

EFFECTO DE LA AGRICULTURA CONTINUA BAJO LABRANZA CONVENCIONAL SOBRE CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS EN UDOLES DEL SUDESTE BONAERENSE

FN CABRIA, JPh CULOT

Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. CC 276. (7620) Argentina.

Recibido 7 de junio de 2000, aceptado 9 de mayo de 2001

CONTINUOUS CROPPING UNDER CONVENTIONAL TILLAGE EFFECTS ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF UDOLLS INTO SOUTH EAST OF BUENOS AIRES PROVINCE

Changes in soil structure occur when different management systems are applied. We hypothesized that in the soil series studied, long-term conventional tillage effect on some physical and chemical soil properties are related to aggregate size, architecture and arrangement. The objectives of this work were: (i) quantify the effect of continuous cropping under conventional tillage on bulk density, particle density, porosity, organic matter, geometric mean diameter of clay fraction, electrical conductivity, iron, and silicon in the A and Bt horizons of three soil series, and (ii) to discuss why aggregate hierarchical level of organization in the A horizons permits to justify the state of the characteristics evaluated as well as helpful to understand the water flux behavior. Management systems were continuous cropping under conventional tillage and non-grazed pastures. Crops included were spring wheat (*Triticum aestivum* L.), soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], sunflower (*Helianthus annuus* L.), and corn (*Zea mays* L.). The results showed that 17 year of continuous cropping under conventional tillage modified the physical and chemical soil properties evaluated. Especially in the A horizons bulk density, geometric mean diameter of clay fraction, iron and particle density were increased. On the other hand, silicon, organic matter, porosity and electrical conductivity decreased. The mechanisms responsible of soil organic matter stabilization permitted to relate organic matter, iron and silicon contents in the management systems evaluated. In the A horizons, the conceptual framework that contributed to justify the state of physical and chemical properties analyzed was also helpful to relate them with water flux behavior.

Key words: Conventional tillage, Soil properties, Aggregate hierarchy, Flux of water.

INTRODUCCION

Los residuos vegetales y los productos de su descomposición se transforman física y químicamente, a posteriori se asocian estrechamente con partículas minerales bajo la forma de agregados estables (Angers, Chenu 1998). En un suelo en particular, la exacta naturaleza y estabilidad de la estructura de los agregados, depende de la relativa cantidad y fuerza de varios tipos de asociaciones órgano-minerales y agentes cementantes que funcionan como estabilizadores en cada nivel jerárquico de la organización. (Jastrow, Miller 1998). En suelos donde la materia orgánica es el principal agente estabilizador, el estudio de la formación y estabilización de los agregados ha sido considerablemente influenciado por los conceptos vertidos por Tisdall y Oades (1982). Según estos autores, en Molisoles y Alfisoles la estabilidad en agua de los macroagregados,

>250 μm , es provista por agentes cementantes o sustancias adhesivas lábiles de origen orgánico; en los microagregados, <250 μm , se vinculó con la presencia de agentes cementantes perdurables. Los macro y microagregados se distinguen por el tamaño y la susceptibilidad que poseen al humedecimiento súbito (Edwards, Bremner 1967; Tisdall, Oades 1982). La estabilidad de los macroagregados es generalmente controlada por las prácticas de manejo u otras perturbaciones, pues alteran el crecimiento de las raíces, hifas de hongos u organismos rizosféricos (Tisdall, Oades 1982). Quizás el tipo de raíces, sus densidades y arquitectura, puedan influenciar la distribución del tamaño de los agregados (Miller, Jastrow 1990). La ruptura de los agregados de gran tamaño producto de la cantidad, frecuencia e intensidad de las labores, expone a la descomposición materia orgánica

relativamente lábil pero previamente protegida, resultando variadas combinaciones de elementos orgánicos con diferentes tasas de ingreso y reciclado (Jastrow, Miller 1998). En suelos donde la jerarquía de agregados está presente, la disminución en el contenido de agentes cementantes de origen orgánico contribuye con la pérdida de estabilidad de los macroagregados, facilita la ruptura de éstos por humedecimiento súbito e incrementa más el contenido de microagregados que el de partículas primarias (Tisdall, Oades 1982). Sobre la base de estas y otras observaciones, Oades, Waters (1991) justificaron la pérdida de estabilidad en los macroagregados de suelos labrados, lo cual sucede inicialmente a tasas elevadas para luego disminuir progresivamente. En Udoles del sector serrano de la Tandilia, esta dinámica en la estabilidad estructural de los agregados fue descrita por Suero y Garay (1978). Una consecuencia del incremento de agregados pequeños debido a la ruptura de los macroagregados, sería el aumento de la densidad aparente de los suelos. Esto se debería a la mayor masa de suelo por unidad de volumen y también, a la diferente densidad aparente que poseen los macro y microagregados. Con respecto a esto último, Dexter (1988) publicó que si existe jerarquía en la estructura de los agregados, debido al mayor contacto entre las partículas los más pequeños poseen poros de menor tamaño y mayor densidad aparente. Además, el modelo de empaquetamiento que adquieren los agregados de escaso tamaño puede modificar la porosidad total y la frecuencia de tamaños de poros (Lu *et al.* 1995), pudiéndose esperar diferencias en el modo con que el agua es infiltrada en los suelos. Contrariamente a lo que sucede con los macroagregados, los microagregados no son alterados por el humedecimiento súbito, ni tampoco por disturbios mecánicos incluyendo las labores de labranza (Tisdall, Oades 1982). La estabilidad de estos agregados depende de la fuerza con que las arcillas y otros componentes inorgánicos del suelo son sorbidos a la materia orgánica particulada, residuos microbianos y otros coloides orgánicos y compuestos de origen microbiano (Jastrow, Miller 1998). La adsorción en una variedad de asociaciones organo-minerales ocurre mediante puentes de

