

TAMAÑO Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS Y SU RELACIÓN CON LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA EN SUELOS BAJO LABRANZA CONVENCIONAL Y PRADERAS

F CABRIA, M CALANDRONI, G MONTERUBBIANESI

Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 7620 Balcarce, Buenos Aires, fcabria@balcarce.inta.gov.ar

Recibido 23 de abril de 2002, aceptado 4 de octubre de 2002

SIZE AND STABILITY OF SOIL AGGREGATES AND THEIR RELATIONSHIPS WITH SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN SOILS UNDER CONVENTIONAL TILLAGE AND PRAIRIES

When organic matter is the major stabilizing agent and aggregate structure is hierarchical, different types of aggregates are being formed and turned over at different rates related to the turnover rates of their organomineral binding agents. Consequently, soil aggregation and organic matter storage are intimately associated with each other. Changes in either of these processes often result in feedbacks on the other. These feedbacks are mediated through organomineral associations, which function as aggregate binding and stabilizing agents. The nature of these organomineral associations and their special locations within the aggregate hierarchy determine the degree to which soil organic carbon is physically protected from decomposition and, consequently, result in organic pools with various input and turnover rates. In degrading systems, the disruption of aggregate exposes previously protected but relatively labile organic matter to decomposers, resulting in a loss of soil organic matter and further destabilization of aggregates. We used this conceptual frame to examine the relationship between aggregation state of three soil series and saturated flow of water (k_s). Aggregate stability and size distribution, geometric particle-size diameter (DGPag) and structural stability index (IE) were quantified. The result showed that conventional tillage modified IE, DGPag and aggregate stability and size distribution. This management system did not affect stability of aggregates < 0.059 mm in diameter. Stability of aggregates > 0.059 mm in diameter decreased 58%, 39% and 28% and declined DGPag 51%, 52% and 57% in El Cruce, Azul and Mar del Plata soil respectively. Contrary to what happened with IE, the lower the position of soils on the landscape, the higher the effect of conventional tillage on DGPag. When were considered variables that take part in the formation and stability of aggregate hierarchy, aggregates stability and size distribution could be justified. The effects that management system exerted on the size and stability of aggregates allowed for the understanding of the relationship between k_s and DGPag.

Key words: Aggregate Hierarchy, Size, Stability, Conventional Tillage, Flow Saturated.

INTRODUCCION

Se entiende por agregado de suelo a un grupo o conjunto de partículas donde las fuerzas de unión entre sí superan a las existentes entre éste y otros grupos adyacentes y por estructura, al arreglo u ordenamiento espacial de los agregados y poros en el suelo (Oades 1984). En suelos donde las partículas están agregadas, el diseño y la perdurabilidad del espacio poroso dependen en gran medida de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados (Lynch, Bragg 1985; Quirk, Murray 1991), consecuentemente, en estos suelos el movimiento y la disponibilidad del agua y el aire pueden estar influenciados por

el estado de agregación. Cuando la dinámica de la descomposición de la materia orgánica es el elemento principal que fundamenta el nivel y la perdurabilidad de la estructura de los agregados, la formación y estabilidad de los agregados se sustentan en el modelo conceptual de agregación desarrollado por Tisdall y Oades (1982). Bajo este marco conceptual, la naturaleza de la estabilidad de los agregados depende de la relativa cantidad y fuerza de varios tipos de asociaciones órgano-minerales y agentes de enlace (Jastrow, Miller 1998). La macroagregación es controlada por el manejo (Oades 1984), pues 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 previamente protegida, resultando variadas combinaciones de elementos orgánicos con diferentes tasas de ingreso y reciclado que afectan las fuentes productoras de agentes enlazantes y sustancias adhesivas orgánicas (raíces, hifas de hongos y organismos rizosféricos). Contrariamente a lo que sucede con los macroagregados, los microagregados (<250 μm) no son alterados por el humedecimiento 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 (MOP), residuos microbianos y otros coloides orgánicos y compuestos de origen microbiano (Jastrow, Miller 1998). La adsorción en una variedad de asociaciones órgano-minerales ocurre mediante puentes de cationes polivalentes, uniones puente hidrógeno, fuerzas de van der Waals e interacciones con óxidos hidratados y alúmino-silicatos (Beckwith, Reeve 1964; Edwards, Bremner 1967; Oades 1984; Schwertmann 1985). Sobre la base de estas y otras observaciones se ha inferido que la jerarquía de los agregados se vincula con el desarrollo alcanzado por su estructura, y la disminución de agentes de enlace de origen orgánico contribuye con la pérdida de estabilidad de los macroagregados, facilita la ruptura de éstos por humedecimiento e incrementa más el contenido de microagregados que el de partículas primarias (Tisdall, Oades 1982). Estos conceptos fueron utilizados por Oades y Waters (1991) para justificar la pérdida de estabilidad en macroagregados de suelos labrados, lo cual sucede inicialmente a tasas elevadas para luego disminuir progresivamente. En Udoles del sudeste bonaerense el índice de estabilidad estructural de los horizontes superficiales disminuyó rápidamente durante los 2 o 3 primeros años luego de iniciadas las labores de un ciclo agrícola. La recuperación del mismo tuvo un comportamiento similar a partir de la siembra de pasturas (Sueró, Garay 1978). En estos suelos la dinámica de la estabilidad estructural fue similar a la que presentó la fracción lábil de la materia orgánica (MO), confirmando que la estabilidad estructural se rela-

