

H.A. Tasi¹, M.G. Wilson¹, A. Paz González², N. Indelángelo¹, M.C. Sasal¹

¹ INTA EEA Paraná. Ruta 11, Km. 12.5 (3100), Paraná, Argentina.

² Facultad de Ciencias UDC, La Coruña, España.

**Trabajo presentado en el
10th International Symposium on Soil and Plant Analysis
Budapest, Hungary 2007**

Resumen

En los últimos tiempos se han producido importantes cambios en el uso de la tierra en áreas con Vertisoles de Argentina. Las tierras dedicadas a pasturas han ido disminuyendo en contraste con un aumento creciente de cultivos de cosecha en las rotaciones. Las tasas de reducción de carbono orgánico (SOC), de pérdidas de suelos por erosión y pérdidas de estabilidad de estructura han explicado la mayor parte de los cambios significativos de calidad del suelo. Se evaluaron efectos de la intensidad de uso del suelo sobre las propiedades físicas y químicas de un Vertisol en rotación ganadero-agrícola en un establecimiento agropecuario localizado en la provincia de Entre Ríos (Argentina). Los tratamientos incluidos fueron: 1) agricultura continua, 2) rotación de agricultura y pasturas, 3) pasturas y 4) campo natural (situación inalterada), como referencia. Se extrajeron muestras y se determinaron: pH, contenidos de SOC y N total, P extraíble, capacidad de intercambio catiónico, estabilidad de agregados, índice de percolación, densidad del suelo y densidad de partícula, así como también distribución de tamaño de poros y superficie específica. Se seleccionó un conjunto de indicadores de calidad de suelo para un Vertisol en uso ganadero-agrícola, sensibles al deterioro. Los indicadores seleccionados fueron el contenido de carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total, los índices de inestabilidad estructural y de percolación de Hénin, la porosidad total, la capacidad de intercambio catiónico y la masa de suelo del horizonte superficial. El suelo manifestó cambios significativos en sus propiedades debido a su uso. La vegetación natural, las pasturas y la rotación de agricultura y pasturas mantuvieron un contenido muy alto de SOC contrastando con la agricultura continua con niveles más bajos. La superficie específica y SOC estuvieron positivamente correlacionados con la capacidad de intercambio catiónico y la estabilidad de agregados. La rotación con pasturas permitiera mantener o mejorar las condiciones de las propiedades del suelo estudiado.

Introducción

La República Argentina tiene una superficie de 257.000.000 ha, y de ella los suelos del orden Vertisol ocupan aproximadamente 6.000.000 ha, ubicados principalmente en el NE del país, provincia de Entre Ríos, NE de Buenos Aires, Sur de Corrientes, Santa Fe y en el Chaco Oriental.

En la provincia de Entre Ríos, con una superficie continental de 6.200.000 ha, los suelos de este orden ocupan una superficie aproximada de 2.350.000 ha (tabla 1). Asimismo, se encuentran asociados a otros ordenes de suelos llegando a cubrir cerca del 70% de la superficie continental (Tasi, 2000).

Tabla 1: Suelos Vertisoles y Vertisólicos en la Provincia de Entre Ríos - Argentina.

Orden	Subgrupo	Superficie ha	%	
Vertisol		2.350.000	37,90	
Molisol	Argiudol vertico	(850.000)	1.150.000	18,55
	Argiacuol vertico	(300.000)		
Alfisol		800.000	12,90	
TOTAL		4.300.000	69,35	

En el área de Vertisoles de la provincia de Entre Ríos (Argentina), la principal actividad agropecuaria ha sido la ganadera-agrícola y ganadera, predominando en una vasta región la cría bajo bosque nativo. En los últimos años, favorecida por su rentabilidad, se han incorporado importantes superficies a la agricultura, especialmente al cultivo de soja, registrándose de esta forma importantes cambios en el uso de la tierra. Estos cambios se produjeron a expensas de la ganadería, y en parte, a los desmontes. Estos, en la mayoría de los casos, se realizaron sin una planificación previa del uso que se le dará a las tierras en el largo plazo. Según Tasi y Bedendo (2001), los suelos incorporados presentan serias limitaciones para un uso agrícola sostenido.

En el contexto de la producción agrícola la Calidad del Suelo se interpreta como la aptitud para el uso (Larson y Pierce, 1994), específicamente en relación a la capacidad de sostener el crecimiento de los vegetales, sin que esto resulte en la degradación del mismo o en un daño ambiental (Gregorich y Acton, 1995). Los indicadores de calidad de suelos son utilizados para identificar áreas con problemas ya que permiten monitorear cambios en la calidad ambiental, relacionados al uso y manejo agrícola, mostrando la dinámica de los procesos que ocurren en el recurso (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994). El conocimiento de la sensibilidad para captar el deterioro que muestran algunas propiedades edáficas es necesario para identificar los indicadores que integrarán el conjunto mínimo de datos (CMD) (Pierce y Larson, 1993).

Las funciones del suelo y la calidad del suelo pueden ser evaluadas a nivel de lote, establecimiento, ecosistema y a escala global. Es conocido, sin embargo, que el manejo del suelo se dificulta progresivamente cuanto mayor es la escala. Así, muchos aspectos de calidad del suelo pueden encararse de manera práctica a pequeña escala (Carter et al., 1997). Se evaluaron los efectos de la intensificación por el uso del suelo a escala de lote sobre las propiedades físicas y químicas en un Vertisol localizado en la provincia Entre Ríos.

