

AGRICULTURA SUSTENTABLE Y LAS TÉCNICAS DE MANEJO DEL RECURSO SUELO

Fernando O. García
IPNI- Argentina
fgarcia@ipni.net

INTRODUCCIÓN

La sustentabilidad, en el contexto de la producción agrícola-ganadera, implica preservar y mejorar la capacidad productiva del sistema desde el punto de vista agronómico, económico y ambiental así como la calidad y la cantidad de los recursos renovables y no renovables, incluidos en el sistema productivo (suelo, agua, aire, biodiversidad y otros). Entre estos se destaca el suelo, como un recurso finito no renovable. El suelo debe proveer un medio para el crecimiento de las plantas, regular y distribuir el flujo de agua en el ambiente y servir como un buffer ambiental en la formación, atenuación y degradación de compuestos ambientales peligrosos. La calidad del suelo se ha definido en términos de sus propiedades químicas, físicas y biológicas.

- **PROPIEDADES FÍSICAS:** Densidad, capacidad de retención de agua, agregación y estabilidad de agregados (Fig. 1), color y temperatura.
- **PROPIEDADES QUÍMICAS:** Reserva de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y otros, pH, capacidad de intercambio catiónico, capacidad tampón, formación de quelatos.
- **PROPIEDADES BIOLÓGICAS:** Biomasa microbiana, actividad microbiana (respiración), fracciones lábiles (materia orgánica particulada) de nutrientes.

La materia orgánica (MO) está reconocida como la más importante por ser un indicador de la calidad de suelo. La materia orgánica es considerada la fracción viva integrada por compuestos que conforman la vida orgánica del suelo, excluyendo residuos vegetales y animales sin descomponer, y

entre sus elementos constituidos se hallan los residuos vegetales y animales en descomposición (10-20%), la biomasa microbiana (1-5%) y el humus (50-85%). La importancia de la materia orgánica radica en su relación con numerosas propiedades del suelo.

El contenido de materia orgánica de los suelos está determinado por los factores formadores del mismo (tiempo, clima, vegetación, material madre, topografía, manejo). El manejo del suelo, afecta el contenido de materia orgánica según: el número de años de agricultura, los cultivos, las labranzas, las rotaciones, el manejo del cultivo, la fertilización, y los períodos de barbecho.

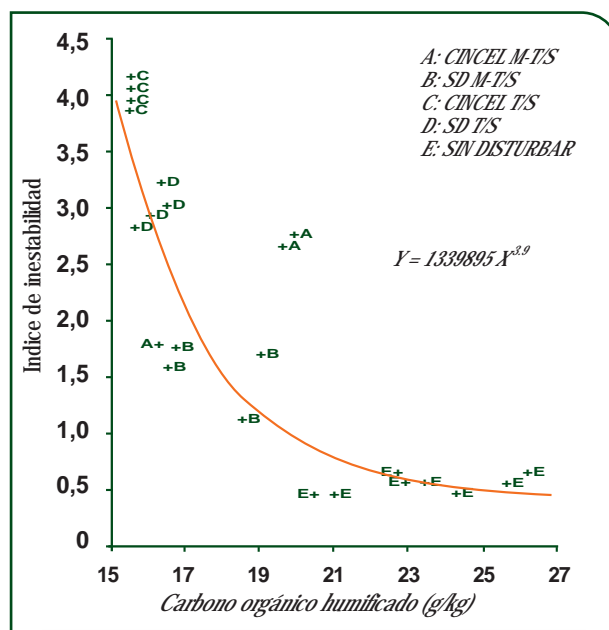


Figura 1.- Relación entre el carbono (C) orgánico humificado y el índice de inestabilidad para distintas rotaciones con doble cultivo trigo/soya (T/S) y maíz (M), sistemas de labranza (cincel y siembra directa, SD) y una situación prístina (sin disturbar) en el sur de Santa Fe (Argentina). Fuente: E. Gómez et al. (2001).

El uso de sistemas de siembra directa (SD), la rotación de cultivos, el mantenimiento y la generación de adecuados niveles de fertilidad de los suelos permite estabilizar los contenidos de materia orgánica ajustados a las condiciones edafoclimáticas del sitio, a través de la incorporación de residuos en cantidad y calidad (Fig. 2).

