



SECUESTRO DE CARBONO BAJO DISTINTOS USOS EN HAPLUDOLAS MONO Y POLIGENÉTICAS DE LA PAMPA ARENOSA

Ileana R. Paladino¹; Carina R. Alvarez^{2*}; Diego J. Cosentino³; Gustavo N. Moscatelli[†]

¹Instituto de Suelos INTA-CIRN. Las Cabañas y Nicolás Repetto s/n. 1686. Hurlingham.

²Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes

³Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Cátedra de Edafología y CONICET.

*E-mail: alvarezc@agro.uba.ar.

Recibido: 20/11/2017

Aceptado: 30/03/2018

RESUMEN

El almacenamiento de carbono orgánico en los suelos, fundamental para mitigar el cambio climático, varía según los diferentes usos y propiedades edáficas como la textura. El objetivo del presente trabajo fue cuantificar el efecto de diferentes usos del suelo sobre el secuestro de carbono orgánico total -COT- (0-100 cm) y en sus fracciones (0-20 cm) en Hapludoles mono y poligenéticos. Se seleccionaron dos tipos de uso (agrícola y mixto) en Hapludoles énticos y Hapludoles thapto árgicos. Las profundidades de muestreo fueron: 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. En las dos primeras profundidades se determinó carbono orgánico particulado ($>53\mu\text{m}$, COP) y carbono orgánico asociado a la fracción mineral ($<53\mu\text{m}$, COM) y, en todas, el COT expresado en concentración, en masa y respecto a masa de suelo equivalente para lo cual se determinó la densidad aparente. La concentración de COT en 0-10 cm evidenció cambios por el uso del suelo, principalmente asociados a cambios en el COP, el cual fue mayor en los sistemas mixtos. La concentración de COT en 10-20 cm dependió de la textura, siendo mayor en los Hapludoles thapto árgicos. Si bien se percibieron cambios en la distribución vertical del COT entre usos y tipos de suelo, el secuestro de carbono respecto a masa de suelo equivalente, no presentó diferencias significativas entre los mismos.

Palabras Clave: carbono orgánico total, fracciones de carbono orgánico, sistemas mixtos, agricultura continua.

CARBON SEQUESTRATION UNDER DIFFERENT MANAGERMENTS IN MONO AND POLIGENETIC HAPLUDOLLS FROM THE SANDY PAMPAS

ABSTRACT

Carbon sequestration in soils is crucial to mitigate climate change and varies according to different soil uses and properties such as texture. The objective of the present work was to quantify the effect of different land uses on the total organic carbon sequestration -COT- (0-100 cm) and in its fractions (0-20 cm) in mono and polygenetic Hapludolls. Two types of soil use (agricultural and integrated livestock-agriculture system) were evaluated in two soil types: Entic Hapludoll and Thapto Argic Hapludoll. Sampling depths were 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. In the first two depths particulate organic carbon ($>53\mu\text{m}$, COP) and organic carbon associated with the mineral fraction ($<53\mu\text{m}$, COM), were determined. Total organic carbon was expressed as concentration, as mass and as stock respect to equivalent mass of soil. TOC concentration in 0-10 cm showed changes due to the use of soil, mainly associated with changes in COP, which was higher in integrated livestock-agriculture system. TOC concentration in 10-20 cm depended on texture, being higher in the Thapto Argic Hapludolls. Although there were changes in the vertical distribution of the TOC between uses and types of soil, the sequestration of carbon expressed as equivalent soil mass did not present significant differences between them.

Key words: total organic carbon, organic carbon fractions, integrated livestock-agriculture systems, continuous agriculture.

INTRODUCCIÓN

El suelo constituye el mayor reservorio de carbono orgánico en los ecosistemas terrestres. El contenido de carbono almacenado en los suelos es más del doble que el acumulado en la atmósfera y 2,5 veces mayor que el presente en la biomasa vegetal (Batjes, 1998). Así, el secuestro de carbono en el suelo podría contrarrestar parte de las actuales tasas de liberación de CO₂ (Sandoval Estrada *et al.*, 2003). Las condiciones edafo-climáticas, así como el uso y manejo, regulan el secuestro de carbono en el suelo (Wu *et al.*, 2015).