cationes polivalentes, uniones puente hidrógeno, fuerzas de van der Waals e interacciones con óxidos hidratados y aluminosilicatos (Beckwith, Reeve 1964; Edwards, Bremner 1967; Oades 1984; Schwertmann, 1985).

Bajo este marco conceptual y considerando que la porosidad total del suelo puede concebirse como el espacio complementario entre el arreglo u ordenamiento de partículas sueltas y agregados de distintos tamaños, formas y estabilidad, los objetivos de este trabajo fueron: (i) cuantificar en los horizontes A y Bt de tres series de suelos, el efecto de la agricultura continua bajo labranza convencional sobre la densidad aparente, densidad real, porosidad total, materia orgánica, diámetro geométrico promedio de las arcillas, conductividad eléctrica, óxidos de hierro libre y sílice, y (ii) fundamentar porqué en los horizontes A y Bt de los suelos estudiados bajo los sistemas de manejo comparados, el nivel de organización de la estructura de los agregados en los horizontes superficiales permite justificar y relacionar el estado de las características cuantificadas; y contribuye a comprender el comportamiento del flujo de agua en los horizontes superficiales.

MATERIALES Y METODOS

Para alcanzar los objetivos fue necesario, en los suelos y usos comparados, cuantificar propiedades físicas y químicas y caracterizar el comportamiento del flujo de agua. La caracterización de este último se efectuó utilizando los parámetros sorptividad (S) y conductividad hidráulica saturada (ks). S y ks fueron cuantificados utilizando la metodología propuesta por Ali y Swartzendruber (1994). Estos valores y el efecto a largo plazo que les causó la agricultura continua bajo labranza convencional, fueron publicados por Cabria y Culot (1999 y 2000). Los datos publicados y los de este trabajo se obtuvieron a partir de las mismas muestras de suelos. Estas muestras representaron horizontes A y Bt de tres series de suelos comprendidas en parcelas experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Balcarce. Las series participantes constituyen una catena en el dominio edáfico 2a (SAGyP – INTA 1989). El paisaje del sector, lomadas y pendientes adosadas a las sierras de Tandilia, posee inclinaciones que decrecen al alejarse de las áreas más elevadas. Los suelos profundos, serie Mar del Plata, se encuentran en sectores cóncavos entre lomas, los moderadamente profundos, serie Azul, en pendientes y senos entre

lomas y los someros, serie El Cruce, en la parte alta de las lomas. Según la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999), la serie Mar del Plata es un Argiudol Típico franco-fino, mixto, térmico. Las series Azul y El Cruce son Paleudoles Petrocálcicos, situándose el límite superior del horizonte cementado a una profundidad que varía entre los 70 y 100 cm y 50 y 70 cm respectivamente. La serie Azul distingue una familia fina, illítica, térmica y El Cruce, una fina, mixta, térmica. Cada una de las series de suelos estuvo bajo dos tipos de utilización de tierras, agricultura continua bajo labranza convencional y pasturas cultivadas. La expresión agricultura continua bajo labranza convencional, se utilizó para identificar sitios donde se realizó un ensayo de rotaciones de cultivos durante 17 años consecutivos. Los cultivos fueron soja, maíz, trigo y girasol. Para roturar y preparar la cama de siembra se utilizó arado de reja en combinación con rastra de dientes. Durante los barbechos, la superficie de los suelos se mantuvo libre de malezas con circular y rastra de dientes. El período de barbecho nunca fue menor a tres meses. El término pasturas cultivadas se utilizó para identificar sitios en los cuales, al menos durante 17 años consecutivos pasturas polifíticas no fueron disturbadas mecánicamente ni pastoreadas. La masa vegetal fue periódicamente podada a 5 o 7 cm de altura con motosegadoras. En el estudio participaron 24 perfiles, cuatro para cada una de las combinaciones entre las series de suelos y los tipos de utilización de tierras especificados. En cada sitio de muestreo se verificaron las series mediante sus características discriminantes (Cabria, Culot 1994). El muestreo realizado se planeó respetando los supuestos de un diseño completamente aleatorizado y se definió un modelo lineal constituido por los factores suelo, horizonte, uso y sus interacciones. Sobre la base de los valores originales y sus transformaciones logarítmicas, el ajuste del modelo se realizó utilizando análisis de varianza ($P < 0,05$). Posteriormente se evaluaron las medias utilizando análisis de comparaciones múltiple de Tukey ($P < 0,05$). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas se evaluaron a partir de los residuos. La normalidad se verificó utilizando la opción Normal del comando PROC UNIVARIATE del programa estadístico SAS (1988). La homogeneidad de varianzas gráficamente.