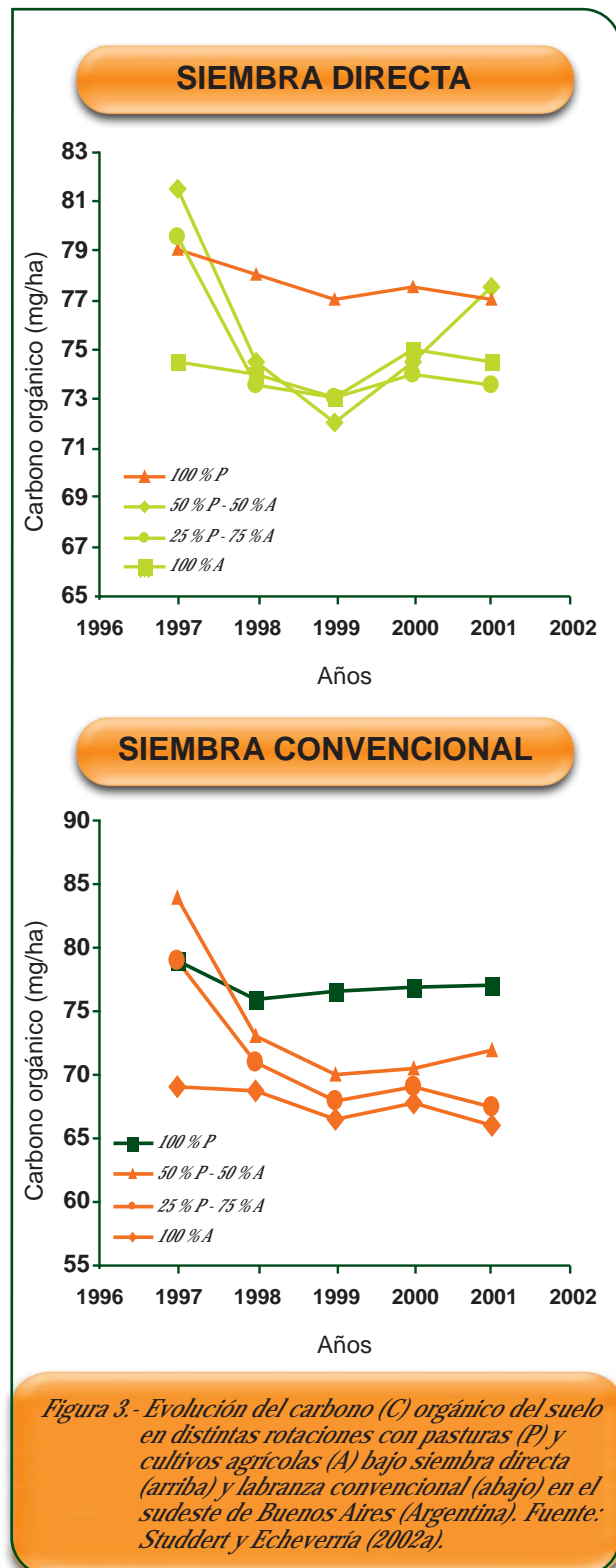


LA SIEMBRA DIRECTA Y LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

El carbono orgánico es el atributo más analizado en estudios de larga duración y es escogido como el indicador más importante de calidad de suelo y de sustentabilidad agronómica, debido a su efecto sobre otras propiedades físicas, químicas y biológicas de suelo.

La no remoción del suelo y el mantenimiento de los residuos de cosecha en superficie bajo siembra directa (SD) resultan en un mayor contenido de materia orgánica en las capas superficiales del suelo, respecto a situaciones similares bajo labranza convencional (LC) con remoción. Este efecto se explica por la menor oxidación de los residuos aportados, la menor erosión y, eventualmente, por una mayor producción de residuos, bajo siembra directa, debida a la mayor producción de materia seca que bajo labranza convencional. La Fig. 3 muestra la evolución del carbono (C) orgánico del suelo en rotaciones con distinta proporción de pasturas y cultivos agrícolas

bajo siembra directa y labranza convencional en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), comparada con los contenidos bajo pastura perenne en la misma situación



edafoclimática. Si bien los contenidos de carbono disminuyen bajo siembra directa, las caídas son mucho mayores bajo labranza convencional. Esta situación, en el sudeste de Buenos Aires, se registra también en el oeste de la región pampeana argentina, con suelos de textura más gruesa y menores contenidos originales de Materia Orgánica (Fig. 4).

