

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO Y ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN MOLISOLES BAJO LABRANZAS CONTRASTANTES

MARÍA FLORENCIA ROLDÁN¹; GUILLERMO ALBERTO STUDDERT^{2*}; CECILIA DEL CARMEN VIDELA²; SILVINA SAN MARTINO² & LILIANA INÉS PICONE²

Recibido: 17-03-14

Recibido con revisiones: 18-08-14

Aceptado: 28-08-14

RESUMEN

Los sistemas de labranza afectan la agregación del suelo y su estabilidad, por acción directa y por alterar otros factores tales como el contenido de materia orgánica (MO). Los cambios en ambas variables pueden ser indicadores de la salud del suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la distribución de tamaños de agregados y su estabilidad en dos sitios representativos del Sudeste Bonaerense (Balcarce y Barrow, suelos con diferente textura y contenido de MO) y bajo dos sistemas de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)). Se tomaron muestras de suelo (0-5 y 5-20 cm) de ensayos de larga duración iniciados en 1997 con agricultura continua bajo SD y LC luego de una pastura de cuatro años con base de gramíneas. Además, en cada sitio se tomaron muestras de situaciones no disturbadas. Las muestras de suelo fueron tamizadas en agua separando macroagregados (MA) grandes (>2000 μm) y chicos (2000-250 μm), microagregados (mA, 250-50 μm) y la fracción <50 μm luego de 2 métodos de re-humedecimiento: 1) por capilaridad (MC) y 2) por inmersión (MV). Se calculó el cambio de diámetro medio ponderado (CDMP) entre métodos de re-humedecimiento como medida de estabilidad. Hubo una mayor cantidad de MA (grandes+chicos) bajo SD respecto a LC en ambos sitios y formas de re-humedecimiento. La proporción de MA tendió a cambiar menos entre métodos de re-humedecimiento bajo SD, especialmente en superficie, y en Barrow, mientras que la de mA se incrementó más bajo LC y tendió a hacerlo en Balcarce. Similares tendencias se observaron al referir los cambios a las situaciones no disturbadas. No se detectaron diferencias ($P>0,05$) en el CDMP ni entre labranzas ni entre sitios. Para los suelos estudiados, la SD incrementó la estabilidad de agregados en superficie posiblemente debido al mayor contenido de MO y de alguna de sus fracciones lábiles. Asimismo, el mayor contenido de arcilla en Barrow podría ser la causa de la mayor estabilidad de las distintas fracciones de agregados.

Palabras clave. Agregación, indicador de salud de suelo, siembra directa, labranza convencional, agricultura continua.

AGGREGATE SIZE DISTRIBUTION AND STABILITY IN MOLLISOLS UNDER CONTRASTING TILLAGE SYSTEMS

ABSTRACT

Tillage systems affect soil aggregation and aggregate stability, both directly and by affecting other factors such as organic matter content (MO). Changes in both variables may be good soil health indicators. The aim of this work was to evaluate aggregate size distribution and stability in two sites representative of the Southeastern Buenos Aires province (Balcarce and Barrow, soils with different texture and MO) and under two tillage systems (no- (SD) and conventional (LC) tillage). Soil samples were taken (0-5 and 5-20 cm) from two long-term experiments started in 1997 with continuous cropping under SD and LC after four-year old grass-based pastures. Besides, in each site soil samples were taken from undisturbed situations. Soil was sieved in water to separate large (>2000 μm) and small (2000-250 μm) macroaggregates (MA), microaggregates (mA, 250-50 μm) and the fraction <50 μm , after 2 re-wetting methods: 1) capillary (MC) and 2) by immersion (MV). Mean weight diameter change (CDMP) between re-wetting methods was determined as a measure of aggregate stability. There was a greater proportion of MA (large+small) under SD respect to LC in both sites and re-wetting methods. The amount of MA tended to change less between re-wetting methods under SD, especially in the top layer, and in Barrow, whereas the amount of mA increased more under LC and with a like trend in Balcarce. Similar trends were observed when changes were expressed relative to the undisturbed situations. No significant differences ($P>0.05$) were observed in CDMP between tillage systems nor sites. For both soils under study, SD increased aggregate stability in the surface layer possibly due to the greater MO content. Likewise, the greater clay content in Barrow could be the cause of the greater stability of the different aggregate fractions.

Key words. Aggregation, soil health indicator, no tillage, conventional tillage, continuous cropping.

¹ Estación Experimental Sáenz Peña, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; ² Fac. Cs. Agrarias, U.N.M.d.P., Unidad Integrada Balcarce, Argentina

*Autor de contacto: studdert.guillermo@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Las prácticas agrícolas inapropiadas son frecuentemente la causa principal de la degradación del suelo (Lal, 2010) comprometiendo la sustentabilidad de los sistemas productivos. Las consecuencias de este fenómeno incluyen la disminución de la productividad agrícola, el deterioro de recursos y ecosistemas básicos, y la pérdida de biodiversidad (Doran *et al.*, 1996; Manuel-Navarrete *et al.*, 2009). Por lo tanto, la degradación generalizada del suelo involucra cambios negativos que ponen en peligro la seguridad alimentaria y, asimismo, amenaza la calidad del ambiente (Lal, 2010).

El sostenido aumento de la superficie dedicada a la producción de cultivos de cosecha en la Región Pampeana argentina derivó en la reducción de la superficie ocupada por rotaciones mixtas con una marcada tendencia al monocultivo (actualmente de soja (*Glycine max* (L) Merr.)), en el uso continuo de sistemas de labranza agresivos y en la utilización intensiva de agroquímicos (Manuel-Navarrete *et al.*, 2009). A pesar de que se ha incrementado el uso de siembra directa (SD) (AAPRESID, 2010), los cambios en el uso de la tierra están conduciendo a una creciente degradación físico-química y biológica de los suelos y a la contaminación del ambiente. Para revertir esta tendencia, es necesario el uso criterioso de la tierra, incluyendo la elección de sistemas de manejo adecuados en el largo plazo que permitan mantener la producción de alimentos y, a la vez, restaurar y proteger las propiedades del suelo y de otros recursos naturales (Lal, 2010). Para una correcta elección de las prácticas de manejo a emplear se requieren herramientas como los indicadores que permitan evaluar el grado de su impacto sobre la salud del suelo y contribuir así a la toma de decisiones (Doran *et al.*, 1996).

