

EFECTO DE 10 AÑOS DE MONOCULTIVO DE SOJA SOBRE DIFERENTES FRACCIONES GRANULOMETRICAS DE LA MATERIA ORGANICA DE UN ARGIUDOL.

ANDRIULO*, A.E.; PICCOLO**, M.; NILSEN**, B. y CERRI** C. C.

* Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Estación Experimental de Pergamino - C.C. 31 - 2700 Pergamino - Argentina

** Centro de Energía Nuclear na Agricultura (CENA). CEP 13.400 - Piracicaba - San Pablo - Brasil

Abstract: Modifications in soil organic matter produced by 10 years of soybean monoculture (C3 photosynthetic pathway) in a gramineous soil (predominantly C4 photosynthetic pathway) were studied using ^{13}C natural abundance and particle-size fractionation. In A1 horizon, soybean monoculture decreased the C content in 13%. 25 % of the original C was mineralized. C derived from soybean reached 14 % of total C, which 53 % was contained in 0-50 μm soil fraction. The replacement of C derived from gramineous soil by C derived from soybean was greater in the sand-size fractions (78 and 40 % of total C in 150-2000 and 50-150 μm fractions, respectively), than in the clay+silt-size fraction (10 % of total C in 0-50 μm fraction). Local weather conditions, soil type, and new cultivation area with soybean increase microbial activity. This results in a probably increase of the decomposability and humification of soil organic matter.

Key words: soil organic carbon - ^{13}C - granulometric fractionation - soybean - Pampa

Resumen: Se estudiaron los cambios ocurridos en la materia orgánica de un suelo de estepa gramínea (ciclo fotosintético predominantemente C4) después de 10 años de monocultivo de soja (ciclo fotosintético C3), utilizando abundancia natural en ^{13}C y fraccionamiento granulométrico. A nivel del horizonte A1, el monocultivo redujo en un 13 % el contenido de carbono total (C). Se mineralizó el 25 % del C proveniente de gramíneas. El C proveniente de soja representó solo el 14 % del contenido de C actual, encontrándose un 53 % en la fracción 0-50 μm . El reemplazo del C proveniente de gramíneas por el C proveniente de soja fue mayor en las fracciones del tamaño de las arenas (78 y 40 % del C total para 150-2000 y 50-150 μm , respectivamente) que en la fracción del tamaño de limos + arcilla (10 % del C total para 0-50 μm). Las condiciones climáticas locales, el tipo de suelo y el área recientemente cultivada con soja estimulan la actividad microbiana. Como consecuencia se acelerarían la descomposición y la humificación de la materia orgánica del suelo.

Palabras clave: carbono orgánico del suelo - ^{13}C - fraccionamiento granulométrico - soja - Pampa

INTRODUCCION

La materia orgánica del suelo (MOS) ha sido ampliamente reconocida como fuente de

nutrientes para las plantas y el mayor factor de estabilización de la estructura edáfica. Es el componente clave del suelo que afecta sus propiedades químicas, físicas y biológicas, sien-

do el prerequisite para la obtención de cultivos con niveles de producción elevados y estables (Allison, 1965).

Los suelos de pradera contienen originariamente niveles altos de MOS, los cuales decrecen bruscamente con la agricultura, desmejorando sus propiedades biológicas, físicas y químicas (Casas, 1985; Anderson y Coleman, 1985; Michelena *et al.*, 1989; Burke *et al.*, 1989; Balesdant *et al.*, 1988).