ciona más estrechamente con el contenido y la dinámica de las fracciones lábiles de MO que con la cantidad total de carbono orgánico (Studdert *et al.* 1997). Además, el mecanismo de estabilización del carbono orgánico en el suelo permitió vincular los contenidos de MO, sílice y óxidos de hierro en los suelos y usos mencionados y contribuyó a explicar y relacionar el efecto de la agricultura continua con labranza convencional sobre la densidad aparente, densidad real, porosidad total, conductividad hidráulica saturada (k_s) y sorptividad. Pudo inferirse que el nivel de organización alcanzado por los agregados en horizontes superficiales de sitios no labrados ni cultivados es distinto que bajo agricultura continua con labranza convencional (Cabria, Culot 2000, 2001), y se comprobó que en los horizontes superficiales de Udoles del SE bonaerense, la velocidad de infiltración final y k_s no se diferencian estadísticamente (Cabria, Culot 1999). Sobre la base de estos resultados y como la conductividad final fue el parámetro hidráulico en las capas superficiales de suelos labrados que más estrechamente se relacionó con el equilibrio o la distribución final del tamaño de partículas, incluyendo los agregados (Cleary *et al.* 1987, Loch *et al.* 1988) nos planteamos probar que: la dinámica de la formación y estabilidad de los agregados tanto en los sitios no labrados ni cultivados como bajo agricultura continua con labranza convencional, permiten justificar las relaciones que se establecen entre la magnitud del flujo de agua saturado y la distribución del tamaño de agregados en los horizontes superficiales de una catena. Los objetivos fueron: (i) determinar el efecto de las fuentes de variación suelo y manejo sobre distintas clases de tamaño de agregados, su estabilidad, el diámetro geométrico promedio de los agregados (DGPag) y el índice de estabilidad (IE). (ii) establecer si la cantidad de agregados en cada clase de tamaño y el DGPag difieren en los suelos y manejos comparados, (iii) validar que las proporciones de macroagregados de gran tamaño disminuyen bajo agricultura continua con labranza convencional y que son compensadas principalmente por un incremento en la proporción de microagregados, y (iv) que bajo agricultura continua con labranza convencional el IE disminuye por la pérdida de la estabilidad en los

macroagregados.

MATERIALES Y METODOS

Los datos procesados se obtuvieron a partir de muestras que representan horizontes A de tres series de suelos ubicadas en parcelas experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Balcarce. Las series participantes constituyen una catena de suelos distribuida en el centro y norte de los partidos de Gral. Pueyrredón y Balcarce, NE de Lobería, oeste, centro y este de Tandil, norte de Benito Juárez, sur de Azul y centro y este de Olavarría (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 (Figura 1). Los suelos profundos, serie Mar del Plata, se en-

cuentran en sectores cóncavos o plano cóncavos con ligeras pendientes 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 con labranza convencional y praderas cultivadas. La expresión agricultura continua con labranza convencional se utili-

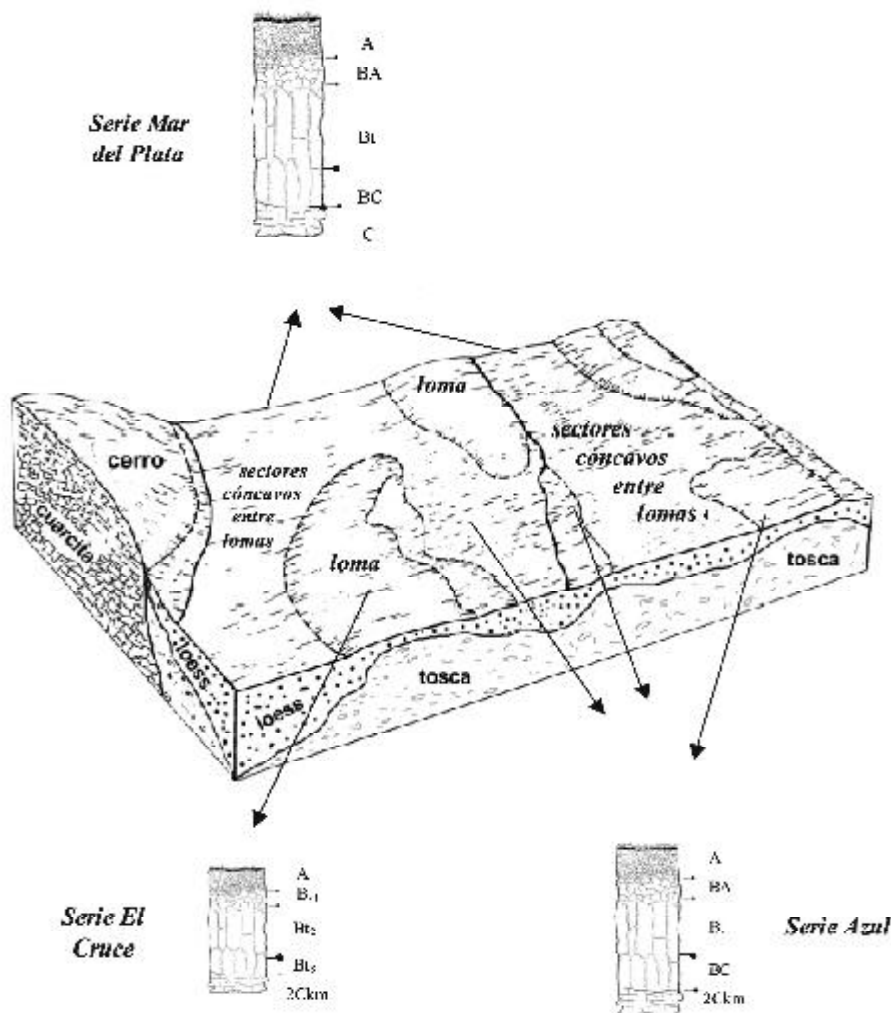


Figura 1. Esquema y ubicación de las series de suelos en el paisaje.
Figure 1. Scheme and location of soil series in the landscape

zó 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 de tres meses. El término praderas cultivadas se utilizó para identificar sitios en los cuales, al menos durante 17 años consecutivos, cultivos de pasturas no fueron disturbados mecánicamente ni pastoreados. La masa vegetal fue periódicamente cortada a 5 o 7 cm de altura con motosegadoras. En el estudio participaron 36 perfiles, seis 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 abrieron calicatas y, antes de la toma de muestras, se verificó la serie de suelo utilizando características o atributos que permiten diferenciarlas (Cabria, Culot 1994).