Los indicadores de salud del suelo son atributos cuantificables vinculados a parámetros físicos, químicos y/o biológicos y a procesos edáficos que determinan su productividad y funcionalidad. Un indicador debe ser sensible a cambios en el corto plazo en las funciones del suelo en respuesta al manejo, fácil de interpretar, sencillo y económico de obtener, y debería relacionarse con una o más funciones edáficas, permitiendo la definición de umbrales (Doran & Parkin, 1996). Así, a través de un grupo de indicadores se podrían tener indicios tempranos del sentido de los cambios ocurridos en las múltiples funciones y servicios ecosistémicos del suelo, asociados al uso y manejo. La magnitud y oportunidad de estos cambios pueden ser diferentes entre tipos de suelo y son frecuentemente dependientes de su condición inicial y de los efectos del manejo realizado.

La estructura del suelo tiene una gran influencia sobre las funciones edáficas respecto a sostener la vida animal y vegetal y a moderar la calidad ambiental (Bronick & Lal, 2005). Los agregados del suelo protegen físicamente a la fracción orgánica, influyendo así sobre la estructura de la biota, la dinámica del carbono y el ciclo de los nutrientes. Asimismo, regulan la aireación y el flujo (infiltración, escorrentía, percolación) y la retención de agua, e inciden sobre la susceptibilidad a la erosión y la dispersión de químicos de origen antropogénico. El estado de agregación, caracterizado a través de los cambios en la distribución de tamaños de agregados y de su estabilidad, es altamente sensible al uso que se haga del suelo y es determinante de su salud (Six *et al.*, 2004; Bronick & Lal, 2005).

El grado de agregación y la estabilidad de los agregados de los suelos están influenciados por su textura y en muchos de ellos, por el contenido de materia orgánica (MO) (Six *et al.*, 2004; Novelli *et al.*, 2011) y en particular de fracciones lábiles como la MO particulada (MOP) (Six *et al.*, 2004; Agostini *et al.*, 2012). Los niveles de MO y MOP pueden ser modificados a través de la combinación de las prácticas que se implementen (Janzen, 2006), particularmente aquellas que definen el aporte de carbono al suelo (Janzen, 2006; Domínguez *et al.*, 2009). Asimismo, el laboreo del suelo, por un lado determina el grado de mezcla y la estratificación de las fuentes carbonadas e incide sobre la oxigenación y la temperatura del suelo (Steinbach & Álvarez, 2006). Por el otro, provoca ruptura de macroagregados (MA) exponiendo fracciones lábiles de la MO a la acción microbiana lo que contribuye a la caída sostenida de MO y MOP e interrumpiendo el mecanismo de reciclaje de MA y de microagregados (mA) (Six *et al.*, 2004). Así, los suelos sometidos a períodos prolongados bajo laboreo agresivo tienden a tener MA menos estables y a estar enriquecidos en mA (Six *et al.*, 2004; Mandiola *et al.*, 2011). Por lo tanto, la distribución de tamaños de agregados y su estabilidad podrían ser buenos indicadores de la salud del suelo (Aparicio & Costa, 2007; Karlen *et al.*, 2013).

El Sudeste Bonaerense (SEB) no escapa a la realidad del resto de la Región Pampeana argentina. A pesar de que sus suelos son de elevada calidad y resistentes a los efectos del uso (Durán *et al.*, 2011), el proceso de agriculturización está conduciendo a disminuciones de los contenidos de MO y MOP (Domínguez *et al.*, 2009; Manso *et al.*, 2012) y a cambios en la estabilidad de los agregados (Domínguez *et al.*, 2008; Manso *et al.*, 2012), lo que podría llevar a disminuciones o pérdidas de salud y productividad del suelo.

Por lo tanto, es necesario profundizar el estudio de las alteraciones en la estructura del suelo con la finalidad de contribuir a la identificación y ajuste de indicadores que permitan orientar las decisiones de manejo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la distribución de tamaños de agregados y su estabilidad en dos suelos del SEB con clases texturales y contenidos iniciales de MO distintos, manejados bajo SD y labranza convencional (LC) continuas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron muestras de suelo provenientes de dos ensayos de larga duración, ubicados sobre suelos representativos del SEB. El ensayo de Labranzas (Sitio 1: Balcarce) está ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce ($37^{\circ}45'13''S$, $58^{\circ}17'53''W$; 136 msnm), partido de Balcarce, sobre un complejo de suelos de Argiudol Típico fino, mixto, térmico (Serie Mar del Plata, INTA, 1979) y Paleudol Petrocálcico fino, illítico, térmico (Serie Balcarce, INTA, 1979). La pendiente del terreno tiene un gradiente menor al 2% y la textura superficial es franca (232, 341, 427 g kg⁻¹ de arcilla, limo y arena (sólo fina y muy fina), respectivamente) (INTA, 1979), con un pH de 6 y un contenido de MO al inicio del ensayo de 61,4 g MO kg⁻¹ de suelo. El clima es mesotermal subhúmedo-húmedo (Thorntwaite, 1948) con una temperatura diaria media anual de 13,9 °C y una mediana de precipitación anual de 955 mm (1971-2007). El ensayo se inició en 1997, con la siembra de maíz (*Zea mays* L.) sobre un lote con una pastura con base de gramíneas entre 1992 y 1996 y un cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.) bajo labranza reducida en la campaña 1996-1997. A partir de 1997 se aplicaron cinco sistemas de labranza (entre ellos SD y LC), y desde 1998 se aplicó la secuencia de cultivos maíz-girasol-trigo (*Triticum aestivum* L.). El diseño experimental es en bloques completos aleatorizados con arreglo de los factores en parcelas divididas con tres repeticiones. A las parcelas principales se les asignó el factor sistema de labranza y a las subparcelas, el factor fertilización nitrogenada (con 120, 90, 180 kg N ha⁻¹ para trigo, girasol, maíz, respectivamente, y testigo sin N). Para este trabajo se tomaron muestras de suelo sólo de las subparcelas fertilizadas de los sistemas de labranza SD y LC. El tratamiento LC, comprendió el uso de arado de rejas y vertederas, rastra de discos y cultivador de campo. El tratamiento SD consistió en realizar barbecho químico mediante el uso de herbicidas totales a las dosis recomendadas.