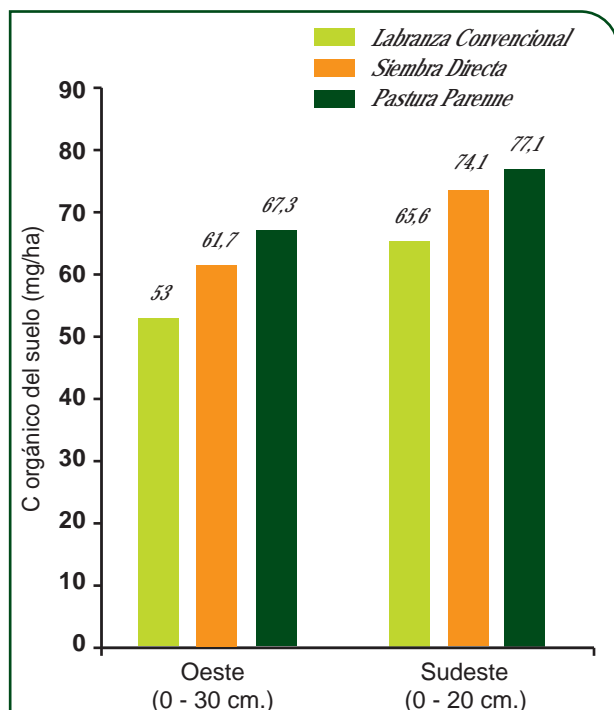


Figura 4.- Carbono (C) orgánico del suelo, bajo labranza convencional, siembra directa y pastura perenne en el oeste (0-30 cm. de profundidad) y el sudeste (0-20 cm. de profundidad) de la región pampeana argentina. Fuente: Diaz Zorita et al. (2002) y Studdert y Echeverría (2002b).

En suelos rojos con alto contenido de óxido (oxisoles) del sur de Brasil, Sá et al. (2001) se reportaron incrementos en el contenido de carbono orgánico del suelo de alrededor de 806 kg./ha/año a 0-20 cm, bajo siembra directa. Los aumentos en carbono orgánico del suelo se relacionaron estrechamente con la cantidad de residuos aportados ($R^2=0.74$). Los autores atribuyen el incremento a la mayor protección del carbono orgánico del suelo a través de la formación de agregados estables del tamaño de arenas y limos, bajo sistemas de siembra directa, especialmente a 0-10 cm. de profundidad. Bayer et al. (2001) indican que la estabilización del carbono orgánico se debe a la interacción con minerales de carga

variable (caolinitas y óxidos de hierro) en suelos ultisoles de Rio Grande do Sul

Los efectos positivos de la Siembra Directa (SD) sobre la fracción orgánica del suelo se observan también cuando se evalúan contenidos de nitrógeno orgánico (Moraes Sá, 1996) y fracciones de materia orgánica particulada de carbono orgánico del suelo (Fabrizzi et al., 2003) (Fig. 5).

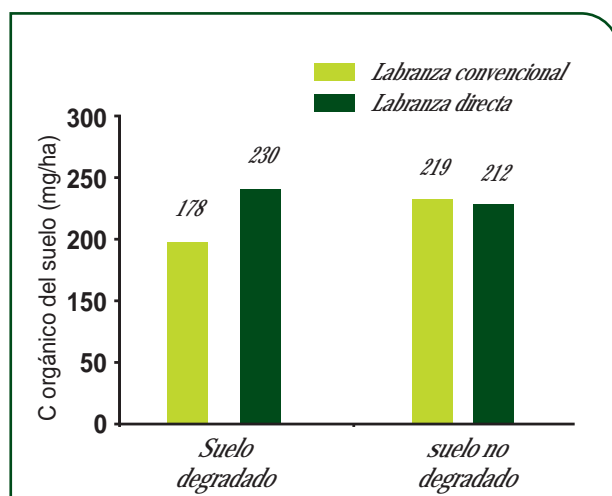


Figura 5.- Carbono (C) orgánico del suelo en la fracción particulada de 212-2000 μ m, bajo labranza convencional y siembra directa en un suelo de prolongada historia agrícola (degradado) (izquierda) y un suelo con historia de pasturas (no degradado) (derecha) en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Fuente: Fabrizzi et al. (2003).

LAS ROTACIONES Y LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Las rotaciones de cultivos presentan numerosas ventajas comparadas con los sistemas de monocultivo. Algunas de estas ventajas se relacionan con:

- La posibilidad de acumular mayores cantidades de residuos de distinta calidad que representan significativos aportes de carbono para el suelo.
- La mayor intensidad de uso del suelo.
- La mayor eficiencia de uso del agua.

