

COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD DE SUELOS AGRÍCOLAS Y NATURALES BASADOS EN EL CARBONO ORGÁNICO

MATÍAS EZEQUIEL DUVAL^{1-3*}; JUAN ALBERTO GALANTINI²; JUAN MANUEL MARTÍNEZ¹⁻³
& JULIO OSVALDO IGLESIAS³

Recibido: 13-01-16

Recibido con revisiones: 28-04-16

Aceptado: 01-05-16

RESUMEN

La literatura exhibe un gran número de índices de calidad del suelo, muchos de ellos basados en el carbono orgánico y sus fracciones, para una gran variedad de suelos naturales y cultivados. En cuatro sitios de la Pampa argentina se evaluó el efecto de la secuencia e intensidad de las rotaciones sobre diferentes fracciones orgánicas en suelos bajo siembra directa, y se analizó la sensibilidad de algunos índices de calidad de suelos para distinguir entre prácticas de manejo. En cada sitio se muestrearon dos escenarios agrícolas distintos en términos de rotación de cultivos, fertilización y uso de agroquímicos (Manejo intensivo diversificado y representativo regional, MID y MRR, respectivamente) y un ambiente sin disturbio, natural (ASD) adyacente a los sitios agrícolas como tratamiento control. El manejo agrícola con una alta frecuencia o monocultivo de soja generó disminuciones del COT de aproximadamente 30% en 0-10 cm, principalmente en las fracciones lábiles (CO particulado 105-2000 μm y CO particulado 53-105 μm) donde se hallaron contenidos 50% y 40% menores que en ASD. Estas situaciones presentaron los peores valores en la mayoría de los índices que incluyen las fracciones lábiles. Sin embargo, la magnitud de los cambios observados en estos índices fueron menores en relación con los asociados al COT. El índice de estratificación del COT (0-5-5:20 cm) reflejó diferencias entre tratamientos, el cual varió desde 2,0 (ASD) hasta 1,5 (MRR). El aporte diferencial de carbono al suelo entre tratamientos se reflejó en el índice de reserva de carbono (IRC), considerándose un índice sencillo de medir y sensible para detectar diferencias entre manejos agrícolas. Los resultados obtenidos ponen en evidencia la importancia del COT como indicador universal y la necesidad de tener en cuenta aspectos locales, sean de manejo y/o estacionales, para la interpretación de los índices asociados a las fracciones más lábiles.

Palabras clave. Índice de estratificación; frecuencia soja; fracciones lábiles.

COMPARISON BETWEEN AGRICULTURAL AND NATURAL QUALITY INDICES BASED ON ORGANIC CARBON

ABSTRACT

Literature exhibit a great number of soil quality indices, many of them based on organic carbon and its fractions, for a wide variety of natural and cultivated soils. In four sites located in the Argentine Pampa region, the effect of the sequence and intensity of crop rotations on different organic carbon fractions in no-tilled soils, and the sensitivity of some quality indices to management practices were evaluated. At each site, three treatments were identified: two different agricultural scenarios in terms of crop rotation, fertilizers and use of agrochemicals (diversified intensive and regional representative managements, MID and MRR, respectively) and an undisturbed environment, natural (ASD) adjacent to agricultural sites as control treatment. Agricultural management with a high frequency or soybean monoculture caused COT decreases of about 30% in 0-10 cm depth. These decreases mainly affected labile fractions (particulate CO 105-2000 μm and particulate CO 53-105 μm) which decreased by 50% and 40% with respect an ASD field. These situations present the worst values in the most indices including labile fractions. However, the magnitude of the observed changes in these indices were lower in relation to those associated with the COT. The COT stratification index (0-5:5-20 cm) showed differences between treatments, which ranged from 2.0 (ASD) to 1.5 (MRR). The differential carbon input to the soil between treatments was reflected in the carbon pool index (IRC), considering a simple index to measure and sensitive to detect differences between agricultural managements. The results highlight the importance of the COT as universal indicator and the need to take into account local issues either management and/or seasonal, for the interpretation of the indices associated with the most labile fractions.

Key words. Stratification index; soybean frequency; labile fractions.

¹ CERZOS-CONICET.

² Comisión de Investigaciones Científicas (CIC); CERZOS-Dpto. Agronomía (UNS).

³ Departamento de Agronomía, UNS

* Autor de contacto: mduval@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En el presente siglo, la degradación del suelo constituye uno de los principales problemas ambientales que afecta a la humanidad, impactando en la capacidad productiva y en la calidad de los recursos naturales (Reicosky, 2007). En la Argentina, actualmente, la mayor parte de los cultivos se implantan bajo el sistema de siembra directa (Derpsch *et al.*, 2010). A su vez, en los últimos años, los sistemas de cultivos extensivos están dominados principalmente por el cultivo de soja (*Glycine max* [L.] Merr.), sobre todo como una única cosecha anual (Caviglia *et al.*, 2011), lo cual puede repercutir negativamente sobre la calidad del suelo. Existen evidencias que una alta proporción de soja en la rotación, asociado con una escasa entrada de residuos con baja relación C:N, pueden afectar los contenidos de carbono orgánico total del suelo (COT) (Wright & Hons, 2005). Por otra parte, la intensificación sostenible de cultivos aumenta la entrada de residuos al suelo (Caviglia *et al.*, 2011), mejorando el almacenamiento de COT (Luo *et al.*, 2010), debido a una actividad más continua de las raíces y los microorganismos del suelo en relación a los sistemas bajo barbecho frecuente (Álvaro-Fuentes *et al.*, 2008).

El COT juega un papel clave en los procesos del suelo ya que está estrechamente asociado con una amplia variedad de propiedades químicas, físicas y biológicas (Smith *et al.*, 2000). El COT en los suelos agrícolas tiene un tiempo de ciclado de décadas o siglos, por tanto, los cambios debidos a las prácticas de manejo y al uso del suelo son difíciles de detectar (Purakayastha *et al.*, 2008). Sin embargo, fracciones orgánicas lábiles como el carbono orgánico particulado (COP) se han utilizado en lugar del COT como indicadores sensibles de los cambios en la calidad del suelo (Bayer *et al.*, 2002; Eiza *et al.*, 2005). Los cambios en las prácticas de manejo o uso del suelo también pueden alterar las propiedades químicas de las sustancias húmicas del suelo (Moraes *et al.*, 2011). Por ejemplo, se ha observado que el contenido de ácidos fúlvicos está correlacionado con los residuos recientemente incorporados al suelo (Zalba & Quiroga, 1999), considerándose una fracción susceptible a cambios debidos a las prácticas de manejo (Rivarolla & Rosell, 2008). Otros autores sugieren a los ácidos húmicos como indicador de sostenibilidad en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos en siembra directa continua (Abril *et al.*, 2013). Por lo tanto, no se conoce con exactitud cuáles fracciones orgánicas son más afectadas por el manejo del suelo en la Región Pampeana.

También, se han propuesto varios índices y relaciones basados en el COT para evaluar la calidad del suelo (Blair *et al.*, 1995; Vezzani & Mielniczuk, 2009). Estos índices son indicadores tempranos y eficientes de cambios en la calidad del suelo dados por el sistema de producción (Bayer *et al.*, 2009), incluso antes que cambien los contenidos de COT. Entre ellos se encuentran el índice de manejo del carbono (IMC), el índice de labilidad (IL) y el índice de reserva de carbono (IRC) originalmente propuestos por Blair *et al.* (1995), donde relaciona los niveles de COT y su labilidad. Estos índices pueden proporcionar un parámetro útil para evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas de producción o bajo diferentes prácticas de manejo (Verma & Sharma, 2007).

