

## Carbono orgánico y propiedades físicas del suelo en predios hortícolas del sur de Uruguay

García de Souza Margarita<sup>1</sup>, Alliaume Florencia<sup>2</sup>, Mancassola Victoria<sup>2</sup>, Dogliotti Santiago<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Departamento Producción Vegetal. Facultad de Agronomía (UdelaR), Av. Gral. Eugenio Garzón 780. Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: margacecigarcia@gmail.com*

<sup>2</sup>*Departamento Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía (UdelaR), Av. Gral. Eugenio Garzón 780. Montevideo, Uruguay.*

Recibido: 4/3/10 Aceptado: 15/12/10

### Resumen

El sur del Uruguay es la zona del país con mayor incidencia y severidad de la erosión de los suelos y donde se concentra la mayor parte de la horticultura del país. La intensificación y especialización de los sistemas hortícolas como respuesta a condiciones desfavorables del contexto socio-económico, sin una adecuada planificación, ha profundizado el deterioro de la calidad del recurso suelo. Este trabajo tuvo como objetivos caracterizar el estado del suelo (Vertisoles rúpticos y Brunosoles éutricos/subéutricos típicos/lúvicos) en 16 predios hortícolas en el sur de Uruguay, así como evaluar el efecto de la adopción de alternativas de manejo en la calidad del suelo. Se evaluaron el contenido de carbono orgánico (COS), la estabilidad estructural inicial y la evolución del COS. Se detectó un deterioro de la calidad del suelo, evidenciado en una pérdida promedio de COS entre 31 a 44% y de la estabilidad estructural de 0,40 mm respecto a la situación de referencia. Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para la diferencia de COS ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en cuadros cultivados, al inicio y al final del período estudiado. Los aportes anuales de materia seca -abono verde y cama de pollo-, el nivel inicial del carbono y el período en años, explicaron significativamente la evolución del COS en los cuadros cultivados. El modelo ajustado es una herramienta simple para estimar el efecto de estas enmiendas en el balance de COS de suelos bajo cultivo de hortalizas en esta zona.

**Palabras clave:** carbono orgánico, estabilidad estructural, enmiendas orgánicas

### Summary

## Soil organic carbon and physical properties in vegetable farms in South Uruguay

The South of Uruguay is the area of the country most severely affected by soil erosion and where the most important vegetable production area is located. Soil degradation has been aggravated by a process of intensification and specialization of the vegetable production due to an unfavorable socio-economic context and lack of adequate planning of the production systems. The objectives of this work were the description of current soil quality (Typic Hapluderts, Paquic (vertic) Argiudolls, and Abruptic Argiudolls) in 16 vegetable farms in the region, and the evaluation of the impact of improved management techniques on soil quality. We evaluated soil organic carbon (SOC), soil structure stability and the evolution of SOC in time. We found a degradation of soil quality under vegetable cropping compared to the reference sites, given by an average loss of SOC of 31 to 44% and 0.4 mm in structure stability. A linear regression model was fitted to explain the change in SOC content observed

in fields under vegetable cultivation during the period under study. The change in SOC content was explained by the organic matter inputs by green manures and chicken bed, the initial SOC content and length of the period in years. This model is a simple tool to estimate the effect of soil organic amendments on SOC balance in soils under vegetable cropping in this region.

**Key words:** soil organic carbon, soil quality, organic amendments

## Introducción

El departamento de Canelones, en el sur del Uruguay, es la zona del país con mayor incidencia y severidad de la erosión de los suelos (MGAP, 2004). Estimaciones realizadas por Cayssials *et al.* (1978), indican que entre un 60 y 70% de estos suelos presentan grados de erosión moderada a severa. Desde el punto de vista productivo, el impacto de la degradación del suelo, repercute en un menor contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes, en la pérdida de estructura y compactación del suelo, en el aumento del riesgo de erosión, en una mayor dificultad para la exploración radicular para la infiltración y percolación del agua, y por lo tanto en un menor suministro de agua para los cultivos (Terzaghi y Sganga, 1998; Carmona *et al.*, 1993).

En la zona sur (Canelones, Montevideo y sureste de San José) se encuentra la mayor concentración de predios familiares del país (DIEA, 2001) y el área más importante de horticultura. El 88% de los productores que tienen como ingreso principal la horticultura son de tipo familiar (Tommasino y Bruno, 2005). El contexto en que estos productores han tenido que trabajar durante los últimos 25 años ha sido de descenso en el valor de los productos y de aumento en el costo de la energía y de los insumos principales. Entre 1990 y 2000 el número de productores especializados en horticultura disminuyó 20% (DIEA, 2001) y los que siguieron en la producción debieron producir más para mantener el mismo ingreso familiar. La estrategia elegida por la mayoría de los productores para mantener su ingreso fue intensificar y especializar sus sistemas de producción. En zonas horticolas importantes, el área de hortalizas por predio se incrementó, mientras que el área total ocupada por estos predios se mantuvo y el número de cultivos por productor disminuyó. Esta estrategia de intensificación aumentó la presión sobre

suelos con calidad física y biológica ya deteriorada, y sobre recursos de capital y mano de obra limitantes (Dogliotti *et al.*, 2005). En este marco, surge como necesario el desarrollo e implementación de tecnologías de manejo de suelos que permitan mejorar su calidad bajo estos sistemas productivos.

Un atributo clave de la calidad del suelo es la materia orgánica (MOS), (Carter, 2002, Wander, *et al.*, 2002, citado por Martínez *et al.*, 2008, Acevedo y Martínez, 2003, citado por Martínez *et al.*, 2008, Sánchez, *et al.*, 2004, Bauer y Black, 1994, citado por Martínez *et al.*, 2008). El contenido de la MOS se ha correlacionado positivamente con la estabilidad de los agregados (Tisdall y Oades, 1982; Carter, 2002; Whalen *et al.*, 2003; Piccolo y Mbagwu, 1990; Rothon, 2000, citado por Martínez *et al.*, 2008). Mantener un alto grado de estabilidad estructural es deseable para preservar la productividad del suelo, minimizar los riesgos de erosión, degradación y contaminación ambiental (Amézqueta, 1999). La estructura del suelo afecta la porosidad y por lo tanto, la dinámica del agua y del aire en el suelo y el crecimiento de las raíces de los cultivos (Brady y Weil, 2002; Acevedo y Martínez, 2003, citado por Martínez *et al.*, 2008).

