: bulk density; PE: extractable phosphorus; CL: light carbon; CAF: fulvic acids carbon; CAH: humic acids carbon.

En la Figura 2 se puede observar la formación de tres agrupamientos de variables. El primer grupo de variables ubicadas en el cuadrante II y III está formado por aquellos parámetros que se encuentran relacionados al contenido de MOS tales como CO, CAH, CAF y CL y variables relacionadas a la fertilidad química del suelo, tales como NT y PE.

Este grupo de variables y fundamentalmente las relacionadas al carbono del suelo (CO, CAH, CAF y CL) presenta una correlación negativa con el segundo grupo de variables ubicadas en el cuadrante IV (DA y pH). La presencia de materia orgánica tiene un efecto protector frente a la compactación. La adsorción de compuesto orgánicos humificados (CAH) a la superficie de las arcillas aumenta la porosidad intra-agregados (porosidad textural) para constituir el complejo arcillo-húmico, modificando el comportamiento global de los suelos frente a la compactación y a las propiedades de retención de agua (Guérif *et al.*, 2001; Ferraras *et al.*, 2007). Shukla *et al.* (2006) observaron una correlación negativa entre Carbono orgánico de suelo (SOC) y los parámetros densidad aparente ($r = -0,49$) y pH ($r = -0,71$). En otra investigación, Aparicio & Costa (2007) en suelos Argiudoles típicos bajo sistemas de agricultura continua con rotaciones de cultivos obtuvieron una correlación negativa ($r = -0,60$) entre MOS y DA.

Los criterios que se adoptarán para la selección de las variables (indicadores) analizadas a partir del ACP serán: i) peso estadístico en la explicación de la variabilidad (valor del autovector), ii) correlaciones con otras variables (positivas o negativas) y iii) facilidad y simpleza en la medición.

En función de esto es posible seleccionar como indicadores de calidad de suelo a CO, NT y PE. En con-

cordancia con otros autores (Galantini & Rosell, 2006; Quiroga & Funaro, 2003) se observa que el contenido de MOS (CO y sus fracciones) resulta un buen indicador de la calidad del suelo; sin embargo, no debería ser utilizado como único indicador incluso en condiciones de suelo y clima similares. Hay que considerar que las sustancias húmicas son una fracción de la materia orgánica relativamente estable y capaz de resistir parcialmente la descomposición microbiana (Galantini & Rosell, 2006) por lo que serían indicadores sensibles a largo plazo, por otra parte resultan determinaciones complicadas de realizar.

En la conformación de la CP2 las variables que presentan mayor incidencia son profundidad del CO_3Ca , espesor del HzA y CDMP, las cuales permiten inferir el grado de erosión que presenta el suelo. Apezteguía *et al.* (1987) afirman que, en la región semiárida central de Córdoba, la profundidad del CO_3Ca permite cuantificar tanto erosión laminar como en surcos. Cantú *et al.* (2007) seleccionaron como un indicador de calidad de suelo el espesor del HzA debido a que el mismo evidencia procesos de erosión hídrica respecto a los suelos de referencia. Por otra parte, la erosión hídrica reduce el espesor del horizonte superficial, originando el ascenso de horizontes subsuperficiales (Reganold *et al.*, 1987).

Se observa una correlación negativa entre CDMP y CO en concordancia a lo observado por Gudelj & Weir (2000). La CE no resultó importante en la explicación de las diferencias existentes entre tratamientos.

Por otra parte, el ACP permite observar el agrupamiento de los distintos tratamientos de suelos en función de los diferentes usos y manejos (Fig. 3). Los suelos provenientes de monte natural (L1) y los suelos que fue-