La estratificación del COT es otro índice que relaciona sus contenidos entre dos capas de suelo diferentes. Por lo general, la primera es la capa superficial del suelo, que está fuertemente influenciada por el manejo (labranza, sistemas de cultivo, fertilización), mientras que la segunda se ve menos afectada por las prácticas de manejo (Franz-luebbbers, 2002). Este autor propone la estratificación del COT como un índice útil para evaluar la calidad del suelo, dado que el COT en superficie es esencial para el control de la erosión, favorecer la infiltración y la conservación de nutrientes. Dicho índice ha sido probado con éxito para comparar diferentes manejos en suelos de la Región Pampeana (Álvarez *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2014). Otros autores proponen las relaciones entre COT y COP, o con la fracción fina del suelo (limo + arcilla) como indicador del efecto de las prácticas agrícolas (Quiroga *et al.*, 1996; Noellemeyer *et al.*, 2006).

Para caracterizar sistemas con diferentes intensidades en el uso del suelo, existen diversos índices que incluyen la fracción de tiempo anual con cubierta vegetal o la frecuencia de un cultivo en particular en la secuencia de cultivos (Novelli *et al.*, 2011). En consecuencia, los pastizales naturales pueden caracterizarse por altos índices de intensificación en el uso del suelo en comparación con las secuencias con largos períodos de barbecho, basados en cultivos anuales (Sasal *et al.*, 2010). Estos índices sintetizan la información de las características de los cultivos, como la calidad y la cantidad de rastrojos aportados y el tipo y distribución de su sistema radical (Sasal *et al.*, 2006).

Existe un gran número de trabajos que destacan a diferentes fracciones orgánicas como indicadores sensibles sobre diversos manejos agrícolas en siembra directa (Duval *et al.*, 2013; Galantini *et al.*, 2014; Benbi *et al.*, 2015). Estas

fracciones orgánicas también son sensibles a las variaciones meteorológicas y edáficas específicas de cada sitio (Duvál *et al.*, 2016). En cambio, el uso de índices, que consideran las variaciones de calidad del suelo de una manera holística, puede ser más conveniente para evaluar los cambios en la calidad del suelo bajo diferentes sistemas de manejo y condiciones ambientales. Los objetivos del trabajo fueron evaluar el efecto de la secuencia e intensidad de las rotaciones sobre diferentes fracciones orgánicas en suelos bajo siembra directa y, por otro lado, aplicar algunos índices de calidad de suelo utilizados en la bibliografía para evaluar su sensibilidad frente a los cambios que se producen en el suelo por las prácticas de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios

Se seleccionaron cuatro sitios de estudio con historia documentada bajo siembra directa, abarcando diferentes tipos de suelo ubicados en: Bengolea y Monte Buey (Córdoba), Pergamino (Buenos Aires) y Viale (Entre Ríos). Estos sitios corresponden a situaciones seleccionadas por el proyecto BIOS-PAS, cuyo objetivo a largo plazo es la identificación de indicadores de sustentabilidad bajo siembra directa (Wall, 2011). Las condiciones climáticas y edáficas más relevantes de cada sitio se muestran en la Tabla 1.

Tratamientos

En cada sitio se seleccionaron lotes con diferentes manejos en siembra directa, los que fueron elegidos de acuerdo a

los criterios de agricultura certificada propuestos por AAPRESID (<http://www.aapresid.org.ar/ac/buenas-practicas-agricolas>):

- Manejo intensivo y diversificado (MID), consistente en manejo agrícola basado en rotación de cultivos de invierno, como trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.), y cultivos de verano como soja (*Glycine max* [L.] Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). En ciertas ocasiones incluyen cultivos de cobertura, como vicia (*Vicia sativa* L.) y triticale (*Triticosecale* Wittmack), reposición de nutrientes, minimización del uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas).
- Manejo representativo regional (MRR): consistente en manejo agrícola con mínima rotación o monocultivo de soja, mínima reposición de nutrientes, y elevado uso de agroquímicos (herbicidas, insecticidas y fungicidas).
- Ambiente sin disturbio, natural (ASD): consistente en situaciones sin uso antrópico, tratamiento de referencia caracterizado por pastizales naturales donde, posiblemente, hayan alcanzado los equilibrios entre las diferentes fracciones orgánicas por ello, los sectores seleccionados presentaban más de 30 años sin ningún tipo de disturbio.

Los lotes utilizados en este trabajo han sido manejados bajo siembra directa durante los 7 años previos al momento de muestreo. La principal diferencia entre las situaciones MID y MRR fue la diferente proporción de soja, en contraposición con la de maíz, trigo y sorgo en la rotación. Es así que en el período agrícola 2004-2011, la proporción del cultivo de soja fue del 79% y 58% en MRR y MID, respectivamente (Tabla 2). Otras

Tabla 1. Características edáficas y climáticas de los sitios.

Table 1. Edaphic and climatic conditions of the sites.

Sitio	Localización	Clima	¹ TMA	² PMA	Arena	Limo	Arcilla	Clasificación
			(°C)	(mm)				
Bengolea	33°01'32,9"S 63°37'36,4"O	Templado Subhúmedo	17	870	575	295	130	Haplustol entico
Monte Buey	32°58'17,0"S 62°27'02,4"O	Templado Subhúmedo	17	910	191	575	234	Argiudol típico
Pergamino	33°56'42,6"S 60°33'35,6"O	Templado Húmedo	16	1.000	180	605	215	Argiudol típico
Viale	31°52'42,2"S 59°41'16,2"O	Templado Húmedo	18	1.160	27	572	401	Hapludert típico

¹TMA: Temperatura media anual. ²PMA: Precipitación media anual.

¹TMA: Mean annual temperature. ²PMA: Mean annual rainfall.

Tabla 2. Secuencia de cultivos y aportes de carbono (parte aérea + raíces) durante el período 2004-2011 en los lotes agrícolas.

Table 2. Crop sequence and carbon inputs (shoot + root) period 2004-2011 in agricultural fields.

Sitio	Tratamiento	Trigo/cebada ¹	Maíz/sorgo ¹	Soja ¹	CC ¹	C (Mg ha ⁻¹)
Bengolea	MID	33	25	33	8	44,9
	MRR	22	11	56	0	22,1
Monte Buey	MID	23	23	31	23	51,0
	MRR	22	11	67	0	28,4
Pergamino	MID	30	20	50	0	34,3
	MRR	0	0	100	0	19,9
Viale	MID	20	30	40	10	32,1
	MRR	22	22	56	0	22,8
Promedio	MID	27	25	39	10	40,6
	MRR	17	11	69	0	23,3

CC: Cultivos de cobertura. 1(Nº de cultivos de una especie)/(Nº total de cultivos)x100.

CC: cover crop. (Nº crop species)/(Nº total crops)x100.

prácticas agronómicas que distinguían entre manejos fue la presencia de cultivos de cobertura y la cantidad de herbicidas utilizados. La información sobre secuencias de cultivos y rendimientos en cada lote se encuentra detallado en Figuerola *et al.* (2012).

Muestreo y análisis

En septiembre 2011, en cada combinación sitio-tratamiento se tomaron muestras de suelo sin disturbar cada 5 cm con cilindros de acero (90,5 cm³) hasta los 20 cm de profundidad sobre tres parcelas (réplicas) de 50 m² homogéneas y uniformes. La densidad aparente se determinó por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986) a dichas profundidades.

Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo

Luego de secadas al aire y tamizadas por 2 mm, se realizó un fraccionamiento físico y químico con el propósito de determinar diferentes fracciones orgánicas (humificadas y no humificadas), por tamizado en húmedo del suelo (Cambardella & Elliott, 1992; Duval *et al.*, 2013). El tamizado se realizó mediante dos tamices de 53 µm y 105 µm de apertura de malla obteniéndose tres fracciones: fracción gruesa (FG, 105-2000 µm) en la que se encuentra materia orgánica particulada gruesa y las arenas medias y gruesas; fracción media (FM, 53-105 µm) constituida por materia orgánica particulada más transformada y las arenas muy finas, y la fracción fina (FF, < 53 µm) la cual contiene la materia orgánica asociada a la fracción mineral más limo y arcilla.

El carbono en el suelo entero y en las diferentes fracciones fueron determinados por combustión seca (LECO, St. Joseph, MI):

$$COP_g (\%) = (\%C \text{ fracción gruesa} * \% \text{fracción gruesa}) / 100,$$

$$COP_f (\%) = (\%C \text{ fracción fina} * \% \text{fracción fina}) / 100$$

El fraccionamiento químico se realizó siguiendo el método propuesto por la Sociedad Internacional de Sustancias Húmicas (IHSS) (Swift, 1996) para obtener huminas (H), ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF), sobre la base de la solubilidad en ácido y álcali. Se pesó 1 g de cada muestra de suelo tamizo por 53 µm (fracción fina), las cuales se sometieron a un pretratamiento ácido (pH=1-2) con HCl 0,1 M (1:10 relación suelo:ácido) utilizando un par de gotas de HCl 12 M para alcanzar los valores de pH, a continuación, se agitó durante 1 h en un agitador rotatorio. Luego de centrifugar a 2500 rpm durante 15 min, se recolectó el sobrenadante, denominado AF en extracto ácido. El precipitado se trató con 0,1 M de NaOH (1:10 relación suelo:extractante), agitando durante 16 h (toda la noche) en agitador rotatorio. El extracto alcalino de color oscuro se separó del residuo insoluble (huminas) por centrifugación a 4300 rpm durante 15 min. El sobrenadante nuevamente se acidificó con HCl 12 M a pH 1,5, y se mantuvo a temperatura ambiente durante 16 h. La solución sobrenadante, denominado AF en extracto alcalino, se separó del precipitado (AH) por centrifugación a 4300 rpm durante 15 min. El precipitado se redisolvió con KOH 0,1 M, se agitó durante 1 h en agitador rotatorio. La solución sobrenadante se separó del precipitado (AH) por centrifugación a 4300 rpm durante 15 min, y se desechó. Los AH se trataron con solución 0,1 M de HCl + 0,3 M de HF (1:10 relación suelo:solución) agitando durante 16 h (toda la noche) para reducción de contenido de cenizas. El precipitado AH se purificó mediante diálisis utilizando una membrana Spectrapore hasta que el líquido estaba libre de iones Cl⁻ (test con AgNO₃), y luego se liofilizó. Los AF se trataron en secuencia con resinas

XAD-8 y IR-120, ultrafiltró, y finalmente se liofilizó para obtener la fracción AF. Los contenidos de carbono del AF (extracto ácido + extracto alcalino) (C-AF) fueron estimados mediante lecturas UV a 410 nm (Zalba *et al.*, 1996), mientras que los contenidos de carbono de AH (C-AH) se determinaron mediante combustión en analizador elemental Flash EA1112.

Cálculo de los contenidos de carbono

El contenido de COT y sus fracciones se transformaron en valores de stock utilizando la siguiente ecuación (Ussiri *et al.*, 2006):

$$C(\text{Mg ha}^{-1}) = \left(\frac{X}{100} \right) \times DA \times d \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$$

Siendo; X es el contenido de COT o sus fracciones (%), DA es la densidad aparente (Mg m^{-3}) y d es el espesor del suelo (m). Posteriormente, los stocks de carbono se transformaron a masa de suelo equivalente para tener en cuenta las diferencias de densidad aparente entre tratamientos y entre sitios. Las estimaciones se realizaron para masas de 950 y 2350 Mg suelo

ha^{-1} . Se utilizó una ecuación lineal que añade o quita una porción de suelo para llegar a la masa de suelo deseada suponiendo que las transiciones entre las capas de suelo son continuas y lineales (Poulton *et al.*, 2003):

$$MC_{MS1} = MC_{P1} + [(MS_1 - MS_{P1}) \times MC_{P2} / MS_{P2}]$$

donde MC_{MS1} es el contenido de COT para la masa de suelo $MS1$, la masa de suelo para la estimación del COT, MC_{P1} es el contenido de COT para la profundidad $P1$, MS_{P1} es la masa de suelo de la profundidad $P1$, MC_{P2} es el contenido de COT de la profundidad $P2$ y MS_{P2} es la masa de suelo de la profundidad $P2$. Si bien los contenidos de carbono en 950 y 2350 Mg suelo ha^{-1} corresponden a profundidades menores que 0-10 y 0-20 cm de profundidad, dichas profundidades fueron utilizadas a modo de referencias para mayor claridad.

Índices de manejo y edáficos

Estos índices se enumeran y explican en la Tabla 3. Se calcularon diferentes índices de manejo en base a los diferentes tipos de cultivos y la duración de su ciclo en el lote: l) el índice de rota-

Tabla 3. Cálculo de los índices de manejo y edáficos.

Table 3. Edaphic and management index calculation.

Clasificación	Índice	Ecuación	Autor
Manejo	Índice de rotación (IR)	$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ meses con vegetación}}{\text{N}^{\circ} \text{ meses totales}}$	Sasal <i>et al.</i> , 2010
	Frecuencia soja (FS)	$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ meses con soja}}{\text{N}^{\circ} \text{ meses con cultivo}}$	Novelli <i>et al.</i> , 2011
	Frecuencia maíz (FM)	$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ meses con maíz}}{\text{N}^{\circ} \text{ meses con cultivo}}$	—
	Frecuencia gramíneas (FG)	$\frac{\text{N}^{\circ} \text{ meses con gramíneas}}{\text{N}^{\circ} \text{ meses con cultivo}}$	—
Edáficos	Índice de materia orgánica	$\frac{\% \text{ COT}}{\% \text{ arcilla}}$	Quiroga <i>et al.</i> , 1996
	Índice de estratificación (IE_1) ^(a)	$\frac{\% \text{ COT capa superficial (0-5 cm)}}{\% \text{ COT capa adyacente (5-20 cm)}}$	Franzluebbers, 2002
	Índice de estratificación (IE_2) ^(b)	$\frac{\% \text{ COT capa superficial (0-10 cm)}}{\% \text{ COT capa adyacente (10-20 cm)}}$	Toledo <i>et al.</i> , 2013
	Labilidad (L)	$L = \frac{C_{\text{Lábil}}}{C_{\text{No Lábil}}}$	Vieira <i>et al.</i> , 2007
	Índice de labilidad (IL)	$IL = \frac{L_{\text{Tratamiento}}}{L_{\text{Referencia}}}$	Blair <i>et al.</i> , 1995
	Índice de reserva de carbono (IRC)	$IRC = \frac{COT_{\text{Tratamiento}}}{COT_{\text{Referencia}}}$	Blair <i>et al.</i> , 1995
	Índice de manejo de carbono (IMC)	$IMC = IRC \times IL \times 100$	Blair <i>et al.</i> , 1995

^(a) Para calcular la concentración de COT en 5-20 cm se tomó el promedio de las profundidades 5-10, 10-15 y 15-20 cm.