Objetivo general

El objetivo de este trabajo fue evaluar la sensibilidad de las propiedades edáficas medidas para obtener el conjunto mínimo de datos (CMD).

Objetivos secundarios

- Identificar propiedades del suelo que por su sensibilidad para evidenciar cambios se consideren como indicadores de calidad.
- Conformar el CMD y evaluar si permite diferenciar y clasificar distintas situaciones de uso del suelo.
- Analizar las relaciones entre las propiedades edáficas estudiadas a fin de encontrar las causas de su grado de sensibilidad.

Materiales y Métodos

Caracterización del sitio y prácticas de manejo

El trabajo se realizó en el establecimiento agropecuario "El Caagui" ubicado a 32° 04' S y 60° 01' W. La actividad del mismo esta basada en la producción mixta ganadera-agrícola, donde la ganadería corresponde mayormente a la producción de leche. Fueron evaluadas propiedades físicas y químicas en un Vertisol, correspondiente a la Serie María Dolores - Hapluderte típico - (Soil Taxonomy, 1999). Tomando como referencia a la condición inalterada de un suelo con bosque nativo, fueron muestreados lotes con diferentes usos: pradera (praderas consociadas de gramíneas y leguminosas e implantación de verdeos), pradera-agricultura (con 50% de cultivos agrícolas en la rotación) y agricultura continua. Los cultivos más importantes en la rotación fueron soja y sorgo granífero en siembra directa de varios años previos al muestreo y con fertilizaciones fosforadas de acuerdo a los requerimientos de los cultivos y las praderas.

Métodos de laboratorio y de campo

Tres muestras compuestas de suelo fueron tomadas a una profundidad de 00-12 cm, conformadas de 5 submuestras sin disturbar para la determinación de estabilidad estructural y de 15 submuestras para las variables químicas y físico químicas. Las muestras fueron secadas al aire y pasadas a través de un tamiz de 2000 μm . La distribución de tamaño de partícula fue determinada por el método de la pipeta. El contenido de SOC fue determinado por el método Walkley y Black, el pH del suelo usando una relación 1:2.5 de suelo y el nitrógeno total (Nt) según el método micro Kjeldahl (Jackson, 1976). También se consideró la relación C/N. La estabilidad estructural fue determinada por el método de Hénin et al. (1958), según tres pretratamientos

diferentes: ningún tratamiento previo a la inmersión en agua (AEA), tratamiento previo con etanol (AEAL) y tratamiento previo con benceno (AEB). El resultado de los tres pretratamientos fue utilizado para el cálculo de los agregados estables promedios y a partir del dato de la fracción inestable se calculó el índice de inestabilidad (Is). Se determinó además el índice Ks de percolación de Hénin, la densidad aparente de suelo (Ds) por el método del cilindro y la densidad de partícula (Dr) por el método del picnómetro. La porosidad total (PT) fue calculada utilizando Ds y Dr. En cada suelo y condición de uso, la erosión fue definida por el método visual y además se realizaron cuatro mediciones de la profundidad del horizonte A para estimar la pérdida de suelo, que fue expresada como masa del horizonte A (M) al multiplicar el espesor del horizonte por la Ds.

La distribución del tamaño de poros se determinó con la técnica de intrusión de mercurio (Fiès, 1984). La medida se llevó a cabo en alícuotas de suelo de aproximadamente 0,6 a 0,9 g formadas por agregados de 2-3 mm, con el fin de caracterizar la porosidad en diferentes rangos de poros: porosidad acumulada (<200 μm), porosidad de almacenamiento (0,5 μm a 50 μm), y de transmisión (50 μm a 200 μm - Greenland, 1977), la porosidad de agua útil (0,2 μm a 10 μm) y la porosidad < 0,2 μm . Se utilizó un porosímetro modelo Pascal con dos unidades (Pascal 140 y 440) que permite operar desde 3×10^{-3} hasta 200 MPa. Con este dispositivo se miden diámetros equivalentes entre aproximadamente 100 μm y 60 nm (Fiès y Bruand, 1990).

Las mediciones de superficie específica se realizaron en agregados de 2 - 3 mm utilizando en un analizador de sorpción de gas Thermo Finnigan SORPTOMATIC 1990. El nitrógeno fue el gas seleccionado como el adsorbente. Los datos de adsorción de gases fueron analizados por un programa de reducción de datos provisto por el fabricante, que está basado en la teoría de adsorción de gas de Brunauer, Emmett y Teller (Brunnauer *et al.*, 1938). Estas últimas determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Servicios Xerales de la Universidad de La Coruña, España.

Estadística

Se evaluaron las variables de suelo en función de su respuesta a los cambios en las condiciones edáficas asociadas al uso y manejo, seleccionando aquellas más sensibles. Para ello se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP). Este permite además visualizar las variables mas relacionadas a cada uso del suelo a través de un gráfico bidimensional (BIPLOT), logrado a partir de los dos primeros componentes del ACP. Siguiendo los criterios de selección utilizados por Maddoni *et al.* (1999), Schipper y Sparling (2000) y Govaerts *et al.* (2006), las variables con los mayores valores de ponderación (< $\pm 0,25$) del Componente 1 (E1) fueron seleccionadas como indicadores de calidad de suelo. De esta manera, se conformó el CMD. Con la interpretación del comportamiento de los indicadores que componen el CMD se puede estimar la dinámica del suelo en función del uso.