Mediante el uso de tecnologías apropiadas, ha sido posible recuperar o mantener la calidad del suelo bajo explotación agrícola (Alvarez y Steinbach, 2009; Durán y García Préchac, 2007). En particular para el caso de los sistemas horticolas, la rotación de los cultivos con pradera cuando la superficie del predio lo permite, el uso de largos y pendientes adecuados de los surcos, la incorporación de estiércoles y/o de abonos verdes, el 'mulching' y algunas experiencias en mínimo laboreo, se han propuesto como prácticas promisorias para mejorar o atenuar el impacto de la producción horticola sobre el suelo (Coscia *et al.*, 2010; Lal, 2008, Astier *et al.*, 2006, Angers, 1999). En investigaciones a nivel nacional, se encontró una significativa respuesta de los cultivos horticolas a la

incorporación de abonos verdes (de invierno y de verano) y de estiércoles (cama de pollo), evidenciada en un aumento de rendimiento y mejora en la calidad comercial de las hortalizas (García y Reyes, 2001; García de Souza, 1993; Malán y Reyes, 1997; Do Campo, 2007). En un estudio exploratorio de las posibilidades de desarrollo sostenible de empresas hortícolas en la zona de Canelón Grande, sur de Uruguay (Dogliotti *et al.*, 2004, 2005) se concluye que es posible para un grupo grande de productores incrementar significativamente el ingreso familiar y, a la vez, reducir la erosión a menos de la mitad y mejorar la calidad biológica y física del suelo. Estos resultados podrían obtenerse reduciendo el área de cultivos hortícolas e integrando rotaciones con abonos verdes y pasturas y combinando el sistema con producción animal donde el área lo permite.

En el año 2007, comenzaron dos proyectos de investigación (EULACIAS<sup>1</sup> y FPTA 209<sup>2</sup>) en 16 predios piloto de productores hortícolas de Canelones y Montevideo, Uruguay. El objetivo de la investigación propuesta fue diseñar cambios para mejorar la sustentabilidad (social, económica y ambiental) de estos sistemas hortícolas. La metodología se basó en ciclos de diagnóstico, re-diseño, implementación y evaluación a nivel predial (Dogliotti *et al.*, 2009a, 2009b). El diagnóstico se realizó mediante la determinación de los puntos críticos para la sostenibilidad de cada sistema y la construcción de un árbol de problemas. El rediseño consistió en la elaboración de una propuesta de cambio basada en los problemas principales detectados. En referencia al manejo de suelos los cambios propuestos más importantes fueron la solución de los problemas más graves de sistematización, la introducción de rotaciones de cultivos y cultivos-pasturas cuando fuera posible, y la realización de abonos verdes o cultivos de cobertura y enmiendas con cama de pollo en los períodos entre cultivos. La implementación y evaluación de la propuesta constituyó la etapa central de aprendizaje para todos los participantes y generó insumos para ajustar el diseño y para realizar actividades de difusión con los vecinos y técnicos de la zona.

La evaluación del estado del recurso suelo en estos 16 predios fue considerada necesaria para poder relativizar la importancia de la degradación del recurso en cada caso, poder monitorear los parámetros tomados como indicadores, y evaluar el efecto de las nuevas prácticas en esos indicadores. Por otro lado, el desarrollo de herramientas cuantitativas que apoyen la toma de decisiones y el rediseño de sistemas fue uno de los objetivos principales de estos proyectos. Para monitorear el impacto de los sistemas de manejo sobre el recurso suelo se calibró el modelo RUSLE (Renard *et al.*, 1997) para rotaciones de cultivos hortícolas y se aplicó el modelo ROTSOM (Dogliotti *et al.*, 2004) para explorar el impacto de los sistemas de manejo en la dinámica de la MOS (Monvoisin, 2009). Este último demostró ser útil en describir y explicar la incidencia de diferentes condiciones de suelo y manejo en la evolución de la MOS, pero sus requerimientos de información y conocimiento para aplicarlo hacen que sea poco práctico para las necesidades de un técnico asesor durante la elaboración y evaluación de impacto de un proyecto o plan de desarrollo predial.

En este artículo se presentan los resultados referentes al estudio del recurso suelo para los 16 casos de estudio de los proyectos EULACIAS y FPTA 209. El primer objetivo de este artículo es presentar los resultados del diagnóstico del estado del recurso suelo al inicio de los proyectos en los 16 predios piloto. El segundo objetivo es analizar el impacto de las medidas correctivas en el manejo de suelos: incorporación de abonos verdes y cama de pollo, en el contenido de carbono del suelo y, con la información disponible desarrollar una herramienta cuantitativa que permita en forma rápida y simple estimar el impacto de diferentes niveles de aporte de abonos orgánicos en el contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS), para las condiciones de los suelos bajo cultivo de hortalizas en el sur de Uruguay.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en cuadros de cultivo seleccionados y áreas imperturbadas o sitios de referen-

<sup>1</sup>EULACIAS: European – Latin American Co-Innovation of Agricultural eco-Systems. EU FP6 INCO DEV Specific Targeted Project. 2007 – 2010.

<sup>2</sup>FPTA 209. Fondo Promoción Tecnología Agropecuaria. Diseño, implementación y evaluación de sistemas de producción intensivos sostenibles en la Zona Sur del Uruguay. 2007- 2010.

cia por tipo de suelo, de 16 predios hortícolas de Montevideo y Canelones, durante el período 2007–2010. Estos predios fueron seleccionados como predios piloto del Proyecto EULACIAS de acuerdo a criterios de diversidad en la disponibilidad de recursos productivos, en su ubicación en la región y en su sistema productivo (Pombo *et al.*, 2010). Los cuadros muestreados dentro de cada predio se seleccionaron buscando variabilidad en el tipo de suelo, situación topográfica y su historia de uso hortícola. Se eligieron sitios de referencia por tipo de suelo, coincidiendo con zonas debajo de alambrados, sin perturbación por laboreo.

### Descripción de los sitios de estudio

Los predios estudiados se encuentran en las siguientes unidades de la carta de Suelos del Uruguay 1:1.000.000: Tala Rodríguez (10 predios), Toledo (3), San Jacinto (2) y Ecilda Paullier-Las Brujas (1).