La distribución del tamaño de los agregados se determinó en muestras de suelos de aproximadamente 1,5 kg (peso seco). Una vez recolectadas fueron llevadas al laboratorio y se tamizaron con malla de 8 mm. A continuación este material se secó colocándolo por el término de 72 horas en una cámara con circulación de aire forzado, donde la temperatura osciló entre 22 y 25 °C. Las muestras secas se fraccionaron utilizando un juego de cinco tamices (4,76; 2,38; 1,19; 0,59 y 0,25 mm) y un agitador excéntrico (test sieve shaker, Endecott). El tiempo de agitación fue de 15 minutos por muestra. El material retenido en los tamices se pesó y para cada clase de tamaño se calcularon las proporciones en función del peso seco total de las muestras. Posteriormente se calculó el diámetro geométrico promedio de los agregados (DGPag) según la metodología descrita por Shirazi y Boersma (1984). La fórmula de cálculo utilizada fue:

$$\text{DGPag} = \exp a$$

$$a = 0,01 \sum_{i=1}^n P_i \ln M_i$$

donde:

DGPag = diámetro geométrico promedio de los agregados.

i = iésima clase de tamaño de agregado.

n = número total de clases de tamaños de agregados.

P_i = proporción en peso de la iésima clase de tamaño de agregado.

ln = logaritmo natural.

M_i = media aritmética de la iésima clase de tamaño de agregado.

En este trabajo al DGPag se lo consideró un indicador del nivel de agregación de los suelos.

Dado que el IE debía representar el comportamiento de los agregados en la capa superficial de los suelos frente al humedecimiento que provocan el agua de las precipitaciones y el riego, se decidió determinar la estabilidad de los agregados a partir de las muestras secas. La estabilidad que se cuantifica en estas condiciones es un indicador confiable de la resistencia que poseen los agregados al colapso que resulta del humedecimiento súbito (Haynes, Swift 1990). El método aplicado fue el descrito por Tallarico (1974), empleándose como agente colapsante soluciones de agua y alcohol de concentraciones variables. La relación agua alcohol varió de a 5%. Como el tiempo de sumergimiento de los agregados puede causar variabilidad en los resultados, éste se estableció en 24 hs (Haynes, Swift 1990). El índice de estabilidad estructural se calculó a partir de la estabilidad estructural de los agregados. La humedad inicial y el modo de sumergir las muestras determinaron que el IE sea un indicador de las resistencias que poseen las estructuras de los agregados, en la capa superficial de los suelos, al colapso que producen las fuerzas disruptivas del humedecimiento súbito. La fórmula utilizada para calcular IE:

$$\text{IE} = \sum_{i=1}^{n=6} P_i (\% \text{H}_2\text{O})_i / 100$$

donde:

IE = índice de estabilidad de la muestra de suelo.

i = iésima clase de tamaño de agregado.

n = número total de clases de tamaños de agregados.

P_i = proporción en peso de la iésima clase de tamaño de agregado.

$(\% \text{H}_2\text{O})_i$ = porcentaje en volumen del agua en la solución donde la iésima clase de tamaño de agregado dejó de colapsar.

Análisis de varianza se aplicaron con el fin de determinar el efecto de las fuentes de variación, suelo y manejo, sobre las distintas clases de tamaño de agregados, su estabilidad, el DGPag y el IE. Los cuadrados medios fueron utilizados para determinar la contribución relativa porcentual de las fuentes de variación significativas en las distintas clases de tamaño de agregados y el DGPag. Comparaciones múltiples de medias según Tukey ($\alpha = 0,05$) se utilizaron para: (i) evaluar si la cantidad de agregados en cada clase de tamaño y el DGPag difieren en los suelos y manejos estudiados, (ii) validar que el incremento en la proporción de microagregados bajo agricultura continua con labranza convencional es compensado, principalmente, por una disminución en las proporciones de macroagregados de gran tamaño, y (iii) determinar que el menor IE bajo agricultura continua con labranza convencional es debido principalmente a la pérdida de estabilidad en los macroagregados de gran tamaño.

Para discernir el vínculo entre la distribución del tamaño de los agregados y la conductividad hidráulica saturada se definió, para cada tratamiento, una regresión lineal entre k_s y el logaritmo natural del DGPag, y con el auxilio de variables Dummy se compararon las pendientes y ordenadas al origen de las ecuaciones de regresión ajustadas. Todos los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el procedimiento general para modelos lineales del programa estadístico SAS (SAS Institute 1988). Teniendo en cuenta las consideraciones de Cabria y Culot (1999), la k_s se determinó según la metodología de Klute y Dirksen (1986).

RESULTADOS

Distribución del tamaño de los agregados y diámetros geométricos promedios

La distribución del tamaño de los agregados para cada suelo en los sistemas de manejo comparados se presenta en la Figura 2. Cada distribución representa el promedio de las seis repeticiones de un tratamiento. Independientemente de las fuentes de variación, la cantidad de macroagregados ($>250\mu\text{m}$) disminuyó a medida que el tamaño también lo hizo y las cantidades de microagregados ($<250\mu\text{m}$) fueron mayores que en la clase 0,59-0,25 mm. Bajo agricultura continua con labranza convencional la cantidad de microagregados fue mayor que en las praderas y, aunque en menor magnitud, también aumentaron los

macroagregados $<1,19$ mm. Las proporciones de los agregados $>1,19$ mm disminuyeron.