El balance de carbono en el suelo está controlado por el equilibrio entre el carbono que ingresa a través de la producción vegetal y el que egresa por mineralización (Schlesinger, 1977). La biomasa aérea y radical son las principales fuentes de carbono orgánico (Don *et al.*, 2007). Por lo tanto, el tipo de uso y manejo que se realice en el suelo es un factor fundamental que determina, en gran medida, la cantidad de carbono almacenado. En este sentido, diferentes rotaciones de cultivos, pueden modificar el secuestro de carbono debido a cambios en las condiciones físicas y biológicas del suelo y, en las cantidades y tipos de residuos orgánicos aportados al suelo (Wu *et al.*, 2015). El cambio en la vegetación no sólo puede modificar el aporte de residuos sino también alterar el patrón de distribución de la biomasa radical en profundidad (Jackson *et al.*, 1996). Por otro lado, la biomasa radical puede diferir entre sistemas naturales y pastoreados. El pastoreo modifica la relación entre la biomasa aérea y radical, las cuales son un factor determinante de la distribución vertical del carbono en el suelo (Rueda *et al.*, 2010). Otros factores, como la textura y estructura del suelo, pueden promover una distribución específica de las raíces que aportan carbono dentro del suelo. Cambios abruptos en la textura de los horizontes del suelo pueden producir importantes cambios en la distribución de raíces (Micucci *et al.*, 2006).

El carbono orgánico total del suelo (COT) es una mezcla heterogénea de materiales orgánicos con características y propiedades marcadamente diferentes. Las distintas fracciones del COT, se pueden aislar y cuantificar mediante diferentes métodos de fraccionamiento. Cambardella y Elliott (1992) plantean la separación física por tamaño de partícula del carbono en diferentes fracciones: una lábil, denominado carbono orgánico particulado (COP) (53-2000 µm) y una fracción más recalcitrante, denominado carbono orgánico asociado a las fracciones minerales (COM) (<53 µm) (Diovisalvi *et al.*, 2008). Varios estudios concuerdan en que prácticas de manejo, como las rotaciones con pasturas, incrementan el contenido de COP de los suelos en el corto plazo (Díaz-Zorita *et al.*, 2002; Eiza, 2005). Contrariamente, se ha sugerido que el contenido de COM está menos asociado al manejo y más vinculado con la textura, con tendencia a acumularse en mayor proporción en los suelos con mayor contenido de arcilla (Galantini y Suñer, 2008). La estabilidad del carbono más resistente depende en gran medida del contenido de arcillas y limos (Quiroga y Funaro, 2004). Dichas fracciones minerales son determinantes para establecer la capacidad que tienen los suelos para acumular carbono (Six *et al.*, 2002).

La mayoría de los estudios donde se evalúa el COT se concentran en los primeros 15 cm a 30 cm superficiales y sólo algunos incluyen capas más profundas (Jobbágy y Jackson, 2000; Lorenz y Lal, 2005). Si bien es aceptado que el COT se concentra principalmente en horizontes superficiales, los horizontes más profundos tienen la capacidad de secuestrar grandes cantidades de carbono, bajo la forma de COM (Jobbágy y Jackson, 2000; Lorenz y Lal, 2005). Suelos u horizontes con diferentes texturas tendrán distinta capacidad de secuestro de carbono; los suelos con mayor contenido de arcilla retienen más COT debido a los mecanismos de protección que ejerce dicha fracción mineral sobre el COT (Van Veen y Kuikman, 1990).

Para comparar el efecto de diferentes usos del suelo, los contenidos de COT pueden expresarse de diferentes maneras. Considerando que las diferentes prácticas agronómicas (e.g. implantación de pasturas, labranzas, etc.) afectan en distinto grado la densidad aparente del suelo (DAP), la forma habitual de muestreo a profundidad constante puede conducir a errores en la comparación entre sistemas o suelos. Para evitar este error se ha propuesto la expresión del contenido de COT en masas equivalentes de suelo, lo que eliminaría el efecto diferencial de la DAP porque supone muestreos a diferentes profundidades según cuál sea ésta (Balesdent *et al.*, 2000). Muchos trabajos no incluyen la corrección por DAP (Hassink, 1994; Arrouays *et al.*, 2006), por lo que estos estudios sólo pueden brindar una primera aproximación de la cuantificación del carbono almacenado en los suelos. A nivel nacional y regional existen escasos trabajos que cuantifiquen el contenido de carbono por debajo de los 30 cm y la mayoría de los estudios expresan los valores de COT en concentración (g kg^{-1} o %). Considerando a los suelos como elementos clave en el desarrollo sostenible, resulta importante el conocimiento de su capacidad para atenuar los efectos ambientales derivados del aumento de la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera. El objetivo del presente trabajo fue cuantificar el efecto de distintos usos del suelo sobre el COT (0-100 cm) y sus fracciones (0-20 cm) en Hapludoles mono y poligenéticos con fuertes diferencias texturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y diseño experimental