Con dicho CMD se realizó el Análisis de Conglomerados utilizando la distancia euclídea promedio y datos estandarizados, con la finalidad de construir un dendrograma jerárquico que muestre el encadenamiento de sitios con diferentes condiciones de uso, con la finalidad de agrupar aquellos semejantes. Para la conformación de grupos se tomó como criterio al valor igual al 50% de la distancia máxima. De esta manera, se logra sintetizar considerablemente la información y visualizar relaciones multivariadas de compleja naturaleza.

Para interpretar la magnitud del efecto del uso sobre el suelo se utilizó el ANAVA con el Test de comparación múltiple de medias (Tukey 5%) para los indicadores seleccionados. Se realizaron correlaciones lineales entre las variables analizadas para identificar asociaciones entre las situaciones de uso de suelo evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los dos primeros componentes lograron explicar el 94% de la variación de los datos (Tabla 2). Las variables de importancia (coeficiente de ponderación mayor a $\pm 0,25$) para el CP1 se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Análisis Multivariado de Componentes principales para la Serie María Dolores (Hapluderte típico) con uso ganadero-agrícola.

Componente	Proporción	Proporción Acumulada	Variable	E1	E2
1	0,76	0,76	SE	-0,21	0,37
2	0,17	0,94	CO	-0,27	-0,04
3	0,06	1	Pe	-0,26	-0,22
4	0	1	pH	-0,10	0,38
5	0	1	Nt	-0,28	0,06
6	0	1	C/N	0,22	-0,33
7	0	1	Is	0,28	0,02
8	0	1	AEA	-0,27	-0,10
9	0	1	AEAL	-0,25	0,04
10	0	1	AEB	-0,26	-0,17
11	0	1	Ks	-0,27	0,03
12	0	1	AEM	-0,27	-0,12
13	0	1	Dap	0,21	0,34
14	0	1	PT	-0,25	-0,24
15	0	1	CIC	-0,25	0,25
16	0	1	C10-0.2	0,14	-0,48
17	0	1	M	-0,26	-0,18

Donde: E1 y E2 son los valores de ponderación de cada variable en los componentes principales 1 y 2 del ACP.

SE es superficie específica; CO es carbono orgánico; Pe es fósforo extractable; Nt es nitrógeno total; pH es reacción del suelo 1: 2.5; C/N es la relación carbono / nitrógeno; Is es el índice de inestabilidad estructural de Hénin; AEA, AEAL, AEB, AEM son agregados estables en pretratamientos al agua, alcohol, benceno y promedios, respectivamente; Ks es el índice de percolación de Hénin; CIC es la capacidad de intercambio catiónico; PT es la porosidad total; Dap es la densidad aparente del suelo; C10-0.2 es la porosidad de almacenamiento y M es la masa del horizonte superficial.

En la Figura 1 puede observarse que el CP1 diferenció aquellos sitios con altos niveles nutricionales y buen estado físico del suelo. Estos sitios corresponden a suelos inalterados y con un uso mixto (rotaciones con pastura y agricultura).

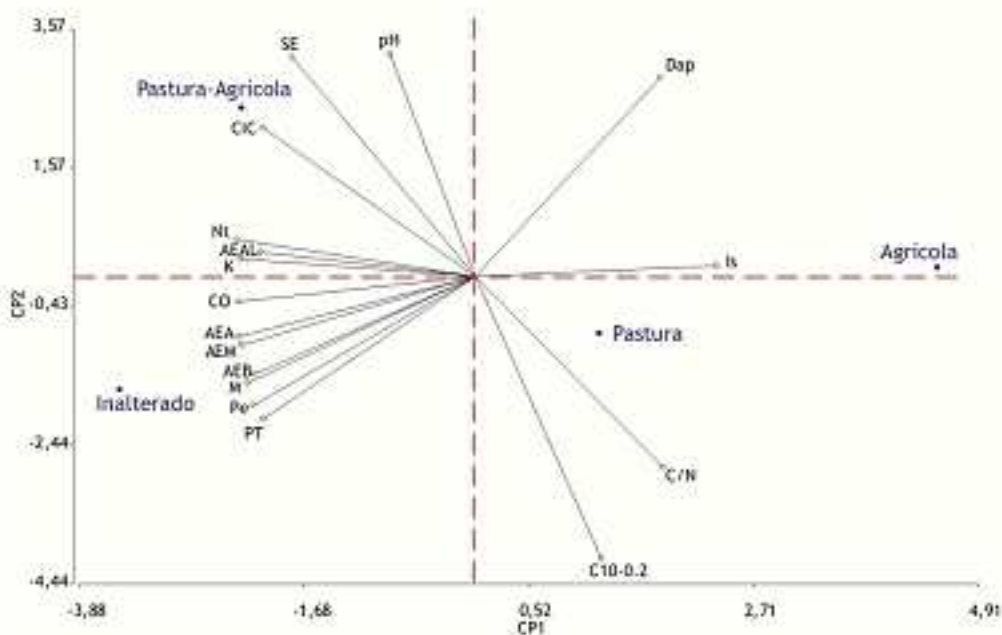


Figura 1: BiPlot. Serie María Dolores (Hapluderte típico) en uso ganadero-agrícola.