^(b) Para calcular la concentración de COT en 0-10 y 10-20 cm se tomó el promedio de las profundidades 0-5, 5-10 cm y 10-15, 15-20 cm, respectivamente.

^(a) To calculate COT concentration in 5-20 cm, COT average 5-10, 10-15 and 15-20 cm depths was taken.

^(b) To calculate COT concentration in 0-10 and 10-20 cm, COT average 0-5, 5-10 cm depths and 10-15, 15-20 cm depths was taken, respectively.

ción, en función del número de meses con cultivo en relación con el número total de meses (Sasal *et al.*, 2010); y II) el índice de frecuencia de un cultivo, basado en el número de meses con soja (Novelli *et al.*, 2011), con maíz o con gramíneas como maíz, trigo, cebada o sorgo. Se consideró una ocupación media anual de 6 meses para maíz, trigo y cebada, y de 5 meses para soja. En algunos casos, otros cultivos estaban presentes dentro de las secuencias de cultivos: para vicia y triticale (cultivos de cobertura) se tuvo en cuenta una ocupación anual promedio de 5 meses. La información de las secuencias de cultivo se obtuvo de los registros por parte de los productores durante un período de 8 años previos al momento de muestreo de los suelos (Tabla 2). También se estimó la producción de residuos de cosecha (biomasa aérea + subterránea) a partir de los rendimientos de grano mediante la utilización del índice de cosecha y la relación parte aérea:raíz (Bolinder *et al.*, 2007). Las entradas de carbono al suelo mediante los residuos de cosecha fueron estimados asumiendo una concentración C de 42,3% (Bolinder *et al.*, 2007).

Análisis estadístico

Por cada sitio (cuatro), y para cada tratamiento (tres) dentro de cada sitio, el número de muestras tomadas fue de tres ($n=3$). Los efectos del uso del suelo (ASD, MID y MRR) y sitios (Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale) sobre las variables e índices determinados fueron evaluados por ANOVA. Cuando se encontraron diferencias significativas se aplicó el test diferencias mínimas significativas (DMS) para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). Si no hay interacción entre los factores, los sitios de muestreo fueron tratados como repeticiones (efecto aleatorio) y los diferentes usos del suelo como tratamientos (efectos fijos). Se realizaron correlaciones y regresiones entre los índices de uso del suelo, los contenidos de carbono, y las diferentes fracciones que lo componen teniendo en cuenta todos los usos del suelo. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS

Índices edáficos basados en el carbono orgánico total

Los mayores niveles de COT se observaron en la capa superficial del suelo (0-5 cm) y disminuyó con la profundidad del suelo, presentando una distribución diferencial en el perfil del suelo entre tratamientos (Tabla 4). El índice de estratificación del COT (0-5-5:20 cm) reflejó diferencias entre tratamientos, el cual varió desde 2,0 (ASD) hasta 1,5 (MRR) (Tabla 4). Las mayores diferencias entre prácticas agrícolas se observaron en la relación 0-5:5-20 cm con mayores valores en MID para los sitios de Bengolea y Monte Buey. Se observó una relación significativa entre

la relación 0-5:5-20 cm y el aporte de carbono por parte de los cultivos ($r=0,48$, $p < 0,05$), mientras la misma fue no significativa para la relación 0-10:10-20 cm ($r=-0,18$, $p=0,28$), evidenciando el efecto de las prácticas de manejo principalmente en los primeros 5 cm del suelo. La estratificación 0-5:5-20 cm presentó estrechas relaciones negativas y positivas con la frecuencia soja y el índice de rotación, respectivamente (Tabla 6).

El COT/arcilla presentó diferencias entre sitios ($p < 0,05$), tratamientos ($p < 0,05$) e interacción no significativa ($p > 0,05$). Este índice reflejó diferencias entre ASD y los tratamientos agrícolas y, dentro de éstos, diferenció estadísticamente MID de MRR (Tabla 7). En este caso, los suelos agrícolas presentaron una disminución del 21 y 33% del COT por unidad de arcilla para MID de MRR, respectivamente.

Carbono orgánico total e índices de manejo

Los contenidos de COT presentaron diferencias significativas entre sitios ($p < 0,05$), tratamientos ($p < 0,05$) e interacción no significativa (Tabla 5). Las diferencias entre tratamientos, presentaron el siguiente orden: $ASD > MID > MRR$. Considerando ASD como referencia, el manejo agrícola generó una disminución del COT de aproximadamente 30% y 20% en 0-10 y 0-20 cm, respectivamente. Entre las prácticas de manejo agrícola, MRR fue el tratamiento que más disminuyó los contenidos de COT (~40 y 30%, respectivamente). Este efecto fue similar en todos los sitios, dado por la interacción no significativa entre sitios y tratamientos ($p > 0,15$). Las diferencias entre prácticas agrícolas responden principalmente a las diferentes secuencias de cultivos que modificaron los aportes de residuos al suelo (Tabla 2). Estas diferencias se reflejaron en las asociaciones negativas ($p = 0,05$) y positivas ($p = 0,07$) entre el COT con la frecuencia soja y maíz, respectivamente (Tabla 6). Contrariamente a lo esperado, el índice de rotación no correlacionó con los contenidos de COT.

Fraciones orgánicas no humificadas y humificadas

Se observó una disminución del contenido de COP_g y COP_f por efectos de las prácticas agrícolas (Tabla 5). En relación con ASD, las prácticas agrícolas disminuyeron un 50% y 40% los contenidos de COP_g y COP_f , respectivamente. La disminución de dichas fracciones (COP_{g+f}) dio como resultado una disminución significativa de la proporción del COP_{g+f} en relación al COT. La relación COP_{g+f}/COT presentó diferencias significativas de los sitios y tratamientos ($p < 0,001$) e interacción no significativa ($p > 0,05$)

Tabla 4. Concentración y estratificación del carbono orgánico total a diferentes profundidades.

Table 4. Concentrations and stratification ratios of total organic carbon at different depths.

Sitio	Prof (cm)	Tratamientos		
		ASD	MID	MRR
Bengolea	0-5	1,93 b	2,27 c	1,34 a
	5-10	1,33 b	1,28 ab	0,99 a
	10-15	1,11 a	1,08 a	0,88 a
	15-20	1,01 ab	1,22 b	0,87 a
	0-5:5-20	1,69 ab	1,92 b	1,48 a
	0-10:10-20	1,55 a	1,56 a	1,35 a
Monte Buey	0-5	3,70 c	2,61 b	1,98 a
	5-10	2,56 b	1,58 a	1,43 a
	10-15	1,98 b	1,43 a	1,39 a
	15-20	1,68 b	1,33 a	1,30 a
	0-5:5-20	1,79 b	1,81 b	1,44 a
	0-10:10-20	1,71 b	1,52 ab	1,27 a
Pergamino	0-5	3,64 c	2,48 b	1,88 a
	5-10	2,04 b	1,53 a	1,37 a
	10-15	1,43 a	1,34 a	1,17 a
	15-20	1,27 a	1,28 a	1,08 a
	0-5:5-20	2,30 b	1,86 ab	1,56 a
	0-10:10-20	2,10 b	1,58 a	1,45 a
Viale	0-5	4,90 a	4,09 a	3,38 a
	5-10	3,00 a	3,14 a	2,42 a
	10-15	2,71 a	2,88 a	2,09 a
	15-20	1,67 ab	2,20 b	1,50 a
	0-5:5-20	2,00 b	1,48 a	1,70 ab
	0-10:10-20	1,81 c	1,42 a	1,62 b

ASD: Ambiente Sin Disturbio; MID, Manejo Intensivo Diversificado; MRR, Manejo Representativo Regional. Para cada profundidad, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

ASD: Undisturbed Environment; MID Diversified Intensive Management; MRR Regional Representative Management. For each depth, different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$).