El estudio se realizó en un establecimiento en la Pampa Arenosa ($35^{\circ} 26' 20'' \text{S}$, $61^{\circ} 43' 20'' \text{O}$). El área posee un clima templado sub-húmedo (Díaz Zorita *et al.*, 2002) con una precipitación media anual de 860 mm (media de 50 años). El paisaje se caracteriza por presentar geformas medanosas que

conforman un conjunto de crestas y depresiones de más de 100 km de largo (Muhs y Zárate, 2001). En las crestas se encuentran Hapludoles énticos (HE), los cuales son suelos monogenéticos desarrollados sobre un sedimento de textura arenosa a franco arenosa. En algunas planicies y bajos no anegables se ubican Hapludoles thapto árgicos (HTA), nombre de uso local que fue propuesto por el INTA para denominar a suelos poligenéticos desarrollados sobre dos materiales superpuestos de distinta edad geológica (SAGYP-INTA, 1989). Históricamente los sistemas de producción de la región comprenden cultivos de granos y, pasturas y verdeos para la actividad ganadera (carne y leche) (Hall *et al.*, 1992). A partir de la década del 90` la superficie destinada al cultivo de granos se incrementó a expensas de las tierras de pastoreo. Esto fue acompañado por la adopción del sistema de agricultura continua bajo siembra directa (SD). En la actualidad, los principales cultivos de la región son: soja (*Glycine max* L. Merrill), maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.), y trigo (*Triticum aestivum* L.), los cuales se realizan compartiendo en algunos planteos la rotación con pasturas (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

Dentro del establecimiento se seleccionaron dos tipos de uso, los cuales fueron evaluados en dos suelos diferentes, siendo los factores de estudio: USO y SUELO. Los usos analizados fueron: 1- agricultura continua (AGRICOLA): se seleccionaron lotes con 13 años de uso agrícola continuo bajo SD (manejo representativo de la región), 2- producción mixta (MIXTO): se seleccionaron lotes de producción mixta, con 9 años de cultivos agrícolas y 4 años de pasturas perennes, también implantadas con SD, que se encontraban en el último año de la fase ganadera de la rotación. El muestreo fue realizado en dicho momento ya que se esperaba la mayor expresión del efecto de las pasturas sobre los suelos, por lo tanto, de no encontrar diferencias en ese momento, no se esperarían diferencias en otros. Los cultivos agrícolas de verano involu-

crados en las rotaciones fueron: soja, maíz y girasol; y de invierno trigo, ya sea en los lotes bajo agricultura continua como en los mixtos. En el sistema mixto las pasturas estaban compuestas por alfalfa (*Medicago sativa* L.) y festuca (*Festuca arundinacea* Schreb) con una clara dominancia de esta última especie. El pastoreo fue rotativo, observándose en la mayoría de los lotes un elevado porcentaje de suelo descubierto y plantas de pequeño porte.

Los suelos evaluados fueron Hapludoles énticos (HE) y Hapludoles thapto árgicos (HTA). Estos suelos integran distintas unidades cartográficas dentro del establecimiento y pueden ser fácilmente reconocidos ya que se sitúan en posiciones topográficas diferentes: los HE se encuentran en las zonas de lomas mientras que los HTA se encuentran en posiciones más bajas. De cada combinación de factores (USO×SUELO) se seleccionaron tres repeticiones, totalizando 12 situaciones o lotes.

Muestreo y determinaciones

El muestreo se realizó durante el otoño-invierno. Primero se realizó el reconocimiento de los suelos dentro de los lotes. Una vez corroborado el tipo de suelo en cada lote, se tomó una muestra compuesta de 3 submuestras tomadas al azar de cada profundidad para cada combinación de USO×SUELO. Las profundidades de muestreo fueron: 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm. Las muestras fueron secadas en estufa a 40°C con circulación de aire forzada y molidas hasta pasar por tamiz de 2 mm de apertura de malla. Posteriormente se determinó textura mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1962) y carbono orgánico oxidable por el método de combustión húmeda de Walkley y Black (Jackson, 1982). Sólo para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm se realizó el fraccionamiento físico de las muestras por tamizado en húmedo (Cambardella y Elliott, 1992) para la determinación de las fracciones orgánicas. Para ello, se utilizó hexametáfosfato de

sodio (5 g L⁻¹) y se agitaron las muestras durante 15 horas en agitador rotacional (50 rpm). Luego las mismas fueron tamizadas en húmedo por tamiz de 53 µm de apertura de malla, recuperando la fracción más fina (<53 µm). Dicha fracción fue secada a 60°C, pesada y molida en mortero para la posterior determinación de la fracción <53 µm (COM). La determinación de carbono orgánico oxidable se realizó en la masa de suelo total (sin fraccionar) (COT) y en la fracción COM. Los niveles de COP (fracción de 53-2000 µm) se determinaron por diferencia entre COT y COM (Eiza, 2005).