El ensayo de Labranzas y Rotaciones (Sitio 2: Barrow) está ubicado en la Chacra Experimental Integrada Barrow ($38^{\circ}19'25''S$; $60^{\circ}14'33''W$; 120 m snm), partido de Tres Arroyos, sobre un suelo Paleudol Petrocálcico fino, illítico, térmico (Serie Tres Arroyos, INTA, 1979). La pendiente del terreno tiene un gradiente de 2 a 3% y el horizonte superficial presenta una

textura franco-arcillo-arenosa (259, 269, 472 g kg⁻¹ de arcilla, limo y arena (sólo fina y muy fina), respectivamente) (INTA, 1979), un pH de 6,4 y un contenido de MO al inicio del ensayo de 38,9 g MO kg⁻¹ de suelo. El suelo es moderadamente somero (profundidad a la tosca, en promedio, de 75 cm). El clima es megatermal subhúmedo-seco (Thorntwaite, 1948) con una temperatura diaria media anual de 14,7 °C y una mediana de precipitación anual de 755 mm (1990-2007). Este ensayo fue iniciado en 1997 con una rotación girasol-trigo-maíz-girasol-trigo, con la implementación de los sistemas de labranza SD y LC, sobre un lote con sectores con distinta historia previa: una pastura implantada de cuatro años y agricultura continua durante 12 años. En la campaña 2007-2008, se implantó un cultivo de maíz que no correspondía a la secuencia que se venía utilizando en el ensayo. El diseño experimental es en bloques divididos con tres repeticiones. Los factores de tratamiento fueron historia previa: a) pastura con base de gramíneas durante cuatro años previo al inicio del ensayo (1993-1996), la cual fue pastoreada, y b) agricultura continua durante 12 años (1985-1996); y dos niveles del factor sistema de labranza, implementados a partir de 1997, SD y LC. La LC comprendió el uso de arado de rejas y vertederas los primeros dos años de ensayo, y posteriormente, rastra de discos y, eventualmente, arado de cincel. El tratamiento SD consistió en realizar barbecho químico mediante el uso de herbicidas totales a las dosis recomendadas. Los cultivos fueron fertilizados con N desde el inicio del ensayo según el sistema de labranza: 70 y 120 kg N ha⁻¹ para LC y SD, respectivamente. Para este trabajo se tomaron muestras sólo de las unidades experimentales correspondientes a los bloques del factor historia previa bajo pastura.

En invierno (agosto) de 2008, luego de la cosecha del cultivo de maíz antecesor, se tomaron muestras compuestas de suelo (15 sub-muestras) a la profundidad de 0-5 y 5-20 cm de las parcelas bajo SD y LC, en cada una de las repeticiones, con un muestreador cilíndrico de 4,5 cm de diámetro. El cultivo antecesor inmediato en ambos sitios fue maíz. A manera de referencia se tomaron también, en cada uno de los sitios, dos muestras compuestas de suelo (15 sub-muestras) de una situación pseudo-prístina que se denominó Parque. Al momento de la extracción, todas las muestras fueron cuidadosamente tamizadas por un tamiz de 8 mm de apertura de malla y luego, secadas a 50 °C en estufa con circulación forzada de aire. Todas las variables respuesta se presentan también para la capa de 0-20 cm, a través del cálculo de promedios ponderados de las dos profundidades muestreadas.

Se realizó el fraccionamiento de las muestras por tamaño de agregados mediante el método propuesto por Six *et al.* (1998). Éste se basa en la separación del suelo en cuatro clases de tamaño de agregados (>2000 (MA grandes), 2000-250 (MA chicos), 250-50 (mA) y <50 µm), mediante tamizados sucesivos en agua a través de tamices con distintas aperturas de

mallas. Esta metodología contempla la aplicación de dos métodos de re-humedecimiento de los agregados secos antes del tamizado en agua: i) re-humedecimiento por capilaridad hasta capacidad de campo (mojado por capilaridad, MC) y ii) la inmersión rápida en agua (mojado violento, MV).

Para el MC se colocó papel de filtro en la base de una bandeja plástica y se esparcieron 150 g de suelo seco. Luego, al papel de filtro se le aplicó de a poco la cantidad de agua desmineralizada necesaria para llevar el contenido de agua de los agregados secos hasta capacidad de campo más 0,05 kg de agua kg^{-1} de suelo (alrededor de 45 mL y 30 mL de agua desmineralizada para los Sitios 1 y 2, respectivamente), contenido de agua en el que la estabilidad de los agregados es máxima (Hofman & de Leenheer, 1975). Posteriormente, las bandejas se cubrieron con papel film plástico para evitar la evaporación y se dejaron a temperatura ambiente durante 24 h, aproximadamente. El MV consistió en sumergir directamente en agua durante 5 min los 150 g de suelo seco distribuidos en el primer tamiz (>2000 μm), antes de iniciar el tamizado.

Los suelos se tamizaron en agua secuencialmente, a través de una serie de tres tamices de 2000, 250 y 50 μm de apertura de malla. Tanto para MV como para MC, el proceso de tamizado se inició 5 min después de haber colocado los agregados secos (MV) o los pre-humedecidos (MC) en el primer tamiz. El tamizado se realizó con movimiento de arriba hacia abajo del tamiz dentro del agua, con un recorrido de 3 cm y 50 repeticiones durante un período de 2 min. A efectos de asegurar la igualdad de condiciones de operación entre los distintos tamizados de una muestra y entre muestras, se utilizó un dispositivo diseñado y construido para tal fin (Roberto y Germán Domínguez, construcción *ad hoc*) cuyo funcionamiento reproduce el recorrido y la frecuencia de repeticiones de los movimientos ascendente y descendente indicados en el protocolo utilizado. El proceso de tamizado se inició con el tamiz de 2000 μm y una vez finalizado el tiempo de tamizado, los agregados que quedaron sobre este tamiz fueron recuperados cuidadosamente por retro-lavado con agua desmineralizada en un recipiente plástico (fracción > 2000 μm). Para agilizar la floculación, se agregaron 5 mL de cloruro de calcio (CaCl_2) 2N.

El agua más los agregados que pasaron el tamiz de 2000 μm de apertura de malla se vertieron sobre el tamiz de 250 μm , y se procedió al tamizado y recuperación de los agregados de la misma manera que con el primer tamizado (fracción 2000-250 μm). Los agregados y agua que pasaron el tamiz de 250 μm se volcaron luego sobre el tamiz de 50 μm y nuevamente se realizó el tamizado y recuperación correspondientes (fracción 250-50 μm). La suspensión remanente que pasó el último tamiz (entre 4 y 6 L de suspensión) fue recuperada y se le agregaron 20 mL de CaCl_2 2N (fracción < 50 μm). Luego de 24 a 36 h, se retiró y descartó el sobrenadante de todos los

recipientes y los agregados se secaron en estufa a 50 °C hasta obtener peso constante. Una vez alcanzado éste, las fracciones obtenidas fueron pesadas y luego almacenadas a temperatura ambiente. Dado que la suma de los pesos de las cuatro fracciones de agregados totalizan en todos los casos 150 g de suelo seco, es decir, constituyen datos composicionales (Aitchison, 1986), se los analizará como tales y se presentará el porcentaje de la masa total del suelo compuesto por cada fracción para facilitar su interpretación y discusión.