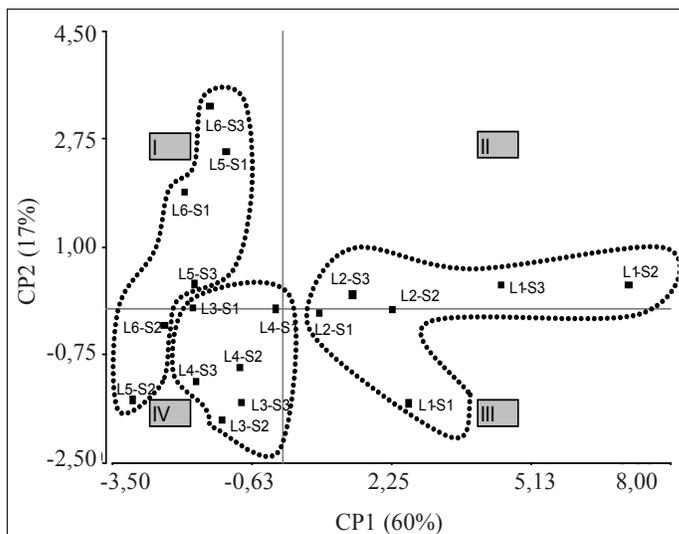


Figura 3. Distribución Ortogonal del Análisis de Componentes Principales (ACP) de los tratamientos y sitios de ensayos.

Figure 3. Orthogonal distribution of the principal component analysis (ACP) for all treatments and sampled locations.

CP1 x CP2 explican el 77% de la variabilidad total. L1: bosque nativo, L2: desmonte reciente, L3: rotación 2:1 soja:maíz, erosión mínima previa, L4: Rotación 2:1 soja:maíz, erosión moderada previa, L5: monocultivo de soja, siembra directa, L6: monocultivo de soja, labranza convencional, erosión moderada actual. S1, S2, S3: sitios de ensayo.

CP1 x CP2 explain 77% of the total variance. L1: native forest, L2: recent clearance, L3: 2:1 soybean:corn rotation, previous minimal erosion, L4: 2:1 soybean:corn rotation, previous moderate erosion, L5: soybean monoculture, no tillage, L6: soybean monoculture, conventional tillage, actual moderate erosion. S1, S2, S3: experiment sites

ron recientemente incorporados a la agricultura (L2) se agrupan en los cuadrantes II y III. Estos sitios de ensayo presentan elevados contenidos de CO y de sus fracciones CAH, CAF y CL como así también elevados contenidos de NT y PE.

Los suelos de los tratamientos L3 y L4 que fueron sometidos a producción agrícola con sistemas de rotación soja-maíz (2:1) en condiciones de siembra directa manifiestan una disminución importante en los contenidos de las fracciones de MOS, como así también, un aumento en los valores de DA. Este aumento de la DA es indicadora de compactación (Gupta & Allmaras, 1987) y podría ser debido tanto a la disminución observada en los valores de CO como así también a la no remoción del suelo por el empleo de la siembra directa. En coincidencia con esto, Quiroga *et al.* (1998) determinaron para suelos Haplustoles énticos de la región semiárida que los sistemas de manejo con menores contenidos de MOS poseían los valores más elevados de susceptibilidad a la compactación. Steinbach & Álvarez (2007), comparando DA entre siembra directa y labranza con arado de reja, obtuvieron valores promedio de 1,33 y 1,28 Mg m⁻³, respectivamente. Por otra parte, Aparicio & Costa (2007) sostienen que la DA es un parámetro de suelo muy afectado por las labranzas, determinando valores de 1,26 y 1,14 Mg m⁻³ a una profundidad de 3 a 8 cm en un suelo Argiudol bajo siembra directa y labranza convencional, respectivamente.

Es posible prever que el tratamiento L2 bajo el sistema de manejo actual tienda a asemejarse a L3 y L4 a medida que transcurra el tiempo.

Los sitios de ensayo pertenecientes a los tratamientos L5 y L6 se agrupan en el cuadrante IV y I. Ambos lotes se encuentran bajo monocultivo de soja realizado con siembra directa (L5) y con labranza convencional (L6). A partir de estos resultados, se puede observar que ambos tratamientos presentan una calidad de suelo similar. Esto indicaría que, en las condiciones de este ensayo, la SD no ha logrado mejorar significativamente las características físicas del suelo ni el contenido de CO y sus fracciones tal que hagan posible diferenciarla del estado en que se encuentra el suelo bajo LC. Es importante considerar también que la cantidad y calidad de biomasa que deja el cultivo de soja lo hace poco persistente como cobertura superficial y por ende como factor mejorador del suelo (García Préchac, 2004).