En cada repetición se tomaron 3 muestras de 0-10 y de 10-20 cm para determinar la DAP por el método del cilindro (volumen del cilindro: 141,37 cm³) (Klute, 1986). Las determinaciones de DAP a mayor profundidad, sólo se realizaron en una calicata de cada situación. La baja variabilidad de la DAP en profundidad comparada con el COT permitió reducir el número de muestreos para esta propiedad (Don *et al.*, 2007). Asimismo, es de esperar que la DAP no se vea afectada en gran medida por el uso por debajo de los 40 cm. Por lo tanto, a partir de dicha profundidad, los datos se promediaron entre usos obteniendo un valor por tipo de suelo para cada intervalo de profundidad. El cilindro se introdujo en la zona central de cada profundidad que en todos los casos se encontró dentro de un horizonte concreto y no entre dos horizontes. La muestra extraída fue secada a 105°C durante 48 horas aproximadamente, hasta peso constante. Los valores de DAP se utilizaron para expresar el contenido de COT de cada profundidad en Mg C ha⁻¹.

Asimismo, se calculó el COT para igual masa de suelo (masa equivalente) hasta un metro de profundidad, para cada combinación USO×SUELO. El cálculo se realizó según (Sisti *et al.*, 2004):

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[M_{Tn} - \left(\sum_{i=1}^n M_{Ti} - \sum_{i=1}^n M_{Si} \right) \right] C_{Tn}$$

donde, C_s es el stock de carbono total (Mg C ha^{-1}) en el suelo a una profundidad donde la masa de suelo sea la misma que aquella observada en el perfil utilizado como referencia (perfil de mínima masa de suelo = $13627,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ que se correspondió con el tratamiento MIXTO del suelo HT),

$$\sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti}$$

es la suma del contenido de carbono total (Mg C ha^{-1}) desde la profundidad de muestreo 1 (superficial) hasta la profundidad de muestreo "n - 1" (penúltima) del perfil de suelo del tratamiento, " M_{Tn} " es la masa de suelo en la última profundidad de muestreo del suelo del tratamiento,

$$\sum_{i=1}^n M_{Ti}$$

es la suma de la masa de suelo (Mg ha^{-1}) desde la profundidad de muestreo 1 (superficial) a "n" (última profundidad de muestreo) en el perfil de suelo del tratamiento,

$$\sum_{i=1}^n M_{Si}$$

es la suma de la masa del suelo (Mg ha^{-1}) desde la profundidad de muestreo 1 (superficial) a la "n" (última profundidad de muestreo) del perfil de suelo de referencia, y " C_{Tn} " es la concentración de carbono de la última profundidad de muestreo del suelo del tratamiento (Mg C Mg^{-1} suelo).

Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis de la varianza y la diferencia de medias a través del Test de Tukey al 5 % (Neter y Wasserman, 1974). Se analizó el efecto de los factores independientes y su interacción (USO \times SUELO) para cada profundidad. Se utilizó el programa

estadístico Infostat versión 1.1 (InfoStat, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables estudiadas no presentaron interacción entre factores (USO \times SUELO) ($P > 0,05$) y, por lo tanto, se analizaron en forma independiente. El COP (Cuadro 1) y el COT (Cuadro 2), expresados en concentración (gC kg^{-1}), mostraron diferencias significativas en la profundidad de 0-10 cm según el USO, siendo mayor en el sistema MIXTO. Por otro lado, el COM no presentó diferencias entre usos para ninguna de las profundidades evaluadas. Esto indica que el aporte de carbono de las pasturas en los planteos mixtos, produjo modificaciones cualitativas, además de cuantitativas en el COT, debido a un incremento de la fracción lábil (COP) en los primeros centímetros del suelo. Los resultados encontrados en concentración demuestran la ventaja del uso de sistemas mixtos sobre los planteos de agricultura continua en relación a la concentración de COT y su fracción más lábil (COP). En forma coincidente, Eiza (2005) concluyó que las rotaciones cortas de agricultura-pastura mejoran el COP y el COT. Esto se debe a que bajo pasturas hay una elevada densidad de raíces en los primeros centímetros del suelo y un gran aporte de restos de la biomasa aérea, lo que favorece la acumulación superficial de materia orgánica (Puget y Lal, 2005). Esta mayor concentración de COP en superficie conduce, generalmente, a una mayor estabilidad estructural (Alvarez *et al.*, 2012). Asimismo, en los sistemas mixtos generalmente el COP disminuye marcadamente con los años de agricultura y aumenta durante el ciclo de las pasturas, mientras que la fracción estable (COM) no sufre cambios frente a variaciones del manejo (Eiza, 2005).