A los efectos de evaluar los cambios relativos de cada uno de los tamaños de agregados en relación a la situación no disturbada, se calculó el cociente entre el peso de agregados de un determinado tamaño de cada unidad experimental luego del MV y el peso de dicha fracción correspondiente al Parque, luego del mismo método de humedecimiento. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{PRA}_{ijk} = \text{PT}_{ijk} * \text{PP}_{jl}^{-1} \quad (1)$$

donde PRA_{ijk} es el cociente de agregados estables relativo al Parque, de la l-ésima fracción, para la i-ésima labranza en el k-ésimo bloque del j-ésimo sitio, PT_{ijk} es el peso de la l-ésima fracción para la jk-ésima unidad experimental y PP_{jl} es el peso de la l-ésima fracción en el Parque (promedio de las dos muestras tomadas) del j-ésimo sitio. Cuanto más cercano a 1 se encuentre el valor de PRA, menor es el cambio con respecto al Parque.

Con el peso de los agregados obtenidos en cada tamiz se determinó el diámetro medio ponderado (DMP) para cada método de humedecimiento (MC y MV), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^4 X_i W_i \quad (2)$$

donde i identifica a cada fracción de agregados incluyendo la que pasó por el tamiz de 50 μm , X_i es el diámetro promedio de la fracción i (mm) calculado como la media aritmética de la apertura de malla de dos tamices sucesivos, y W_i es la proporción del peso de la fracción l respecto de la muestra total tamizada (150 g). Por diferencia entre los DMP de MC y MV se obtuvo el cambio en DMP (CDMP, mm) como una medida de la estabilidad de los agregados.

Los datos de las diferentes variables respuesta obtenidos para cada profundidad y método de humedecimiento fueron analizados mediante un análisis de varianza (uni o multivariado, según correspondiera) considerando un modelo lineal en el cual los sistemas de labranza y los sitios fueron considerados como efectos fijos, y los bloques, como aleatorios y anidados en los sitios. Se utilizaron los procedimientos GLM y MIXED del

sistema SAS (Statistical Analysis System, SAS Institute, 2009) y la librería "compositions" del programa R (R Core Team, 2013). En todas las pruebas de hipótesis se consideró un nivel de significancia del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No hubo interacción entre sitios y sistemas de labranza ni efecto de sitio ($P > 0,05$) sobre las masas de los agregados de cada fracción obtenidas por MC y MV. En la Figura 1, se presenta el porcentaje de la masa total del suelo correspondiente a cada tamaño de agregados promedio de ambos sitios, luego de aplicar cada método de humedecimiento, para los dos sistemas de labranza. Cuando el suelo fue sometido al MC (Fig. 1a), los MA grandes representaron la mayor proporción de la masa total del suelo para los dos sistemas de labranza a las profundidades analizadas. Sin embargo, luego del MV (Fig. 1b), la mayor proporción de la masa total del suelo se concentró en las fracciones de los MA chicos y los mA. Por lo tanto, los métodos de humedecimiento generaron una distribución distinta de la masa de las fracciones de agregados. Esto es consecuencia de que el método de MC, al permitir el humedecimiento

paulatino del suelo, hizo que el aire que se encontraba atrapado dentro de los agregados se liberara lentamente, por lo que el disturbio ocasionado a los MA fue mínimo. La estabilidad de los agregados es máxima a contenidos de humedad a capacidad de campo más el 5% (Hofman & de Leenheer, 1975). De esta manera, la distribución de agregados estuvo concentrada hacia los agregados de mayor tamaño (Fig. 1a). Por el contrario, el método de MV provocó que el agua ingresara rápidamente en los poros de los agregados secos y se generaran grandes fuerzas internas por compresión del aire dentro de los mismos, ocasionando un mayor disturbio que el MC a los agregados menos estables (Kemper & Rosenau, 1986). Esto generó, para cada profundidad, una distribución desplazada hacia los agregados de menor tamaño (Fig. 1b). Es decir, los MA más débiles o menos estables en agua se desagregaron y esto resultó en un incremento de la masa de los agregados más chicos (MA chicos y mA). Se ha informado que los MA grandes son más vulnerables a la ruptura por agua, comparados con los MA chicos (Sainju, 2006). Los MA que resisten las fuerzas de disrupción del MV tendrían mayor estabilidad estructural que los que se mantienen estables frente al MC (Cambardella & Elliott, 1993). Por lo tanto,

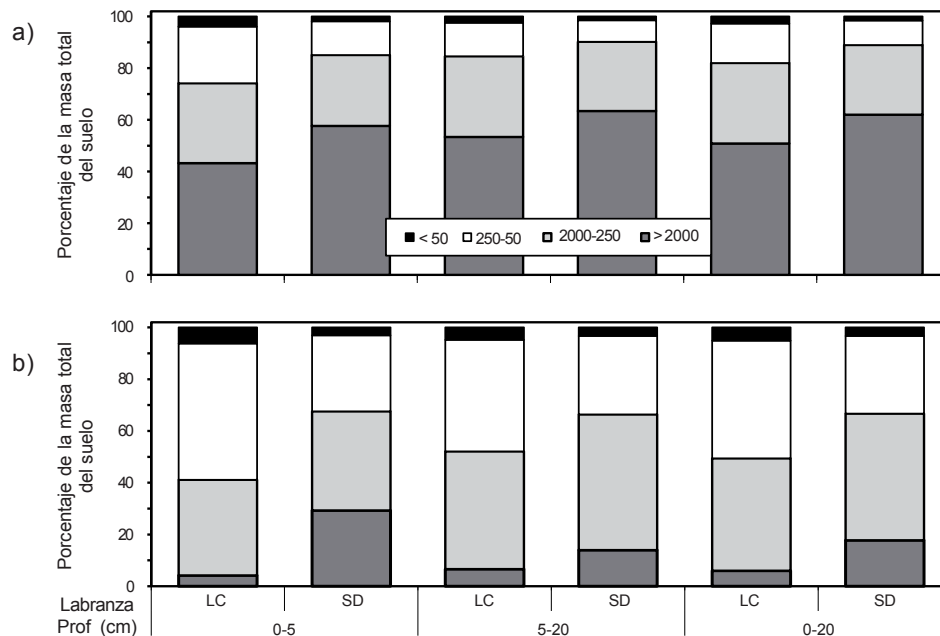


Figura 1. Distribución por tamaño de agregados ($>2000 \mu\text{m}$, $2000-250 \mu\text{m}$, $250-50 \mu\text{m}$ y $<50 \mu\text{m}$) bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) a diferentes profundidades (Prof.) para dos métodos de humedecimiento de los agregados: por capilaridad (a) y violento (b).

Figure 1. Aggregate size distribution ($>2000 \mu\text{m}$, $2000-250 \mu\text{m}$, $250-50 \mu\text{m}$ y $<50 \mu\text{m}$) under no-tillage (SD) and conventional tillage (LC) at different depths (Prof.) for two aggregate re-wetting methods: capillary (a) and by immersion (b).

la masa de MA remanente luego del MC contiene MA estables e inestables, mientras que la remanente luego del MV contiene sólo los estables. Cambardella y Elliott (1993) reportaron que la estabilidad de los MA luego del MV, podría estar directa o indirectamente relacionada con cambios en la MOP del suelo. La estabilidad de los MA se relaciona con el incremento en la concentración de C dentro de los mismos, especialmente de fracciones lábiles (Tisdall & Oades, 1982).

