

**USO DE INDICES BASADOS EN FRACCIONES DEL CARBONO ORGÁNICO DEL  
SUELO BAJO DIFERENTES SISTEMAS CON TRIGO DE LARGO PLAZO**

**Duval M.E.<sup>1,2</sup>, J.M. Martinez<sup>1,2</sup>, H.R. Krüger<sup>3</sup>, J.A. Galantini<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup> Dpto. Agronomía, Universidad Nacional del Sur (UNS), San Andrés 800, Bahía Blanca (Bs. As.) – [mduval@criba.edu.ar](mailto:mduval@criba.edu.ar)

<sup>2</sup> Centro Recursos Renovables Naturales de la Región Semiárida (CERZOS)-CONICET.

<sup>3</sup> INTA, Centro Regional Buenos Aires Sur, EEA Bordenave.

<sup>4</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Bs. As.

**RESUMEN:** La literatura exhibe un gran número de índices de calidad del suelo, muchos de ellos basados en el carbono orgánico total (COS) y sus fracciones, para una gran variedad de suelos. El objetivo de este estudio fue determinar los cambios en las diferentes fracciones del COS y, evaluar la utilidad de diferentes índices como herramienta para diferenciar sistemas de manejo. La experiencia se realizó sobre un ensayo de larga duración de sistemas de producción en la EEA del INTA Bordenave y consistieron en: TT-LC, monocultivo de trigo con labranza convencional (LC), 1983-2006; TT-SD, monocultivo de trigo con LC, 1983-1999, y con SD, 1999-2006 y TP, un año trigo – un año pastoreo de los residuos. En el año 2006 se tomaron muestras de suelo en las profundidades de 0-5 y 0-20 cm. Se determinó COS, N total (Nt) y carbono en las diferentes fracciones separadas por tamaño de partícula. Además, se calcularon diversos índices: índice de labilidad (IL), de reserva de carbono (IRC), de manejo de carbono (IMC), de carbono orgánico (COS/limo+arcilla). Se observaron concentraciones significativamente mayores de COS en TTSD-f, mientras que cuando no se aplicó fertilizante, se hallaron las menores concentraciones en TT-SD y TT-LC. Las mayores concentraciones de carbono orgánico particulado (105-2000  $\mu\text{m}$ ) también se hallaron en TTSD-f superando en un 73 y 89% los observados en TTLC-f y TP-f, respectivamente. Los tratamientos bajo LC presentaron los menores valores de IL, mientras que la conversión a SD los aumentó (0,74-1,28). La calidad de los suelos agrícolas, a través del IRC, fue inferior al suelo natural (IMC=100) presentando el siguiente orden SD=TP<LC. El análisis multivariado reflejó que los índices IL, IMC y COS/limo+arcilla fueron más sensibles para diferenciar sistemas de labranza, mientras que IRC y C/N fueron más sensibles para diferenciar los tratamientos testigos de los fertilizados.

**PALABRAS CLAVE:** monocultivo, siembra directa, carbono orgánico particulado.

## **INTRODUCCION**

En el sudoeste bonaerense, el clima es el principal obstáculo para la producción agrícola. A su vez, los sistemas de labranza más utilizados, similares a los introducidos en la región pampeana húmeda, causaron disminuciones del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) debido a la mineralización acelerada de los residuos, alteración de los agregados del suelo y aumento de la aireación (Sainju *et al.*, 2006). Frente a este escenario, se han propuesto prácticas de labranza de conservación, como la siembra directa (SD), para evitar pérdidas de COS como resultado de cambios en su descomposición, el ingreso de residuos o ambos (Chan *et al.*, 2002). En general, se considera que el COS aumenta bajo SD en comparación con los sistemas de labranza intensiva (Kahlon *et al.*, 2013). En algunos estudios, sin embargo, los efectos de la labranza sobre el COS han sido limitados o ausentes (Cookson *et al.*, 2008). Como resultado, la medición del COS por sí solo no refleja adecuadamente los cambios en la calidad del suelo debido a las prácticas de manejo (Leifeld & Kögel-Knabner, 2005).