Al analizar el factor SUELO se observó que el COT presentó diferencias significativas de 10-20 cm, siendo mayor en los suelos HTA de textura franco limosa, que en los HE de tex-

tura franco arenosa (Cuadro 2). Al igual que el COT, el COM presentó diferencias significativas entre suelos, siendo mayores en los HTA de 0-10 cm y de 10-20 cm (Cuadro 1). Contrariamente, el COP no mostró diferencias significativas entre suelos en ninguna de las profundidades evaluadas. Es decir que el tipo

de suelo incidió sobre el COT, debido a incrementos en el COM asociados a los suelos de textura más fina.

Cuando se analizó el COT, expresado en concentración hasta un metro de profundidad, se observó que, en todas las situaciones evaluadas, el 40% o más del carbono se en-

Cuadro 1: Concentración de carbono orgánico particulado (COP), carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM), contenido de arena y arcilla en los diferentes tratamientos y profundidades.

		0-10 cm			
		COP	COM	ARENA	ARCILLA
		(g kg ⁻¹)			
USOS	AGRICOLA	1,39 B	15,83 A	422 A	108 A
	MIXTO	3,60 A	17,62 A	427 A	118 A
SUELOS	HE	2,40a	15,02 b	534 a	90 b
	HTA	2,60 a	18,45 a	316 b	135 a
		10-20 cm			
		COP	COM	ARENA	ARCILLA
		(g kg ⁻¹)			
USOS	AGRICOLA	1,2 A	14,60 A	454 A	115 A
	MIXTO	1,4 A	16,16 A	429 A	130 A
SUELOS	HE	1,7 a	13,33 b	554 a	100 b
	HTA	0,9 a	17,42 a	329 b	146 a

AGRICOLA: Agricultura continua; MIXTO: producción mixta; HE: Hapludoles énticos; HTA: Hapludoles thapto árgicos. Letras distintas mayúsculas indican diferencias significativas entre usos y minúsculas entre suelos (P<0,05).

Cuadro 2: Contenido de carbono orgánico total (COT) en profundidad expresado en concentración (g kg⁻¹) y en masa (t ha⁻¹) para distintos usos y suelos.

Profundidad	COT (g kg ⁻¹)				COT (t ha ⁻¹)			
	USOS		SUELOS		USOS		SUELOS	
	AGRICOLA	MIXTO	HE	HTA	AGRICOLA	MIXTO	HE	HTA
0-10 cm	17,2 B	21,2 A	17,5 a	21,0 a	23,48 A	27,97 A	24,21 a	27,24 a
10-20 cm	15,8 A	17,5 A	15,0 b	17,5 a	22,33 A	23,63 A	21,49 a	24,46 a
20-40 cm	12,0 A	10,3 A	12,4 a	9,9 a	29,25 A	28,7 A	32,6 a	25,35 b
40-60 cm	6,6 A	4,2 B	6,8 a	4,0 b	16,95 A	12,2 A	16,92 a	12,23 a
60-80 cm	4,2 A	2,9 A	4,3 a	2,9 a	10,02 A	8,23 A	9,49 a	8,76 a
80-100 cm	2,6 A	2,1 A	2,4 a	2,3 a	7,17 A	5,89 A	6,8 a	6,26 a

Agricultura continua (AGRICOLA) y producción mixta (MIXTO) y en distintos suelos; Hapludoles énticos (HE) y Hapludoles thapto árgicos (HTA). Diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas entre usos y minúsculas entre suelos, dentro de cada profundidad (P<0,05).