Tanto la distribución como la estabilidad de cada fracción de agregados fueron fuertemente influenciadas por el sistema de labranza (Fig. 1). Luego de cualquiera de los métodos de humedecimiento, la masa de MA grandes fue mayor bajo SD que bajo LC, en todas las profundidades y en ambos sitios. Por el contrario, las masas de mA y de la fracción <50 µm fueron en todos los casos mayores bajo LC que bajo SD (Fig. 1), lo que refleja la mayor ruptura de los MA. Sin embargo, no hubo diferencias entre sistemas de labranza en la masa de los MA chicos.

La masa de MA grandes en la capa superficial luego del MC, representaba el 58% y el 43% de la masa total del suelo bajo SD y LC, respectivamente, mientras que luego del MV constituía el 29% y 4%, respectivamente. Asimismo, luego del MC, los MA grandes en la capa sub-superficial, representaban el 63% y 53% de la masa total del suelo bajo SD y LC, respectivamente, mientras que luego del MV constituían el 14% y 7%, respectivamente. Esto muestra la menor estabilidad de los MA grandes bajo manejos con labranzas agresivas. Gale y Cambardella (2000) presentaron evidencias de que bajo SD los MA más estables, poseen mayor concentración de MOP joven, proveniente principalmente de raíces, que los MA menos estables. Six *et al.* (1998) observaron que bajo SD había una mayor proporción de MOP fina (250-50 µm) retenida en los mA dentro de los MA en comparación con LC, lo que indica que el reciclaje lento de los MA bajo SD conduce al secuestro de C, principalmente como MOP fina, convirtiéndolos en más estables y resistentes a disturbios como el ocasionado por el MV. Es decir, el efecto de las labranzas en la estabilidad de los agregados ocurre, principalmente, a través del efecto sobre la cantidad y la calidad del material orgánico ocluido dentro de ellos. Las labranzas agresivas, como LC, causan la ruptura de los MA e inhiben la formación y/o persistencia de la MOP dentro de ellos, causando así una menor estabilidad (Six *et al.*, 2004).

La mayor estabilidad de los MA grandes en superficie bajo SD (Fig. 1), probablemente se deba a diferencias en la localización de las fuentes nuevas de C y su degradación. Bajo SD hay una estratificación de C orgánico, con mayor concentración en la capa superficial por acumulación de residuos en contacto con el suelo (Six *et al.*, 2004; Agostini *et al.*, 2012) y el consecuente aporte de C lábil que interviene en la estabilización de los agregados (Tisdall & Oades, 1982). El menor aporte de C en profundidad se traduce en menor contenido de fracciones orgánicas lábiles y, por lo tanto, la estabilidad de los MA se manifiesta reducida. Sin embargo, bajo LC, si bien los contenidos de C son más uniformes en el perfil, los MA están expuestos a condiciones de constante desagregación y desestabilización propias del tipo de laboreo, provocando un reciclaje más rápido y, por lo tanto, reduciendo el secuestro de C (Six *et al.*, 2004).

La diferencia de masa remanente de las fracciones entre los tamizados luego de los dos métodos de humedecimiento (MV - MC) no presentó interacción ($P > 0,05$) entre sitios ni sistemas de labranza. La Figura 2 muestra la mayor disminución en la cantidad de MA grandes originada a partir del disturbio ocasionado por el MV respecto al MC, a las tres profundidades evaluadas, bajo ambos sistemas de labranza y en los dos sitios. El cambio de peso debido al método de humedecimiento difirió entre los sitios sólo a la profundidad de 5-20 cm en la fracción de los MA chicos, siendo este cambio mayor en Barrow que en Balcarce (Fig. 2b). También puede observarse que las diferencias entre los sistemas de labranza en el cambio de peso de las fracciones de agregados, sólo fueron significativas en la fracción de los mA ($SD < LC$, $P < 0,05$) para las tres profundidades evaluadas (Fig. 2a). Estos resultados estarían indicando que los mA son más estables que los MA dado que presentan menor cambio de peso asociado al método de humedecimiento, y que lo son aún más bajo SD que bajo LC.

La ausencia de diferencia entre SD y LC en los cambios de la masa de los MA chicos indica que la estabilidad de esta fracción de agregados es independiente del sistema de labranza. Asimismo, el cambio significativamente mayor ($P < 0,05$) en la masa de mA (Fig. 2a) bajo LC respecto a SD, indica que el laboreo agresivo produjo una mayor ruptura de MA (>250 µm) o, por otro lado, que la SD condujo a una mejor conservación de ese tamaño de agregados. Esto resultó en que, luego del MV (Fig. 1b), la masa de mA constituyera alrededor del 50% de la masa del suelo bajo LC y sólo el 30% bajo SD. La muy baja proporción de la