Excepto en los macroagregados de menor tamaño, 0,59-0,25 mm, el efecto de las fuentes de variación, suelo y manejo, fue significativo sobre las proporciones de macroagregados. La interacción entre factores sólo fue significativa en el intervalo de clase 4,76-2,38 mm. Cuando las fuentes de variación fueron significativas, $p<0,05$, su contribución relativa al explicar la variabilidad de los datos tendió a equipararse a medida que el tamaño de los macroagregados disminuyó (71%, 55% y 49% y, 24%, 34% y 35% para manejo y suelo, respectivamente, en los intervalos 8-4,76, 2,38-1,19 y 1,19-0,59 mm. En los microagregados el manejo fue el único factor significativo y contribuyó a explicar el 97,47% de la variabilidad total de los datos ($p<0,05$).

Independientemente del manejo, la cantidad de microagregados fue similar en las tres series de suelos. Sin embargo, bajo agricultura continua con labranza convencional fue mucho mayor y estadísticamente distinta que en las praderas (Tabla 1). Las medias de las proporciones de los agregados fueron estadísticamente distintas en la clase 8-4,76 mm y en las comprendidas en el rango 2,38-0,59 mm. Las medias de las clases 2,38-1,19 y 8-4,76 mm fueron similares en las series Azul y El Cruce, diferenciándose por defecto y exceso, respectivamente, de las de Mar del Plata. En el intervalo 1,19-0,59 mm El Cruce y Mar del Plata se diferenciaron estadísticamente, pero Azul no lo hizo con respecto a ninguna de estas dos. Al analizar las medias donde la interacción fue significativa, 4,76-2,38 mm, las cantidades de agregados en las tres series de suelos bajo cultivos no se diferenciaron estadísticamente. En las praderas se diferenciaron Mar del Plata y El Cruce, pero Azul no lo hizo con respecto a ninguna de las otras dos ($p<0,05$).

Los resultados sobre los cuales se precisó que tamaños de agregados compensarían el incremento de los microagregados en suelos labrados y cultivados, fueron las medias de las diferencias entre las proporciones en peso para cada tamaño de agregados. Las diferencias se obtuvieron restándole a las proporciones en peso de los sitios labrados y cultivados las de sitios con praderas. Bajo agricultura continua con labranza convencional la

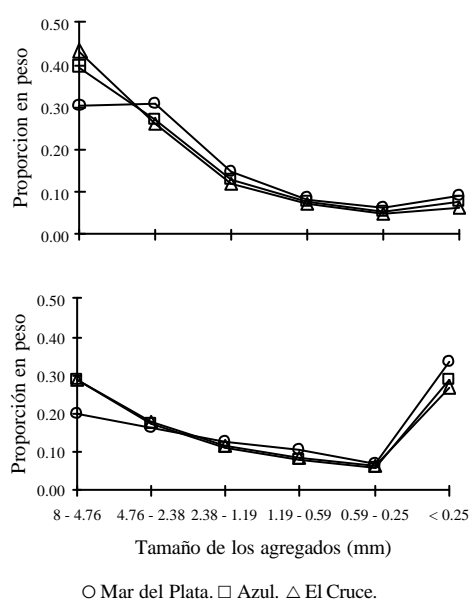


Figura 2. Distribución del tamaño de los agregados.
Figure 2. Aggregate size distribution.

Tabla 1. Comparación múltiple entre las medias de las proporciones en cada clase de tamaño.

Table 1. Multiple comparisons among mean of the proportions in each size class.

Fuentes de variación y niveles de tratamiento		Intervalos de clase para los tamaños de agregados					
		8 - 4,76	4,76 - 2,38	2,38 - 1,19	1,19 - 0,59	0,59 - 0,25	< 0,25
		mm					
Manejo	Cultivados	0,2611 b	--	0,1183 b	0,0911 a	0,0628 a	0,2989
	Praderas	0,3772 a	--	0,1339 a	0,0772 b	0,0550 a	0,0772
Suelo	El Cruce	0,3617 a	--	0,1192 b	0,0775 b	0,0567 a	0,1675
	Azul	0,3425 a	--	0,1208 b	0,0792 ab	0,0550 a	0,1842
	Mar del Plata	0,2533 b	--	0,1383 a	0,0958 a	0,0650 a	0,1675
Interacción	Praderas x Mar del Plata	--	0,3067 b	--	--	--	--
	Praderas x Azul	--	0,2733 ab	--	--	--	--
	Praderas x El Cruce	--	0,2583 a	--	--	--	--
	Cultivados x El Cruce	--	0,1783 a	--	--	--	--
	Cultivados x Azul	--	0,1717 a	--	--	--	--
	Cultivados x Mar del Plata	--	0,1617 a	--	--	--	--

En cada columna y dentro de cada fuente de variación, no difieren significativamente medias con la misma letra ($p > 0,05$). El Cruce: suelo somero. Azul: suelo moderadamente profundo. Mar del Plata: suelo profundo. In each column and inside each source of variation, means with the same letter do not differ significantly ($p > 0,05$). El Cruce: shallow. Azul: moderate deep. Mar del Plata: deep.

proporción de agregados disminuyó en los tres intervalos de clase de mayor tamaño. Las pérdidas cuantitativamente más importantes fueron estadísticamente similares en los dos mayores tamaños de macroagregados, 0,11 aproximadamente. Dentro de las tres clases de macroagregados comprendidas en el rango 2,38-0,25 mm, la proporción de la clase de mayor tamaño disminuyó y las otras dos aumentaron. A pesar del sentido opuesto en las respuestas, las magnitudes de los cambios cuantificados en estos tres intervalos fueron muy pequeñas y no se diferenciaron estadísticamente, 0,01 aproximadamente. Bajo agricultura continua con labranza convencional la proporción de microagregados fue mucho mayor y estadísticamente distinta que en las praderas y el incremento, 0,22, se diferenció estadísticamente del cuantificado en los dos intervalos de macroagregados ($p < 0,05$).