La materia orgánica particulada (MOP) es la fracción orgánica determinada entre 53 y 2000  $\mu\text{m}$  luego de la separación por tamaño de partícula del suelo (Elliott & Cambardella, 1991) cuyo contenido de carbono se denomina carbono orgánico en partículas (COP). Varios estudios han corroborado que esta fracción es más sensible en la detección de cambios a corto plazo que el COS (Needelman *et al.*, 1999). Por lo tanto, esta fracción lábil podría reflejar mejor los cambios en la calidad del suelo debido a cambios inducidos por las prácticas de manejo (Galantini *et al.*, 2014, Duval *et al.*, 2016). También, se han propuesto varios índices y relaciones asociados con el COS para evaluar la calidad del suelo (Blair *et al.*, 1995; Vezzani & Mielniczuk, 2009). Estos índices son indicadores tempranos y eficientes de los cambios en la calidad del suelo causados por el sistema de producción (Bayer *et al.*, 2009), incluso antes de que se observe el cambio en el contenido de COS.

El conocimiento sobre los cambios en el COS y sus fracciones bajo diferentes sistemas de labranza y fertilización, son necesarios para evaluar la viabilidad de la adopción de prácticas de conservación para mantener la productividad y proteger el medio ambiente. Los objetivos de este estudio fueron (i) determinar los cambios en las diferentes fracciones del COS y, (ii) evaluar la utilidad de diferentes índices como herramienta para detectar cambios tempranos del COS bajo diferentes sistemas de manejo.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se realizó en un lote demostrativo de sistemas de producción en la EEA del INTA Bordenave (37° 45' 47,9" S y 63° 05' 56,8" O). Los sistemas de producción estudiados comenzaron en 1983 sobre una pastura (REF) y consistieron en: TT-LC, monocultivo de trigo con labranza conservacionista (LC), 1983-2006; TT-SD, monocultivo de trigo con LC, 1983- 1999, y con SD, 1999-2006 y TP, un año trigo – un año alternativamente pastoreo de los rastrojos con bovinos. A su vez, los tratamientos se dividieron en no fertilizado (nf) y fertilizado (f) a la siembra, aplicado al azar todos los años en cantidad: 64 kg de N y 16 kg de P en forma de urea (46-0-0) y fosfato de amonio (18-20-0). En TP se utilizó laboreo convencional (barbecho muy corto, arado, rastra de discos y sistema de siembra plano), mientras que en TT el laboreo fue conservacionista (barbecho largo, con cobertura de residuos, labranza vertical y sistema de siembra en surco profundo). También se evaluó el suelo manteniendo la pastura inicial como referencia adyacente a los tratamientos. Se utilizó un diseño de bloques al azar, en un arreglo de parcelas divididas, donde las parcelas principales fueron los sistemas de labranza (tres) y las subparcelas la fertilización (dos).

En enero de 2006 se realizó un muestreo de suelos a las profundidades: 0-5 y 0-20 cm. En las muestras secas al aire y tamizadas por 2 mm se determinó nitrógeno total (Nt) mediante semimicro Kjeldhal, (Bremner, 1996). Se realizó un fraccionamiento del suelo por tamaño de partícula (Duval *et al.*, 2013) obteniendo tres fracciones: fracción gruesa (FG, 105-2000  $\mu\text{m}$ ) en la que se encuentra el carbono orgánico particulado grueso (COP<sub>g</sub>) y las arenas medias y gruesas; fracción media (FM, 53-105  $\mu\text{m}$ ) constituida por el carbono orgánico particulado fino (COP<sub>f</sub>) y las arenas muy finas y, la fracción fina (FF, <53  $\mu\text{m}$ ) la cual contiene el carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) más limo y arcilla. El carbono orgánico total del suelo (COS) y el de las fracciones (FG y FM) fueron determinadas por combustión seca (LECO, St. Joseph, MI). El COM se obtuvo mediante el cálculo de la diferencia entre el COS y el C de la fracción gruesa y media.

Se calcularon diversos índices: COS/COP<sub>g</sub> y COS/limo+arcilla (COS/L+a) para la profundidad de 0-20 cm.