En tres sitios del este de Colorado (EE.UU), región con precipitaciones anuales de 438 mm, la intensificación del uso del suelo, con dos cultivos en tres años o tres cultivos en cuatro años, sobre el manejo histórico de trigo-barbecho (un cultivo cada dos años) permitió incrementar el contenido de materia orgánica del suelo en un 6%, la producción anualizada de granos en un 74% y la eficiencia de uso del agua en un 75% (Tabla 1) (Peterson et al., 1998). Estas ventajas se reflejaron en ingresos económicos anuales netos superiores en 25-40% para las rotaciones con dos o tres cultivos, cada tres y cuatro años, respecto de la práctica tradicional de trigo-barbecho. En un ensayo de larga duración (35 años) establecido en Ontario (Canadá), la rotación de cultivos y la fertilización NPK mejoraron los rendimientos de maíz y el contenido de MO en 11,08% y 39%, respectivamente (Tabla 2) (Gregory y Drury, 1996).

Rotación	1 C orgánico (0-20 cm.) %	2 Rendimiento analizado kg./ha	3 Eficiencia de uso del agua kg./mm
Trigo - Barbecho	0,7	1150	2.6
Trigo - Maíz Barbecho	0,75	2031	4.6
Trigo - Maíz Mijo - Barbecho	0,74	1974	4.5

Tabla 1. Carbono orgánico, rendimiento anualizado y eficiencia de uso del agua estimada para tres rotaciones bajo siembra directa. Promedios para tres localidades del este de Colorado (EE.UU). Elaborado a partir de información de Peterson et al. (1998).

1. Determinado luego de 12 años de implantadas las rotaciones.
2. Promedios de rendimientos de 12 años incluyendo los años bajo barbecho.
3. Estimada a partir del rendimiento anualizado y las precipitaciones anuales promedio de 30 años para cada sitio.

En general, la inclusión de gramíneas en la rotación mejora el balance de carbono del suelo, tanto por la cantidad como por la calidad de los residuos y por permitir una mayor cobertura del suelo. La Tabla 3 muestra el balance de carbono del suelo, para

dos rotaciones agrícolas, en el sudeste de Córdoba (Argentina). En la rotación con mayor frecuencia de gramíneas (trigo y maíz) que soya, el balance de carbono es positivo, siendo negativo para la rotación con mayor frecuencia de soya. Los impactos negativos en el contenido de materia orgánica, cuando existe una mayor frecuencia de soya en las rotaciones respecto de cultivos como el maíz o el sorgo, ya han sido destacados por varios autores en diversas regiones del mundo (Havlin et al., 1990; Studdert y Echeverria, 2000).

Rotación	Fertilización NPK kg/ha	Rendimiento de Maíz kg./ha	Materia orgánica %
Maíz continuo	0-0-0	752	3.1
	115-60-30	6520	3.5
Maíz - avena - alfalfa - alfalfa	0-0-0	4075	3.2
	115-60-30	9091	4.3

*Dosis en kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O.

Tabla 2. Rendimientos de maíz (promedios 1989-1993) y niveles de materia orgánica (1993) en dos rotaciones con dos niveles de fertilización NPK en un ensayo iniciado en 1959 en Ontario (Canadá) (Gregory y Drury, 1996).

A.: Trigo/Soya - Maíz, tres cultivos en 2 años

Cultivos	Trigo/Soya	Maíz	Promedio
Rendimiento (kg/ha)	3529/2771	11000	
C. humificado (kg/ha)	2993	3359	3176
Pérdidas de C (kg/ha)	3505	2713	3109
Balance de C (kg/ha)	-512	646	67

B.: Trigo/Soya - Maíz - Soya, cuatro cultivos en tres años

Cultivos	Soya	Trigo/Soya	Maíz	Promedio
Rendimiento (kg/ha)	3500	3529/2771	11000	
C. humificado (kg/ha)	1763	2993	3359	2705
Pérdidas de C (kg/ha)	2713	3505	2713	2977
Balance de C (kg/ha)	-950	-512	646	-273

Tabla 3. Rendimientos en grano, carbono humificado, pérdida de carbono y balance de carbono para dos rotaciones agrícolas en el sudeste de Córdoba (Argentina). Fuente: Alejandro Thomas (com. personal).