Donde: SE es superficie específica; CO es carbono orgánico; Pe es fósforo extractable; Nt es nitrógeno total; pH es reacción del suelo 1: 2.5; Is es el índice de inestabilidad estructural de Hénin; C/N es la relación carbono / nitrógeno; Ks es el índice de percolación de Hénin; CIC es la capacidad de intercambio catiónico; PT es la porosidad total; Dap es la densidad del suelo; C10-0.2 es la porosidad de almacenamiento y M es la masa del horizonte superficial.

En la dispersión de los sitios por influencia de las variables se observó que en el cuadrante izquierdo diferenciado por el CP1 se ubica la condición inalterada, oponiéndose en el extremo del cuadrante derecho la condición con uso agrícola continuo. La condición inalterada presentó una buena condición edáfica, donde se observaron elevados contenidos de CO (3,93%) y Nt (0,30%), de CIC (32,1 cmol $\text{c}^{-1}\text{kg}^{-1}$) y PT (56,2%), un espesor del horizonte A de 23 cm de profundidad y un muy bajo índice de inestabilidad (0,14) que permitirían un desempeño de las funciones que se le asignan al suelo en niveles óptimos para un Vertisol.

Las variables que integran la ecuación para el cálculo del Is también fueron importantes para este componente. Éstas se mostraron sensibles y marcaron diferencias, especialmente entre suelos inalterados y en uso agrícola continuo. Cada uno de los pretratamientos tiene un sentido por sí mismo, permitiendo conocer las causas de la inestabilidad de los agregados. Sin embargo, la combinación de los tres pretratamientos en el índice de inestabilidad (Is) permite dar alta potencialidad a la información generada

(Mathieu y Pieltain, 1998). Es por ello que solo se utilizó dicho índice como indicador.

Si bien el Pe presentó un valor de ponderación en el CP1 mayor a 0,25, (Tabla 2) la variable no puede considerarse un indicador de calidad de suelo, ya que no refleja los efectos de deterioro o recuperación por el uso. Los valores de Pe mostraron en cambio, una correspondencia con la práctica de la fertilización fosforada. Esta medición podría reemplazarse por otra fracción más sensible como el fósforo orgánico lábil. Giuffré et al. (2000), lo recomendaron como indicador de calidad de suelo en Vertisoles, especialmente aquellos provenientes de desmonte, debido a que constituye una reserva que gradualmente se va utilizando por los cultivos. Indicaron que dicho fósforo mostró una gran dependencia con la pérdida de suelo por erosión y con el contenido de carbono orgánico del suelo.

Respecto del CP2 la condición inalterada se ubica en el cuadrante inferior. El uso agrícola continuo afectó negativamente el rango de porosidad de almacenamiento. Una buena estructura del suelo que presente una adecuada distribución de poros, garantiza la entrada de agua y aire, su circulación, almacenamiento y redistribución entre los horizontes y además, el óptimo aprovechamiento de los nutrientes. Si bien en el ACP solo se incluyó este rango de porosidad, fueron analizados otros, que no reflejaron efectos del uso del suelo, por lo que fueron descartados del análisis.

En la condición pastura-agrícola, la utilización de tecnologías como la alternancia de cultivos de cosecha con las pasturas destinadas al pastoreo permitió la semejanza de esta condición con la inalterada.

En la condición con uso agrícola continuo se identificó una pérdida de la estabilidad estructural. Se destaca también el aumento de la relación C/N y la pérdida del volumen total de poros por aumento de la densidad aparente. El aumento de C/N con el uso agrícola representa una limitante para la captura de C por parte de los sistemas agrícolas, ya que ésta es nitrógeno dependiente. El solo aporte de residuos de cosecha no es suficiente para mantener o incluso aumentar el contenido de materia orgánica del suelo si el N es limitante (Galarza et al., 2005). Debe considerarse además que si la fertilización nitrogenada no es adecuada, la mineralización de la MO también resulta en una pérdida de SOC.

La condición con uso ganadero continuo (pastura) se aproxima en el BiPlot, al sitio agrícola. Esto señala que la mera participación de los cultivos forrajeros no basta para sostener condiciones edáficas deseadas. Resulta muy importante analizar la productividad de las mismas, los aportes de residuos de estas pasturas y los balances de nutrientes de estos sistemas, ya que si éstos no son de importancia y positivos, los planteos ganaderos puros pueden resultar tan desfavorables como la agricultura continua. Trabajando en suelos similares y utilizando modelos de simulación validados en ensayos de larga duración, García Préchac (2004) encontró que sólo aquellas pasturas que superaban los 8 Mg de materia seca ha año⁻¹ de productividad y se encontraban participando de rotaciones con cultivos agrícolas lograban

sostener los niveles de carbono orgánico del suelo. Se observaron, al momento de los muestreos, pasturas degradadas, con producciones anuales muy inferiores a los alcanzables en la región con la tecnología disponible.