contró en los primeros 20 cm (Cuadro 2). En forma coincidente, Jobbágy y Jackson (2000) evaluaron la distribución relativa del carbono en el primer metro de profundidad en distintos tipos funcionales de vegetación y encontraron valores cercanos al 40% en ecosistemas equivalentes al aquí estudiado. Sin embargo, las concentraciones de carbono difirieron tanto entre usos como entre suelos en algunas profundidades. Los suelos bajo planteos mixtos presentaron concentraciones de COT significativamente superiores en 0-10 cm. Los suelos bajo agricultura continua en cambio, mostraron un perfil de carbono más uniforme y en la profundidad de 40-60 cm las concentraciones de COT se tornaron significativamente mayores que en los planteos mixtos. Los suelos HTA tienen mayor contenido de COT que los HE en los primeros 20 cm, presentando diferencias significativas solo en 10-20 cm. Contrariamente a mayor profundidad las diferencias se invierten, presentando los suelos HE concentraciones de COT significativamente mayores que los HTA en la profundidad de 40-60 cm.

Cabe mencionar las diferencias que existen en las DAP entre suelos a lo largo de todo el perfil y las mismas inciden en los resultados. Cuando se analiza el COT expresado en $t\ ha^{-1}$ desaparecen algunas diferencias y cambia la significancia estadística. Al analizar el efecto de los distintos usos de suelos sobre el carbono almacenado, expresado en ($t\ ha^{-1}$), no se observaron diferencias significativas en ninguna de las capas analizadas (Cuadro 2).

Asimismo, el mayor contenido de COT ($t\ ha^{-1}$) en los HTA en los primeros 20 cm no fue significativamente diferente al almacenado en los HE. Contrariamente, se observaron diferencias significativas en la capa de 20-40 cm presentando los suelos HE mayor cantidad de COT acumulado. Más allá de las diferencias parciales encontradas en cada profundidad, el contenido de COT acumulado hasta el metro de profundidad calculado para una masa

equivalente de suelo (COT Me), no presentó diferencias significativas entre usos ni entre suelos. Los resultados variaron entre $105\ Mg\ C\ ha^{-1}$ y $117\ Mg\ C\ ha^{-1}$ (Figura 1).

El contenido de COT y su distribución vertical en el perfil del suelo, es particularmente sensible al desarrollo de las raíces en las praderas ya que dichos sistemas poseen, en general, una relación raíz/tallo mayor que 3 (Jackson *et al.*, 1996). Sin embargo, el manejo de las pasturas puede modificar esta relación, así como a las estructuras y procesos radicales (Johnson y Matchett, 2001). La producción primaria y la intensidad del pastoreo pueden ser factores determinantes de la distribución vertical de la biomasa subterránea (Rueda *et al.*, 2010). En el presente estudio, el pastoreo pudo haber inducido a una alta concentración de raíces en superficie, aumentando el contenido de COT en capas superficiales y disminuyendo en profundidad. Sin embargo, son necesarios estudios más específicos para comprender el comportamiento radical de las pasturas bajo diferentes situaciones de pastoreo.

Por otro lado, Noellemeyer *et al.* (2006) al comparar la estratificación del carbono en suelos de la Pampa Semiárida, concluyeron que las variaciones en los contenidos de COT y sus fracciones en superficie están más influenciados por la cantidad de carbono que ingresa al suelo, mientras que el carbono en subsuperficie es más dependiente de los efectos de la textura y de la estabilización de los compuestos orgánicos. Estas conclusiones coinciden con lo observado en el presente trabajo donde el tipo de suelo incidió sobre el COT en la profundidad de 10-20 cm debido a incrementos en el COM en los suelos de textura más fina (HTA). Esta importancia, no sólo se relaciona con el efecto de la textura como condicionante de la disponibilidad de agua para la actividad biológica, sino también con el efecto protector o estabilizador que tiene la fracción mineral fina sobre los compuestos orgánicos más estables (Neufeld *et al.*, 2002).