La agricultura de la región pampeana argentina data de 120 años. Por un largo período, los cultivos agrícolas se alternaron con pastos para la producción bovina. Este sistema contribuyó a mantener la fertilidad de los suelos. Sin embargo, desde la década del 70, y debido a razones principalmente económicas, hubo un importante incremento del área ocupada por cultivos agrícolas. El incremento de la relación área ocupada por cultivos agrícolas sobre área ocupada por pastos es del orden del 4 % por año. Los principales cultivos agrícolas son soja, trigo, doble cultivo trigo-soja y maíz. El sistema agrícola actual, bajo las condiciones climáticas de la región, ha desembocado en la degradación del suelo: reducción de la estabilidad estructural en la capa superficial, presencia de capas compactadas, decrecimiento significativo de los contenidos en C y N totales y de fósforo disponible, disminución de las tasas de infiltración, aumento del escurrimiento superficial y de la erosión hídrica (Marelli, 1989; Senigaglia y Ferrari, 1993; De Battista *et al.*, 1994). Michelena *et al.*, 1989, informan acerca de una disminución del 46.7 % en los niveles medios de MOS con respecto a los contenidos originales.

Para poder explicar y/o controlar la abundancia de la MOS y su relación con la degradación de los suelos, es necesario estudiar su dinámica y su efecto sobre las propiedades de los suelos de la región bajo agricultura continua. El conocimiento de la naturaleza y del turnover de la MOS es un prerequisite para comprender la estructura, la reactividad química y la fertilidad de los suelos y para predecir el destino de los fertilizantes minerales, de los

abonos orgánicos animales y de los residuos de cosecha agregados al suelo (Christensen, 1992). La aplicación del fraccionamiento granulométrico a la MOS por tamizado resulta de particular interés para comprender el rol de diferentes fracciones orgánicas en los sistemas de cultivo. Por simple tamizado se pueden separar fracciones orgánicas u órgano-minerales muy diferentes entre sí en estado, composición y bioestabilidad (Feller, 1988).

El método de la abundancia natural en ^{13}C para estudios de dinámica de MOS ha demostrado ser de gran utilidad cuando se introduce un cultivo de ciclo metabólico contrastante con el de la vegetación nativa (Ceri *et al.*, 1985; Balesdant *et al.*, 1987, 1988; Andreux, *et al.*, 1990; Martin, *et al.*, 1990; Desjardins, *et al.*, 1994). Documentos históricos indican que el área era originariamente una pradera de gramíneas constituida por especies C-3 y C-4 (Hauman, 1928, citado por Pecorari *et al.*, 1991). La introducción de una especie típicamente C-3 como el cultivo de soja, permitiría la aplicación de esta técnica en dicha región.

El propósito de este trabajo es estudiar los cambios ocurridos en la cantidad y composición de la MOS después de 10 años de monocultivo de soja, utilizando fraccionamiento granulométrico y abundancia natural en ^{13}C .

MATERIAL Y METODOS

El trabajo se realizó en la estación experimental Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), provincia de Buenos Aires, ubicada a $34^{\circ} 10' \text{ S}$ y $60^{\circ} 40' \text{ O}$. El clima es templado húmedo. La temperatura media del invierno es de 9° C y la del verano 23° C . Los suelos nunca se congelan. La precipitación media anual es de 900 mm y el balance hídrico es negativo en el mes de enero. El suelo es un argiudol típico familia illítica media. Es profundo y bien drenado. Se ubica en las lomas y corresponde a un paisaje suavemen-

te ondulado. La vegetación natural es una estepa de gramíneas. El material originario es loess bonaerense (INTA, 1972).

Las muestras de suelo se extrajeron de:

- un área donde se está seguro que no fue cultivada en los últimos 30 años, ocupada por una pradera de gramíneas (G) y

- una parte adyacente que tuvo solamente 10 años de monocultivo de soja durante el período 1980-1990 (S). En este sistema de cultivo, las malezas de ciclo otoño-primaveral que crecen durante el barbecho (de ciclo predominantemente C-3) son incorporadas al suelo por medio de labores mecánicas. Las malezas que crecen durante el cultivo de soja /de ciclo predominantemente C-4) son controladas quí-

micamente. El rendimiento promedio del cultivo de soja es de $3.8 \pm 0.4 \text{ T ha}^{-1}$.

Procesamiento de las muestras.