Se calculó el IMC para cada tratamiento basado en el método de Blair *et al.* (1995):

$$\text{IMC} = \text{IRC} \cdot \text{IL} \cdot 100$$

El IRC e IL se calculan de la siguiente manera:

$$\text{IRC} = \frac{\text{COS}_{\text{tratamiento}}}{\text{COS}_{\text{referencia}}}$$

$$\text{IL} = \frac{\text{L}_{\text{tratamiento}}}{\text{L}_{\text{referencia}}}$$

donde L se refiere a la labilidad del C calculado como:

$$\text{L} = \frac{\text{C}_{\text{lábil}}}{\text{C}_{\text{no lábil}}}$$

Se utilizó REF como suelo de referencia, con un IMC de 100. El C lábil se considera como la porción de CO del suelo en la fracción gruesa COP<sub>g</sub> (105-2000 μm) (Vieira *et al.*, 2007). El contenido de C no lábil fue estimado a partir de la diferencia entre el COS y el C lábil.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Los sistemas de labranza y la fertilización modificaron los niveles de COS y sus fracciones tanto en 0-5 como en 0-20 cm (Tabla 1). Se observaron concentraciones significativamente mayores de COS en TTSD-f en relación con los demás tratamientos en ambas profundidades ( $p < 0,05$ ), mientras que cuando no se aplicó fertilizante, se hallaron las menores concentraciones en TT-SD y TT-LC. Varios estudios han reportado mayores concentraciones de COS en SD que en LC debido a la ruptura de los agregados del suelo y al aumento de la respiración del suelo como resultado de la liberación de COS protegido en este último (Sainju *et al.*, 2008, Lewis *et al.*, 2011, Kahlon *et al.*, 2013). La fertilización modificó los niveles de COS tanto en TT-SD (0-5 y 0-20 cm) como en TT-LC (0-20 cm). Si bien existen trabajos donde la adopción de SD sin fertilización adecuada puede aumentar el COS en sistemas de agricultura continua (Lemke *et al.*, 2010, 2012), los resultados obtenidos no reflejan lo informado por estos autores. Es decir, las prácticas de manejo que favorecen la acumulación de COS interactúan positivamente entre ellas, de forma tal que la ganancia de COS será mayor cuando se aplican en forma combinada (Grant *et al.*, 2001).

Tabla 1. Concentración de carbono orgánico total (COS), carbono orgánico particulado grueso y fino (COP<sub>g</sub> y COP<sub>f</sub>, respectivamente) y carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) en el 2006.

| Frac. de C<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | Prof (cm) | TT-SD  |         | TT-LC   |        | TP      |         |
|-------------------------------------|-----------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
|                                     |           | f      | nf      | f       | nf     | f       | nf      |
| COS                                 | 0-5       | 15,1 a | 10,6 b  | 11,3 b  | 10,1 b | 11,3 b  | 12,5 b  |
|                                     | 0-20      | 11,3 a | 8,2 c   | 10,3 b  | 8,9 c  | 10,2 b  | 10,7 ab |
| COP <sub>g</sub>                    | 0-5       | 3,71 a | 2,66 ab | 2,14 ab | 1,90 b | 1,96 b  | 2,10 ab |
|                                     | 0-20      | 1,67 a | 1,40 ab | 1,04 b  | 1,02 b | 1,36 ab | 1,39 ab |
| COP <sub>f</sub>                    | 0-5       | 1,28 a | 1,09 a  | 0,98 a  | 0,82 a | 1,07 a  | 1,30 a  |
|                                     | 0-20      | 0,83 a | 0,78 a  | 0,71 a  | 0,66 a | 0,89 a  | 1,02 a  |
| COM                                 | 0-5       | 10,1 a | 6,88 d  | 9,35 b  | 7,37 d | 8,23 c  | 8,51 c  |
|                                     | 0-20      | 8,82 a | 6,05 e  | 8,52 ab | 7,26 d | 7,99 c  | 8,27 bc |