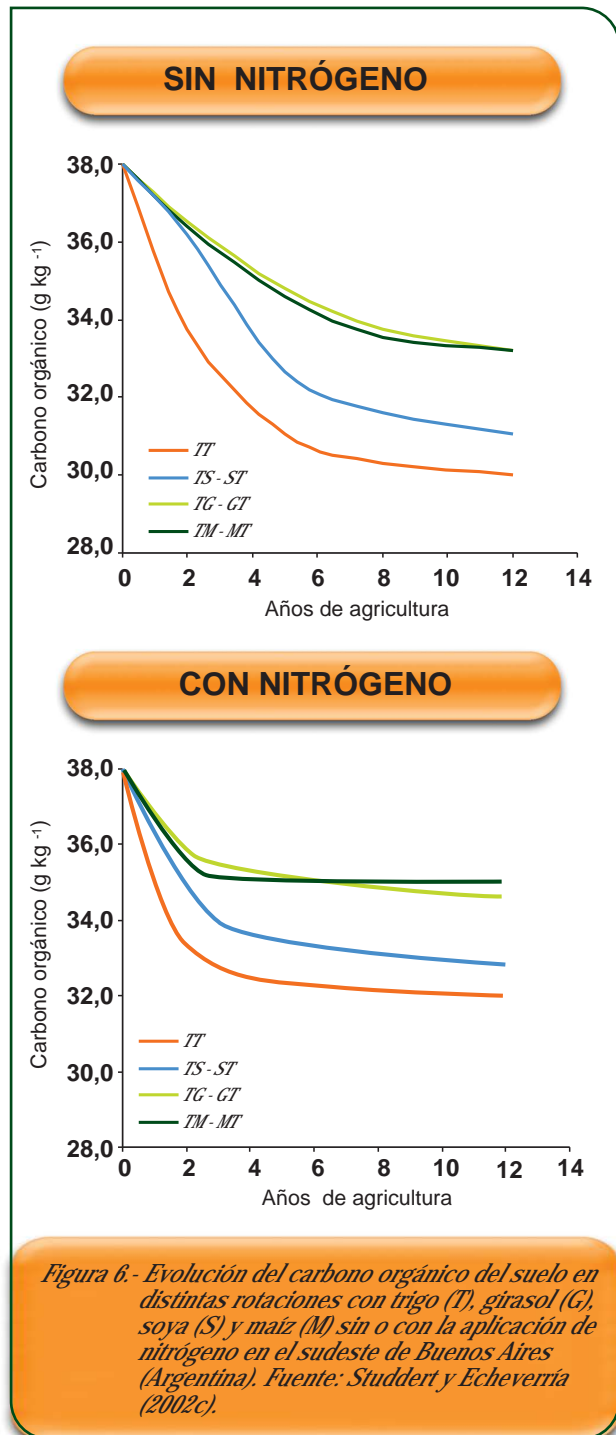
Una alternativa para mejorar el balance de C en los suelos es la utilización de cultivos de cobertura. Esta práctica está muy difundida en numerosas zonas de Brasil, donde la avena negra participa en la rotación entre dos cultivos de grano de verano, por ejemplo soya y maíz, (Fiorin, 1999). En climas templados, la inclusión de cultivos de cobertura de gramíneas como centeno o avena, o de leguminosas como vicia o trébol encarnado también constituye una alternativa para fijar una mayor cantidad de Carbono atmosférico (Ruffo, 2003).



LA FERTILIDAD Y LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La materia orgánica (MO) es reserva de numerosos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. La MO contiene aproximadamente un 58% de carbono (C) y presenta una relación C/N/P/S (Carbono/Nitrógeno/Fósforo/Azufre) estimada en 140:10:1.3:1.3. A partir de esta información, se estima que cada 1% de materia orgánica en 20 cm de suelo, con densidad de 1.1 ton/m³, contiene : 22000 kg. /ha de materia orgánica, 12000 - 13000 kg. /ha de C, 1000 -1200 kg. /ha de N, 90 -120 kg. /ha de P, y 90 -120 kg. /ha de S. Dados los contenidos de nutrientes en la MO, la misma actúa como fuente y destino de los nutrientes en el sistema. Es así que en situaciones de balance de nutrientes negativos, cuando la exportación de nutrientes en productos de cosecha (granos y forrajes) es superior al aporte, vía abonos