Las muestras de suelo se extrajeron de los horizontes genéticos A11(Ap), A12 y B1, poco antes de la cosecha de la soja. Las principales características de estos horizontes se describen en la Tabla 1. En cada horizonte se obtuvieron muestras compuestas de 10 muestras de 1 kg cada una. Se mezclaron, se secaron al aire y se tamizaron por 2 mm obligando a que toda la fracción orgánica de tamaño superior a 2 mm atravesara el tamiz. Se obtuvo una muestra por horizonte y situación considerada. A 50 g de

TABLA 1. Características principales de los horizontes de suelo en las dos situaciones estudiadas

Vegetación horizonte	Gramíneas			Soja		
	A11	A12	B1	Ap	A12	B1
profundidad (cm)	14	14	7	15	8	7
arcilla, 0-2 μm (%)	25	25	27	22	23	24
limo, 2-50 μm (%)	63	61	60	60	60	60
arena, 50-2000 μm (%)	12	14	13	18	17	16
densidad aparente (g cm^{-3})	1.07	1.1	1.25	1.18	1.22	1.26
carbono total (%)	2.7	1.6	2.1	2.1	2.0	1.8
nitrógeno total orgánico (%)	0.23	0.14	0.18	0.15	0.15	0.15
C:N	11.8	11.2	11.5	14.3	13.5	12.0
pH	6.1	6.1	6.3	5.8	6.0	6.0

cada muestra se le agregó 150 ml de agua y 3 bolas de vidrio. Se colocaron en un agitador rotativo a 50 rpm durante 3 horas para provocar la ruptura de los agregados. La arena y los restos vegetales del tamaño de la arena fueron separados a 150 y a 50-150 μm por tamizado en agua. El material suspendido que atravesó el tamiz de 50 μm fue secado a 60° C. La masa de las 3 fracciones obtenidas por suma superó el 98 % en todos los horizontes.

Métodos analíticos

Para cada fracción granulométrica obtenida y para el suelo completo de cada horizonte se realizaron las siguientes determinaciones:

- Carbono total, por combustión seca a 1100 °C (Carmograph 12A -> Wosthoff), método del Carmograph; 5 repeticiones por muestra de suelo y 2 repeticiones para cada fracción (coeficiente de variación para las muestras de suelo inferior a 3 %; diferencia entre dos repeticiones de cada fracción inferior al 10 %. Al C presente en la fracción 0-50 μm se lo llama C humificado.

- Densidad aparente; método del cilindro, Page, 1982, 4 repeticiones (coeficiente de variación inferior a 3.2 %).

- distribución del tamaño de partículas; método de la pipeta de Robinson, Page, 1982, 2 repeticiones.

- abundancia natural en ^{13}C , según Volkoff *et al.*, 1982, por combustión seca, realizando el dosaje en un espectrómetro de masa ~VG Micromass~, Mod. MM6E. Se expresó en unidades δ por mil, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = 10^3 \times [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{m}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}] / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}$$

Este permite estimar el valor de $\delta^{13}\text{C}$ en relación a la referencia Pee Dee Belemnite (PDB) con un error máximo de 0.1 ‰. Las determinaciones en $\delta^{13}\text{C}$ para suelo y fracción granulométrica se realizaron por triplicado y duplicado, respectivamente,

admitiendo una diferencia inferior a 0.3 ‰ unidades entre repeticiones de la misma muestra.

El carbono derivado de gramíneas (Cdg) y el carbono derivado de soja (Cds) en el horizonte del suelo o en cualquier fracción bajo S fue expresado en T ha^{-1} , o como porcentaje del Carbono total (PCdg y PCds) del respectivo horizonte o fracción, según las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} \text{Cds} &= \text{Cs} \cdot (\delta_{\text{m}} - \delta_{\text{g}}) / (\delta_{\text{s}} - \delta_{\text{g}}) & \text{Cdg} &= \text{Cs} - \text{Cds} \\ \text{PCds} &= 100 \cdot (\delta_{\text{m}} - \delta_{\text{g}}) / (\delta_{\text{s}} - \delta_{\text{g}}) & \text{PCdg} &= 100 - \text{PCds} \end{aligned}$$

donde Cs es el contenido de C total de la muestra bajo S (horizonte o fracción), δ_{m} es valor del $\delta^{13}\text{C}$ de la muestra, δ_{g} es el valor del $\delta^{13}\text{C}$ correspondiente al suelo no cultivado y δ_{s} es el valor seleccionado del $\delta^{13}\text{C}$ para el residuo de soja.