Por otra parte, se observa una variabilidad espacial dentro de los tratamientos L5 y L6, esto podría ser explicado si consideramos que los sitios de ensayo de L6-S3, L6-S1 y L5-S1 son sitios de deposición de partículas, debido a que los mismos presentan valores elevados de CDMP, espesor del HzA y profundidad del CO₃Ca. Si

bien parece no haber una relación universal entre erosión y distribución de tamaño de agregados, el valor de CDMP (uno de los índices más usados de distribución de tamaños) muestra correlación con la resistencia de los suelos a la erosión (Texeira & Misra, 1997). Altos valores en el CDMP siempre se relacionan con mayor erosión (Cacchiarelli *et al.*, 2008). Es importante destacar que el CDMP, si bien surge de una técnica trabajosa en su realización, es uno de los parámetros físicos más sensibles para determinar diferencias entre sistemas de cultivos y de labranzas y, en consecuencia, calidad de suelo (Aparicio & Costa, 2007; Aoki *et al.*, 2008). Los demás sitios de L5 y L6 presentaron una pérdida de partículas por erosión del horizonte superficial correlacionándose con menores contenidos MOS y mayor DA.

CONCLUSIONES

En las condiciones estudiadas los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad de suelos están relacionados a la fertilidad de los mismos: MOS, NT, PE y a la susceptibilidad a la erosión: CDMP, profundidad del CO₃Ca y espesor del HzA.

La disminución de los contenidos de CO y sus fracciones, macronutrientes (NT y PE) y el aumento en la susceptibilidad a la erosión hídrica a medida que se prolongan los años de agricultura y se incrementan las prácticas tales como monocultivo de soja y siembra convencional, evidencian el deterioro de la calidad del suelo en relación a los sitios bajo bosque nativo que son los que presentan el máximo potencial.

Bajo condiciones de semiaridez, la siembra directa no logró mejorar significativamente las características físicas del suelo ni el contenido de CO y sus fracciones cuando se realizó monocultivo de soja.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico de la SeCyT-UNC y la valiosa colaboración del alumno Juan Ignacio Tuda.

BIBLIOGRAFÍA

- Aoki, AM; P Campitelli; O Gudelj; CI Vettorello; G Esmoriz & R Sereno. 2008. Efectos de diferentes sistemas de cultivos y labranzas sobre propiedades indicadoras de calidad de suelo. XXI C. A.C.S., Potrero de los Funes (San Luis). Resumen pág. 47, trabajo en CD-ROM.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96: 155-165.