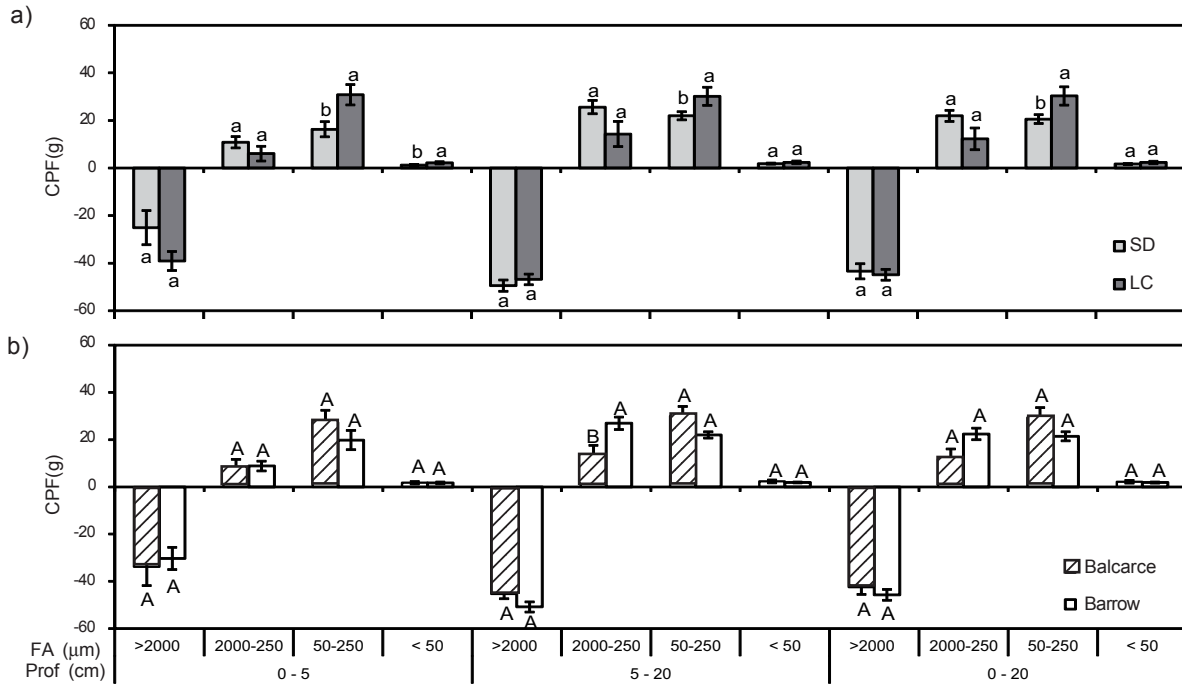


Figura 2. Cambio de peso (CPF) de las fracciones de agregados (FA) entre los dos métodos de humedecimiento a diferentes profundidades (Prof.) para los sistemas de labranza siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) (a) y para los sitios Balcarce y Barrow (b). Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media. Letras iguales dentro de cada FA y para cada Prof. indican que las diferencias no son significativas ($P>0,05$) entre sistemas de labranza (a) o entre sitios (b).

Figure 2. Weight change (CPF) of aggregate fractions (FA) between re-wetting methods at different depths (Prof.) for no-tillage (SD) and conventional tillage (LC) (a) and for Balcarce and Barrow (b). Vertical lines in each column indicate estimated standard error of the mean. Equal letters above columns within each FA and for each Prof. indicate that differences between tillage systems (a) or sites (b), are not significant ($P>0,05$).

fracción <50 μm y la similitud de peso entre métodos de humedecimiento para ambos sitios y sistemas de labranza y para las tres profundidades (Fig. 2), confirma que los mA fueron más estables que los MA (Tisdall & Oades, 1982; Cambardella & Elliott, 1993; Six *et al.*, 1998). El gran cambio en la distribución relativa del tamaño de agregados (mayor o menor que 250 μm) y la pequeña cantidad de material menor que 50 μm en el suelo sometido al tratamiento MV (Fig. 1b) sostiene el modelo de formación de estructura de suelo de Tisdall y Oades (1982) en el cual los MA están compuestos de un ensamble de mA. Cuando los MA se desagregan por efecto del laboreo, la proporción de mA se incrementa, dado que no son destruidos (Tisdall & Oades, 1982; Six *et al.*, 1998). Los mA tienen menores concentraciones de C que los MA, pero el C orgánico dentro de estos últimos es menos estable que el de los mA (Six *et al.*, 2004). Buyanovsky *et al.* (1994) estimaron que el tiempo de residencia del C en los MA de 2000 μm era de entre 0,8 y 4,0 años mientras que en los mA, lo era de 7,0 años.

La diferencia entre las masas remanentes de las fracciones de agregados luego de aplicar cada método de humedecimiento (MV - MC) para el Parque de cada sitio, a las tres profundidades evaluadas se presenta en la Figura 3. El menor tamaño de las columnas en todos los tamaños de agregados indica una mayor estabilidad que en los respectivos sistemas bajo agricultura (Fig. 2b). Sólo hubo interacción significativa entre sitios y sistemas de labranza ($P<0,05$) sobre la proporción relativa al Parque de agregados estables al agua luego del MV. En la Tabla 1 se observa que la cantidad de MA (donde MA proviene de la suma de los MA grandes y los MA chicos) estables al agua luego del MV en la capa superficial del suelo bajo SD, representó el 82% de los MA del Parque, mientras que bajo LC representó sólo aproximadamente el 50%. Este patrón fue similar en las otras profundidades analizadas, aunque la diferencia fue de menor magnitud entre sistemas de labranza. Bajo LC, los cambios en los MA con respecto al Parque, estuvieron asociados a grandes pérdidas de MA grandes y

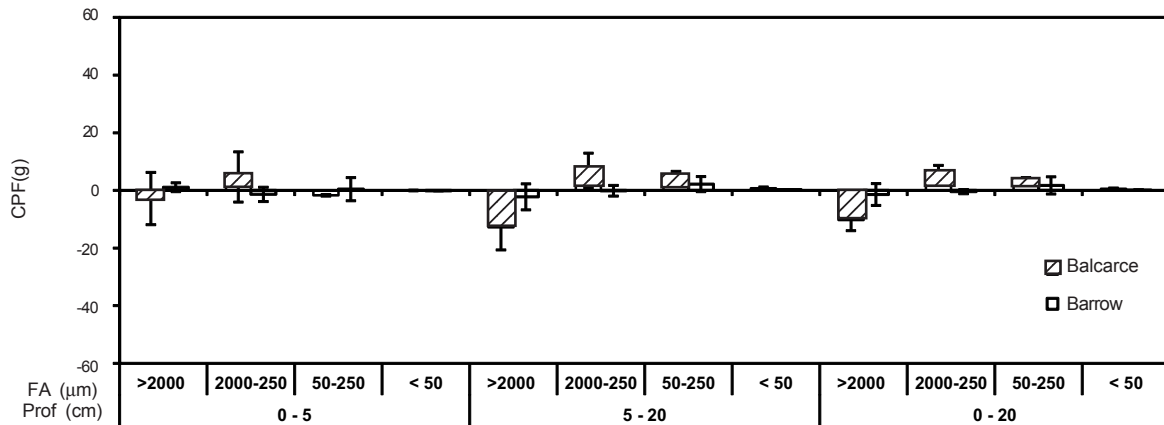


Figura 3. Cambio de peso (CPF) de las fracciones de agregados (FA) entre los dos métodos de humedecimiento a diferentes profundidades (Prof.) del Parque en los sitios Balcarce y Barrow. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

Figure 3. Weight change (CPF) of aggregate fractions (FA) between re-wetting methods at different depths (Prof.) for the undisturbed situation (Parque) at Balcarce and Barrow. Vertical lines in each column indicate estimated standard error of the mean.

menores ganancias en los MA chicos (Fig. 2a), lo que se traduce en un gran incremento de mA (Fig. 2a, Tabla 1). Los menores cambios relativos en la estabilidad de los MA bajo SD, podrían estar asociados a los mayores contenidos de MOP respecto a LC, especialmente en la capa superficial (Gale & Cambardella, 2000; Six *et al.*, 1998, 2004). Por otro

lado, la proporción relativa de los MA estables al agua luego del MV fue mayor en Barrow que en Balcarce, siendo estas diferencias significativas sólo a 5-20 y 0-20 cm de profundidad (Tabla 1). Asimismo, los cambios en los mA con relación al Parque, como consecuencia de los cambios en los MA, fueron mayores en Balcarce que en Barrow en cada