El $\delta^{13}\text{C}$ del residuo de soja utilizado en el trabajo es de -26.3 ‰ y corresponde a la parte aérea del cultivo.

El porcentaje de C proveniente de G perdido por la introducción de la soja (PPCdg) fue calculado como sigue:

$$\text{PPCdg} = 100 - \text{Pcdg} \times (\text{Cs} / \text{Cg})$$

donde Cs y Cg son los contenidos de C en horizonte o fracción considerada bajo S y G, respectivamente. La conversión de Cg y de Cs de % a T ha^{-1} en un horizonte dado se realizó como sigue:

$$\text{C} (\text{T ha}^{-1}) = \text{C} (\%) \times d_a \times e$$

donde:

d_a es la densidad aparente y

e es el espesor del horizonte (en cm)

Todos los cálculos que incluyeron el contenido de C humificado (expresado en T ha^{-1}), se realizaron con el C que surge por diferencia entre el C total de la muestra de suelo y la suma de las fracciones restantes.

Paralelamente, 3 muestras de suelo (de 50

g cada una) de los horizontes Ap y A12 bajo G y S se humedecieron al 60 % de la capacidad de campo y se incubaron durante 4 días para determinar la abundancia natural en $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 producido por la actividad microbiana. Se utilizó el incubador especialmente desarrollado para estudios de descomposición de materiales orgánicos del suelo propuesto por Cerri *et al.*, (1994).

RESULTADOS Y DISCUSION

Distribución del C total en diferentes fracciones de la MO del suelo

La Tabla 1 muestra las características principales de los horizontes de suelo analizados en este trabajo. Como puede observarse, los perfiles de C total son diferentes entre G y S. El suelo bajo G presenta un perfil de C correspondiente al sistema radical de las gramíneas que componen la vegetación con gran concentración de raíces y partes aéreas en la capa superficial (2.7 % de C en el espesor 0-14 cm contra 1.6 % de C en 14-28 cm). Sin embargo, bajo S, la agricultura iguala los contenidos de C de los horizontes Ap y A12 alrededor de 2 % y disminuye el contenido de C del horizonte B1. También bajo S, existe una reducción del espesor del horizonte A12 como consecuencia del incremento de la densidad aparente. La Tabla 2 presenta el porcentaje de C de cada fracción granulométrica (a) y el porcentaje de C de cada fracción granulométrica con respecto a la masa del suelo (b) y (c) en los dos situaciones estudiadas. En (a) el porcentaje de C de las fracciones de tamaño superior a 150 μm es mucho más elevado que en las fracciones restantes debido a que éste representa un C formado por residuos vegetales poco transformados, de aporte más reciente en el suelo. La composición de un residuo vegetal que se introduce en el suelo es del alrededor de 40 % en C y en este estudio se obtienen valores de 12 a 29 % de C.

En (b), el contenido de C del suelo en la fracción 0-50 μm representa la mayor parte del