Doce de los 16 predios se encuentran en zonas con relieve ondulado (ocasionalmente fuertemente ondulado), con suelos desarrollados sobre sedimentos de origen cuaternario, profundos, negros o pardos, ricos en arcilla, muchas veces vérticos. Los suelos en estos predios fueron Vertisoles rúpticos (MGAP, 1976) LAc (Typic Hapluderts) (Durán *et al.*, 2005): predios 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 y Brunosoles éútricos y subéútricos típicos AcL, FrAc, LAc. (Paquic vertic Argiudolls): predios 2, 3, 4, 6, 7, 8, 13, 14. Los restantes cuatro predios están sobre Brunosoles subéútri-

cos lúvicos Fr y FrL (Abruptic Argiudolls). Dos de ellos, ubicados en zonas planas, desarrollados sobre sedimentos de origen cuaternario, profundos, pardos, lixiviados (predios 12 y 15), mientras que los otros dos están ubicados en zonas altas del paisaje con relieve ondulado a fuertemente ondulado, con suelos desarrollados sobre materiales geológicos con influencia de cristalino en un caso (predio 16) y cretáceo en el otro (predio 11), moderadamente profundos, pardos, de texturas medias, y lixiviados. Las características morfológicas y edafológicas generales de los suelos imperturbados de los 16 predios se muestra en el Cuadro 1.

### Colección de muestras de suelo y determinaciones

En cada predio se tomaron muestras apareadas de suelos de zonas de referencia, consideradas imperturbadas y en cuatro o cinco cuadros cultivados, del mismo tipo de suelos.

#### Parámetros físicos

- Estabilidad estructural: se extrajo un bloque por cuadro, con pala manual a 20 cm de profundidad, el ancho de la pala y con 15 cm de espesor. Se analizó el diámetro medio geométrico (DMG) con tamizado en húmedo (Kemper y Chepil, 1965). Los datos analizados corresponden a las muestras extraídas en otoño del 2008.
- Densidad aparente ( $\text{g cc}^{-1}$ ): se tomaron tres repeticiones por cuadro con anillos de extracción

**Cuadro 1.** Características morfológicas y analíticas generales de los suelos de referencia en los predios.

Horizonte	Espesores (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	arena (%)	limo (%)	arcilla (%)	Texturas	Carbono (g kg <sup>-1</sup> )	CIC <sup>1</sup> pH 7	Sat. Bases (%) a pH7
Vertisoles rúpticos (Typic Hapluderts) LAc <sup>2</sup>									
Ap	15-30	6,5-7	17-23	35-45	35-48	FAc-Ac	19-27	30-33	95-100
Bt(Au1,Au2)	60-70	6,8-7,5	13-20	30-38	45-51	Ac	10-15	35-42	95-100
Ck	75-100+	8-8,5	12-15	33-40	50-54	Ac-AcL	2-5	29-31	100
Brunosoles éútricos/subéútricos típicos (Pachic and Vertic Argiudolls) AcL, FrAc, Lac									
Ap	10-30	5-6	18-31	40-50	28-42	FrAc(gv)-FrAcL	20-27	17-29	80-90
Bt(Bt1,Bt2)	40-70	6-7	12-20	25-40	46-59	Ac	7-15	30-46	90-100
Ck	50-100+	7-8,5	15-35	30-45	35-47	Ac-AcL	1-6	25-30	100
Brunosoles subútricos lúvicos (Abruptic Argiudolls) Fr y FrL									
Ap	10-30	4,8-6,3	10-42	45-65	20-27	Fr,FrL	9-17	12-19	75-90
Bt	20-30	6	10-28	35-48	43-45	Ac-AcL	6-9	20-30	85-90
BC	20	7	6-20	35-50	45	Ac-AcL	4-6	20-31	99
Ck	50-80`+	8	7-21	39-51	39-42	Ac-AcL	1-5	20-25	100

<sup>1</sup> CIC = capacidad de intercambio catiónico.

<sup>2</sup> Ac, arcilloso; Fr, franco; L, limoso.

de muestras imperturbadas a dos profundidades: de 5 a 10 y de 15 a 20 cm.

- Textura: en cuadros cultivados se determinó a dos profundidades: en el camellón (0-20 cm) y por debajo del camellón (20-40 cm); en sitios de referencia se determinó en todos los horizontes. La determinación se realizó al comienzo del proyecto, mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos 1962).

#### Parámetros químicos

- Carbono orgánico: el muestreo se realizó con una frecuencia bianual (en otoño y primavera), comenzando en el año 2007. En seis de los predios se cuenta además con información del contenido de COS desde el 2004-2005 proveniente del proyecto FPTA N° 160<sup>3</sup> (Dogliotti *et al.*, 2006). Las muestras se extrajeron con calor, tomando una muestra compuesta por 20 tomas individuales por cuadro, a 20 cm de profundidad. Las determinaciones se realizaron por oxidación con  $K_2Cr_2O_7$  0.1 N en  $H_2SO_4$  concentrado durante una hora a 150 °C (Nelson y Sommers, 1996) y determinación colorimétrica (600 nm). El contenido de COS se expresó en  $Mg\ ha^{-1}$ , considerando la densidad aparente del suelo medida de 5–10 y 15-20 cm, en el momento de la extracción de la muestra para COS.
- Acidez activa: se midió en phmetro utilizando una relación suelo:agua de 1:2,5.
- Capacidad de Intercambio Catiónico: se determinó con la finalidad de caracterizar los suelos, mediante el método de acetato de amonio 1 N a pH 7 (Rohades, 1982).

#### Análisis estadístico

La estabilidad estructural se analizó mediante la prueba t de Student para muestras apareadas (cuadros cultivados y sus respectivos sitios de referencia).

La concentración de COS ( $g\ kg^{-1}$ ) en los primeros 20 cm de suelo al inicio del proyecto según su uso (cuadros cultivados y sus sitios de referencia) y tipo

de suelo fue analizada mediante un modelo lineal mixto usando el método de máxima verosimilitud restringida (REML) donde los efectos fijos fueron suelo, uso y suelo\*uso. La diferencia de COS ( $g\ kg^{-1}$ ) entre muestras apareadas de sitios cultivados y de referencia al inicio del período de estudio, se analizó también mediante REML, usando como efectos fijos suelo y predio; no se incluyó la interacción, dado que no en todos los predios existen todos los tipos de suelo. Para la separación de medias se calculó la diferencia mínima significativa (DMS). Se compararon por pares, las medias de los tratamientos (combinación de los niveles del factor suelo con los niveles del factor uso) mediante la prueba t de Student, considerando el desbalance en el número de repeticiones (Cuadro 3).