	Fracción de Agregados			
	MAg	MAc	MA	mA
0 - 5 cm				
SD	0,57 a	1,22 a	0,82 a	-
LC	0,08 b	1,18 a	0,50 b	-
Balcarce	0,30 A	1,15 A	0,59 A	-
Barrow	0,35 A	1,24 A	0,73 A	-
SD-Balcarce	-	-	-	3,92 bA
SD-Barrow	-	-	-	1,29 aB
LC-Balcarce	-	-	-	7,42 aA
LC-Barrow	-	-	-	2,19 aB
5 - 20 cm				
SD	0,25 a	1,68 a	0,79 a	-
LC	0,12 b	1,46 a	0,62 b	-
Balcarce	0,20 A	1,38 B	0,62 B	-
Barrow	0,17 A	1,76 A	0,78 A	-
SD-Balcarce	-	-	-	4,08 bA
SD-Barrow	-	-	-	1,60 aB
LC-Balcarce	-	-	-	6,36 aA
LC-Barrow	-	-	-	2,04aB
0 - 20 cm				
SD	0,33 a	1,56 a	0,79 a	-
LC	0,11 b	1,39 a	0,59 b	-
Balcarce	0,23 A	1,32 A	0,61 B	-
Barrow	0,22 A	1,63 A	0,77 A	-
SD-Balcarce	-	-	-	4,04 bA
SD-Barrow	-	-	-	1,50 aB
LC-Balcarce	-	-	-	6,62 aA
LC-Barrow	-	-	-	2,09 aB

Tabla 1. Comparaciones de medias de la masa de agregados estables al agua luego del mojado violento expresadas como relativo al Parque, a diferentes profundidades. Letras minúsculas o mayúsculas iguales indican que las diferencias no son significativas ($P > 0,05$) entre los sistemas de labranza (dentro de cada sitio o independientemente del sitio, según corresponda) o entre los sitios (dentro de cada labranza o independientemente de la misma, según corresponda), respectivamente, dentro de cada fracción de agregados y profundidad. SD: siembra directa, LC: labranza convencional, MAg: macroagregados grandes ($>2000 \mu\text{m}$), MAc: macroagregados chicos (2000-250 μm), MA: macroagregados (suma de MAg y MAc), mA: microagregados (250-50 μm).

Table 1. Mean comparisons of percentage of water stable aggregates after re-wetting by immersion relative to Parque at different depths. Equal lower or upper case letters indicate that differences between tillage systems (within each site or independently of the site) are not significant ($P > 0,05$) or between sites (within each tillage system or independently of the tillage system), respectively, within each aggregate size fraction and depth. SD: no-tillage, LC: conventional tillage, MAg: large macroaggregates ($>2000 \mu\text{m}$), MAc: small macroaggregates (2000-250 μm), MA: macroaggregates (sum of MAg and MAc), mA: microaggregates (250-50 μm).

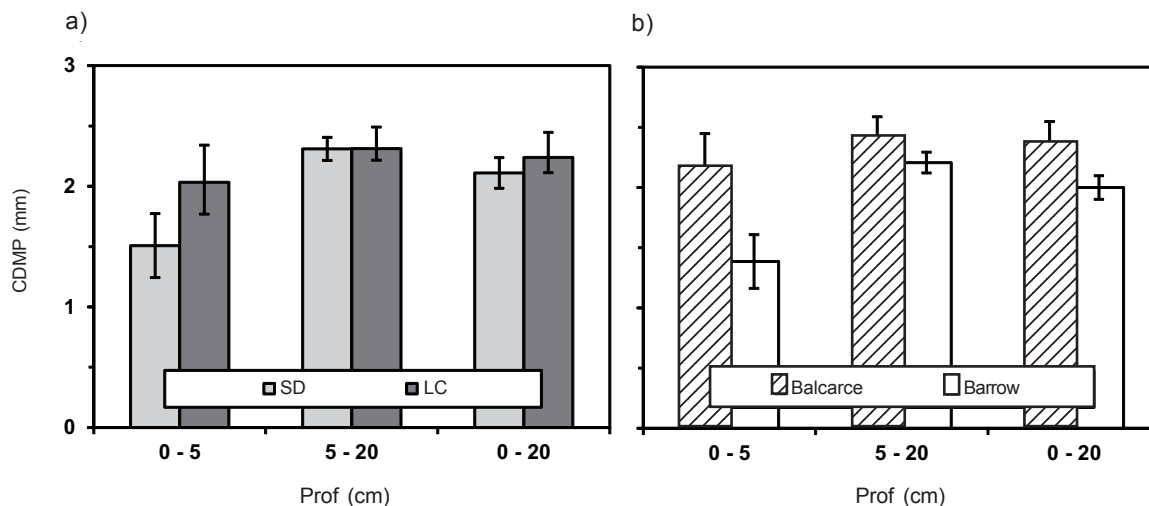


Figura 4. Cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) de agregados para: a) dos sistemas de labranza (SD: siembra directa y LC: labranza convencional); b) dos sitios (Balcarce y Barrow) a tres profundidades (Prof). Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

Figure 4. Aggregate mean weight diameter change (CDMP) for: a) two tillage systems (SD: no tillage and LC: conventional tillage), and b) two sites (Balcarce and Barrow) at three depths (Prof). Vertical lines in each column indicate estimated standard error of the mean.

sistema de labranza y para las tres capas analizadas (Tabla 1). Por lo tanto, los MA fueron más estables en Barrow que en Balcarce, a pesar de tener una textura más gruesa (menor proporción de limo más arcilla). Esto está indicando un efecto diferencial entre sitios, posiblemente asociado a la mayor concentración de arcillas dentro de la fracción fina (limo más arcilla) en Barrow, y a su rol en la protección de algunas fracciones orgánicas que intervienen en la estabilización de los agregados (Six *et al.*, 2004).