Los DGPag de las series El Cruce y Mar del Plata fueron estadísticamente distintos independientemente del uso, en cambio el de Azul no se diferenció de los otros dos. El DGPag bajo agricultura continua con labranza convencional disminuyó 51%, 52% y 57% en las series El Cruce, Azul y Mar del Plata, respectivamente.

Si bien fueron estadísticamente significativos los factores suelo y manejo, la contribución relativa de estas fuentes de variación al explicar la variabilidad del DGPag fue cuantitativamente muy distinta, 4% y 95%, respectivamente ($p < 0,05$).

Estabilidad de los agregados e índice de estabilidad estructural

En los microagregados y macroagregados de menor tamaño las fuentes de variación no fueron significativas, sí la interacción en las restantes clases de tamaño ($p < 0,05$). En los microagregados y macroagregados de menor tamaño las medias de la estabilidad de los agregados fueron similares, en las restantes clases de tamaños disminuyeron bajo agricultura continua con labranza convencional (Tabla 2). En estas cuatro clases el valor promedio de la estabilidad disminuyó 59% en la serie El Cruce y 40% y 29%, respectivamente, en Azul y Mar del Plata.

Las medias del IE en las praderas fueron estadísticamente similares (0,91, 0,93 y 0,92 El Cruce, Azul y Mar del Plata, respectivamente). Bajo agricultura continua con labranza convencional disminuyeron (El Cruce 0,58, Azul

Tabla 2. Comparación múltiple entre las medias de la estabilidad en cada clase de tamaño.
Table 2. Multiple comparisons among mean of the stability in each size class.

Niveles de tratamiento	Intervalos de clase para los tamaños de agregados						
	8 - 4,76	4,76 - 2,38	2,38 - 1,19	1,19 - 0,59	0,59 - 0,25	< 0,25	
mm							
Praderas	El Cruce	0,9125 a	0,8458 a	0,9542 a	0,9980 a	0,9990 a	0,9990 a
	Azul	0,9292 a	0,9125 a	0,8917 a	0,9891 a	0,9951 a	0,9971 a
	Mar del Plata	0,9083 a	0,8833 a	0,9017 a	0,9953 a	0,9970 a	0,9982 a
Cultivados	El Cruce	0,3583 b	0,3583 c	0,3917 b	0,4292 c	0,9956 a	0,9963 a
	Azul	0,5458 a	0,5458 b	0,5583 a	0,5958 b	0,9961 a	0,9948 a
	Mar del Plata	0,5625 a	0,6917 a	0,6125 a	0,7677 a	0,9970 a	0,9985 a

En cada columna y dentro de cada fuente de variación, medias con la misma letra no difieren significativamente ($p > 0,05$). El Cruce: suelo somero. Azul: suelo moderadamente profundo. Mar del Plata: suelo profundo.
In each column and inside each source of variation, mean with the same letter do not differ significantly ($p > 0,05$). El Cruce: shallow. Azul: moderate deep. Mar del Plata: deep.

0,71 y Mar del Plata 0,79) y entre éstas hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Conductividad hidráulica saturada y su relación con el diámetro geométrico promedio de los agregados

El promedio de k_s en los sitios cultivados fue menor que en las praderas, 33,5 mm.h^{-1} y 45,3 mm.h^{-1} respectivamente, y la magnitud de k_s disminuyó a medida que los suelos se sitúan en las posiciones más altas del paisaje (Tabla 3). Las relaciones entre el flujo de agua saturado y el diámetro geométrico promedio de los agregados se ilustran en la Figura 3. El gráfico muestra la distribución de k_s en función del DGPag, las trayectorias de las regresiones lineales estimadas y sus

coeficientes de determinación. Todas las ecuaciones presentaron pendientes negativas y ordenadas al origen estadísticamente distintas de cero (Tabla 4). En los suelos con praderas tanto las ordenadas al origen como los valores absolutos de las pendientes fueron mayores que en los sitios cultivados. El mismo comportamiento en las ordenadas al origen y las pendientes se observó dentro de cada uso a medida que las series de suelos ocupan las posiciones más bajas del paisaje. Tomando como referencia a la ecuación de regresión k_s -DGPag serie Mar del Plata con praderas, sólo hubo coincidencia entre ésta y la de Azul con praderas.

DISCUSION

Los resultados de la distribución del tamaño de agregados y su estabilidad fueron discutidos considerando los factores que, dados los sistemas de manejo comparados, intervienen en la dinámica de la descomposición de MO y consecuentemente, en la formación y estabilidad de macroagregados (Oades, Waters 1991, Oades 1993). En suelos donde la dinámica de la descomposición de MO participa en la formación y estabilidad de los distintos tamaños de agregados, la estabilidad de los macroagregados es transitoria, el mantenimiento del nivel de agregación depende del modo y

Tabla 3. Promedios de la conductividad hidráulica saturada.
Table 3. Average of saturated hydraulic conductivity.