En la Tabla 3 se presenta los indicadores seleccionados para establecer el Conjunto mínimo de datos.

Tabla 3: Conjunto mínimo de datos (CMD) para la Serie María Dolores (Hapluderte típico) con uso ganadero-agrícola.

Indicadores seleccionados	
CO	Carbono Orgánico
Nt	Nitrógeno total
Is	Índice de inestabilidad estructural
Ks	Índice de percolación
PT	Porosidad Total
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
M	Masa del horizonte A

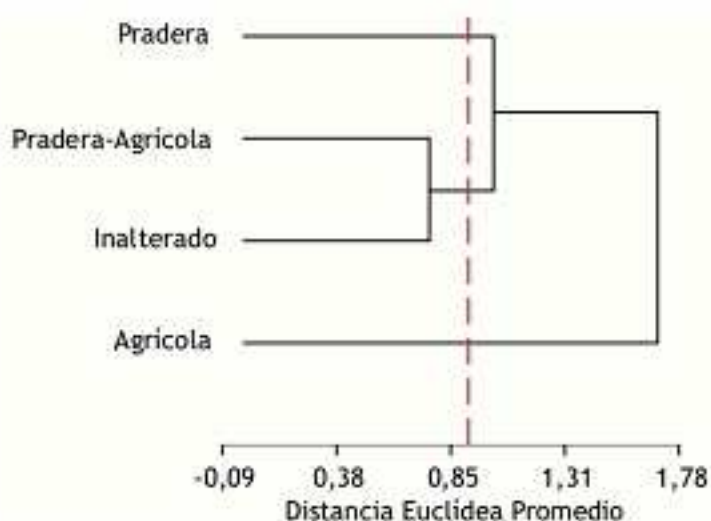


Figura 2: Encadenamiento promedio de diferentes condiciones de uso para la Serie María Dolores (Hapluderte típico).

El análisis de conglomerados utilizando el CDM presentó un coeficiente de correlación cofenética de 0,803, que indica un buen ajuste (Figura 2). El encadenamiento promedio de los sitios, fijando como criterio el corte a una distancia de 0,89 (50% de la máxima distancia euclídea promedio), permitió distinguir tres grupos: uno representado por las condiciones inalterada y pradera-agrícola formando un conglomerado a la distancia de 0,76, otro por la condición pradera y la restante por la condición agrícola continua. Este resultado coincide con el arrojado por el Biplot que muestra la similitud entre el uso agrícola y pradera degradadas.

Tabla 4: Correlación entre variables de suelo en un Typic Hapluderts con uso ganadero-agrícola de Entre Ríos, Argentina.

	SE	CO	Pe	pH	Nt	C/N	Is	Ks	Dap	PT	CIC	C10-0.2	ARC	LIM	M
SE	1														
CO	0.66	1													
Pe	0.33	0.63	1												
pH	0.39	-0.19	-0.18	1											
Nt	0.70	0.89	0.79	0.07	1										
C/N	-0.54	-0.12	-0.56	-0.51	-0.55	1									
Is	-0.79	-0.85	-0.69	-0.15	-0.92	0.43	1								
Ks	0.70	0.81	0.60	0.24	0.86	-0.43	-0.95	1							
Dap	-0.25	-0.70	-0.69	0.05	-0.67	0.20	0.68	-0.63	1						
PT	0.33	0.77	0.61	0.11	0.73	-0.21	-0.83	0.75		1					
CIC	0.86	0.66	0.50	0.44	0.82	-0.58	-0.85	0.90	-0.36	0.54	1				
C10-0.2	-0.87	-0.37	-0.10	-0.48	-0.50	0.40	0.62	-0.59	-0.11	-0.08	-0.84	1			
ARC	0.74	0.40	0.26	0.26	0.54	-0.43	-0.59	0.57	0.12	0.04	0.78	-0.88	1		
LIM	-0.79	-0.45	-0.32	-0.25	-0.60	0.46	0.68	-0.64	-0.04	-0.11	-0.83	0.89		1	
M	0.40	0.66	0.58	0.00	0.64	-0.26	-0.62	0.72	-0.75	0.79	0.56	-0.14	0.25	-0.29	1

SE es superficie específica ($m^2 g^{-1}$); CO es carbono orgánico (%); Pe es fósforo extractable; Nt es nitrógeno total (%); pH es reacción del suelo 1: 2.5; Is es el índice de inestabilidad estructural de Hénin; C/N es la relación carbono / nitrógeno; Ks es el índice de percolación de Hénin ($cm h^{-1}$); CIC es la capacidad de intercambio catiónico ($cmol kg^{-1}$); PT es la porosidad total (%); Dap es la densidad del suelo ($Mg m^{-3}$); C10-0.2 es la porosidad de almacenamiento ($cm^3 100g^{-1}$) y M es la masa del horizonte superficial ($Mg ha^{-1}$); ARC es el contenido de arcilla y LIM es el contenido de limo.

En la Tabla 4 se presenta los coeficientes de correlación entre las 15 variables estudiadas. En ella se observa una asociación significativa ($p < 0,05$) en 50 de los 112 pares de propiedades del suelo analizados. Las correlaciones positivas más altas fueron obtenidas para SE versus CIC, CO versus Nt, Ks versus Nt y poros de 10-0.2 μm versus Lim ($r > 0.85$). Las correlaciones negativas más altas fueron obtenidas para SE versus poros 10-0.2 μm , CO versus Is, Nt versus Is, Is versus K, Is versus CIC, poros 10-0.2 μm versus Arc ($r > 0.85$).