El CDMP permite cuantificar el grado de estabilidad de los agregados en la masa total del suelo como consecuencia del uso. En la Figura 4 se muestra el CDMP de los agregados para ambos sistemas de labranza, en ambos sitios, y a las profundidades analizadas. No hubo interacción ($P > 0,05$) entre sitios y sistemas de labranza sobre el CDMP. Tampoco hubo diferencias significativas en el CDMP entre los sistemas de labranza, ni entre sitios ($P > 0,05$) para las profundidades evaluadas (Fig. 4). La formación de agregados y su estabilización son procesos complejos que involucran fenómenos abióticos como ciclos de secado y humedecimiento, y factores bióticos relacionados con la actividad de la fauna edáfica y la acción de las raíces de las plantas, pero que son afectados en gran medida por la

textura y la MOP (Six *et al.*, 2004; Bronick & Lal, 2005). Se esperaba encontrar diferencias significativas en CDMP entre los sistemas de labranza, al menos en la capa superficial, considerando que los suelos bajo SD reciben un aporte importante de C en superficie que no es mezclado con el resto del suelo, lo que lleva a aumentos de la MOP que favorecen la formación y estabilización de mA y MA (Six *et al.*, 2004). Por otro lado, el CDMP del Parque (situación de referencia) varió entre 0,10 y 0,64 mm para ambos sitios y las tres profundidades analizadas y, por lo tanto, fue mucho menor que el obtenido en los suelos bajo agricultura. Esto indica claramente que cuando los suelos son cultivados, pierden la estabilidad estructural que poseían en su situación prístina (Cambardella & Elliott, 1993; Six *et al.*, 1998; Domínguez *et al.*, 2008; Agostini *et al.*, 2012). Los suelos bajo situaciones pseudo-prístinas (pasturas de varios años o parques de estancia, etc.), poseen diferentes niveles de C orgánico, el cual es siempre significativamente mayor que en las condiciones de manejo agrícola. Esta relación justifica los niveles de estabilidad estructural generalmente elevados que poseen los suelos bajo las situaciones pseudo-prístinas (Six *et al.*, 1998; Agostini *et al.*, 2012; Karlen *et al.*, 2013).

CONCLUSIÓN

La diferencia entre las distribuciones de las fracciones de agregados luego de cada uno de los métodos de humedecimiento, puso en evidencia que la estabilidad de los agregados fue sensible al sistema de labranza empleado. Los MA grandes fueron menos estables que los MA chicos y los mA. No obstante, la proporción de MA (>250 μm) estables respecto al Parque fue mayor bajo SD que bajo LC, en ambos sitios y a las profundidades estudiadas pero, principalmente, en la capa superficial. Así, la proporción de MA (>250 μm) estables podría ser un buen indicador de salud del suelo dada la relativa facilidad para su determinación y su relación con diversos aspectos que la definen.

Los cambios en las proporciones de agregados respecto a una situación asumida como estable (Parque), fueron mayores en la situación con la textura más fina y mayor contenido original de MO (Balcarce) que en aquella con la textura más gruesa y menor contenido de MO (Barrow). Así, la estabilidad de los MA fue mayor en Barrow independientemente del sistema de labranza. Esto sugiere la necesidad de asociar la distribución de tamaño de agregados y la estabilidad de la estructura a la textura y de profundizar en el estudio de la distribución de MO y de MOP en las distintas fracciones de agregados.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo son parte de la Tesis de Maestría de la primera autora en el Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Los autores desean expresar un profundo agradecimiento a los Ings. Agrs. H.J. Forján y M.L. Manso por permitir la toma de muestras en el ensayo a su cargo en Barrow. La obtención y publicación de estos resultados ha sido posible dentro del marco del PICT 2012-1092 financiado por el FONCYT y la Universidad Nacional de Mar del Plata, del PNCYO 1127032 financiado por el INTA, y del proyecto AGR426/13 financiado por la Universidad Nacional de Mar del Plata.

BIBLIOGRAFÍA

- AAPRESID. 2010. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa, Rosario, Santa Fe. <http://www.aapresid.org.ar>. Último acceso diciembre de 2010.
- Agostini, MA; GA Studdert & GF Domínguez. 2012. Relación entre el cambio en el diámetro medio de agregados y el carbono orgánico y sus fracciones. Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 abril, 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, 6 p. (en CD).
- Aparicio, VC & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96: 155-165.
- Aitchison, J. 1986. The statistical analysis of compositional data. Chapman and Hall, London, UK.
- Bronick, CJ & R Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- Buyanovsky, GA; M Aslam & GH Wagner. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1167-1173.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1071-1076.
- Domínguez, GF; A Andersen & GA Studdert. 2008. Cambios en la estabilidad de agregados en distintos sistemas de cultivo bajo siembra directa y labranza convencional. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 13-16 mayo, 2008. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina, 6 p. (en CD).
- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on Mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Tillage Res.* 102: 93-100.
- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: JW Doran & AJ Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication N° 49. Pp. 25-37. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, JW; M Sarrantonio & MA Liebig. 1996. Soil health and sustainability. In: DL Sparks (Ed.) *Adv. Agron.* Pp. 1-54. Academic Press Inc., San Diego, California, USA.
- Durán, A; H Morrás; G Studdert & X Liu. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chinese Geogr. Sci.* 21: 511-530.
- Gale, WJ & CA Cambardella. 2000. Carbon dynamics of surface residue- and root-derived organic matter under simulated no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 190-195.
- Hofman, G & L de Leenheer. 1975. Influence of soil prewetting on aggregate instability. *Pedologie* 25: 190-198.
- INTA. 1979. Cartas de suelo de la República Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Secretaría de Agricultura de Ganadería y Pesca. Buenos Aires Argentina. s.p.
- Janzen, HH. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.* 38: 419-424.
- Karlen, DL; CA Cambardella; JL Kovar & TS Colvin. 2013. Soil quality response to long-term tillage and crop rotation practices. *Soil Tillage Res.* 133: 54-64.
- Kemper, WD & R Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: A Klute (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. Pp. 425-442. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, Wisconsin, USA.
- Lal, R. 2010. Enhancing eco-efficiency in agro-ecosystems through soil carbon sequestration. *Crop Sci.* 50: S120-S131.
- Mandiola, M; GA Studdert; GF Domínguez & CC Videla. 2011. Organic matter distribution in aggregate sizes of a Mollisol under contrasting managements. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 11: 41-57.
- Manso, ML; HJ Forján; GA Studdert & S San Martino. 2012. Efecto de labranzas contrastantes sobre algunas propiedades de un Mollisol de Tres Arroyos bajo distintos usos previos. *Rev. Facultad Ciencias Agrarias-UNCuyo* 44: 85-99.

- Manuel-Navarrete, D; GC Gallopín; M Blanco; M Díaz-Zorita; DO Ferraro; H Herzer; P Lopera; MR Murmis; G Podestá; J Rabinovich; EH Satorre; F Torres & EF Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11: 621-638.
- Novelli, LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>, octubre, 2013.
- Sainju, UM. 2006. Carbon and nitrogen pools in soil aggregates separated by dry and wet sieving methods. *Soil Sci.* 171: 937-949.
- SAS Institute. 2009. SAS OnlineDoc® 9.2. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA. <http://www.sas.com>. Último acceso mayo de 2010.
- Six, J; ET Elliott; K Paustian & JW Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1367-1377.
- Six, J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79: 7-31.
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in pampean agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 35: 3-13.
- Thorntwaite, CW. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.