Para explicar las variaciones en el COS ( $\Delta COS$ ) debidas a las modificaciones en el manejo del suelo introducidas por los proyectos, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple para la variable  $\Delta COS$  en cuadros cultivados. En un inicio se consideraron como posibles variables explicativas del  $\Delta COS$ , las siguientes: porcentaje de arcilla, porcentaje de limo, COS inicial, número de laboreos, Materia Seca (MS) de los aportes orgánicos, y tiempo. El  $\Delta COS$  se calculó como la diferencia entre el COS ( $Mg\ ha^{-1}$ ) al final del período estudiado (año 2010) y el COS ( $Mg\ ha^{-1}$ ) al inicio del período (2004 o 2007 según el predio). La contribución de las variables arcilla, limo y número de laboreos, no fue significativo para explicar el  $\Delta COS$ , probablemente debido a la poca variación de estos parámetros, entre los predios estudiados. Se volvió a ajustar un modelo con las variables que sí dieron significativas:

$$Y = \phi_0 + \phi_1 C_{ini_1} + \phi_2 AV_2 + \phi_3 CP_3 + \phi_4 años_4 + \varepsilon$$

Siendo:

Y:  $\Delta COS$  ( $Mg\ ha^{-1}$ )

$\phi_0$ : intercepto estimado

$\phi_x$ : parámetros estimados

C ini: carbono inicial ( $Mg\ ha^{-1}$ )

AV: materia seca de abono verde ( $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ )

CP: materia seca de cama de pollo ( $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ )

Años: número de años del período evaluado.

$\varepsilon$ : error debido a variables no controladas

<sup>3</sup>FPTA 160. Fondo Promoción Tecnología Agropecuaria. «Validación de Alternativas Tecnológicas para la Producción Hortícola Sostenible en la Región Sur». 2004-2006.

Para este análisis se utilizó la información obtenida de los aportes orgánicos de 42 cuadros de cultivo de los 16 predios y su correspondiente dato analítico del COS (n = 42).

Las incorporaciones relevadas correspondieron a abonos verdes: 50% de las incorporaciones fueron avenas (*Avena sativa*) con 6996 kg MS ha<sup>-1</sup> promedio y 38,7% C; 30% fueron trigo (*Triticum aestivum*) con 6959 kg MS ha<sup>-1</sup> y 25,3% C; 13% fueron moha (*Setaria italica*) con 6660 kg MS ha<sup>-1</sup> y 0,37% C; 6% fueron sudangrass (*Sorghum × drummondii* (Steud.) Mill sp. & Chase) con 6800 kg MS ha<sup>-1</sup> y 0,38% C; y 3% fueron mezclas incluyendo maíz (*Zea mays*). Las incorporaciones de estiércoles fueron 89% cama de pollo con 8303 kg MS ha<sup>-1</sup> y 26,6% C, y 11% de gallina con 4401 kg MS ha<sup>-1</sup> con 22,5% C. Además se consideraron restos de cultivos hortícolas (tomate, *Solanum lycopersicum* y boniato, *Ipomoea batata*) con 1377 kg MS ha<sup>-1</sup> promedio y 0,46% C. Las relaciones C:N de las enmiendas orgánicas incorporadas, fueron entre 8,7 y 32,3. Estas incorporaciones de abonos orgánicos fueron diseñadas en las rotaciones para cada predio en el marco de los proyectos EULACIAS y FPTA 209. Los tiempos considerados necesarios para la descomposición de los abonos verdes, fueron entre uno y dos meses (Del Pino *et al.*, 2004, Ernst *et al.*, 2002).

Todos los análisis se efectuaron con el software Genstat Discovery (VSN Internacional, 2008).

## Resultados y discusión

### Estabilidad estructural

Mayores DMG se asocian a mejor estabilidad estructural, siendo los valores más altos para el sitio de referencia (2,76 mm) que para los cuadros pro-

ductivos (2,36 mm). En promedio, los DMG fueron 0,4 mm menores en los pares perturbados respecto a los sitios de referencia (Cuadro 2). Estos resultados son coincidentes con lo encontrado por Terzaghi (1996), con el método de tamizado en húmedo, donde el diámetro de los agregados fue un 14% menor en cualquiera de los sistemas de laboreo comparado con el sitio con pastura perenne.

En este trabajo las correlaciones entre el contenido de COS y la estabilidad no mostraron significación estadística, probablemente debido a los pocos datos disponibles para el análisis y al estrecho rango de variación de los DMG encontrados. La literatura cita una relación positiva entre el COS y la estabilidad estructural (Carter, 2002) y una relación negativa con la intensidad de laboreo (Liebig *et al.*, 2004). La reducción en la estabilidad estructural implica un deterioro de la calidad del suelo, ya que frente a una presión, se reducen los poros de mayor tamaño, resultando en una mayor compactación, en una menor capacidad de infiltración del agua y por tanto una menor resistencia a la erosión, por aumento del volumen escurrido en superficie y de la resistencia al crecimiento radicular. Todos estos efectos tienen consecuencia directa en la respuesta vegetal, evidenciada en la pérdida de rendimientos comerciales (Carter, 2002).

### Contenido de Carbono Orgánico del Suelo

Los niveles de COS al comienzo del proyecto de rediseño de los predios fueron menores en los cuadros cultivados que en sus respectivos sitios de referencia descriptos para todos los tipos de suelo estudiados (Cuadro 3). Los Vertisoles rúpticos presentan valores de COS más altos que los Brunsoles tanto

**Cuadro 2.** Promedios, intervalos de confianza, y error estándar de las diferencias de la estabilidad estructural en muestras apareadas (cuadros cultivados y sitios de referencia).

Muestras	Número de obs.	Promedio de las diferencias de DMG <sup>1</sup> (mm)	Intervalo de confianza de la diferencia	Error estándar	Prob t
Referencia - Cultivado	18	0,40	0,14 – 0,66	0,33	< 0,001

<sup>1</sup>DMG = diámetro medio geométrico.

**Cuadro 3.** Contenido promedio de COS (g kg<sup>-1</sup>) a los 20 cm de profundidad según tipo de suelo y uso anterior.

Uso de la tierra	Vertisoles rúpticos	Brunosoles éútricos/ subéútricos típicos	Brunosoles subéútricos lúvicos	Promedios	Número de obs.	DMS <sup>2</sup> u1-u2
	Ac, FrAcL <sup>1</sup>	Ac, AcL	FrL, Fr			
Referencia	24,84	21,34	20,01	22,07 a	23	2,17
Cuadros productivos	16,51	14,71	11,31	14,18 b	66	
Promedios	20,68 a	18,03 b	15,66 b			
Número de obs.	45	25	19		89	
DMS <sup>3</sup> v-bt	2,29					
DMS <sup>4</sup> v-bl	2,66					
DMS <sup>5</sup> bt-bl	2,94					

<sup>1</sup>Ac, arcilloso; Fr, franco; L, limoso.

<sup>2</sup>DMS u1-u2 = diferencia mínima significativa entre usos.