La densidad aparente (ρ_{ap}) se obtuvo aplicando el método de los agregados, se utilizó parafina como elemento impermeabilizante (Blake, Hartge 1986a). La densidad real (ρ_r) se determinó por el método del picnómetro (Blake, Hartge 1986b). La porosidad total (Pt) se calculó restando a la unidad el valor de la relación ρ_{ap}/ρ_r . La fracción orgánica en las muestras de suelos (Mo) se obtuvo aplicando el método de Walkley y Black (Pauwels *et al.* 1992). La conductividad eléctrica (Ce) se

determinó por conductimetría en una solución extraída a la pasta de saturación (Bower, Wilcox 1965). La cantidad de sílice (Si) se determinó aplicando el método colorimétrico de Kilmer, se extrae como ácido silícico mediante una solución de hidróxido de sodio al 15% (Kilmer 1965). El hierro (Fe), proveniente de los óxidos de hierro libres, se obtuvo mediante la técnica colorimétrica de Kilmer (Olson 1965). Esta utiliza ditionito de sodio como extractante y citrato de sodio como regulador del pH. Para establecer la distribución del tamaño de las partículas minerales, primero se eliminaron los agentes cementantes, materia orgánica y carbonato de calcio. La materia orgánica se eliminó por oxidación con peróxido de hidrógeno, el carbonato de calcio por disolución con una solución de ácido acético y posterior centrifugación y lavado. Las partículas del tamaño de las arenas se separaron por tamizado. Utilizando calgón como agente dispersante, los limos y arcillas se separaron por el método de la pipeta (Gee, Bauder 1986). A partir de un análisis previo de la distribución de la fracción mineral de los suelos, se observó que el efecto uso y la variabilidad entre horizontes se manifestó peculiarmente en la fracción arcilla. Sobre la base de esta observación, el efecto de los factores horizonte y uso sobre la distribución de la fracción mineral, se caracterizó a partir del diámetro geométrico promedio de las arcillas. (DGPas).

RESULTADOS

El coeficiente de determinación junto con el de variación porcentual, resume la concordancia general entre la curva descripta por el modelo y la distribución de los datos (Tabla 1). Ambos coeficientes, en siete de las ocho variables estudiadas, hacen referencia a un ajuste general muy elevado (densidad aparente, porosidad total, materia orgánica, conductividad eléctrica, sílice, hierro y diámetro geométrico promedio de las arcillas). En éstas el estudio de la normalidad y homocedasticidad de los residuos, evidenció que el arreglo de los datos fue óptimo a lo largo de toda la trayectoria que describe la curva del modelo.

La ρ_r , al procesar las magnitudes originales o sus transformaciones logarítmicas, no satisfizo los supuestos de normalidad y homogeneidad en los residuos (Tabla 1). Por lo tanto, utilizando el modelo probado, los efectos de los factores suelo, horizonte y uso no pudieron comprobarse estadísticamente. El promedio general de los datos fue 2,36 Mg m³. El promedio para el conjunto de los horizontes A labrados fue 2,39 Mg m³ y para

Tabla 1. Significancia del modelo general y sus fuentes de variación. Coeficiente de determinación múltiple y de variación porcentual. Normalidad y homogeneidad de varianza en los residuos.

Table 1. General model significance and variation sources. Multiple determination coefficient and porcentual variation. Normality and homogeneity of residues variance.

Variable	Modelo General	R ²	CV(%)	Efecto								Normalidad	Homogeneidad de varianza
				Hz	Uso	Suelo	Hz x Uso	Uso x Suelo	Hz x Uso x Suelo				
ρ_{ap}	***	0,9446	2,64	***	NS	*	NS	NS	NS	NS	**	B	
P _t	NS	0,6569	2,05	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	***	S	
Log P _t	NS	0,6561	2,41	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	***	S	
Log Pt	***	0,9192	2,25	---	*	---	NS	**	NS	NS	**	B	
Log Mo	***	0,9811	18,09	---	NS	---	NS	***	NS	NS	***	B	
Ce	***	0,8590	18,62	---	*	*	NS	NS	NS	NS	***	E	
Si	*	0,7191	9,00	---	---	NS	***	NS	NS	NS	***	MB	
Fe	***	0,9995	0,14	---	---	---	***	***	***	***	---	B	
Log DGPs	***	0,9713	7,33	---	---	---	NS	***	NS	***	***	MB	

ρ_{ap} : densidad aparente. ρ_p : densidad real. Log: transformación logarítmica decimal. Pt: porosidad total. Mo: materia orgánica. Ce: conductividad eléctrica. Si: sílice. Fe: hierro. DGPs: diámetro geométrico promedio de las arcillas. Hz: horizonte. NS: no significativo. *: Significativo ($P < 0,05$). **: Significativo ($P < 0,01$). ***: Significativo ($P < 0,001$). R²: coeficiente de determinación múltiple. CV(%): coeficiente de variación porcentual. S: sesgado. B: bueno. MB: muy bueno. E: excelente.