(Tabla 7). Este índice fue mayor en suelos arenosos (Bengolea) que en suelos de textura fina (Viale), no evidenciando cambios entre prácticas agrícolas. La disminución de las fracciones lábiles estuvo relacionada significativamente con el índice de rotación, donde se encontró una estrecha relación de dicho índice con ambas fracciones orgánicas (Tabla 6). Los cambios en las fracciones orgánicas lábiles no solo dependen de la intensidad de la rotación, si no también están influenciados por el tipo de cultivo dentro de la misma. En el presente trabajo se halló que la frecuencia soja afectó negativamente al COP_{g+f} (Tabla 6). A su vez, la frecuencia maíz se relacionó significativa y positivamente con COP_g , sin efectos significativos sobre el COP_f (Tabla 6).

Las prácticas de manejo también generaron cambio en las sustancias húmicas, donde los AF presentaron relaciones significativas con el índice de rotación, mientras que el aumento de la frecuencia soja afectó negativamente los contenidos de C en los AF en 0-10 cm (Tabla 6).

Índices simples y su relación con las prácticas de manejo

Los manejos agrícolas evaluados produjeron un amplio rango de aportes de carbono al suelo, que variaron de 2,5 a 6,4 $Mg\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$, durante los últimos 8 años (Tabla 2). Los mayores aportes se observaron en MID, los cuales fueron 103, 80, 73 y 41% más elevados, en relación a MRR, para Bengolea, Monte Buey, Pergamino y Viale, respecti-

Tabla 5. Contenido de carbono orgánico total (COT), carbono orgánico particulado fino (COP_f) y carbono orgánico particulado grueso (COP_g) por unidad de área corregida por masa de suelo equivalente para los diferentes manejos y sitios.

Table 5. Content of total organic carbon (COT), fine particulate organic carbon (COP_f) and coarse particulate organic carbon (COP_g) per unit of area corrected by equivalent soil mass for the different managements and sites.

Sitios	0-10 cm			0-20 cm		
	COT (Mg ha ⁻¹)					
	ASD	MID	MRR	ASD	MID	MRR
Bengolea	16 b	17 c	11 a	31 b	34 b	24 a
Monte Buey	30 c	21 b	17 a	58 c	41 b	36 a
Pergamino	27 b	19 a	16 a	48 b	39 a	33 a
Viale	38 a	34 a	28 a	70 a	71 a	54 a
Promedio	28 c	23 b	18 a	52 c	46 b	37 a
COP _f (Mg ha ⁻¹)						
Bengolea	3,5 b	3,7 b	2,6 a	6,9 b	6,9 b	5,3 a
Monte Buey	4,3 b	2,7 a	2,2 a	7,1 b	4,7 a	4,1 a
Pergamino	5,6 b	2,8 a	2,3 a	8,9 b	4,8 a	3,9 a
Viale	2,7 b	1,7 a	1,3 a	4,0 b	2,5 a	2,1 a
COP _g (Mg ha ⁻¹)						
Bengolea	3,1 b	3,2 b	1,1 a	5,0 b	4,1 b	1,6 a
Monte Buey	4,5 b	2,2 a	1,7 a	5,3 b	2,6 a	2,0 a
Pergamino	3,5 b	2,0 a	1,7 a	4,6 b	2,3 a	2,1 a
Viale	5,7 b	2,5 a	3,3 a	7,1 b	3,5 a	3,8 a

ASD: Ambiente Sin Disturbio; MID, Manejo Intensivo Diversificado; MRR, Manejo Representativo Regional. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

ASD: Undisturbed Environment; MID Diversified Intensive Management; MRR Regional Representative Management. Different letters indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$).

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre los contenidos de carbono orgánico total, las fracciones orgánicas lábiles (COP_g y COP_f) y humificadas (AF, AH y H) con los diferentes índices de manejo.

Table 6. Pearson correlation coefficients between the contents of total organic carbon (COT), labile (COP_g and COP_f) and humified fractions (AF, AH and H) with different management indices.

	Prof. (cm)	Índice de rotación		Frecuencia soja		Frecuencia gramíneas		Frecuencia maíz	
		r	p-valor	r	p-valor	r	p-valor	r	p-valor
COT (0-5:5-20)	-	0,67	0,02	-0,66	0,02	0,59	0,13	0,49	0,21
COT	0-10	0,51	0,09	-0,57	0,05	0,48	0,22	0,66	0,07
	0-20	0,38	0,22	-0,47	0,13	0,45	0,26	0,63	0,10
COP _g	0-10	0,77	0,003	-0,78	0,003	0,66	0,08	0,70	0,05
	0-20	0,84	<0,001	-0,84	<0,001	0,69	0,06	0,74	0,04
COP _f	0-10	0,69	0,01	-0,62	0,03	0,22	0,60	0,03	0,95
	0-20	0,62	0,03	-0,55	0,07	0,15	0,72	-0,06	0,90
C-AF	0-10	0,62	0,03	-0,66	0,02	0,55	0,16	0,60	0,11
	0-20	0,45	0,14	-0,50	0,10	0,48	0,23	0,50	0,21
C-AH	0-10	0,38	0,21	-0,46	0,13	0,43	0,29	0,61	0,11
	0-20	0,32	0,31	-0,39	0,20	0,38	0,34	0,56	0,15
C-H	0-10	0,12	0,71	-0,22	0,49	0,32	0,43	0,52	0,19
	0-20	0,05	0,87	-0,16	0,63	0,30	0,46	0,50	0,21

vamente. Como era esperable, un 78% de las variaciones del IRC fueron determinadas por este aporte diferencial de carbono, según esta relación: $IRC = 0,36 + (0,0001 \times \text{aporte de C})$, $R^2 = 0,78^{***}$. Este índice diferenció entre prácticas agrícolas, indicando que en estos suelos se conservó el 84% y el 64% del COT contenido en ASD para MID y MRR, respectivamente. El IRC presentó diferencias significativas entre prácticas agrícolas en tres de los cuatro sitios evaluados, considerándose un índice sencillo de medir y sensible para detectar diferencias entre manejos agrícolas, independientemente del sitio evaluado (Tabla 7).

La labilidad del C (L) fue calculada dividiendo el contenido de carbono lábil (COP_{g+f}) por el carbono no lábil (COM) (Tabla 3). Se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, indicando que el COP_{g+f} fue un 47,35 y 31% del contenido de COM, para ASD, MID y MRR respectivamente. Es decir, en ASD la relación COP:COM fue $\frac{1}{2}$, mientras en las situaciones agrícolas la relación se redujo a $\frac{1}{3}$. Diferencias entre prácticas agrícolas únicamente se observaron en Bengolea (mayor en MID) y Viale (mayor en MRR),

sin diferencias en el resto de los sitios (Tabla 7). El IL relaciona el COP_{g+f} respecto al COM y su proporción respecto a la misma relación en la condición prístina del suelo. En general, este índice no reflejó diferencias debidas a los sitios y tratamientos. Para cada sitio, mayores valores de IL en MID se observaron en Bengolea debido, principalmente, a la mayor entrada anual de carbono. En Viale se encontraron menores valores de IL en MID, sin diferencias en Monte Buey y Pergamino (Tabla 7). El estado y la tasa de cambio del carbono en los sistemas agrícolas y naturales, mediante el IMC, presentó efectos del sitio ($p < 0,05$), tratamiento ($p < 0,01$) e interacción significativa ($p < 0,05$). El efecto de las prácticas agrícolas en cada sitio presentó diferencias significativas únicamente en Bengolea a favor de MID, presentando una calidad semejante a ASD y una tendencia similar en Monte Buey y Pergamino (Tabla 7).