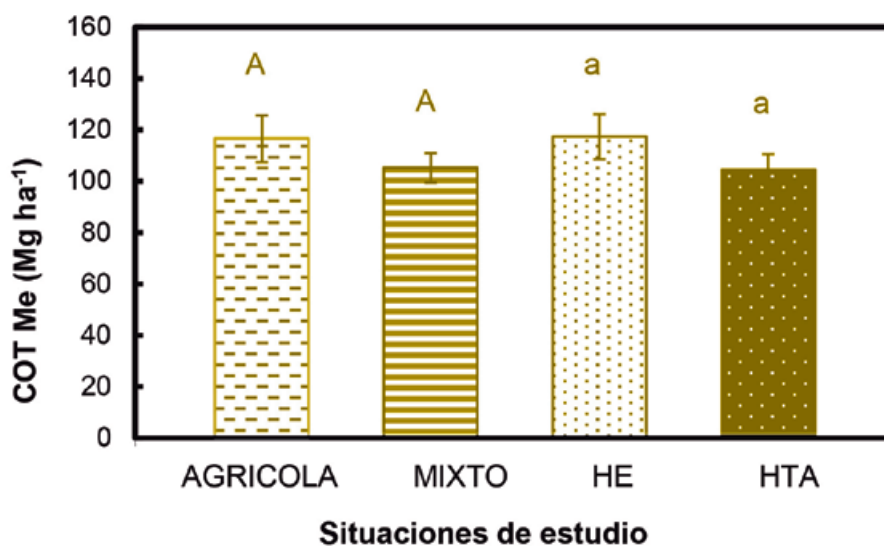


Figura 2: Carbono orgánico total almacenado hasta un metro de profundidad calculado en masa equivalente de suelo (COT Me). AGRICOLA: Agricultura continua MIXTO: producción mixta; HE: Hapludoles énticos; HTA: Hapludoles thapto árgicos. Diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas entre usos y minúsculas entre suelos ($P < 0,05$)

Sin embargo, en el estrato 20-40 cm en los HTA se observa importante disminución del COT, tanto expresado en concentración como en masa, comparado con los HE. La arquitectura radical del cultivo puede modificarse por la presencia de impedancias mecánicas que dificulten el crecimiento de las raíces en profundidad (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). En general, la presencia de un horizonte subsuperficial con un incremento abrupto en la DAP limita el crecimiento de las raíces y puede generar cambios en las concentraciones de COT (Don *et al.*, 2007). Varios trabajos anteriores en la región bajo estudio, hacen referencia al efecto del horizonte 2Bt de los suelos HTA sobre el desarrollo vegetal (Díaz-Zorita, 1997; Díaz-Zorita *et al.*, 2002). Imbellone y Giménez (1998) encontraron en suelos del área la presencia de fragipanes que son muy duros cuando están secos y poseen escaso contenido de materia orgánica. Los HTA aquí estudiados, presentaron valores de DAP que llegaron a valores de 1,6 g cm³ en el 2Bt, mientras que en los HE a igual profundidad se observaron valores de 1,38 g cm³. Este valor medio de 1,6 g cm³ que supera el umbral crítico para el crecimiento radical (USDA, 1999) puede haber difi-

cultado el crecimiento radical y, consecuentemente, generar un ingreso de carbono restringido en profundidad. Desde el punto de vista ambiental y su potencial para atenuar el cambio climático, el secuestro de carbono orgánico expresado en masa equivalente, no presentó diferencias entre suelos ni manejos.

CONCLUSIONES

Los stocks de carbono en 0-100 cm, calculado en masa equivalente de suelo, no reflejaron cambios por los diferentes usos y tipos de suelos. Si bien se esperaba un incremento en el secuestro de COT en los HTA debido al mayor contenido de material fino en el horizonte 2Bt, las características físico-mecánicas desfavorables para el crecimiento radical de este horizonte primaron por sobre su capacidad protectora del carbono al limitar el ingreso de material orgánico en profundidad. El uso solo produjo cambios en la distribución vertical del COT y en la concentración. Probablemente, la ausencia de diferencias entre usos se relacione en parte, con que el secuestro de carbono haya sido afectado en mayor medida por el