<sup>3</sup>DMS v-bt = diferencia mínima significativa entre Vertisoles y Brunosles típicos.

<sup>4</sup>DMS bt-bl = diferencia mínima significativa entre Brunosoles típicos y Brunosles lúvicos.

en la situación de referencia como en los cuadros cultivados. Esto coincide con lo encontrado por otros autores (Hassink *et al.*, 1997) quienes señalan que los suelos de texturas más finas tienen una mayor capacidad de protección del COS, y por lo tanto alcanzan contenidos más altos de COS. No se observó interacción significativa entre suelo y uso.

Comparando los niveles de COS de las zonas de referencia de acuerdo al tipo de suelo, con los valores reportados para suelos similares en Uruguay en condiciones prístinas (Durán y García Préchac, 2007), se verifica una diferencia de 43% menor para los Vertisoles rúpticos y 26% menor para los Brunosoles éútricos.

Se verifica pérdida de COS respecto a la situación de referencia en 14 de los 16 predios. En el Cuadro 4 se presentan las diferencias de COS (g kg<sup>-1</sup>) entre el promedio de sitios cultivados y su correspondiente suelo de referencia para cada predio, al inicio de la intervención de los proyectos.

Se observa variabilidad en las pérdidas/ganancias de COS, siendo altamente significativo el efecto predio (Cuadro 5). Se verificaron pérdidas mayores a 10 g kg<sup>-1</sup> de COS en cinco de los predios, pérdidas entre 5 y 10 g kg<sup>-1</sup> de COS en siete de los predios, y pérdidas menores, o incluso ganancias en cuatro predios. Se necesita más información de la historia

**Cuadro 4.** Diferencias en el contenido de COS (g kg<sup>-1</sup>) entre cuadros cultivados y zonas de referencia y en cada predio.

Predio n°	Diferencias COS g kg <sup>-1</sup>	
12	-23,984	a
15	-14,616	b
4	-14,569	b
8	-14,345	b
2	-10,477	bc
10	-8,138	cd
16	-7,752	cde
6	-6,949	cdef
9	-6,949	cdef
1	-6,931	cdef
11	-6,931	cdef
3	-4,773	cdefg
13	-3,1	defgh
7	-1,707	fgh
5	0,18	gh
14	1,698	h
N	64	
DMS <sup>2</sup>	5,92	

<sup>2</sup>DMS = diferencia mínima significativa.

**Cuadro 5.** Test Wald para los efectos fijos (suelo y predio) al analizar la diferencia de COS en sitios cultivados y COS en sitio de referencia

Términos Fijos	Wald Statistic	G.L	Probabilidad Chi-sq
Predio	302,31	15	< 0,001
Suelo	3,10	1	0,562

de manejo de cada predio para profundizar en el análisis de estos resultados.

**Modelo de estimación del Δ COS**

Se estudió la evolución del contenido de Carbono Orgánico del Suelo en el horizonte superficial a 20 cm, en los cuadros cultivados desde el inicio del período de intervención de los proyectos (2004 y 2007) hasta el último análisis realizado (otoño 2010), y los parámetros que podrían estar explicando dicha variación. En el Cuadro 6 se muestra el análisis estadístico de la regresión para el Δ COS.

La ecuación de regresión lineal múltiple [1] se ajustó con los parámetros: valor COS inicial (negativamente relacionado), materia seca (MS ha<sup>-1</sup>) apor-

**Cuadro 6.** Análisis estadístico de la regresión para el COS final – COS inicial de cuadros cultivados

	g.l. <sup>1</sup>	s.c. <sup>2</sup>	c.m. <sup>3</sup>	Prob F
Regresión	4	510,7	128	<,001
Residual	37	252,9	6,84	
Total	41	763,6	18,63	
Número de obs.	42			

<sup>1</sup>g.l. = grados de libertad.

<sup>2</sup>s.c. = suma de cuadrados.

<sup>3</sup>c.m. = cuadrados medios.

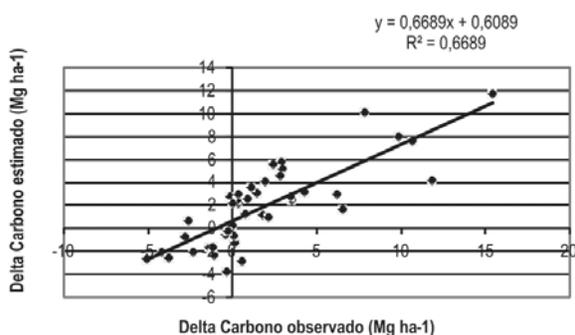
tada anualmente por los abonos verdes y restos de cultivo (AV) y estiércoles (CP), y número de años evaluados (positivamente relacionados) (p<0,05), como lo indica el Cuadro 7. Los rangos de cada parámetro utilizado en el ajuste de la ecuación se muestran también en el Cuadro 7.

$$\Delta \text{COS (Mg ha}^{-1}\text{)} = 1.31 + 0,000536 * \text{kg ha}^{-1} \text{ MS AV anual} + 0,00027 * \text{kg ha}^{-1} \text{ MS CP anual} - 0.1616 * \text{COS inicial (Mg ha}^{-1}\text{)} + 0,848 * \text{N}^{\circ} \text{ de años}$$

[1]

En la Figura 1 se muestra la regresión entre los valores del Δ COS observados y los estimados mediante la ecuación del modelo de regresión lineal múltiple, con un ajuste del r<sup>2</sup> de 0.6689.

Este modelo empírico se utilizó para estimar el ΔCOS en función de diferentes aportes de materia seca de abonos verdes y/o de estiércol. Los límites de validez de la ecuación ajustada están dados por:



**Figura 1.** Regresión lineal entre valores de ΔCOS observados y estimados mediante la ecuación del modelo de regresión lineal múltiple.

**Cuadro 7.** Estimación de los parámetros del modelo, valores promedio y rango de valores usados.

Error estándar	t(37)	Prob. t	Valor medio	Valor máx.	Valor min.
2,03	0,65	0,521			
0,0497	-3,25	0,002	31,97	47,25	12,87
0,0000107	5,03	<0,001	3947,8	19047,6	0
0,000139	1,95	0,059	3198	13317	0
0,264	3,21	0,003	3,19	6,5	1

1. Intervalo máximo temporal de seis años.
2. Rango de texturas de suelo: desde franco arcillosas a franco limosas en el horizonte A.
3. Rango de COS inicial (mínimo: 12.87 y máximo: 47.25 Mg ha<sup>-1</sup>).
4. Aportes máximos anuales de MS como abono verde (19047 kg ha<sup>-1</sup> y como estiércol 13317 kg ha<sup>-1</sup>).
5. Aportes máximos de MS total combinando ambos aportes: 27.000 kg ha<sup>-1</sup>.