C edáfico total en los dos sitios experimentales. Christensen, 1987, utilizó el factor de enriquecimiento en C de una fracción ($[\% \text{C del suelo en la fracción}] / [\% \text{C del suelo}]$) para comparar los contenidos de MOS de fracciones separadas provenientes de diferentes tipos de suelos y excluir el efecto de diferentes contenidos de MOS de suelo entero. Cuanto más elevado es el valor de este factor menor es la capacidad del componente mineral para estabilizar la MOS. En los Argiudoles pampeanos se observa que el enriquecimiento de C en la fracción 0-50 μm es inferior y cercano a 1 tanto en G como en S mientras que en los suelos daneses de textura similar el factor de enriquecimiento de aproximadamente 3. Nuestros valores están cercanos a los de suelos franco limosos de las praderas canadienses (Cryoborol típico) informados por Tiessen y Stewart, 1983. Esto puede indicar una alta capacidad de los suelos de la Pampa para sostener la MOS al componente mineral. El hecho que el C edáfico se concentre en las fracciones inferiores a 50 μm es un resultado esperable debido al efecto estabilizador de las partículas finas en la MOS. Normalmente se considera a esta fracción como humificada, lo que ratifica el alto grado de humificación de estos suelos. Bajo S, la agricultura ha causado una disminución del contenido de C del suelo de todas las fracciones del horizonte Ap, de la fracción inferior a 50 μm en el horizonte A12 y de las fracciones superiores a 50 μm en el horizonte B1. La diferencia existente entre el C determinado en la fracción 0-50 μm y el C de la misma obtenido por diferencia entre el C total y la suma de las fracciones 50-150 y 150-2000 μm podría atribuirse a un defecto de homogeneización de las muestras y/o a una pérdida de C por el método de fraccionamiento.

En (c), cuando el contenido de C se calcula sobre la base de volumen, el C acumulado en el horizonte A1+B1 es de alrededor de 83 T ha^{-1} bajo G y de 73 T ha^{-1} bajo S. Es importante aclarar que si bien se señala como horizonte Ap actual a los primeros 15 cm de profundidad, observaciones del perfil de cultivo demostraron

TABLA 2. Carbono orgánico del suelo en diferentes fracciones granulométricas de los horizontes superficiales del suelo

Vegetación horizonte	Gramíneas			Soja		
	A11	A12	B1	Ap	A12	B1
Fracción						
(μm)						
(a) contenido de carbono orgánico en cada fracción granulométrica						
(%)						
150-2000	24.5	17.5	28.5	11.8	20.6	14.2
50-150	2.2	0.6	3.3	0.7	1.6	0.7
0-50	2.5	2.2	1.5	2.1	2.2	1.7
(b) contenido de carbono orgánico del suelo en cada fracción granulométrica						
(%)						
150-2000	0.28	0.02	0.19	0.08	0.04	0.02
50-150	0.28	0.07	0.44	0.13	0.30	0.13
0-50	2.12	1.87	1.31	1.70	1.71	1.35
(c) contenido de carbono orgánico del suelo en cada fracción granulométrica						
(T CO ha ⁻¹)						
150-2000	4.2	.3	1.7	1.4	.4	.2
50-150	4.2	1.1	3.9	2.3	2.9	1.2
0-50	32	28	11	30	17	12
0-50 calculado	32	23	13	33	16	15

la existencia de antiguos fondos de labor a la profundidad del horizonte A1 completo. O sea que en el horizonte A12 existe un aporte permanente de origen endógeno (sistema radical) y un aporte transitorio de origen externo (partes aéreas del cultivo). Bajo G, si bien se encuentra una profundidad de horizonte A1 correspondiente a la serie Pergamino pura, los contenidos de C son inferiores a los que cabría esperar para un suelo jamás trabajado. Valores de C cercanos al 3 % han sido reportados para estos suelos en citas bibliográficas anteriores (Michelena *et*

al., 1989). Podría pensarse que estos valores más bajos forman parte de la variabilidad natural de la serie de suelo. Sin embargo, la pérdida de C al cabo de 10 años de monocultivo de soja en el horizonte A1 es del orden de 13 % $(1 - 56.7 / 65) \times 100$; bastante inferior a la pérdida que cabría esperar para Mollisoles de climas templados que se inician en la agricultura y con una probable disminución del aporte de C al pasar de G a S. Con los valores de la bibliografía dicha pérdida alcanzaría el 30 %. Estos resultados confirman la existencia de algun laboreo ante-

rior a dicho lapso de tiempo. Una mayor mineralización a causa del laboreo y, probablemente, un menor aporte de C explican esta disminución al pasar de G a S.