excesivo pastoreo que por el tipo de uso del suelo. Sin embargo, son necesarios estudios más específicos para comprender el comportamiento radical de las pasturas bajo diferentes situaciones de pastoreo. Los resultados obtenidos contribuyen a la comprensión de la capacidad de captación de carbono en el suelo según el suelo y uso del mismo y sus implicancias sobre el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-CASTELAR) y a la Universidad de Buenos Aires por haber facilitado el apoyo económico (UBACYT Programación 2014-2017 20020130100274BA) e infraestructura para realizar el presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, C.R.; P.L. Fernández & M.A. Taboada. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 30: 173-178.
- Arrouays, D.; N. Saby; C. Walter; B. Lemercier and C. Schvartz. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*, 22 (1): 48-51.
- Balesdent, J.; C. Chenu and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53: 215-230.
- Batjes, N.H. 1998. Mitigation of atmospheric CO₂ concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biology and Fertility of Soils*, 27: 230-235.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method for making particle size analysis de soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
- Cambardella, M.R. and E.T. Elliott. 1992. Particulate organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 777-783.
- Díaz-Zorita, M. 1997. Propiedades edáficas y sostenibilidad de los sistemas de producción de la región noroeste bonaerense. *Publicación Técnica* N° 21. EEA INTA Gral. Villegas, Buenos Aires, Argentina. INTA, 23p.
- Díaz-Zorita, M.; G.A. Duarte and J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65: 1-18.
- Diovisalvi, N.V.; G.A. Studdert; G.F. Domínguez y M.J. Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 26: 1-11.
- Don, A.; J. Schumacher; M. Scherer-Lorenzen; T. Scholten and E.D. Schulze. 2007. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites — Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141:272-282.
- Eiza, M.J. 2005. Dinámica de la materia orgánica particulada bajo distintas rotaciones y sistemas de labranza. Tesis de Maestría. Área de Postgrado en Producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina. 71p.
- Galantini, J.A. y L. Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, XXV. (1): 41-55.
- Hall, A.J.; C.M. Rebella; C.M. Ghersa and J.P. Culot. 1992. Field crop systems of the Pampas. Elsevier, Ámsterdam. Holanda. En: CJ Pearson (Ed.). *Field Crop Ecosystems*: 413-450.
- Hassink, J. 1994. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in Dutch grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 26: 1573-1581.
- Imbellone, P.A. and J.E. Giménez. 1998. Parent materials, buried soils and fragipans in northwestern Buenos Aires province, Argentina. *Quaternary International*, 51/52: 115-126.
- InfoStat, 2002. InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. 1ra Ed. Córdoba, Argentina. Editorial Brujas.
- Jackson, L.M. 1982. Análisis químico de suelos. 4ta Ed. Barcelona. España. Editorial Omega. 662 p.

- Jackson, R.B.; J. Canadell; J. Ehleringer; H.A. Mooney; O.E. Sala and E.D. Schulze. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108: 389-411.
- Jobbágy, E.G. and R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10: 423-436.
- Johnson, L.C. and J.R. Matchett. 2001. Fire and grazing regulate belowground processes in tall grass prairie. *Ecology*, 82: 3377-3389.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. 2nd Ed. Madison, Wisconsin, USA. En: Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Nº 9.
- Lorenz, K and R. Lal. 2005. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 88: 35-66.
- Micucci, F.G. and M. A. Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max* Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 86: 152-162.
- Muhs, D.R. and M. Zárate, 2001. Late Quaternary eolian records of the Americas and their paleoclimatic significance. San Diego, USA. En Markgraf, V. (ed.). *Interhemispheric climate linkages* Academic Press, 12: 183-211.
- Neter, J. and W. Wasserman. 1974. *Applied Linear Statistical Models*. Homewood: Richard D. Irwin. 842p.
- Neufeld, H.; W.S.D. Reck and M. Ayarza. 2002. Texture and land-use effects on soil organic matter in Cerrado Oxisols, Central Brazil. *Geoderma*, 107: 151-164.
- Noellemeyer, E.; A.R. Quiroga and D. Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 65: 142-155.
- Puget, P. and R. Lal. 2005. Soil organic carbon and nitrogen in Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil and Tillage Research*, 80: 201-213.
- Quiroga, A. y D. Funaro. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. En: *Actas de XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos, Argentina. En CD.
- Rueda, M.; S Rebollo and M.A. Rodríguez. 2010. Habitat productivity influences root mass vertical distribution in grazed Mediterranean ecosystems. *Acta Oecologica*, 36: 377-382.
- SAGYP-INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Proyecto PNUD/ARG/85/019.
- Sandoval Estrada, M.; N. Stolpe Lau; E. Zagal Venegas; M. Mardones Flores y J. Junod Montano. 2003. El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *Theoria*, vol 12. Universidad de Bío-Bío, Chillán, Chile.
- Schlesinger, W.H. 1977. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8: 51-81.
- Sisti, C.P.J., H.P. dos Santos, R. Kohmann, B.J.R. Alves, S. Urquiaga and R.M. Boddey. 2004. Changes in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 76: 39-58.
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul, and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241: 155-176.
- USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf.
- Van Veen, J.A and P.J. Kuikman. 1990. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry*, 11: 213-233.
- Wu, Y., S. Liu and Z. Tan. 2015. Quantitative attribution of major driving forces on soil organic carbon dynamics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7: 21-34.