En el Cuadro 8 se presenta un ejercicio de cálculo del  $\Delta$  COS para diferentes COS iniciales.

Considerando el valor máximo de COS inicial (47.25 Mg ha<sup>-1</sup>), encontrados en el análisis de los cuadros hortícolas, son necesarios 7000 kg MS ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de abonos verdes y 6400 kg MS ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> de estiércol para mantener ese nivel de COS. En el otro extremo, corriendo la ecuación para el mínimo valor de COS inicial observado en los predios piloto (12.87 Mg ha<sup>-1</sup>), aún sin el agregado de materia seca los valores de  $\Delta$  COS son positivos y próximos a cero. Estos resultados son coherentes con el concepto de Carbono Mínimo del suelo (Rühlmann, 1999). De acuerdo a esto, cuando el contenido de COS está cerca del mínimo no existen pérdidas por minerali-

zación o éstas son insignificantes. El COS remanente está fuertemente asociado a la fracción arcilla y es muy estable (Hassink *et al.*, 1997). En este caso el COS inicial (12.87 Mg ha<sup>-1</sup>) está próximo al COS mínimo estimado con la ecuación de Rühlmann (1999) para ese tipo de suelo.

Con los valores promedio de aportes de MS utilizados en los predios bajo estudio (3948 kg ha<sup>-1</sup> de abonos verdes y 3198 kg ha<sup>-1</sup> de estiércol), en los suelos con niveles más bajos de COS inicial se logran incrementos de 3.06 Mg COS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Con los mismos aportes, los suelos con niveles más altos de COS inicial, perderían COS a una tasa de 2.50 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Cuadro 8).

De acuerdo a los resultados obtenidos por esta ecuación los aportes de los abonos verdes tienen un mayor efecto en el incremento del COS que el aporte de los estiércoles, como lo reafirman los parámetros de la ecuación [1].

Según las estimaciones realizadas a mediano plazo (seis años) con la ecuación [1] para tres situaciones distintas de predios con contenidos de COS máximo, intermedio y mínimo y con los aportes de MS reales para cada situación, es posible aumentar el contenido de COS en 0,69, 1,28 y 3,57 Mg ha<sup>-1</sup>

**Cuadro 8.** Estimación del  $\Delta$ COS con diferentes aportes en situaciones de máximo y mínimo COS, utilizando la ecuación [1].

	MS <sup>1</sup> abono verde kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	MS <sup>1</sup> Estiércol kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	COS <sup>2</sup> inicial Mg ha <sup>-1</sup>	años	$\Delta$ COS <sup>2</sup> Mg ha <sup>-1</sup>	$\Delta$ MOS <sup>3</sup> Mg ha <sup>-1</sup>
	19047,6	8000	47,25	1	6,89	11,88
valores máximos de abono verde y estiércol	19047,6	0	47,25	1	4,73	8,16
	0	13317	47,25	1	-1,88	-3,24
suelos con máximo valor de COS encontrado en cuadros cultivados	0	0	47,25	1	-5,48	-9,44
aportes para $\Delta$ COS = 0	7000	6400	47,25	1	0,00	0,00
	3947,8	3198	47,25	1	-2,50	-4,31
valores promedio de abonos verdes y estiércol	3947,8	0	47,25	1	-3,36	-5,80
	0	3198	47,25	1	-4,61	-7,95
	19047,6	8000	12,87	1	12,45	21,46
valores máximos de abono verde y estiércol	19047,6	0	12,87	1	10,29	17,74
	0	13317	12,87	1	3,67	6,33
suelos con mínimo valor de COS en cuadros cultivados	0	0	12,87	1	0,08	0,13
	3947,8	3198	12,87	1	3,06	5,27
valores promedio de abonos verdes y estiércol	3947,8	0	12,87	1	2,19	3,78
	0	3198	12,87	1	0,94	1,62

<sup>1</sup> MS = materia seca.

<sup>2</sup> COS= carbono orgánico del suelo.

<sup>3</sup> MOS = materia orgánica del suelo.

**Cuadro 9.** Estimación del  $\Delta$  COS promedio para un período de seis años con la información de tres predios, utilizando la ecuación [1].

Predios	MS <sup>1</sup> Abono verde kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	MS <sup>1</sup> Estiércol kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	COS <sup>2</sup> inicial Mg ha <sup>-1</sup>	Promedio anual $\Delta$ COS <sup>2</sup> Mg ha <sup>-1</sup>	Promedio anual $\Delta$ MOS <sup>3</sup> Mg ha <sup>-1</sup>
12	7000	5500	12,90	3,57	6,16
6	5000	6000	28,2	1,28	2,21
7	12000	0	46,8	0,69	1,19

<sup>1</sup>MS = materia seca.

<sup>2</sup>COS= carbono orgánico del suelo. Se actualizó anualmente sumándole los  $\Delta$  COS estimados por año.

<sup>3</sup>MOS = materia orgánica del suelo.

año<sup>-1</sup> respectivamente (Cuadro 9). Estos resultados concuerdan con las estimaciones de  $\Delta$ COS realizadas por Monvoisin (2009) con el modelo ROTSOM a seis años. En este estudio se trabajó también en el predio 6 y con los mismos aportes de MS se obtuvieron ganancias de COS de 1,19 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, comparable al valor 1,28 obtenido con la ecuación [1].

De acuerdo a la experiencia nacional los abonos verdes con gramíneas de invierno pueden producir en promedio entre 3000 y 7000 kg de MS y los de verano entre 3000 y 8000 kg de MS dependiendo de la especie, largo del ciclo y disponibilidad de agua (García de Souza y Reyes, 2000; Calegari y Peñalva, 1994; Do Campo y García, 2000; Barbazán *et al.*, 2002). Esto significa que es necesario incorporar como mínimo un abono verde de buen rendimiento por año, lo cual requiere de un período mínimo entre cultivos de siete meses para lograr cinco meses de ciclo de crecimiento y dos meses de preparación de suelo, tiempo necesario para la descomposición mínima de los materiales y facilitar su manejo posterior (Del Pino *et al.*, 2004; Ernst *et al.*, 2002). Esto es muy difícil en la mayoría de los sistemas hortícolas ya que varios de los cultivos más importantes tienen ciclos de crecimiento de más de cinco meses. Aumentar las dosis anuales de cama de pollo es posible, pero debe analizarse con cuidado el efecto en la acumulación de fósforo y en el lavado de nitrógeno.