ρ_{ap} : bulk density. ρ_p : particle density. Log: log transformation in the base 10. Pt: porosity. Mo: organic matter. Ce: electrical conductivity. Si: silicon. Fe: iron. DGPs: geometric mean diameter of the clay fraction. Hz: horizon. NS: non significant. *: Significant ($P < 0,05$). **: Significant ($P < 0,01$). ***: Significant ($P < 0,001$). R²: multiple determination coefficient. CV(%): variation coefficient in percentage. S: biased. B: good. MB: very good. E: excellent.

el de los no labrados 2,32 Mg m³. En los horizontes B_t el promedio para el conjunto de suelos labrados y no labrados fue 2,37 y 2,34 Mg m³ respectivamente.

La ρ_{ap} no evidenció interacciones significativas. Los efectos significativos fueron los factores suelo y horizonte (Tabla 1). En los horizontes A no labrados las ρ_{ap} fueron similares (Tabla 2). Sus magnitudes se incrementaron

bajo labranza convencional, pero sólo la serie El Cruce se diferenció estadísticamente. En cada suelo la ρ_{ap} superficial fue significativamente menor que la subsuperficial. La ρ_{ap} en los horizontes subsuperficiales de la serie Mar del Plata y Azul fueron similares e independientemente del uso, se diferenciaron por defecto de la del Cruce.

La Pt en los horizontes superficiales fue

Tabla 2. Comparación de medias. Densidad aparente (ρ_{ap}), porosidad total (Pt) y diámetro geométrico promedio de las arcillas (DGPs).

Table 2. Means comparison. Bulk density (ρ_{ap}), porosity (Pt) and geometric mean diameter of the clay fraction (DGPs).

Serie de Suelo y Uso	ρ_{ap}		Pt		DGPs	
	Horizonte		Horizonte		Horizonte	
	A	B _t	A	B _t	A	B _t
	Mg m ⁻³		m ⁻³ m ⁻³		mm	
Labrados						
Mar del Plata	1,21 a	1,47 b	0,496 ab	0,386 de	0,014 bc	0,0065 cde
Azul	1,28 a	1,44 b	0,464 abc	0,398 bcd	0,026 ab	0,0018 de
El Cruce	1,40 b	1,56 c	0,413 abcd	0,347 f	0,044 a	0,0003 fg
No labrados						
Mar del Plata	1,17 a	1,44 b	0,491 ab	0,374 ef	0,010 cd	0,0036 e
Azul	1,19 a	1,42 b	0,489 abc	0,391 cd	0,012 cd	0,0006 f
El Cruce	1,14 a	1,55 c	0,511 a	0,335 f	0,007 cde	0,0003 g

Mar del Plata: suelo profundo. Azul: moderadamente profundo. El Cruce: somero. En una variable, letras distintas indican valores diferentes según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Mar del Plata: deep soil. Azul: moderately deep soil. El Cruce: shallow. In a variable, different letters indicate significant differences to Tukey test ($P < 0,05$).

mayor que en los subsuperficiales, pero no se diferenciaron estadísticamente (Tabla 2). El efecto de la labranza no fue constante en los horizontes superficiales. La Pt en las series Azul y El Cruce disminuyó. En los horizontes subsuperficiales de los suelos labrados fue levemente superior que en los no labrados, pero las magnitudes no se diferenciaron estadísticamente.

El logaritmo decimal del DGPas fue similar en los horizontes A de los suelos no labrados (Tabla 2). En los cultivados, el mayor valor lo observamos en El Cruce y el menor en Mar del Plata. Estos fueron estadísticamente distintos y no se diferenciaron con respecto al de Azul. Excepto en la serie Mar del Plata labrada, los DGPas de los horizontes de un *sequum* se diferenciaron estadísticamente. La agricultura continua bajo labranza convencional provocó en todos los horizontes un incremento con respecto a su homónimo no labrado. Este efecto no fue constante. En los horizontes superficiales el mayor incremento se observó en la serie El Cruce, que al igual que en Azul, provocó que las medias del DGPas se diferenciaron estadísticamente de las de sus pares no labrados. En los horizontes B_t el incremento con respaldo estadístico sólo se observó en la serie Azul. Los resultados evidenciaron que independientemente del uso, el logaritmo del DGPas de los horizontes B_t se asociaría positivamente con la profundidad

efectiva de los suelos. Esta relación se invierte en los horizontes A labrados y no se observó en los no labrados.

Los porcentajes de MO en los horizontes A de los distintos suelos fueron estadísticamente similares ($P < 0,058$). El efecto uso calificaría como significativo si se toma como criterio de decisión el valor $P < 0,1$ (Tabla 3). El porcentaje de MO en los horizontes A de los suelos labrados fue menor que en los no labrados. El contenido de MO en los horizontes superficiales fue mayor y estadísticamente distinto que en los subsuperficiales. El contenido de MO en los horizontes B_t se asociaría negativamente con la profundidad efectiva del suelo.

La Ce no definió interacciones significativas (Tabla 1). La Ce superficial fue mayor y estadísticamente distinta que la subsuperficial, siendo el promedio de la primera independientemente del uso 0,38, 0,50 y 0,49 dS.m⁻¹ (Mar del Plata, Azul y El Cruce respectivamente). El promedio para el conjunto de los horizontes B_t independientemente del uso, fue 0,22, 0,27 y 0,30 dS.m⁻¹ (Mar del Plata, Azul y El Cruce respectivamente). En los horizontes A, excepto en la serie Azul, la Ce disminuyó bajo labranza, pero las medias no se diferenciaron estadísticamente de sus pares no labrados (Tabla 3). En los horizontes B_t el comportamiento fue similar.