DISCUSIÓN

La conversión de la vegetación nativa en agrícola es conocida por decrecer los contenidos de COT, como se

Tabla 7. Índices edáfico basados en el carbono orgánico total y sus fracciones en los diferentes sitios y tratamientos en 0-10 cm.
Table 7. Edaphic indices based on total organic carbon and its fractions in different sites and treatments in 0-10 cm depth.

Sitio-Trat.	$\frac{COP_{g+f}}{COT}$	$\frac{COT}{\text{arcilla}}$	L	IL	IRC	IMC
Bengolea-ASD	0,38 c	12,2 c	0,72 b	1,00	1,00	100
Bengolea-MID	0,32 b	10,8 b	0,63 b	0,87 b	1,09 b	95 b
Bengolea-MRR	0,28 a	8,7 a	0,47 a	0,65 a	0,71 a	46 a
Monte Buey-ASD	0,19 a	10,4 c	0,40 a	1,00	1,00	100
Monte Buey-MID	0,17 a	8,7 b	0,28 a	0,71 a	0,67 b	48 a
Monte Buey-MRR	0,16 a	7,3 a	0,27 a	0,67 a	0,55 a	37 a
Pergamino-ASD	0,26 b	12,1 b	0,50 b	1,00	1,00	100
Pergamino-MID	0,18 a	7,8 a	0,33 a	0,67 a	0,71 b	46 a
Pergamino-MRR	0,16 a	6,7 a	0,30 a	0,60 a	0,57 a	34 a
Viale-ASD	0,17 b	9,6 a	0,28 c	1,00	1,00	100
Viale-MID	0,12 a	7,7 a	0,14 a	0,50 a	0,91 a	45 a
Viale-MRR	0,10 a	6,8 a	0,19 b	0,68 b	0,73 a	50 a
ASD	0,25 b	11,1 c	0,47 b	1,00	1,00	100
MID	0,19 a	8,8 b	0,35 a	0,69 a	0,84 b	59
MRR	0,18 a	7,4 a	0,31 a	0,65 a	0,64 a	42
Sitio	***	***	***	ns	***	***
Tratamiento	***	***	***	ns	***	***
Sitio x Tratamiento	ns	ns	ns	ns	ns	**

ASD: Ambiente Sin Disturbio; MID, Manejo Intensivo Diversificado; MRR, Manejo Representativo Regional. Para cada índice, letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios y los tratamientos ($p < 0,05$).

ASD: Undisturbed Environment; MID Diversified Intensive Management; MRR Regional Representative Management. For each index, different letters indicate significant differences among different sites and treatments ($p < 0,05$).

refleja en los datos de los suelos cultivados (Tabla 4 y 5). Sin embargo, la magnitud de las pérdidas depende de las prácticas de manejo, tipo e intensificación de cultivos (Bayer *et al.*, 2006). Los resultados observados reflejan el impacto negativo de la frecuente inclusión del cultivo de soja sobre el COT igual a lo informado por otros autores (Novelli *et al.*, 2011). Estos resultados afirman que el uso de la siembra directa como herramienta para mantener los contenidos de COT, sólo es posible únicamente si se utilizan secuencias de cultivos más equilibradas. Sin embargo, no se encontró una relación entre el índice de rotación y los contenidos de COT, contrariamente a lo reportado por otros autores (Novelli *et al.*, 2013).

El aumento del COT en la capa superficial del suelo ha sido informado como crítico para su calidad, en especial por el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (Franzuebbers, 2002), la actividad biológica (Moreno *et al.*, 2006) y la mejora de la estructura del suelo. Los valores de estratificación hallados en este trabajo fueron cercanos a 2,0 y 1,5 para MID y MRR, respectivamente, sugiriendo que MID está promoviendo la calidad del suelo, mientras en MRR prevalecen condiciones de degradación (Franzuebbers, 2002). Diferencias significativas en los valores de estratificación entre prácticas agrícolas se observaron en Bengolea y Monte Buey (Tabla 4), sitios en donde las diferencias en los aportes de carbono fueron mayores (Tabla 2). Estos resultados concuerdan con lo observado por otros autores, donde el aporte extra de materiales orgánicos en suelos bajo siembra directa aumentó la estratificación del COT (Spargo *et al.*, 2008). En Viale, mayores valores de estratificación del COT se observaron en MRR (Tabla 4). En este sitio, los procesos de expansión-contracción, propio de los Vertisoles, puede minimizar las diferencias de estratificación entre tratamientos (Fabrizzi *et al.*, 2009). Estos resultados refuerzan el hecho de que el tipo de suelo debe ser considerado cuando se evalúa índices de estratificación. Evaluando diferentes rotaciones de cultivos, Dou *et al.* (2007) observaron un efecto significativo tanto de la diversidad como de la intensidad de cultivos sobre la estratificación del COT. En nuestro trabajo la estratificación del COT se relacionó tanto con la frecuencia soja como con el índice de rotación (Tabla 6). Estos resultados también se reflejaron en diferencias significativas del COT/arcilla entre prácticas agrícolas, atribuido posiblemente a las diferencias en cantidad y calidad de los residuos de estos tratamientos (Hao & Kravchenko, 2007). Es decir, los cultivos que producen residuos con elevada relación C:N, como trigo y maíz, pueden contribuir a un mayor secuestro

de carbono en relación a la soja (baja C:N) (Wright & Hons, 2005). En cuanto a la sensibilidad, tanto el índice de estratificación como el COT/arcilla, no aportaron mayor información acerca del efecto de los diferentes manejos que lo observado en el COT individualmente, refutando en este caso la hipótesis planteada. El índice de estratificación ha sido un exitoso indicador de calidad de suelos para evaluar sistemas de labranza (Díaz Zorita & Grove, 2002; Álvarez *et al.*, 2011), con resultados variables comparando sistemas bajo siembra directa (de Moraes Sa & Lal, 2009; Álvarez *et al.*, 2014). Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos, el índice de estratificación podría considerarse un indicador potencial de la calidad del suelo en siembra directa, dado los valores de estratificación semejantes entre ASD y MID (Tabla 4).