Cuando se parte de suelos muy degradados es esperable obtener aumentos muy rápidos en el contenido de COS al cambiar radicalmente el sistema de manejo por uno con aportes importantes de materia orgánica. La tasa de aumento tiende a dismi-

nuir rápidamente en años siguientes a pesar de mantener el mismo nivel de aporte de materia orgánica (Stewart *et al.*, 2007).

## Conclusiones

En los 16 predios hortícolas, estudiados en los proyectos, se detectó un deterioro de la calidad del suelo, evidenciada en una pérdida promedio de COS entre 31 a 44% y de la estabilidad estructural de 0,40 mm respecto a la situación de referencia.

Los aportes anuales de materia seca, tanto de abono verde como de estiércol, junto con el nivel inicial del carbono del suelo, son variables que explican significativamente la evolución del COS en los cuadros cultivados durante el período evaluado (de 1 a 6,5 años). De acuerdo a los resultados presentados en este artículo, el diseño de rotaciones de cultivos hortícolas incluyendo la realización de un abono verde anual e incorporaciones de estiércol permitirían mejorar en forma importante el contenido de COS de los suelos más degradados bajo horticultura en el sur de Uruguay. Sin embargo parece difícil llegar a la cantidad de materia seca por hectárea y por año necesaria para mantener los suelos con contenidos de materia orgánica más elevados en los predios hortícolas de esta zona. Para esto es necesaria la incorporación de otras tecnologías con capacidad de mejorar el COS y explorar el efecto de la introducción de pasturas o alfalfa (*Medicago sativa*) a la rotación, que reduce la cantidad de laboreos y de tecnologías de laboreo mínimo o reducido.

La ecuación de regresión lineal múltiple ajustada, en este trabajo, representa una herramienta sencilla y útil para un técnico asesor para poder evaluar rápidamente el impacto que puede tener sobre el suelo un determinado plan productivo de mediano plazo sobre el COS de un sistema hortícola, dentro de los límites señalados para el uso de esta ecuación.

## Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente al equipo de trabajo, a los ayudantes de investigación José Pedro Dieste, Sebastián Peluffo y Santiago Guerra, por los valiosos aportes, la extracción de muestras y todo el relevamiento de información predial, tareas básicas imprescindibles para la elaboración de este artículo. Nuestro especial agradecimiento a las familias de los productores que amablemente suministraron la información requerida, nos dedicaron parte de su tiempo para atender la información solicitada y nos permitieron realizar el estudio en sus predios. Esta investigación fue cofinanciada por el proyecto EULACIAS (EU FP6-2004-INCO-dev-3; contract nr 032387; <http://www.eulacias.org/>) y el FPTA 209 (INIA).

## Bibliografía

- Acevedo E. y Martínez E.**, 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos, en Acevedo, E.: Sustentabilidad en Cultivos Anuales. Citado por: Martínez H. E., Fuentes E. J.P. y Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*; 8(1): 68-96. 2008.
- Álvarez R. and Steinbach H.S.** 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*; 104 (1) 1–15.
- Amézketa E.** 1999. Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*; 14(2/3): 83-151.
- Angers D. A., Edwards L. M., Sanderson J. B. and Bissonnette N.** 1999. Soil organic matter quality and aggregate stability under eight potato cropping sequences in a fine sandy loam of Prince Edward Island. *Canadian Journal of Soil Science*; 79(3): 411–417.
- Astier M., Maass J., Etchevers-Barra J., Peña J. and De Leon F.** 2006. Short term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol. *Soil & Tillage Research*; 88(1-2): 153-159.
- Barbazán M., Ferrando M. y Zamalvide J. P.** 2002. Acumulación de materia seca y nitrógeno en gramíneas anuales invernales usadas como cobertura vegetal en viñedos. *Agrociencia*; 6(1): 10-19.
- Bauer A. and Black A. L.**, 1994. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. Citado por: Martínez H. E., Fuentes E. J.P. y Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*; 8(1): 68-96. 2008.
- Bouyoucos G. J.** 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54(5):464-465.
- Brady N C. and Weil R R.** 2002. The nature and properties of soils. 13th ed. New Jersey :Prentice Hall. 122-174 p
- Calegari A. y Peñalva M.** 1994. Abonos verdes, importancia agroecológica y especies con potencial de uso en el Uruguay. Canelones : MGAP. 151p.
- Carter M.** 2002. Soil Quality for Sustainable Land Management: Organic Matter and Aggregation Interactions that Maintain Soil Functions. *Agronomy Journal*; 94(1), 38–47.
- Carmona H., Sosa P., Davies P., Cristiani G. y Puente R.** 1993. Manejo y Desarrollo integrado de cuencas hidrográficas en la cuenca del río Santa Lucía: Plan Ejecutivo para el manejo de la microcuenca del embalse Canelón Grande. Documento 5. Programa de Cooperación Técnica, FAO, Uruguay.
- Cayssials R., Liesegang J.E. y Piñeyría, J.** 1978. Panorama de la erosión y conservación de suelos en el Uruguay. *Boletín Técnico*; (4). 27p.
- Coscia P., del Pino A., Barros C. y Moltini, C.** 2010. Cambios en la materia orgánica de suelos hortícolas de Uruguay con agregado de enmiendas orgánicas(CD ROM) En: Reunión Técnica: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. 12 al 14 julio 2010. Colonia. Uruguay.
- Del Pino A., Mori C. y Repetto C.** 2004. Patrones de descomposición de rastrojos de trigo, maíz y girasol a diferentes niveles de N. (CD ROM). En: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Cambio en el uso de la tierra: educación y sustentabilidad; 22 al 24 de junio 2004; Paraná, Entre Ríos. AACCS.
- DIEA.** 2001. Censo General Agropecuario 2000. Montevideo : Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. 120p.
- Do Campo R. y García C.** 2000. Sistemas de cultivos para producción hortícola sostenible en la región sur. IN: Seminario Investigación Aplicada, Prenader. Las Brujas : INIA. 7p.
- Do Campo R., García C. y Arboleda J.** 2007. Rotaciones Hortícolas. En: Día de Campo: Manejo de suelos y cultivos hortícolas. Las Brujas: INIA. (Serie de Actividades de difusión 479) 15p. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad\\_479.pdf](http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_479.pdf); Consultado noviembre 2009.
- Dogliotti S., Peluffo S., Dieste J.P., García M. and Rossing W.A.H.** 2009a. Re-designing of vegetable farming systems in South Uruguay: linking theory and practice. In: Farming Systems Design Conference Monterey, California; 2009. p. 95-96. Disponible en: <http://www.iesm.org/farmsys09/>; Consultado agosto 2010.
- Dogliotti S., Abedala C., Aguerre V., Albin A., Alliaume F., Alvarez J. et al.** 2009b. Re-diseño de sistemas hortícolas sostenibles: una experiencia de prácticas integrales en la Facultad de Agronomía. EN: Congreso ExtenSo 2009; noviembre 2009; Montevideo. 11p.
- Dogliotti S., González L., Peluffo S. y Aldabe L.** 2006. Diseño, implementación y evaluación de sistemas de producción hortícolas sustentables. En: Validación de alternativas tecnológicas para la producción hortícola sostenible en la región sur. INIA (Serie Actividades de Difusión n° 468) p. 1-8.
- Dogliotti S., Van Ittersum M.K. and Rossing W.A.H.** 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in south Uruguay. *Agricultural Systems*; 86(1):29-51.
- Dogliotti S., Rossing W.A.H. and Van Ittersum M.K.**, 2004. Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems*; 80(3): 277-302.
- Durán A., Califra A., Molfino J.H. and Lynn W.** 2005. Keys to Soil Taxonomy for Uruguay. USDA. Natural Resource Conservation Service. 77 p.
- Durán A. y García Préchac F.** 2007. Suelos del Uruguay, Origen, Clasificación, Manejo y Conservación - Vol. II. Montevideo: Hemisferio Sur. 358 p.