Los resultados de sílice evidenciaron

Tabla 3. Comparación de medias. Materia orgánica (MO), hierro (Fe) y conductividad eléctrica (Ce).
Table 3. Means comparison. Organic matter (MO), iron (Fe) and electrical conductivity (Ce).

Serie de Suelo y Uso	MO		Fe		Ce	
	Horizonte		Horizonte		Horizonte	
	A	Bt	A	Bt	A	Bt
	%		%		dS m ⁻¹	
Labrados						
Mar del Plata	6,06 a	0,67 d	0,755 c	0,753 d	0,34 ab	0,18 c
Azul	5,49 a	1,56 c	0,798 a	0,788 b	0,53 a	0,21 c
El Cruce	7,54 a	1,84 b	0,730 f	0,735 f	0,45 a	0,25 c
No labrados						
Mar del Plata	8,43 a	0,67 d	0,640 k	0,753 d	0,42 a	0,27 bc
Azul	7,54 a	1,31 c	0,665 i	0,718 g	0,46 a	0,33 bc
El Cruce	7,67 a	1,83 b	0,648 j	0,670 h	0,52 a	0,34 bc

Mar del Plata: suelo profundo. Azul: moderadamente profundo. El Cruce: somero. En una variable, letras distintas indican valores diferentes según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Mar del Plata: deep soil. Azul: moderately deep soil. El Cruce: shallow. In a variable, different letters indicate significant differences to Tukey test ($p < 0,05$).

una interacción significativa horizonte – uso. El factor suelo no afectó significativamente los porcentajes de sílice. (Tabla 1). La mayor concentración fue el valor promedio que caracterizó a los horizontes A de los suelos no labrados (93,8%), el menor, el de los horizontes A labrados (74,82%). Estos valores fueron estadísticamente distintos. En los horizontes B_t la situación se revirtió (suelos labrados 79,00% y no labrados 75,54 %); pero el efecto, que es debido al uso, no fue significativo.

En los suelos labrados se cuantificó la mayor cantidad de óxidos de hierro libre. Sólo el horizonte B_t de la serie Mar del Plata no se diferenció de su homónimo no labrado (Tabla 3). Los menores porcentajes de hierro correspondieron a horizontes A de suelos no labrados. Estos fueron menores que en los horizontes B_t independientemente del uso. En los suelos labrados, excepto en la serie El Cruce, los porcentajes de hierro en los horizontes A fueron mayores que en los B_t.

DISCUSION

Si bien el contenido de MO en los horizontes A no se diferenció estadísticamente, la producción de cultivos bajo labranza convencional disminuyó los porcentajes. Muestras realizadas entre 1976 y 1993 en parte de los sitios donde este ensayo fue ejecutado, demostraron que la dinámica que caracteriza al índice de estabilidad en agua de los agregados durante los 2 a 3 primeros años de iniciado el laboreo en un ciclo agrícola, o la mayor intensidad en la recuperación del mismo luego de un período similar desde la siembra de una pastura (Suero, Garay 1978), se corresponde con la dinámica que caracteriza a la fracción lábil de Mo (Studdert *et al.* 1997). Esta relación concuerda con los conceptos publicados por Oades y Waters (1991), Fuller *et al.* (1995) y Golchin *et al.* (1995). Ellos mencionan que la agregación de las partículas minerales en los suelos se debe a sustancias adherentes producidas por la biota edáfica y que la presencia y el nivel de actividad en la biota es mayor, si no se disturba el sistema suelo-planta. En los suelos no labrados, donde el ambiente no es mecánicamente perturbado, las fracciones más lábiles de MO son el sustrato de diversos hongos, streptomycetes y bacterias. Estos organismos junto con las raíces

y la mesofauna, particularmente lombrices, envuelven a los agregados primarios con sustancias adherentes como polisacáridos, gomas, mucílagos y ácido urónico, lo cual genera y otorga mayor estabilidad a los agregados de gran tamaño (Harris *et al.* 1966; Tisdall, Oades 1982). Por el contrario, cuando los suelos estudiados están bajo labranza convencional durante largos períodos, la fracción lábil disminuye (Studdert *et al.* 1997), posiblemente debido a que el ambiente es menos propicio para el establecimiento y la actividad de una biota edáfica asociada con la producción de agentes cementantes de origen orgánico y a la escasez y menor accesibilidad de los sustratos carbonados (Golchin *et al.* 1995). Si esto es aceptado, en nuestro conjunto de datos la disminución del porcentaje de MO bajo labranza convencional se relacionaría con una menor producción de sustancias adherentes de origen orgánico, asintiendo de este modo que la fracción lábil de Mo es una variable estrechamente relacionada con la estabilidad en agua de los agregados (Studdert *et al.* 1997).