Para cada profundidad letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

Dentro de las fracciones lábiles se encontraron diferencias significativas entre tratamientos únicamente en el COP<sub>g</sub> donde, al igual que el COS, TTSD-f presentó los mayores niveles superando en un 73 y 89% a los observados para TTLC-f y TP-f, respectivamente en 0-5 cm. Generalmente, se observaron mayores concentraciones de COP<sub>g</sub> bajo SD (3,71-1,40 g kg<sup>-1</sup>) que en los tratamientos bajo LC (2,14-1,04 g kg<sup>-1</sup>). Las diferencias observadas en COP<sub>g</sub> afirma lo reportado por otros autores que comparan el efecto de sistemas de labranza con mínimos disturbios del suelo (SD) con sistemas de mayor intensidad de labranza (LC) (Chen *et al.*, 2009; Awale *et al.*, 2013). Al analizar ambas profundidades el efecto de la fertilización no se encontraron diferencias significativas. Esto puede deberse a que las variaciones en el COP<sub>g</sub> estén más influenciadas por el estado físico del suelo y la disponibilidad de agua, factores que modifican la actividad microbiana (descomposición) y la productividad del cultivo (aportes).

El carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COM) tuvo un comportamiento similar al COS. En el monocultivo sin fertilizar se observó la menor concentración de COM independientemente del sistema de labranza utilizado. La aplicación de fertilizante en monocultivo produjo un aumento en el nivel de COM, debido a que: en SD hay una mayor humificación en todas las profundidades (aporte de materia seca superficial en 0-5 cm y

mayor aporte de raíces en 5-20). En cambio, en LC el aporte de materia seca se distribuye principalmente en los 10 a 15 cm superficiales (profundidad de las labores). Posiblemente, por esa razón ese aporte compensa la mayor actividad descomponedora de las labranzas encontrándose diferencias significativas respecto de SD sólo en 0-5 cm (Tabla 1).

El IMC proporciona una medida integrada de la cantidad y calidad del COS, el cual es útil para evaluar la capacidad de las prácticas de manejo en promover la calidad del suelo (Blair *et al.*, 1995). Un sistema de manejo se considera sostenible si el valor de IMC es mayor que 100. En este estudio, al igual que el COS, el IMC presentó diferencias estadísticamente significativas entre TT-SD y TT-LC en los tratamientos fertilizados (Tabla 2). Los sistemas de labranza también provocaron cambios en las proporciones de las fracciones orgánicas (Tabla 2). En SD, aumentó significativamente los contenidos de las fracciones más lábiles ( $COP_g$ ) reflejándose en los mayores valores de L (0,17-0,21). Además, la pérdida de COS por el uso agrícola de los suelos repercutió principalmente sobre las fracciones lábiles donde el IL presentó diferencias significativas entre tratamientos. Los tratamientos bajo LC presentaron los menores valores de IL, mientras que la conversión a SD aumentó significativamente dichos valores (Tabla 2).

Tabla 2. Índices relacionados al COS y sus fracciones.

| Índices      | Prof (cm) | TT-SD   |         | TT-LC  |         | TP      |         |
|--------------|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
|              |           | f       | nf      | f      | nf      | f       | nf      |
| L            | 0-5       | 0,33 a  | 0,34 a  | 0,21 a | 0,23 a  | 0,21 a  | 0,21 a  |
|              | 0-20      | 0,17 ab | 0,21 a  | 0,11 c | 0,13 c  | 0,15 bc | 0,15 bc |
| IL           | 0-5       | 1,28 a  | 1,32 a  | 0,80 a | 0,89 a  | 0,81 a  | 0,83 a  |
|              | 0-20      | 0,74 ab | 0,88 a  | 0,48 c | 0,55 bc | 0,65 bc | 0,63 bc |
| IRC          | 0-5       | 0,40 a  | 0,28 bc | 0,33 b | 0,27 c  | 0,30 bc | 0,32 bc |
|              | 0-20      | 0,75 a  | 0,55 c  | 0,68 b | 0,60 c  | 0,68 b  | 0,71 ab |
| IMC          | 0-5       | 51 a    | 37 ab   | 27 ab  | 24 b    | 25 b    | 26 ab   |
|              | 0-20      | 56 a    | 48 ab   | 33 b   | 33 b    | 45 ab   | 45 ab   |
| COS/ $COP_g$ | 0-5       | 25 a    | 25 a    | 17 a   | 19 a    | 17 a    | 18 a    |
|              | 0-20      | 15 ab   | 17 a    | 10 c   | 11 bc   | 13 bc   | 13 bc   |
| COS/L+a      | 0-5       | 4,7 a   | 4,6 ab  | 3,9 bc | 3,2 c   | 3,9 bc  | 3,7 c   |
|              | 0-20      | 3,4 ab  | 3,3 ab  | 3,1 b  | 2,8 c   | 3,5 a   | 3,2 ab  |