	Conductividad hidráulica saturada	
	Praderas	Cultivados
	mm.h^{-1}	
El Cruce	17,7	12,5
Azul	46,7	35,9
Mar del Plata	71,7	52,2

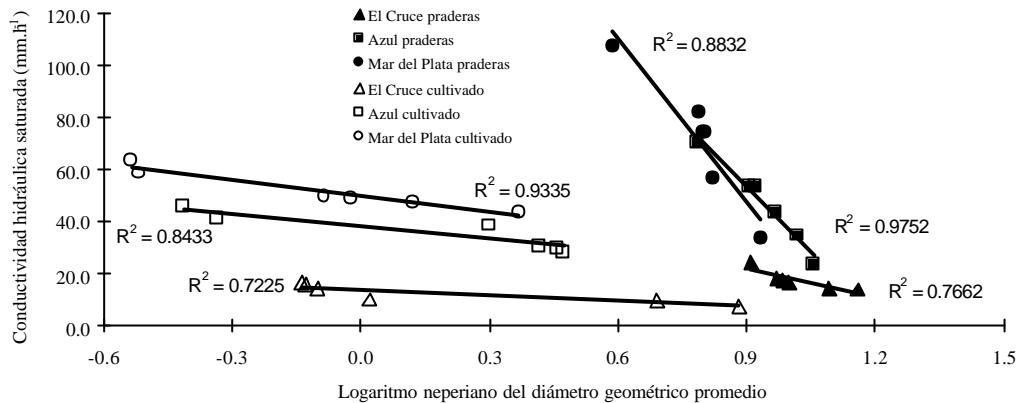


Figura 3. Ecuaciones de regresión entre el diámetro geométrico promedio de los agregados y la conductividad hidráulica saturada.

Figure 3. Regression equations between the geometric mean diameter of aggregate and the saturated hydraulic conductivity.

la frecuencia con que la MOP es incorporada al suelo y la dimensión de los macroagregados sería una función del tamaño, la geometría y el modo de deposición de la MOP (Golchin *et al.* 1998). En los sitios con praderas los residuos vegetales de las partes aéreas de las plantas no fueron incorporados a la matriz del suelo, y la frecuencia y cantidad con que fueron depositados sobre la superficie quedaron determinadas por la tasa de crecimiento de las especies. En este sistema de manejo los residuos vegetales dentro de la matriz del suelo proven-

drían, básicamente, de restos de raíces y la frecuencia de incorporación resultaría de la combinación que establecieron los ciclos de las especies presentes. Bajo estas condiciones, el crecimiento de hifas fúngicas sobre largos pedazos de residuos de raíces promueve la asociación entre las partículas minerales y orgánicas en el suelo (Oades, Waters 1991, Oades 1993). Estas asociaciones tienen el potencial para atravesar poros y entrelazar grupos de microagregados por medio de procesos físicos y la producción de agentes cementantes

Tabla 4. Parámetros estimados de las regresiones lineales entre el logaritmo del diámetro geométrico promedio de los agregados y el flujo saturado de agua.

Table 4. Parameters estimated of lineal regressions between the logarithm of the geometric mean diameter of aggregate and the saturated flow of water.

Niveles de tratamiento		Parámetros de las ecuaciones			
		R ²	Coef. de variación (%)	Pendiente	Intercepto
Praderas	El Cruce	0,7662	11,68	- 36,98 *	55,43 **
	Azul	0,9752	6,25	- 167,23 ***	204,37 ***
	Mar del Plata	0,8832	13,29	- 208,68 **	236,18 **
Cultivados	El Cruce	0,7225	17,01	- 6,681 *	13,85 ***
	Azul	0,8433	8,85	- 15,98 **	38,27 ***
	Mar del Plata	0,9335	4,15	- 20,29 **	49,92 ***

* significativo $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ y *** $p < 0,001$. ns: no significativo. El Cruce: suelo somero. Azul: suelo moderadamente profundo. Mar del Plata: suelo profundo.

* significant $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ and *** $p < 0,001$. ns: not significant. El Cruce: shallow. Azul: moderate deep. Mar del Plata: deep.

de origen biológico. Sosteniéndose estas condiciones, con el tiempo se generan macroagregados de gran tamaño por acoplamiento de los pequeños. Esta apreciación de la formación de los agregados estables permite justificar porqué en los suelos con praderas, la proporción de macroagregados de gran tamaño fue mucho mayor a la de macroagregados pequeños y microagregados. Sin embargo, la cantidad de agregados $>4,76$ mm fue menor a medida que los suelos se sitúan en las partes más bajas del relieve. La diferente proporción de estos agregados en cada suelo podría atribuirse al contenido de componentes inorgánicos que intervienen en la formación y estabilidad de los agregados (Jastrow, Miller 1998). Particularmente en los sitios estudiados, la cantidad de ión calcio disminuye a medida que los suelos ocupan las posiciones más bajas del paisaje (Cabria, Culot 1994).

Bajo agricultura continua con labranza convencional la cantidad de microagregados y macroagregados de menor tamaño se incrementó a expensas de macroagregados de gran tamaño. También estos resultados pueden justificarse considerando el efecto del tamaño, la geometría y el modo de deposición de la MOP sobre la formación y estabilización de agregados jerárquicos. Tisdall y Oades (1982) observaron que en la matriz de los suelos labrados es menor la distribución de los restos vegetales y su asociación con partículas del suelo. No obstante, la gran cantidad de MOP fresca determina una fase inicial donde aumentan los agentes metabólicos cementantes asociados a su descomposición. Esto tiene un efecto benéfico sobre la macroagregación, pero con el tiempo, la continua descomposición disminuye el tamaño de la MOP y la menor frecuencia de reposición reciente la producción de agentes cementantes de origen biológico. En estas condiciones, al aplicar fuerzas disruptivas como las ejercidas por el tamizado o el humedecimiento, los centros de macroagregación se fracturan, colapsa la estructura de los macroagregados de gran tamaño y se originan agregados de menores dimensiones y diferente estabilidad.