Asociados a la estabilidad de los agregados estarían los resultados de Si y Fe. El contenido de sílice ya ha sido utilizado para explicar la estabilidad de los agregados en suelos no calcáreos (Golchin *et al.* 1995). Según Beckwith y Reeve (1964), la superficie de los minerales, particularmente sesquióxidos, posee sitios específicos para sorber sílice. La pérdida de estabilidad de los agregados de gran tamaño, induce a que la superficie de los minerales esté más expuesta, la desorción de sílice sea más probable y percole junto con el agua infiltrada a mayor profundidad (Blank, Fosberg, 1989a y b). Nótese que, contrariamente a lo sucedido en los horizontes subsuperficiales, los porcentajes de Si en los horizontes A de los suelos no labrados fue mayor que en los labrados. Estas observaciones permiten argüir que en los horizontes superficiales de los suelos labrados, la exposición de las asociaciones órgano-minerales debido a la ruptura de los agregados primarios (Jastrow, Miller 1998), facilitó la desorción de sílice que posteriormente fue transportada por el agua a mayor profundidad.

Los porcentajes de Fe respaldan lo sugerido a partir de los resultados de Si y MO. Es ampliamente aceptado que las fracciones

de agregados más pequeñas son abundantes en los suelos labrados, suelos en los cuales se extrajeron las mayores concentraciones de óxidos de hierro libre. Harris *et al.* (1966) concluyó que las fracciones más estables contienen las concentraciones de óxidos de Fe más elevadas y que el efecto estabilizador de este último es mayor en agregados pequeños. Sobre la base de estos conceptos consideramos que en el marco del presente trabajo, los porcentajes de hierro que representan la cantidad de óxidos de hierro libre en cada suelo bajo los sistemas de manejo comparados, pueden utilizarse como indicadores del nivel de organización alcanzado por la estructura de los agregados. Según Schwertmann (1985), distintos diagramas de estabilidad indican que bajo condiciones de laboratorio, la goetita es el óxido de hierro más estable. Sin embargo, especifica que en un sistema altamente contaminado, como lo es el suelo, no se alcanza el equilibrio termodinámico. En estos ambientes, debido a la obstaculización cinética de las reacciones químicas, distintas fases metaestables como la lepidocrocita y ferrihidrita pueden coexistir por largos períodos de tiempo. El autor reconoce un ambiente edáfico donde este suceso se manifiesta, ambiente pedológico característico de suelos que se desarrollan bajo climas húmedos fríos o templados. En estos ecosistemas, los ácidos carboxílico e hidroxílico inhiben o retardan la cristalización de los óxidos de hierro metaestables, específicamente ferrihidrita a lepidocrocita o goetita. La especie ferrihidrita genera una mayor concentración de sílice en los suelos, ya que lo retiene en enlaces oxígeno-hierro. Considerando que en los suelos estudiados la fracción lábil de MO disminuye bajo labranza convencional (Studdert *et al.* 1997), puede conjeturarse que la cantidad de ácido carboxílico e hidroxílico también lo hace. Las observaciones precedentes permiten justificar los resultados de Mo, Si y Fe y asociarlos con el mecanismo de la estabilización del carbono orgánico en el suelo (Jastrow, Miller 1998). Estos autores especifican que la ruptura de los agregados de gran tamaño como consecuencia de las labores, expone a la descomposición distintas fracciones de MO asociadas a los niveles de organización que constituyen la estructura de

los agregados. Como en cada nivel de la organización la sílice y los óxidos de hierro metaestables participan en la estabilización de distintos complejos órgano-minerales o asociaciones físico-químicas (Schwertmann 1985), los porcentajes de MO, Si y Fe en los suelos estudiados, permiten inferir que el nivel de desarrollo alcanzado por la estructura de los agregados en las pasturas no disturbadas mecánicamente, es distinto al de sitios labrados y cultivados. Estos últimos poseerían mayor cantidad de microagregados debido a la ruptura y pérdida de estabilidad de los macroagregados, condición que en las muestras de suelos utilizadas para la realización de este trabajo ha sido confirmada (Cabria y Calandroni, datos no publicados).

Para justificar los resultados del DGPa en los horizontes superficiales labrados y su relación con la de los horizontes superficiales no labrados, fue necesario reparar en las fracciones de agregados que participarían en la estructura de los horizontes de suelo, su posición en el paisaje y la continuidad temporal de la cobertura vegetal. Al perturbarse el estado estable de los suelos, efecto labranza-cultivo, aquellos ubicados en los sitios más elevados, Serie El Cruce, tendrían los mayores DGPa en sus horizontes superficiales, pues la fracción habría migrado bajo la forma de agregados pequeños junto con el agua que escurre superficialmente. Bajo labranza este proceso sería favorecido por el menor flujo de agua saturado (Cabria, Culot 2000), el menor tamaño de los agregados debido a la pérdida de estabilidad de los agregados de gran tamaño (Studdert *et al.* 1997) y a la ausencia de cobertura vegetal durante los barbechos y el establecimiento de los cultivos. Esta conjunción de factores también justificaría la menor pérdida de arcillas que caracterizó a las posiciones medias y bajas del paisaje, series Azul y Mar del Plata respectivamente, pues parte del material erosionado en los sectores altos se depositaría en la superficie de estos suelos. Relacionados con este proceso estaría la interacción horizonte-suelo-uso de las concentraciones de Fe. Como los agregados de pequeño tamaño poseen asociaciones órgano-minerales donde el Fe participa como agente estabilizador, la remoción y el transporte de esta clase de agregados desde los sitios

altos a las posiciones más bajas, justificaría el menor porcentaje de Fe en los horizontes superficiales labrados de la serie El Cruce con respecto al de Azul y Mar del Plata. Los DGPs de los horizontes Bt se asociaron negativamente con la profundidad efectiva de los suelos y positivamente con los porcentajes de Mo. Estas relaciones fueron explicadas por Cabria y Culot (1994). Además del efecto floculante que sobre los complejos órgano-minerales ejerce el Ca^{++} acumulado en los horizontes petrocálcicos, este horizonte es un impedimento físico que restringe la migración.