Puede observarse que la asociación de los indicadores seleccionados con el resto de las variables (Tabla 3) es muy buena y explica su inclusión en el CMD. La elección de sitios de muestreo con historias de uso y manejo bien diferenciados permitió obtener correlaciones significativas aun con un reducido número de observaciones.

Una variable que no está incluida en el CMD y que presentó una alta correlación tanto positiva como negativa con el resto de las variables es la SE. Cambios en el contenido de arcillas provocaron cambios positivos de SE ($r = 0,74$), demostrando el importante rol que juega este tamaño de partículas en Vertisoles con elevados niveles de esmectitas. La SE también explicó la variación de la CIC ($r = 0,85$) y se correlacionó negativamente con la porosidad de agua útil ($r = -0,87$), Fig 3. La SE y su relación con el tamaño de partículas, es un indicador de la actividad coloidal del suelo y permitió inferir acerca de la fertilidad química y la capacidad de retención de agua (Scott, 2000).

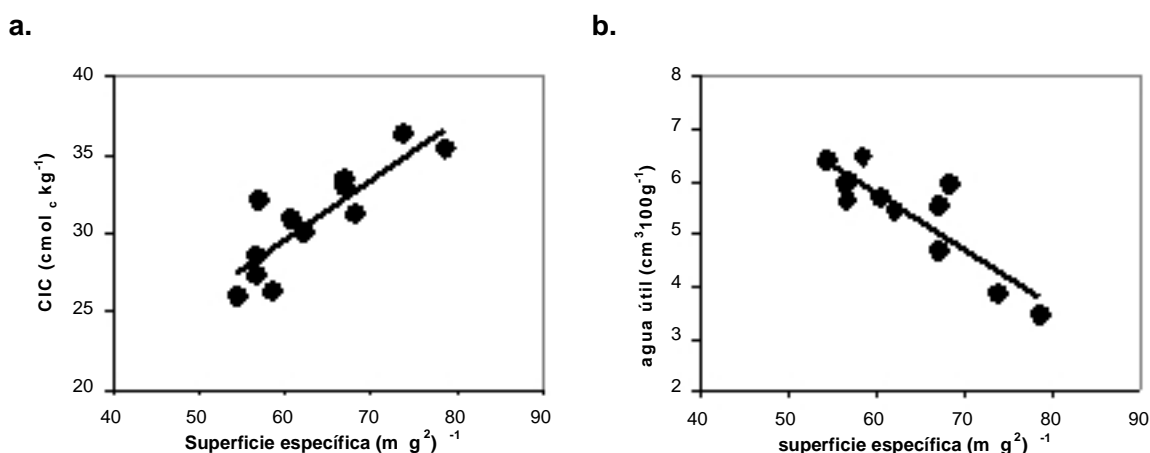


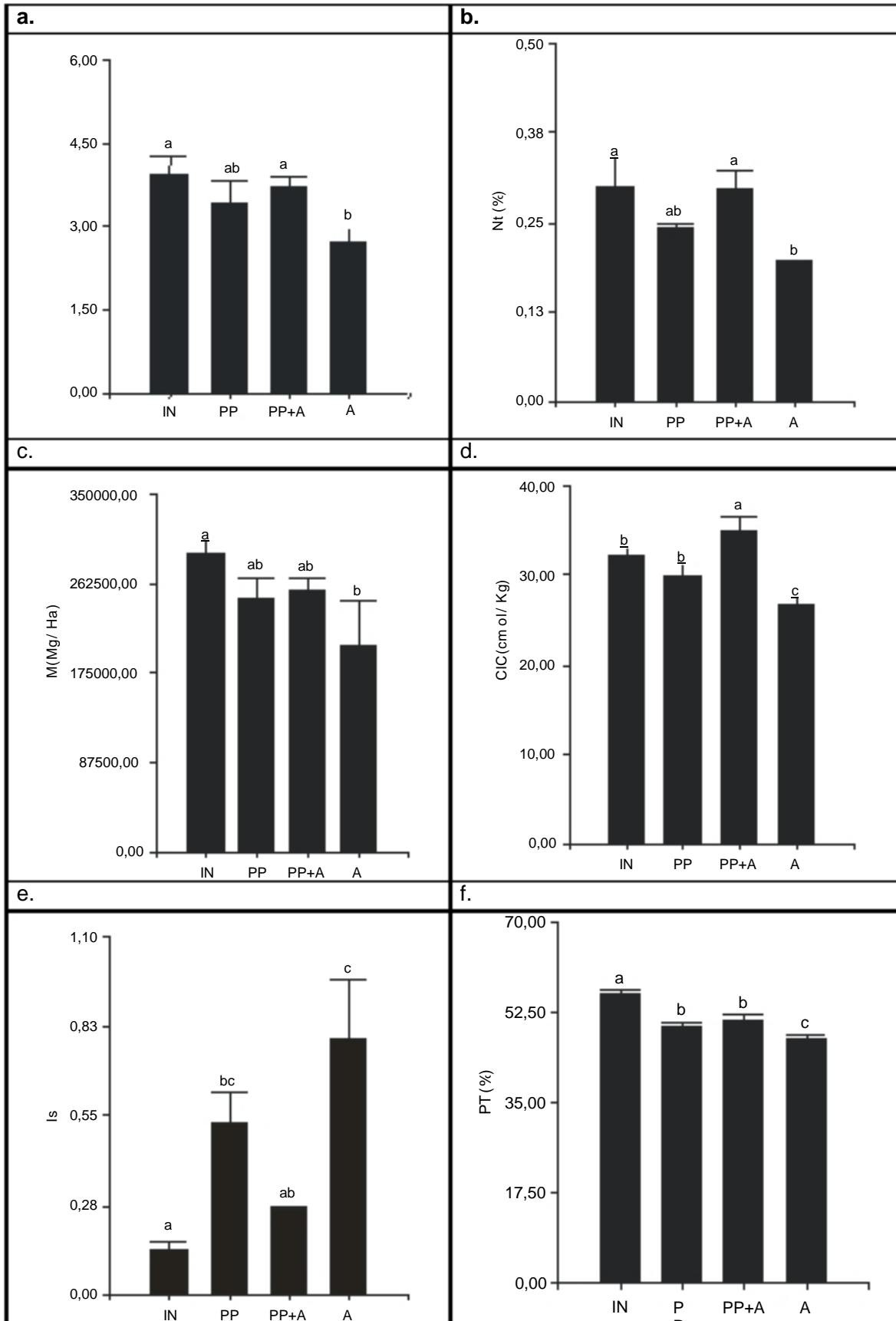
Figura 3: Relación entre la superficie específica de un Hapluderte típico con la capacidad de intercambio catiónico y la porosidad de agua útil.