L: Labilidad; IL: Índice de labilidad; IRC: Índice de reserva de carbono; IMC: Índice de manejo de carbono. Para cada profundidad letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

El estado y la tasa de cambio del carbono en los tratamientos, mediante el IMC, presentó efectos significativos únicamente del sistema de labranza ( $p < 0,05$ ). Los suelos agrícolas presentaron una calidad inferior al suelo REF (IMC=100) presentando el siguiente orden REF>SD=TP>LC. El COS/L+a presentó diferencias entre sistemas de labranza y fertilización ( $p < 0,05$ ) hallándose los mayores valores en TTSD-f (Tabla 2).

Para comparar los resultados y ayudar a comprender los efectos de diferentes tratamientos, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) de las variables edáficas e índices en 0-20 cm (Figura 1). Los dos primeros ejes (CP1 y CP2) del ACP representaron más del 80% de variabilidad total aportada por los parámetros estudiados tanto para las variables como para los índices. En el caso de las variables, el CP1 explicó 66% de la varianza donde las fracciones más estables (COS, COM y Nt) presentaron una asociación positiva (Tabla 3). Esta primer CP separó, principalmente, los tratamientos f y nf en TT-SD, sin una tendencia clara en el resto de los tratamientos (Figura 1a). La segunda CP explicó el 25% de la varianza, donde las fracciones orgánicas más lábiles ( $COP_g$  y  $COP_f$ ) presentaron asociaciones positivas en dicha componente, mientras que COM se asoció negativamente

(Tabla 3). Esta segunda componente permitió diferenciar principalmente entre TT-SD y TT-LC en los tratamientos nf.

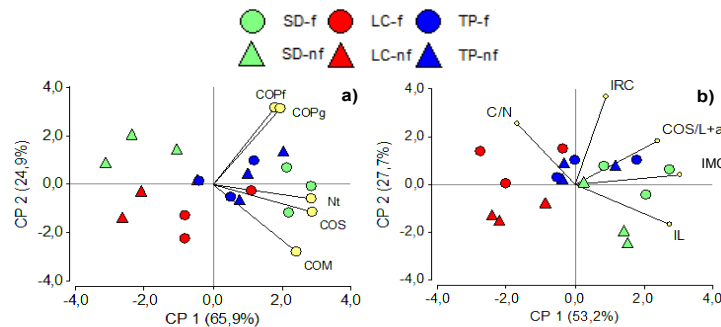


Figura 1. Biplot de componentes principales de los atributos del suelo (a) y de los índices asociados (b) para los diferentes tratamientos en 0-20 cm.

En el caso de los índices, el ACP permitió diferenciar más claramente los tratamientos (Figura 1b). El CP1 explicó 53% de la varianza donde IL, IMC y COS/L+a presentaron una asociación positiva y significativa separando, principalmente, los sistemas de labranza (LC y SD) tanto en f como en nf (Figura 1b). La segunda CP explicó el 28% de la varianza, donde IRC y C/N fueron los índices que presentaron asociaciones positivas y significativas en dicha componente (Tabla 3). Esta segunda componente permitió diferenciar principalmente entre f y nf en SD y LC (Figura 1b). Por lo tanto, mediante ACP, se puede afirmar que IL, IMC y COS/L+a fueron los índices más sensibles para diferenciar sistemas de labranza, mientras que IRC y C/N fueron más sensibles para diferenciar los tratamientos testigos de los fertilizados.