Bajo agricultura continua con labranza convencional el IE fue mayor a medida que los suelos se sitúan en las posiciones medias y bajas del paisaje (serie Azul y Mar del Plata

respectivamente). Como su magnitud depende de la cantidad y estabilidad de los agregados en cada intervalo de clase, debemos justificar porqué en cada serie de suelo, aunque con diferente magnitud, a medida que el tamaño de los macroagregados disminuye éstos fueron más estables. Numerosos estudios en el laboratorio y a campo han observado que la MO de los macroagregados es más joven, más lábil y está físicamente menos protegida a medida que sus tamaños aumentan (Angers, Carter 1996; Skjemstad *et al.* 1990; Puget *et al.* 1995; Tisdall, Oades 1982). Estas características la hacen más apetecible y fácilmente disponible para los organismos del suelo (Golchin *et al.* 1998; Jastrow, Miller 1998). Si bien esto justifica porque en cada suelo la estabilidad de los macroagregados fue mayor a medida que el tamaño disminuye, no permite explicar la similar estabilidad de los microagregados y macroagregados de menor tamaño. Este resultado puede atribuirse a que la proporción del carbono recientemente incorporado en los macroagregados >1 mm es mayor que en los microagregados (Jastrow *et al.* 1996), pero es similar, en los macroagregados de menor tamaño (<1 mm) y los microagregados (Puget *et al.* 1995; Angers, Carter 1996). Para justificar la magnitud de la estabilidad en los distintos tamaños de agregados $>0,59$ mm que caracterizó a cada una de las series de suelo, se reparó en el efecto que tendrían las proporciones de los distintos tamaños de agregados sobre la reorganización y estabilidad de nuevos macroagregados. Al igual que lo observado por Tisdall y Oades (1982), la estabilidad de los agregados disminuyó bajo labranza convencional y los macroagregados de gran tamaño colapsaron generando agregados de menores dimensiones y diferente estabilidad. Sin embargo, a pesar que la estabilidad de los macroagregados en la serie Mar del Plata fue la más elevada, ésta presentó la mayor cantidad de agregados pequeños ($<1,19$ mm). En una catena de suelos como la definida por las series El Cruce, Azul y Mar del Plata, agregados pequeños de sitios elevados serían transportados por el escurrimiento del agua a posiciones medias y bajas del paisaje. Este enriquecimiento en agregados pequeños y con mayor estabilidad por haber estado protegidos físicamente (Golchin *et al.* 1998), sería una fuente

de MO relativamente lábil que contribuye para que las partículas o agregados pequeños se reorganicen y formen macroagregados de mayor estabilidad (Tisdall, Oades 1982; Golchin *et al.* 1998 y Jastrow, Miller 1998). Esta combinación de factores permite justificar porqué el efecto de la agricultura continua con labranza convencional fue menor sobre la estabilidad de los macroagregados y el IE a medida que las series de suelo se sitúan en las posiciones más bajas del paisaje.

Como el movimiento del agua en el suelo depende en gran medida del diseño y la perdurabilidad del espacio poroso y sobre éstos influyen la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados (Martin *et al.* 1955; Lynch, Bragg 1985; Quirk, Murray 1991), las relaciones ks-DGPag fueron interpretadas considerando las consecuencias que tendría, sobre la magnitud de ks, el espacio poroso que resulta del arreglo espacial que adquieren las distintas formas y tamaños de agregados. Bajo agricultura continua con labranza convencional disminuyeron las proporciones de macroagregados grandes y aumentaron los pequeños y microagregados. Esta relación entre las proporciones de agregados determinaría que el tamaño de poros, producto del arreglo espacial entre agregados, sea menor que en los sitios con praderas (principio de exclusión de Dexter, 1988) y, además, la menor estabilidad de los agregados en sitios labrados y cultivados favorecería el colapso de agregados y aumentaría la obstrucción de los poros (Haynes, Swift 1990). Estos dos elementos justificarían la menor magnitud de ks en los sitios labrados y cultivados y, al mismo tiempo, que la relación ks - DGPag entre manejos alcance a ser directa. El sentido negativo de las pendientes dentro de cada sistema de manejo se justificaría pues, aunque con diferente magnitud y en distintos intervalos de clase, en ambos sistemas de manejo los agregados grandes fueron menos estables que los pequeños. Por lo tanto, independientemente del tipo de suelo, a medida que las cantidades de agregados grandes aumentan sería más significativa la obstrucción del espacio poroso conductivo debido al colapso y la dispersión causada por el humedecimiento súbito.

En los sitios con praderas fueron similares el DGPag e IE de las series Azul y

Mar del Plata. El modelo de empaquetamiento que define a la forma de sus agregados es romboédrico, ambas series poseen estructura granular. Además, los diámetros geométricos de la fracción arcilla no fueron estadísticamente distintos (Cabria, Culot 2001). Por lo tanto, la forma, el tamaño y la perdurabilidad del espacio poroso producto del arreglo espacial entre partículas y agregados serían similares, y puede comprenderse porqué fueron coincidentes las ecuaciones de regresión ks-DGPag de las series Azul y Mar del Plata. Bajo este sistema de manejo el IE de la serie El Cruce fue similar al de Azul y Mar del Plata, del mismo modo que los diámetros geométricos de sus fracciones arcilla (Cabria, Culot 2001). Sin embargo, la forma de los agregados de la serie El Cruce responde al modelo de empaquetamiento cúbico, bloques subangulares. La falta de coincidencia entre la ecuación de regresión ks-DGPag de la serie El Cruce con respecto a la de Azul y Mar del Plata, podría atribuirse al efecto que tendría, sobre el movimiento del agua, la forma y/o el tamaño del espacio poroso que resultaría del arreglo espacial de diferentes formas de agregados.