orgánicos y fertilizantes, los niveles de materia orgánica (MO) disminuyen aportando los nutrientes necesarios para los cultivos. Esta situación se observa frecuentemente cuando se comienza a cultivar un área nueva con disminuciones importantes de MO en los primeros años que liberan cantidades importantes de nutrientes. La aplicación de nutrientes, vía



fertilización y/o abonos orgánicos, permite mantener y/o mejorar los niveles de MO. La Fig. 6 muestra los efectos de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de carbono orgánico del suelo para cuatro secuencias agrícolas en el sudeste de Buenos Aires (Argentina), y la Tabla 4 muestra los aportes de carbono en los residuos y la estimación del carbono humificado para cuatro tratamientos de fertilización en el sudeste de Córdoba (Argentina). En ambas situaciones, la mejor nutrición de los cultivos permitió incrementar los rendimientos de los cultivos y acumular una mayor cantidad de residuos con un mayor aporte de C para el suelo.

Tratamiento	Aporte C Residuos # (kg C/ha)	C humificado (kg C/ha)
<i>Don Osvaldo</i>		
Testigo	6144	-815
NP	8061	31
NPS	10353	1082
NPS rep	11381	1532
<i>Los Chañaritos</i>		
Testigo	8358	173
NP	10377	1071
NPS	11019	1359
NPS rep	11747	1677

Tabla 4.- Aporte de carbono y carbono humificado en un ciclo de la rotación maíz / trigo / soya para cuatro tratamientos de fertilización en dos sitios del sudeste de Córdoba (Argentina). Los tratamientos NP y NPS incluyeron dosis de nutrientes, según diagnóstico, y el tratamiento NPS Rep dosis de nutrientes según reposición de los nutrientes extraídos en grano. Elaborado a partir de información de Vicente Gudelf y col. (com. personal). # Estimado a partir del índice de cosecha y la concentración de C en residuos. Según modelo AMG (Andriulo et al., 1999)

CONSIDERACIONES FINALES

La producción de alimentos, forrajes y fibras siempre afecta los ecosistemas. El objetivo del manejo adecuado de los suelos es limitar y balancear los procesos de degradación con procesos de producción. La agricultura sustentable se basa en la preservación de la calidad de los recursos naturales: agua, aire, biodiversidad, suelo, etc.

La Materia Orgánica es el más importante de los indicadores de la calidad de los suelos. El manejo de rotaciones, siembra directa y fertilidad, de manera adecuada y específica para cada sitio, permitirá mantener y alcanzar contenidos de materia orgánica sustentables para la producción de cultivos.



BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo A., B. Mary y J. Guérif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19: 365-377.
- Bayer C., L. Martin-Neto, J. Mielniczuk, C. Pillon y L. Sangoi. 2001. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1473-1478.
- Díaz Zorita M., G. Duarte y J. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65:1-18.
- Fabrizzi K. P., A. Morón y F. O. García. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: in press.
- Fiorin J. E. 1999. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. En III Curso sobre Aspectos Básicos de Fertilidade e Microbiologia do Solo sob Plantio Direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.
- Gómez E., L. Ferreras, S. Toresani, A. Ausilio y V. Bisaro. 2001. Changes in some soil properties in a Vertic Argiudoll under short-term conservation tillage. *Soil Till. Res.* 61:179-186.
- Gregory E. y C. Drury. 1996. Fertilizer increases corn yield and soil organic matter. *Better Crops* 80(4): 3-5. Potash and Phosphate Institute. Norcross, Georgia, EE.UU.
- Havlin J.L., D. Kissel, L. Maddux, M. Claassen, y J. Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:448-452.
- Moraes Sá J. C. 1996. Manejo de nitrogeno na cultura do milho no sistema plantio direto. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo, RS, Brasil.
- Peterson G., D. Westfall, L. Sherrod, D. Poss, K. Larson, D. Thompson y L. Ahuja. 1998. Sustainable dryland agroecosystem management. Technical Bulletin 98-1. Colorado Agricultural Experimental Station. Fort Collins, CO, EE.UU.
- Ruffo M. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. Actas XI Congreso Nacional de AAPRESID. Tomo 1: 171-176. Rosario, Argentina.
- Sá J.C.M., C. Cerri, W. Dick, R. Lal, S. Venske Filho, M. Piccolo y B. Feigl. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1486-1499.
- Studdert G., y H. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert G. y H. Echeverría. 2002a. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.
- Studdert G. y H. Echeverría. 2002b. Agricultura continua, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.
- Studdert G. y H. Echeverría. 2002c. Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. En Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2002". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. 52 pág.