Tabla 3. Autovectores de las componentes principales CP1 y CP2. La significancia corresponde a la correlación de Pearson entre cada componente principal con las variables e índices.

|                  | Variables |          |
|------------------|-----------|----------|
|                  | CP1       | CP2      |
| COS              | 0,53 ***  | -0,21    |
| COP <sub>f</sub> | 0,33 **   | 0,59 **  |
| COP <sub>g</sub> | 0,36 **   | 0,58 **  |
| COM              | 0,44 ***  | -0,52 ** |
| Nt               | 0,53 ***  | -0,11    |
|                  | Índices   |          |
|                  | CP1       | CP2      |
| IL               | 0,54 ***  | -0,33    |
| IRC              | 0,18      | 0,72 *** |
| IMC              | 0,59 ***  | 0,08     |
| COS/L+a          | 0,47 ***  | 0,36     |
| C/N              | -0,33 *   | 0,50 *   |

(\*), (\*\*) y (\*\*\*) indican asociaciones significativas al 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente.

## CONCLUSIONES

La SD complementada con el uso de fertilizantes demostró ser efectiva para mejorar los niveles de COS en 0-20 cm, considerándose un sistema de manejo apropiado para las condiciones semiáridas del área de estudio. Los índices IL, IMC y COS/L+a podrían considerarse sensibles a los sistemas de labranza, mientras que IRC y C/N, lo fueron para las prácticas de fertilización.

## BIBLIOGRAFIA

- Awale, R; A Chatterjee & D Franzen. 2013. Tillage and N-fertilizer influences on selected organic carbon fractions in a North Dakota silty clay soil. *Soil Till. Res.* 134, 213-222.
- 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.
- Blair, GJ; RDB Lefory & L Lise. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural system. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 1459–1466.
- Bremner, J. 1996. Nitrogen - Total. En: *Methods of Soil Analysis, Part 3*. Ed. Sparks, D.L., Chemical Methods, SSSA-ASA, Madison, WI, USA. p.:1085-1123.
- Chan, KY; DP Heenan & A Oates. 2002. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil & Till. Res.* 63, 133-139.
- Chen, H; R Hou; Y Gong; H Li; M Fan & Y Kuzyakov. 2009. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. *Soil Till. Res.* 106, 85–94.
- Cookson, WR; DV Murphy & MM Roper. 2008. Characterizing the relationships between soil properties and microbial function and composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biol. Biochem.* 40, 763–777.
- Duval ME; JA Galantini; JO Iglesias; S Canelo; JM Martinez & L Wall. 2013. [Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems](#). *Soil Till. Res.* 131, 11–19.
- 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.
- Elliott, ET & CA Cambardella. 1991. Physical separation of soil organic matter. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34(1-4), 407-419.
- 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.
- Grant, F; N Juma; J Robertson; R Izaurrealde & W McGill. 2001. Long-term changes in soil carbon under different fertilizer, manure, and rotation: Testing the mathematical model ecosys with data from the Breton plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 205–214.
- Kahlon, MS; R Lal & MA Varughese. 2013. Twenty years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil Till. Res.* 126, 151–158.
- Leifeld, J & I Kögel-Knabner. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different landuse? *Geoderma* 124, 143–155.
- Lemke, RL; AJ VandenBygaart; CA Campbell; GP Lafond; BG McConkey & B Grant. 2012. Long-term effects of crop rotations and fertilization on soil C and N in a thin Black Chernozem in southeastern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 92(3), 449-461.
- Lemke, RL; AJ VandenBygaart; CA Campbell; GP Lafond & B Grant. 2010. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll. *Agric. Ecosys. Environ.* 135, 42-51.
- Lewis, DB; JP Kaye; R Jabbour & ME Barbercheck. 2011. Labile carbon and other soil quality indicators in two tillage systems during transition to organic agriculture. *Renewable Agriculture and Food Systems* 26, 342–353.
- Needelman, BA; MM Wander; GA Bollero; CW Boast; GK Sims & DG Bullock. 1999. Interaction of tillage and soil texture: biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1326-1334.
- Sainju, UM; A Lenssen; T Caesar-Tonthat & J Waddell. 2006. Tillage and crop rotation effects on dryland soil and residue carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 668–678.

- Sainju, UM; ZN Senwo; EZ Nyakatawa; IA Tazisong & KC Reddy. 2008. Tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer source effects on soil carbon sequestration and fractions. *Journal of Environmental Quality* 37, 880–888.
- Vezzani, FM & J Mielniczuk. 2009. An overview of soil quality. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 33, 743–755.
- Vieira, FCB; C Bayer; JA Zanatta; J Dieckow; 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, 195–204.