- Apezteguía, HP; H Amaya & L Crusta. 1987. Medición de pérdidas de suelo y disminución de los rendimientos de soja debidos a la erosión hídrica en la región semiárida central de Córdoba. *Ciencia del suelo* 5(1): 51-55.
- Ball, BC; DJ Campbell & EA Hunter. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil Till. Res.* 57: 83-91.
- Blake, GR & KH Hartage. 1986. Bulk Density. In: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part I.* 2nd. Ed. American Society of Agronomy, Madison, *Agronomy* 9: 363-375.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Cantú, MP; A Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25(2): 173-178.
- Cacchiarelli, J; JA Galantini & RA Rosell. 2008. Estabilidad estructural y P en fracciones de agregados en la cuenca de A° El Divisorio (Coronel Pringues, BA). *Ciencia del Suelo* 26(1): 71-79.
- De Boodt, M. & L De Leenheer. 1967. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. West-European Methods for Soil Structure Determinations. State Faculty Agricultural Sciences, Ghent, Belgium. 60-62.
- Doran, J & T Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, JW; DC Coleman; DF Bezdick & BA Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, p. 3-21.
- Doran, JE & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In: Doran, JW & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality.* SSSA Spec. Publ. N° 49, Madison, WI, USA, p. 25-37.
- Elissondo E; JL Costa; E Suero; LP Fabrizzi & F García. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 19(1): 11-19.
- Ferraras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25(2): 159-172.
- Galantini, J & R Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87: 72-79.
- García Préchac, F. 2004. Cultivo continuo en siembra directa o rotaciones de cultivos y pasturas en suelos pesados del Uruguay. XIX C.A.C.S. Paraná. Resumen pág. 340, trabajo en CD-ROM.
- Govaerts, B; KD Sayre & J Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.* 87: 163-174.
- Gudelj, O & E Weir. 2000. Estabilidad estructural y materia orgánica en distintos grados de erosión provocada, en un suelo Argiudol típico. XVII C.A.C.S. Mar del Plata, Argentina.
- Guerif, J; G Richard; C Dürr; JM Machet; S Recous & S Seoane. 2001. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37: 877-887.
- Gupta, SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Hair, AJ; RE Anderson; RL Tatham & WC Black. 1995. *Multivariate data analysis with readings.* 529p. D. Borkowsky (ed). Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- INFOSTAT. 2004. Software Estadístico. Estadística y Biometría y Diseño de Experimentos. Fac. Ciencias Agropecuarias. U.N.Córdoba. (Argentina). ISBN: 987-9449-65-7.
- Janzen, HH; CA Campbell, SA Brandt, LP Lafond & L Townley Smith. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1779-1806.
- Karlen, DL & DE Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, JW; DC Coleman; DF Bezdick & BA Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, p. 53-72.
- Larson, WE & FJ Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, JW; DC Coleman; DF Bezdick & BA Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, p. 37-51.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, DL (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 3 - Chemical Methods.* ASA, SSSA, CSSA, Madison WI, p. 961-1010.
- Paruelo, JM; JP Guerschman; G Piñeiro; EG Jobbágy; SR Verón; G Baldi & S Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* X(2): 47-61.
- Quiroga, A & D Funaro. 2003 [Online]. Indicadores de calidad de suelos. Homepage: <http://www.aacrea.org.ar/soft/nro275.htm#notatapa>.
- Quiroga, A & D Funaro. 2004. Materia orgánica, factores que condicionan su utilización como indicador de la calidad en molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. XIX C.A.C.S., Paraná. Resumen pág. 476, trabajo en CD-ROM.
- Quiroga, A; DE Buschiazzi & N Peinemann. 1998. Management discriminant properties in semiarid soils. *Soil Sci.* 163: 591-597.
- Reganold, JP; LF Elliot & L Unger. 1987. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion. *Nature* 330: 370-372.
- Salas, HP; EF Lovera; M del V Basanta; JP Giubergia; EE Martellotto & AI Salinas. 2005. Producción de Soja y Maíz en función de la rotación y del sistema de manejo en un Haplustol típico de la región central de Córdoba: Disponibilidad de agua y rendimiento. *Proyecto regional Gestión Agroambiental.* EEA Manfredi. Pp. 12.
- Sena, MM; RTS Frighetto; PJ Vlarini; H Tokeshi & RJ Poppi. 2002. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. *Soil Till. Res.* 67: 171-181.
- Shukla, MK; R Lal & M Ebinger. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.* 87: 194-204.

- Sims, JR & VA Haby. 1971. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Sci.* 112: 137-141.
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? *Informaciones Agronómicas* 33: 7-12.
- Strickland, TC & P Sollins. 1987. Improved method for separating light- and heavy-fraction organic material from soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 1390-1393.
- Texeira, PC & RK Misra. 1997. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. *Catena* 30: 119-134.
- Viglizzo, EF; FLértora; AJ Pordomingo; JN Bernardos; ZE Roberto & H Del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture Ecosystem an Enviroment* 83: 65-81.
- Wander, ED & GA Bollero. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 961-971.
- Wilson, MG; CE Quintero; NG Boschetti; RA Benavides & WA Mancuso. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Rev. Fac. Agr. UNER* 20(1): 23-30.
- Zamora, EM & B Jarsum. 1985. Mapa de erosión de la provincia de Córdoba. Plan mapa de suelos de la provincia de Córdoba, convenio INTA/SMAG y RR. Dirección de Recursos Renovables. Córdoba, Argentina. Pp.1-45.