Bajo agricultura continua con labranza convencional la estructura de las tres series de suelos fue granular, el modelo de empaquetamiento que define a la forma de sus agregados es el mismo. En este sistema de manejo el nivel de agregación (DGPag) y su perdurabilidad (IE) se relacionaron con la posición de los suelos en el paisaje. Contrariamente a lo sucedido con el IE, el DGPag, al igual que el de las arcillas (Cabria, Culot 2001), fue mayor a medida que los suelos se sitúan en las posiciones más altas. Esto significa que el tamaño de las partículas y agregados aumenta a medida que los suelos ocupan las posiciones más elevadas, pero los agregados son más susceptibles al colapso y la dispersión ejercida por el humedecimiento súbito. Consecuentemente, puede suceder que el tamaño de los poros producto del arreglo espacial de las partículas y agregados, luego del efecto ejercido por el humedecimiento súbito, sea menor a medida que los suelos ocupan los sectores más elevados. Esto permite justificar las magnitudes de ks en las distintas posiciones del paisaje y, además, la falta de coincidencia que presentaron, bajo labranza convencional, las ecuaciones de regresión ks-

DGPag.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permitieron verificar que la agricultura continua con labranza convencional: (i) modifica la distribución del tamaño de agregados que caracteriza a los sitios con praderas, las proporciones de microagregados aumentan y disminuyen las de macroagregados de gran tamaño. Bajo este sistema de manejo: (ii) disminuye el nivel de agregación y la resistencia al colapso por humedecimiento, (iii) la estabilidad de los macroagregados de menor tamaño y microagregados no es afectada, (iv) el incremento en la proporción de microagregados es compensado principalmente por una merma en las proporciones de las dos clases de macroagregados de mayor tamaño, y (v) a medida que los suelos se sitúan en las posiciones más bajas del relieve el nivel de agregación disminuye y su estabilidad aumenta. En los sitios con praderas: (vi) el nivel de agregación de las tres series de suelos no es semejante, pero sí la resistencia al colapso por humedecimiento súbito. En ambos tipos de utilización de tierras la distribución del tamaño de los agregados y su estabilidad pudieron justificarse considerando las variables que intervienen en la formación y estabilidad de agregados jerárquicos, y los efectos que los sistemas de manejo ejercieron sobre el tamaño y la estabilidad de los agregados permitieron interpretar las relaciones entre ks y DGPag.

REFERENCIAS

- Angers D, Carter M. 1996. Aggregation and organic matter storage in cool humid agricultural soils. En: Structure and organic matter storage in agricultural soils. Ed. Carter M, Stewart B. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL. 193-211.
- 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.
- 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.
- Cabria F, Culot J. 2001. Efecto de la agricultura continua bajo labranza convencional sobre características físicas y químicas en Udoles del sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 19: 1-10.
- Cleary J, Loch R, Thomas E. 1987. Effects of time under rain, sampling technique and transport of samples on size distribution of water-stable aggregates. Earth Surf. Proc. and Lforms 12: 311-318.
- 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.
- Golchin A, Baldock J, Oades J. 1998. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. 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, Fl. 33431. 245-266.
- Haynes R, Swift R. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. J. Soil Sci. 41:73-83.
- Jastrow J, Boutton T, Miller R. 1996. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by ¹³C natural abundance. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 801-807.
- Jastrow J, Miller R. 1998. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organo - mineral associations. 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, Fl. 33431. 207-223.
- Klute A, Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. En: Ed. A. Klute. Methods of Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph N° 9. 2nd Edition. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. 687-734.
- Loch R, Cleary J, Thomas E, Glanville S. 1988. An evaluation of the use of size distributions of sediments in runoff as a measure of aggregate breakdown in the surface of a cracking clay soil under rain. Earth Surf. Proc. and Lforms 13: 37-44.
- Lynch J, Elaine Bragg 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. Adv. Soil Science 2: 133-171.
- Martin J, Martin W, Page J, Raney W, De Ment J. 1955. Soil aggregation. Adv. Agron. 7: 1-37.
- Oades J. 1984. Soil organic matter and structural stability, mechanisms and implications for management. Plant and Soil 76: 319-337.
- Oades J. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure.

- Geoderma 56: 377-400.
- Oades J, Waters A. 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aus. J. Soil Res.* 29: 815-828.
- Puget P, Chenu C, Balesdent J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 449-459.
- Quirk J, Murray R. 1991. Towards a model for soil structural behavior. *Aust. J. Soil Res.* 29: 829-867.
- SAGyP-INTA. 1989. Dominio Edáfico 2. En: Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Proyecto PNUD ARG 85/019, CIRN – Instituto de Evaluación de Tierras. Eds. Salazar, La Plaza J. C., Moscatelli G. 57-84.
- SAS Institute, Inc. 1988. SAS/STAT User's Guide, Version 6.
- Schwertmann U. 1985. The effect of pedogenetic environments on iron oxide mineral. En: Stewart BA. Eds. *Advances in Soil Science. Volume 1.* Springer - Verlag. NY. p. 171-200.
- Shirazi M, Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.
- Skjemstad J, Le Feuvre R, Prebble R. 1990. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. *Aust. J. Soil Res.* 28: 267-276.
- 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 S.E. bonaerense. II. Modificaciones producidas por el manejo a que han sido sometidos los suelos. *Actas 8^{va} Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*. Bs. As. Argentina.
- Tallarico L. 1974. El método rápido de la mezcla alcohol-agua para evaluar la estructura del suelo. *IDIA*. 313-314, enero – febrero: 1-4 ed. 1977.
- Tisdall J, Oades J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.