Para justificar los resultados de ρ_{ap} apelamos al principio de exclusión de la porosidad (Dexter 1988) y al efecto de la agricultura continua bajo labranza convencional sobre la ρ_r del material de los horizontes. El primero enuncia que si existe jerarquía en la estructura de los agregados, los más pequeños tienen poros de escaso tamaño, hay mayor contacto entre partículas y mayores densidades aparentes. Así, en los horizontes superficiales de los suelos labrados donde las labores rompen agregados de gran tamaño, se incrementaría la cantidad de agregados pequeños y consecuentemente la densidad aparente. Además, la pérdida de materia orgánica en los sitios labrados y cultivados determinó que la ρ_r aumente. Este suceso es otro elemento que contribuye a justificar el incremento de la ρ_{ap} en sitios labrados, pues deja en evidencia que el volumen específico del material que constituye a los agregados disminuyó. En este trabajo, el principio de exclusión de la porosidad no permitiría justificar los resultados de ρ_{ap} en los horizontes Bt, pues los agregados no fueron disturbados por las labranzas y consecuentemente no es factible argüir cambios en los tamaños o el arreglo de los agregados. Sin embargo, al igual que en los horizontes superficiales la ρ_r fue mayor en los sitios labrados y cultivados, y el efecto que esto produce sobre el volumen específico del material de los horizontes, puede utilizarse para justificar el escaso incremento de ρ_{ap} en los horizontes Bt de los suelos labrados.

La interacción horizonte-suelo en los resultados de Pt, evidenció que el efecto de la labranza convencional no fue constante en los horizontes A de los tres suelos estudiados. A diferencia de lo sucedido en las series Azul y

El Cruce, la porosidad total en la serie Mar del Plata labrada no disminuyó. Dada la posición de los suelos en el paisaje y los tamaños de agregados que participarían en la estructura de los horizontes, es admisible suponer que parte del espacio poroso de la serie Mar del Plata labrada provendría del apilamiento de fracciones finas. Como fue mencionado, esta serie ocupa las posiciones más bajas del paisaje, pudiéndose esperar una mayor acumulación de partículas sueltas o agregados pequeños como consecuencia del material desplazado de los sectores más elevados. Este evento sería favorecido bajo labranza convencional por una conjunción de factores que incrementa el agua que escurre superficialmente. Particularmente en los suelos estudiados disminuye la estabilidad de los macroagregados (Suero, Garay 1978), la k_s (Cabria, Culot 2000) y la protección de la cobertura vegetal durante los barbechos y el establecimiento de los cultivos. Según Cabria y Culot (1999 y 2000), las observaciones precedentes también contribuyen a fundamentar las relaciones entre Pt, S y k_s en los horizontes superficiales de los suelos estudiados. Ellos observaron que la disminución en el tamaño de los poros que resultaría del apilamiento de agregados pequeños y la menor cantidad y diámetro de los bioporos como consecuencia de las frecuentes labranzas y el crecimiento estacional de los cultivos, permitían justificar la menor k_s de los tres suelos en los sitios labrados y cultivados. Por otro parte, el incremento en el volumen de poros pequeños como resultado del apilamiento de agregados de escaso tamaño, junto con el contenido inicial de agua volumétrica de los suelos, contribuye a justificar el incremento de S en los suelos labrados y cultivados. La agricultura continua bajo labranza convencional afectó el DGPs, pero este resultado no permite justificar el incremento del parámetro S en los horizontes A labrados (Cabria, Culot 2000). Contrariamente a lo requerido, aumentó el DGPs en los horizontes A bajo agricultura continua con labranza convencional.

CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo evidenciaron que la agricultura continua bajo labranza

convencional modificó a largo plazo las características físicas y químicas analizadas. El efecto de este factor en los horizontes de los suelos evaluados no fue necesariamente significativo o constante ($P < 0,05$). El mecanismo de estabilización del carbono orgánico en el suelo, el cual repara en la protección física que proporciona la jerarquía del nivel de desarrollo alcanzado por los agregados, la naturaleza de las reacciones que participan en los diferentes tipos de asociaciones órgano-minerales que actúan como estabilizadores y en la localización espacial de estos últimos dentro de la estructura de los agregados, permitió vincular los contenidos de MO, Si y Fe en los suelos y usos comparados. Considerando el modelo conceptual de la jerarquía de agregados, los contenidos de MO, Si y Fe permitieron inferir que el nivel de organización de la estructura de los agregados en las pasturas no disturbadas mecánicamente es distinto al de sitios labrados y cultivados, cualidad que a su vez contribuyó a explicar y relacionar los efectos de la agricultura continua bajo labranza convencional sobre la ρ_{ap} y Pt. Finalmente queremos destacar que este marco conceptual en los horizontes superficiales de los suelos y usos comparados, contribuye a justificar el vínculo existente entre el estado de las características físicas y químicas analizadas y el comportamiento del flujo de agua.