- Ernst O., Bentancur O. y Borges R.** 2002. Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: trigo, maíz, soja y trigo después de maíz. *Agrociencia*, 6(1): 20-26.
- García M. y Reyes C.** 2001. Estudio de la respuesta de una sucesión de cultivos hortícolas a diferentes abonos orgánicos, En: VIII Congreso Nacional de Horticultura; 7 al 10 de noviembre del 2001; Salto, Uruguay. p. 29
- García de Souza, M. y Reyes, C.** 2000. Manejo de suelos en Horticultura, sitio Juanicó. Estudio de sistemas productivos hortícolas teniendo como base el manejo de suelos. Informe de avances. En: Seminario Investigación Aplicada, Prenader, Las Brujas: INIA. 32p.
- García de Souza, M.** 1993. Manejo de adubação orgânica e doses de nitrogênio na cultura de cenoura (*Daucus carota* L.) em solos da zona sul do Uruguai (Tesis de Maestría). Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 247p
- Hassink J., Whitmore, A.P. and Kubát, J.** 1997. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *European Journal of Agronomy*, 7 (1-3): 189-199.
- Kemper W.D. and Chepil W.S.** 1965. Size distribution of aggregates. In: *Methods of soil Analysis -part 1*. Madison: Ed C Black. ASA. p. 495-509.
- Lal R.** 2008. Sustainable Horticulture and Resource Management. *Acta Horticulturae*; (767):19-44.
- Liebig M.A., Tanaka D.L. and Wienhold B.J.** 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. *Soil & Tillage Research* 78(2): 131-141.
- MGAP. División Suelos y Aguas.** 2004. Interpretación de la carta de erosión antrópica. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/renare/SIG/ErosionAntropical/mapaindices.jpg>; Consultado noviembre 2009.
- MGAP.** 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I: Clasificación de Suelos. 96 p.
- Malán R. y Reyes C.** 1997. Efecto de diferentes manejos de suelo en el rendimiento de un cultivo de zanahoria y en las propiedades químicas y físicas del suelo (Tesis de grado). Montevideo: Facultad de Agronomía. 119p.
- Monvoisin K.** 2009. Model-based diagnosis and design of sustainable farming systems in Canelones, Uruguay (MSc Thesis). Wageningen: Wageningen University, 74 p.
- Nelson D.W. and Sommers L.E.** 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed.*, A.L. Page *et al.*, Ed. Agronomy. 9:961-1010. Am. Soc. of Agron., Inc. Madison, WI.
- Piccolo A. and Mbagwu J.S.C.** 1990. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances. *Plant and Soil* 123(1): 27-37.
- Pombo C., Scariato M., Bacigalupe G. F., Dogliotti S., Rossing W.A.H., Abedala C. et al.** 2010. Co-innovando para una agricultura más sostenible. En: Congreso en Co-Innovación de Sistemas de Sustento Rural; Minas. Uruguay. p. 7 -10.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G. A., Mc Cool D.K. and Yonder D.C.** 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United State Department of Agriculture. Agricultural Research Service. (Agriculture Handbook Number 703). 384p.
- Rhoades J.** 1982. Cation Exchange Capacity. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy Monograph N° 9. 2nd. Ed.* Riverside: USDA-ARS.
- Rothon, F.E.**, 2000. Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices. Citado por: Martínez H. E., Fuentes E. J.P. y Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*; 8(1): 68-96. 2008.
- Rühmann J.** 1999. A new approach to estimating the pool of stable organic matter in soil using data from long-term field experiments. *Plant and Soil*; 213(1-2): 149-160.
- Sánchez J., Harwood R., Willson T., Kizilkaya K., Smeenk J., Parker E., et al.** 2004. Managing Soil Carbon and Nitrogen for Productivity and Environmental Quality. *Agronomy Journal*; 96(3): 769-775.
- Stewart C. E., Paustian K., Conant R. T., Plante A. F. and Six J.** 2007. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation *Biogeochemistry* 86(1-2):19-31.
- Terzaghi A. y Sganga J.C.** 1998. Características físicas de los principales suelos agrícolas de Canelones y Montevideo y su interpretación agronómica. *Boletín Técnico*; (8): 769-775.
- Terzaghi A.** 1996. Soil management for improvement of soil physical characteristics related to erosion in Uruguay» (Ph.D. thesis). Wageningen: Agricultural University.
- Tisdall J. M. and Oades J. M.** 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*; 33(2): 141-163.
- Tommasino H. y Bruno Y.** 2005. Algunos elementos para la definición de productores familiares, medios y grandes. *Anuario OPYP* 2005: 267-278.
- Wander M.M., Walter G.L., Nissen T.M., Bollero G.A., Andrews S.S. and Cavanaugh-Grant D.A.,** 2002. Soil quality: Science and process. Citado por: Martínez H. E., Fuentes E. J.P. y Acevedo H. E. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*; 8(1): 68-96. 2008.
- Whalen Joann K., Quancai Hu and Aiguo Liu.** 2003. Compost Applications Increase Water-Stable Aggregates in Conventional and No-Tillage Systems. *Soil Science Society of American Journal*; 67(6):1842-1847.