La Tabla 3 muestra la distribución del tamaño de partículas sin destrucción de MOS. Si se la compara con la distribución después de destrucción de MOS (Tabla 1), la suma de arcilla+limo en todos los horizontes varió entre 82-88 % y entre 80-87 %, con y sin destrucción, respectivamente. Esto hace que las distribuciones del tamaño de partículas con y sin destrucción de MOS resulten similares. La tabla 4 presenta las relaciones C de la fracción 0-50 μm / limo+arcilla y C de la fracción 50-2000 μm / arena. Estas relaciones fueron construídas para caracterizar los contenidos unitarios de C del suelo humificado y no humificado de cada horizonte y estudiar los cambios producidos en las mismas por efecto del laboreo. El contenido de C de la fracción 0-50 μm por unidad de limo + arcilla de cada horizonte muestra que el C asociado a dicha fracción disminuye con la profundidad en las dos situaciones estudiadas. Cuando el cálculo de la misma relación se hace a nivel del horizonte A1 completo, no existen diferencias entre G y S y, a nivel del horizonte B1, tiende a aumentar. Por el contrario, los valores de la relación %C > 50 μm por unidad de arena es 2 y 5 veces más grande en G que en S, en los

horizontes A1 y B1, respectivamente. O sea que a nivel del horizonte A1, el laboreo cambia la distribución de los contenidos de C por unidad de arcilla+limo y por unidad de arena que existen en G en los horizontes Ap y A12. Además, las fracciones orgánicas del tamaño de la arena, constituídas por residuos poco transformados, que son muy abundantes en G, son mucho más sensibles de cambiar. La compactación existente en el horizonte A12, aunque pequeña a juzgar por el valor de densidad aparente, disminuye notablemente la biomasa de raíces del horizonte B1. Cabe aclarar que la biomasa observada en la fracción superior a 50 μm del horizonte B1 está constituída esencialmente por raíces. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Tiessen y Stewart, 1983 y Dalal y Mayer, 1986b y c. Dalal y Mayer, 1986c establecieron que el C de la fracción superior a 50 μm (verdaderamente asociado a la arena y no asociado con limo y arcilla) constituye el C lábil del suelo. Como consecuencia, el GH de la MOS aumenta bajo S. La pérdida rápida de MOS lábil bajo S puede resultar en una mayor reducción de la fertilidad del suelo de la que se obtiene cuando se comparan los contenidos de MOS de suelos vírgenes y cultivados o la tasa de pérdida de la MOS total. Las fracciones inferiores a 50 μm son más importantes en el turnover a largo plazo de la MOS.

TABLA 3. Porcentaje de cada fracción granulométrica analizada sin destrucción de la MOS

Vegetación horizonte	Gramíneas			Soja		
	A11	A12	B1	Ap	A12	B1
Fracción, μm						
150-2000	1.2	0.1	0.7	0.6	0.2	0.2
50-150	13.2	12.9	13.1	18.1	18.8	20.0
0-50	85.6	87.0	86.2	81.3	81.0	79.8

TABLA 4. Grado de humificación (GH) del C (C fracción 0-50 μm^* / Ctotal) x 100 y relaciones:

$$-(\text{C de la fracción } 0-50\mu\text{m}^* / \text{limo+arcilla}) \times 100$$

$$-(\text{C de la fracción } 50-2000\mu\text{m} / \text{arena}) \times 100$$

Vegetación horizonte	Gramíneas				Soja			
	Ap**	A12	A1	B1	Ap	A12	A1	B1
(C<50/L+A)x100	36	27	33	13	41	20	34	17
(C>50/arena)x100	68	10	46	42	21	20	21	8
GH	79	95	85	70	90	83	91	92

*el C de la fracción 0-50 μm es el C calculado por la diferencia entre el C total y las fracciones del tamaño de la arena.