Respecto a la porosidad de agua útil, se observó una disminución con el aumento de la cantidad de arcilla ($r = -0,87$), mientras que mayores valores de arcilla se vieron reflejados en mayores niveles de poros $< 0,2 \mu\text{m}$ ($r = 0.75$). Es decir que a mayores niveles de arcilla habría mayor retención hídrica, pero la misma no estaría disponible. Contrariamente, la porosidad $< 0.2 \mu\text{m}$ disminuyó con el aumento del contenido de limos en el suelo ($r = -0.73$).

Las asociaciones entre los parámetros mencionados (SE, ARC, CIC, porosidad de agua útil) son importantes, aunque explicables. La porosidad textural es dependiente de la constitución mineral y orgánica del suelo y su ensamblaje, así como del tenor de agua. Sin embargo, las acciones antrópicas, climáticas y biológicas, propias del uso del suelo, solo tienen efecto sobre el volumen de macroporos y el ordenamiento de agregados estructurales. Los resultados indican que el uso del suelo produjo una variación en el contenido de CO que influyó sobre la SE ($r = 0,66$), mientras que las proporciones texturales no cambiaron.

En la Fig. 4 se presenta el efecto del uso a partir de los indicadores de calidad de suelo que integran el CMD. Para el CO (Fig. 4a) no existieron diferencias significativas entre la condición inalterada y aquella donde se incluyó pasturas, en cambio las condiciones inalterada y pradera-agrícola mostraron diferencias significativas respecto a la condición agrícola continua. Comportamiento similar se observó en el Nt (Fig. 4b).

Figura 4: Efecto del uso sobre las propiedades edáficas que integran el CMD.



Donde: Letras diferentes indican diferencias significativas (5%). Las líneas que se desprenden de las barras señalan el desvío estándar.

La masa de suelo del horizonte superficial (M), utilizada para estimar la pérdida de suelo por erosión, no registró diferencias significativas entre la condición inalterada y aquellas donde se incluyó pasturas, mientras que las diferencias fueron significativas respecto a la agricultura continua, disminuyendo M en un 31% (Fig 4c). La variable M fue sensible y se correlacionó positivamente con la mayoría de los indicadores seleccionados, tales como el CO ($r = 0,66$), el Nt ($r = 0,64$), el índice K ($r = 0,72$), la PT ($r = 0,79$) y negativamente con el Is ($r = -0,62$); mientras que mostró baja asociación con la CIC. De esta manera, diferentes autores han informado sobre el deterioro de los Vertisoles por el uso agrícola, destacando a la materia orgánica, la erosión hídrica, y la pérdida de estructura del suelo como los indicadores más sensibles (Wilson et al., 2000 y 2006; Cosentino y Constantini, 2000; Conti, 2004; Cerana et al, 2006).

La CIC mostró cambios significativos en función del uso, con valores más bajos en la condición de agricultura continua y valores más elevados en la condición pradera-agrícola (Fig. 4d), mientras que el Is presentó los valores más bajos en la condición inalterada, aumentando significativamente en la condición pradera, mientras que la condición agrícola continua evidenció la situación estructural mas desfavorable. Por último, la PT disminuyó significativamente con el uso de praderas respecto a la condición inalterada, y al igual que para el resto de los indicadores seleccionados, la agricultura continua mostró las peores condiciones de suelo (Fig. 4f). Esta situación se vio reflejada además por el Ks.