El COP ha sido reportado como un indicador sensible del efecto de las prácticas de manejo sobre el COT (Eiza *et al.*, 2005). Los menores contenidos de estas fracciones orgánicas en MID y MRR pueden atribuirse a la menor entrada de residuos vegetales (Tabla 2), sumado a condiciones más favorables para la mineralización en barbechos largos (Witter & Kanal, 1998). En cambio, ASD mantiene la vegetación viva durante más tiempo realizando un mayor y más continuo aporte de biomasa aérea y radical asociado directamente con los mayores contenidos de las fracciones orgánicas lábiles (Tisdall & Oades, 1982). Nuestros resultados muestran una disminución diferencial de las fracciones más lábiles en relación a las fracciones más humificadas y estables en los sistemas agrícolas, independientemente de las condiciones climáticas y edáficas. Esto se reflejó en una menor relación COP_{g+if}/COT en los tratamientos agrícolas, sin embargo, no presentó diferencias entre éstas, donde el COP_{g+if} representó entre un 18-19% del COT, diferenciándose de ASD (25%) (Tabla 7). La disminución de las fracciones lábiles (COP_{g+if}) estuvo relacionado significativamente con el índice de rotación (Tabla 6). Un mayor índice de rotación aumentó el tiempo en el cual el suelo se encontraba con vegetación (natural o cultivada), por lo tanto, aumentaron las entradas de materiales orgánicos al suelo (residuos de cosecha, residuos de raíces y biomasa microbiana, etc.), considerados la principal fuente de COP. Otros autores han encontrado también una relación estrecha y directa entre las fracciones orgánicas lábiles y la adición de carbono anual en diferentes secuencias de cultivo bajo siembra directa (Bayer *et al.*, 2002; Duval *et al.*, 2014). A su vez, el tipo de cultivo también repercutió significativamente sobre el contenido de las fracciones lábiles, donde la frecuencia soja afectó el

COP_g (0-10 y 0-20 cm) y el COP_f (0-10 cm) (Tabla 6). El aporte de residuos de soja probablemente favoreció la descomposición de residuos, en comparación con el de otras especies, lo que puede explicar los menores contenidos de fracciones lábiles con alta frecuencia soja (Dou *et al.*, 2007). En cambio, el aumento de la frecuencia maíz mejoró los contenidos de COP_g en 0-10 y 0-20 cm. En suelos con ausencia de labranzas, los contenidos de COP en la capa superficial reflejan las contribuciones de carbono al suelo a partir de residuos vegetales, mientras que acumulaciones más profundas reflejan las contribuciones por parte de las raíces de las plantas (Franzluebbers & Stuedemann, 2002). Gregorich *et al.* (1996) utilizando técnicas de ¹³C demostraron que el aumento en fracciones orgánicas lábiles derivó principalmente de residuos C4 (maíz).

El efecto de las prácticas agrícolas en los contenidos de las fracciones orgánicas separadas químicamente se observaron únicamente en el AF (Tabla 6). El AF fue la fracción más sensible, mostrando cambios importantes con la intensificación y tipo de cultivos dentro de la rotación. El contenido de AF está asociado con los residuos incorporados al suelo, (Zalba & Quiroga, 1999; Guimarães *et al.*, 2013). Las diferencias entre prácticas agrícolas en este trabajo también se debieron a un mayor aporte de residuos por parte de los cultivos.

El IRC indica la proporción adicional de COT que quedó en el suelo respecto a la reserva original contenida en suelos bajo condición prístina (ASD). En suelos bajo siembra directa, la mayor intensificación sostenible de cultivos resulta en un mayor IRC (de Oliveira Ferreira *et al.*, 2013). Los resultados hallados muestran que este índice refleja de buena manera las diferencias entre prácticas agrícolas promedio para todos los sitios (Tabla 7). Estos resultados, a diferencia del índice de estratificación y COT/arcilla, no permiten rechazar la hipótesis planteada y concuerdan, además, con varios trabajos donde afirman que el IRC es un indicador eficiente de la calidad de los suelos (Blair *et al.*, 1995; Diekow *et al.*, 2005; Vieira *et al.*, 2007). Los índices relacionados con la labilidad del COT presentaron baja sensibilidad entre prácticas agrícolas, donde, en general las diferencias más marcadas se encontraron entre sitios (Tabla 7). Por ejemplo, en Bengolea, las fracciones más dinámicas y lábiles (COP_{g+f}) fueron encontrados en mayor proporción, por lo tanto, un manejo adecuado aumenta rápidamente los niveles de carbono lábil del suelo (MID: 11 Mg en 0-20 cm) y, a su vez, prácticas de manejo inadecuadas lo redujeron (MRR: 6,9 Mg en 0-20 cm) (Tabla 5). Por

otro lado, en Viale, la menor labilidad en MID no se debe a una menor concentración de la fracción orgánica lábil, sino que hay una mayor concentración de la fracción humificada.

El IMC permite evaluar los procesos de ganancia o de pérdida de calidad de suelo ya que los valores más altos significan mayor calidad, y viceversa. En base a los resultados observados, se puede decir que MID es más apropiado para mejorar los contenidos de COT para condiciones de suelo muy diferentes, a pesar de que en Monte Buey y Pergamino no se hallaron diferencias significativas debido a los altos coeficientes de variación de los datos (CV 40%). El uso agrícola de los suelos resultó en una marcada disminución del IMC. En otros estudios, la utilización del IMC fue de utilidad para evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas agrícolas (Diekow *et al.*, 2005; Vieira *et al.*, 2007). Se han informado valores de IMC entre 23 y 45 en suelos con diferente historia agrícola (Blair *et al.*, 1995).

CONCLUSIONES

La mayor intensificación sostenible del uso del suelo aumentó los contenidos de COT en superficie modificando su distribución en suelos bajo siembra directa de la Región Pampeana.

La disminución de las fracciones no humificadas (COP_g y COP_f) y humificadas (AF) se magnifican a medida que se incrementan las prácticas de manejo relacionadas con prolongados períodos de barbecho y escasa diversidad de cultivos, característicos de una alta frecuencia o monocultivo de soja. Estas situaciones presentaron los peores valores en la mayoría de los índices que incluyen las fracciones lábiles. Sin embargo, la magnitud de los cambios observados en estos índices fueron menores en relación con los asociados al COT.

A nivel global, índices como el de estratificación (0-5:5-20 cm), COT/arcilla y IRC fueron los más sencillos de medir y sensibles para reflejar diferencias entre manejos agrícolas. En general, estos índices representaron tendencias de recuperación y degradación para MID y MRR, respectivamente.

Los resultados obtenidos ponen en evidencia la importancia del COT como indicador universal y la necesidad de tener en cuenta aspectos locales, sean de manejo y/o estacionales, para la interpretación de los índices asociados a las fracciones más lábiles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Programa de Áreas Estratégicas (PAE) del MINCYT, BIOSPAS, N° 36976.