REFERENCIAS

- Ali A, Swartzendruber D. 1994. An Infiltration Equation to Assess Cropping Effects on Soil Water Infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1218-1223.
- Angers D, Chenu C. 1998. Dynamics of Soil Aggregation and C Sequestration. *En: Soil processes and the carbon cycle*. Ed. by Lai R, Kimble J, Follett R, Stewart B. II. Series: Advances in soil science. Boca Raton, Fda. 33431. 199-206.
- Beckwith R, Reeve R. 1964. Studies on soluble silica in soils. II The release of monosilicic acid from soil. *Aust. J. Soil Res.* 2: 233-245.
- Blank R, Fosberg M. 1989a. Cultivated and adjacent virgin soils in north central South Dakota: I. Chemical and physical comparisons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1484-1490.
- Blank R, Fosberg M. 1989b. Cultivated and adjacent virgin soils in north central South Dakota: II. Mineralogical and micromorphologic comparisons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1490-1499.
- Blake G, Hartge K. 1986a. Clod Method. *En: Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition*. Ed. A. Klute. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 363-375.
- Blake G, Hartge K. 1986b. Picnometer Method. *En: Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition*. Ed. A. Klute. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 377-382.
- Bower, Wilcox. 1965. Soluble Salts. *En: Method of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Black, Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 933-951.
- Cabria F, Culot J. 1994. Selección y utilización de características edáficas para discriminar series de Argiudoles en el Sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 12: 41-55.
- Cabria F, Culot J. 1999. Sorptividad y conductividad hidráulica saturada en Udoles del sudeste Bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo*. 17: 8-19.
- Cabria F, Culot J. 2000. Efectos de la labranza convencional sobre la sorptividad y conductividad hidráulica saturada en Udoles del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*. 18: 1-8.
- Dexter A. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11: 199-238.
- Edwards A, Bremner J. 1967. Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.* 18: 64-73.
- Fuller L, Goh T, Oscarson, D. 1995. Cultivation effects on dispersible clay of soil aggregates. *Can. J. Soil Sci.* 75: 101-107.
- Gee G, Bauder J. 1986. Particle-Size Analysis. *En: Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph N° 9, 2nd Edition*. Ed. A. Klute. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 383-411.
- Golchin A, Clarke P, Oades J, Skjemstad J. 1995. The effects of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils. *Aust. J. Soil Res.* 33: 975-993.
- Harris R, Chesters G, Allen O. 1966. Dynamics of soil aggregation. *In: Norman, A.G. eds. Advances in Agronomy*. Vol. 18. Academic Press Inc. 111 fifth avenue, NY. NY 10003. USA. 107-169.
- Jastrow J, Miller R. 1998. Soil Aggregate Stabilization and Carbon Sequestration: Feedbacks through Organomineral Associations. *In: Soil*

- processes and the carbon cycle. Ed. by Lai R, Kimble J, Follett R, Stewart B. II. Series: Advances in soil science. Boca Raton, Fda. 33431. 207-223.
- Kilmer. 1965. Silicon. En: Method of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Ed. Black, C.A. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 959-962.
- Lu T, Nielsen D, Biggar J. 1995. Water movement in glass bead porous media. 3: Theoretical analyses of capillary rise into initially dry media. Water Resources Research. 31: 11-18.
- Miller R, Jastrow J. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. Soil. Biol. Biochem. 22: 579-584.
- Oades J. 1984. Soil organic matter and structural stability, mechanisms and implications for management. Plant Soil 76: 319-337.
- Oades J, Waters A. 1991. Aggregate hierarchy in soils. Aus. J. Soil Res. 29: 915-828.
- Olson. 1965. Iron. En: Method of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Ed. Black, C.A. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 963-973.
- Pauwels J, Van Ranst E, Verloo M, Mvondo Ze A. 1992. Manuel de Laboratoire de Pédologie. Publications Agricoles - 28AGCD. Belgique.
- SAGyP-INTA. 1989. Dominio Edáfico 2. En: Mapa de la Provincia de Buenos Aires. Proyecto PNUD ARG 85/019, CIRN – Instituto de Evaluación de Tierras. Ed. Aleska A. 58-84.
- SAS Institute. 1988. SAS/STAT user's guide. Version 6.06 ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Schwertmann U. 1985. The effect of pedogenetic environments on iron oxide mineral. En: Stewart, B.A. eds. Advances in Soil Science. Volume 1. Springer - Verlag. NY. pp 171-200.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2nd Ed. U.S. Dept. of Agric. Natural Resources Conservation Service. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Studdert G, Echeverría E, Casanova M. 1997. Crop-Pasture Rotation for Sustaining the Quality and Productivity of a Typic Argiudoll. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 1466-1472.
- Suero E, Garay A. 1978. Estado estructural del horizonte superficial de suelos Argiudoles del SE. bonaerense. II. Modificaciones producidas por el manejo a que han sido sometidos los suelos. Actas 8^{ta} Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Bs. As. Argentina.
- Tisdall J, Oades J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci. 33: 141-163.