Conclusiones

Se seleccionó un conjunto de indicadores de calidad de suelo para un Vertisol en uso ganadero-agrícola, sensibles al deterioro. Los indicadores seleccionados fueron el contenido de carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total, los índices de inestabilidad estructural y de percolación de Hénin, la porosidad total, la capacidad de intercambio catiónico y la masa de suelo del horizonte superficial.

La vegetación natural, pasturas y agricultura en rotación con pasturas mantienen un contenido muy alto SOC contrastando con lo observado en condiciones de agricultura continua.

La superficie específica de microagregados presentó alta correlación tanto positiva como negativa con el resto de las variables. Esta y la SOC mostraron muy buena correlación en particular con la capacidad de intercambio catiónico y la estabilidad de agregados.

La rotación con pasturas permitirían mantener o mejorar las condiciones de las propiedades del suelo estudiado.

Bibliografía

- Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Janzen, H.H. and F.J. Pierce (1997). Concepts of soil quality and their significance. Chapter 1. En Gregorich, E. G.; Carter, M. R. *Soil Quality For Crop Production and Ecosystem Health*. Elsevier. 1997. 1-19.
- Cerana, J.A.; Wilson M.G.; De Battista J.J.; Noir J. y C.E. Quintero (2006). Estabilidad estructural de los Vertisoles en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. *Revista de Investigaciones Agropecuarias RIA*. 35 (1): 87-106.
- Cosentino, D.J. y A.O. Constantini (2000). Evaluación de algunas formas de carbono como indicadores de degradación en Argiudoles vérticos de Entre Ríos, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía* 20 (1): 31-34.
- Conti, M.E. (2004). Efectos del uso agrícola sobre suelos vertisólicos. *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 31-36.
- Doran J.W. and T. Parkin (1994). Defining and assessing soil quality. *Soil Science Society of America* 677: 3-21.
- Fiés, J.C. (1984). Analyse de la repartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette: comparaison entre un modèle d'espace poral et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie* 4: 891-899.
- Fiés, J.C. and A. Bruand (1990). Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore balance estimation, mercury porosimetry and backscattered electron image analysis (BESI). *Geoderma*, 47: 209-219.
- Galarza, C. (2005). Balances de carbono en suelos agrícolas pampeanos con manejos contrastantes como indicadores de sustentabilidad. I Seminario Internacional. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Marcos Juárez. Centro Regional Córdoba. Trabajo en CD.
- García Prechac, F. (2004). Cultivo continuo en siembra directa o rotaciones de cultivos y pasturas en suelos pesados del Uruguay. *Revista Científica Agropecuaria*. Número especial Segundo Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. Número 8(1): 23-29.
- Giuffré, L.; Heredia, O.S.; Pascale, C.; Conti, M. y M. González (2000). Fósforo extractable y fósforo orgánico lábil como indicadores de calidad de suelos de Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía* 20 (1): 41-46.
- Govaerts, B.; Sayre, K.D. and J. Deckers (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87: 163-174.
- Greenland, D.J. (1977). Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent. *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. B*, 281: 193-208.

- Gregorich, L. J. and D.F. Acton (1995). Understanding soil health. In D. F. Acton and L. J. Gregorich, Eds. The health of our soils-towards sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont., Canada. 5-10.
- Henin, S., Monnier, G. and A. Combeau (1958). Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- Jackson, M.L. (1976). Análisis químico de suelos. Tercera Edición. Ed. Omega S.A. Barcelona, España. 662 p.
- Larson, W. and F. Pierce (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Soil Science Society of America* 677: 37-51.
- Maddoni, G.; Urricariet, S.; Ghera, C. and R. Lavado (1999). Assessing soil quality in the Rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agronomy Journal* 91: 280-287.
- Mathieu C., and F. Pieltain (1998). Analyse physique des sols: Méthodes choisies. Lavoisier Tec. Doc. París, London, New York. 275p.
- Pierce, F.J. and W.E. Larson (1993). Developing criteria to evaluate sustainable land management. In R. J. MacEwan and M. R. Carter, Eds. Proc. Of symposium Soil Quality for Land Management: Science, Practice and Policy. CEM, University of Ballarat, Victoria, Australia. 7-14.
- Scott, H.D. (2000). Soil Physics applications. Agricultural and environmental. Iowa State University Press. 421 p.
- Schipper L.A. and G.P. Sparling (2000). Performance of soil condition indicators across Taxonomic groups and Land uses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 300-311.
- Tasi H.A.A. (2000). Aptitud de uso y estado de degradación de suelos Vertisoles y vérticos de la provincia de Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA.* 20 (1): 1-6.
- Tasi, H y D. Bedendo (2001). Aptitud agrícola de las tierras de la provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos. INTA Serie Extensión N° 19. 10 p.
- Wilson, M.G.; Quintero, C.E.; Boschetti, N.G.; Benavídez, R.A. y W.A. Mancuso (2000). Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Revista de la Facultad de Agronomía* 20 (1): 23-30.
- Wilson, M.G.; Garcarena N.; Tasi, H.A.A.; Paz González, A.; Mancuso, W.A. and L. López (2006). The impact of the changes in land-use on two soils of Entre Rios Province, Argentina. 14th Conference of ISCO International Soil Conservation Organisation. Marrakech, Marruecos. Paper in CD.