BIBLIOGRAFÍA

- Abril, A; N Casado-Murillo; C Vázquez & P Olivera. 2013. Labile and Recalcitrant Carbon in Crop Residue and Soil under No-Till Practices in Central Region of Argentina. *The Open Agriculture Journal* 7: 32-39.
- Álvarez, C; CR Álvarez; A Costantini & M Basanta. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil Till. Res.* 142: 25-31.
- Álvarez, CR; AO Costantini; A Bono; MÁ Taboada; FHG Boem; PL Fernández & P Prystupa. 2011. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the Pampean Region of Argentina. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35(6): 1985-1994.
- Álvaro-Fuentes, J; JL Arrúe; R García & MV López. 2008. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. *Geoderma* 145: 390-396.
- Bayer, C; J Mielniczuk; L Martin-Neto & PR Ernani. 2002. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. *Plant Soil* 238: 133-140.
- Bayer, C; L Martin-Neto; J Mielniczuk; A Pavinato & J Diekow. 2006. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-tillage. *Soil Till. Res.* 86(2): 237-245.
- Bayer, C; J Diekow; TJC Amado; FLF Eltz & FCB Vieira. 2009. Cover Crop Effects Increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. *Commun. Soil Sci. Plant* 40: 1499-1511.
- Benbi, DK; K Brar; AS Toor & P Singh. 2015. Total and labile pools of soil organic carbon in cultivated and undisturbed soils in northern India. *Geoderma* 237-238: 149-158.
- Blair, GJ; RDB Lefroy & L Lisle. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 1459-1466.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk Density p.: 363-375. *In: A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1.2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
- Bolinder, MA; HH Janzen; EG Gregorich; DA Angers & AJ VandenBygaart. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118: 29-42.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Caviglia, OP; VO Sadras & FH Andrade. 2011. Yield and quality of wheat and soybean in sole- and double-cropping. *Agron. J.* 103: 1081-1089.
- de Moraes Sa, JC & R Lal. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* 103(1): 46-56.
- de Oliveira Ferreira, A; TJC Amado; RS Nicoloso; JCM Sa; JE Fiorin; DSS Hansel & D Menefee. 2013. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 133: 65-74.
- Derpsch, R; T Friedrich; A Kassam & H Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3: 1.
- Di Rienzo, JÁ; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2013. InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Díaz Zorita, M & JH Grove. 2002. Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till. Res.* 66: 165-174.
- Diekow, J; J Mielniczuk; H Knicker; C Bayer; DP Dick & I Kogel-Knabner. 2005. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil Till. Res.* 81: 87-95.
- Dou, F; AL Wright & FM Hons. 2007. Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. *Soil Till. Res.* 94: 530-536.
- Duval, ME; JA Galantini; JO Iglesias; S Canelo; JM Martínez & L Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Till. Res.* 131: 11-19.
- Duval, M; E de Sa Pereira; JO Iglesias & JA Galantini. 2014. Efecto de uso y manejo del suelo sobre las fracciones de carbono orgánico en un Argiudol. *Ci. Suelo.* 32(1): 105-115.
- Duval, ME; JA Galantini; JM Martínez; FM López & LG Wall. 2016. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil Till. Res.* 159: 9-22.
- Eiza, MJ; N Fioriti; GA Studdert & HE Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ci. Suelo* 23: 59-68.
- Fabrizzi, KP; CW Rice; TJC Amado; J Fiorin; P Barbagelata & R Melchiori. 2009. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry* 92: 129-143.
- Figuerola, EL; LD Guerrero; SM Rosa; L Simonetti; ME Duval; JA Galantini; JC Bedano; LG Wall & L Erijman. 2012. Bacterial indicator of agricultural management for soil under no-till crop production. *PLoS One* 7, e51075.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106.
- Franzluebbers, AJ & JA Stuedemann. 2002. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. *Environmental Pollution* 116: S53-S62.
- Galantini, JA; M Duval; JO Iglesias & H Krüger. 2014. Continuous Wheat in Semiarid Regions: Long-term Effects on Stock and Quality of Soil Organic Carbon. *Soil Sci.* 179: 284-292.
- Gregorich, EG; CM Monreal; M Schnitzer & HR Schulten. 1996. Transformation of plant residues into soil organic matter: Chemical characterization of plant tissue, isolated soil fractions, and whole soils. *Soil Sci.* 161: 680-693.
- Guimarães, DV; MIS Gonzaga; TO da Silva; TL da Silva; N da Silva Dias & MIS Matias. 2013. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land. *Soil Till. Res.* 126: 177-182.

- Hao, X & AN Kravchenko. 2007. Management practice effects on surface soil total carbon: Differences along a textural gradient. *Agron. J.* 99(1): 18-26.
- Luo, Z; E Wang & OJ Sun. 2010. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: a review and synthesis. *Geoderma* 155: 211-223.
- Moraes, GM; FAS Xavier; ES Mendonca; JA Araujo Filho & TS Oliveira. 2011. Chemical and structural characterization of soil humic substances under agroforestry and conventional systems. *Braz. J. of Soil Sci.* 35: 1597-1608.
- Moreno, F; JM Murillo; F Pelegrín & IF Girón. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO_3 . *Soil Till. Res.* 85: 86-93.
- Noellemeyer, E; AR Quiroga & D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65: 142-155.
- 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.
- Novelli, LE; OP Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196, 260-267.
- Poulton, PR; E Pye; PR Hargreaves & DS Jenkinson. 2003. Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland. *Glob. Chang. Biol.* 9: 942-955.
- Purakayastha, TJ; L Rudrappa; D Singh; A Swarup & S Bhadraray. 2008. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize-wheat-cowpea cropping system. *Geoderma* 144: 370-378.
- Quiroga, AR; DE Buschiazzo & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinean Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Reicosky, DC. 2007. Carbon sequestration and environmental benefits from no-till systems. In: Goddard, T; M Zoebisch; Y Gan; W Ellis; A Watson & S Sombatpanit (eds), No-till farming systems. Special publication N° 3 by The World Association of Soil and Water Conservation (WASWC).
- Rivarolla, SE & RA Rosell. 2008. Sustancias húmicas como indicadores de calidad del suelo. En: Galantini, J (ed). Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Pp. 245-251. EdiUNS. Bahía Blanca, Argentina.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Smith OH; GW Petersen & BA Needelman. 2000. Environmental indicators of agroecosystems. *Adv. Agron.* 69: 75-97.
- Spargo, JT; MM Alley; RF Follett & JV Wallace. 2008. Soil carbon sequestration with continuous no-till management of grain cropping systems in the Virginia coastal plain. *Soil Till. Res.* 100: 133-140.
- Swift, RS. 1996. Organic matter characterization. In: Sparks DL; AL Page; PA Helmke; RH Loeppert; PN Soltanpour; MA Tabatabai; CT Johnston & ME Sumner (eds). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Soil Sci. Soc. Am. Book Series: 5. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. pp. 1018-1020.
- Tisdall, JM & J Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33(2): 141-161.
- Toledo, DM; JA Galantini; E Ferreccio; S Arzuaga; L Gimenez & S Vazquez. 2013. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ci. Suelo* 31(2): 201-212.
- Ussiri, DAN; R Lal & PA Jacinthe. 2006. Soil properties and carbon sequestration of afforested pasture in reclaimed Minesoils of Ohio. *Soil Sci. Soc. America. J.* 70(5): 1797-1806.
- Verma, S & PK Sharma. 2007. Effect of long-term manuring and fertilizer on carbon pools, soil structure, and sustainability under different cropping systems in wet-temperate zone of northwest Himalayas. *Biol. Fertil. Soils* 19: 235-240.
- Vezzani, FM & J Mielniczuk. 2009. An overview of soil quality. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 33: 743-755.
- Vieira, FCB; C Bayer; JA Zanatta; J Diekow; J Mielniczuk & ZL He. 2007. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil Till. Res.* 96(1): 195-204.
- Wall, LG. 2011. The BIOSPAS Consortium: Soil Biology and Agricultural Production. In: de Bruijn, FJ (ed), Handbook of Molecular Microbial Ecology I, (Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.), pp. 299-306.
- Witter, E & A Kana. 1998. Characteristics of the soil microbial biomass in soils from a long-term field experiment with different levels of C input. *Appl. Soil Ecol.* 10: 37-49.
- Wright, AL & FM Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 141-147.
- Zalba, P; JC Gasparoni & N Peinemann. 1996. A rapid method for estimating the carbon concentration of fulvic acids. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27(1-2): 1-5.
- Zalba, P & AR Quiroga, 1999. Fulvic acid carbon as a diagnostic feature for agricultural soil evaluation. *Soil Sci.* 164: 57-61.