**cálculo realizado sobre el C del suelo expresado en T C ha⁻¹

Valores $\delta^{13}\text{C}$ de la MOS, de las fracciones granulométricas y del CO_2

La Tabla 5 muestra los valores de la abundancia natural en ^{13}C para suelo, fracciones granulométricas y del CO_2 en las dos situaciones estudiadas. Los valores obtenidos para el suelo en todos los horizontes bajo G varían entre -18.7 y -19.6 ‰, de acuerdo con la presencia de comunidades gramíneas de ciclo fotosintético C3 y C4, con predominancia de ciclo C4. Resultados similares fueron reportados por Andriulo y Guerif (1993) quienes señalaron la coherencia entre los valores $\delta^{13}\text{C}$ obtenidos para el suelo y la descripción botánica de la vegetación originaria. También señalaron la presencia de un clima con características mixtas de clima templado y subtropical sin cambios significativos en los ciclos fotosintéticos de la vegetación a través del tiempo.

En el momento de muestreo el lugar estaba invadido por *Sorghum hallepensis* (C4). Sus raíces ocupan una proporción muy importante de la

fracción > 150 μm y por lo tanto se considera la causa de los valores más altos de $\delta^{13}\text{C}$.

Los valores de abundancia natural del suelo bajo S resultaron diferentes a los valores bajo G en el horizonte A1. Bajo S los valores medios son del orden de -20.1 a -20.4 ‰. Los valores δ para el B1 son similares en las dos situaciones. El aporte del cultivo de soja en una fracción determinada, puede visualizarse por un valor más negativo en la abundancia natural en ^{13}C de la misma fracción bajo S. Cuanto mayor sea la diferencia en el valor $\delta^{13}\text{C}$ de una fracción entre G y S, mayor será el aporte de soja. Así, dicho aporte se observa en las diferentes fracciones granulométricas de los 3 horizontes considerados, siendo las fracciones 150-2000 y 50-150 μm del Ap y, en menor medida, del A12 y del B1 las más naturalmente marcadas por el isótopo. La fracción 0-50 μm de los horizontes Ap y A12 contienen C proveniente de la soja.

Los valores medios $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 respirado resultan altamente variables en las dos situaciones estudiadas. El rango de variación es entre -16.8 y -18.8 ‰ bajo G y entre -17.5 y -21.4 ‰

TABLA 5. Abundancia natural en ^{13}C (expresada en unidades d ‰) del suelo y las respectivas fracciones granulométricas analizadas.

Vegetación	Gramíneas			Soja		
	Horizonte	A11	A12	B1	Ap	A12
suelo	-19.6 ± 0.2	-18.7 ± 0.14	-19.6 ± 0.04	-20.4 ± 0.2	-20.1 ± 0.05	-19.5 ± 0.01
fracción, μm						
150-2000	-17.5	-15.5	-16.7	-25.0	-22.0	-19.2
50-150	-20.4	-21.4	-21.2	-24.4	-22.3	-21.7
0-50	-20.1	-18.7	-19.3	-20.7	-19.4	-19.4
gas	-17.7 ± 0.6	-17.8 ± 1.0		-20.5 ± 0.9	-18.7 ± 1.2	

bajo S. A pesar de ello son diferentes entre G y S en el horizonte superficial. El origen de este C es el correspondiente a residuos de partes aéreas, raíces actuales muertas, exudados de muy diversa naturaleza y biomasa muerta, que se descomponen en el curso del año (Schönwitz *et al.*, 1986). Significa que bajo G los microorganismos están respirando un residuo predominantemente C4, coincidiendo con la ocupación del Sorgo de Alepo (*Sorghum hallepensis*) y de las otras gramíneas con dos ciclos fotosintéticos. Bajo S, la presencia de los residuos del cultivo está más marcada en el horizonte Ap que en el horizonte A12, pero menos que lo esperado. El hecho de encontrar valores $\delta^{13}\text{C}$ de gas bajo S bastante enriquecidos en ^{13}C se explica porque el laboreo acelera la respiración de la MOS, incluyendo a otras fracciones probablemente físicamente protegidas bajo G, efecto típicamente llamado «priming effect».

El hecho de pasar de un suelo que presentó siempre una vegetación de gramíneas a un cultivo de leguminosa podría acarrear problemas de diferentes mecanismos de mineralización de la MOS en las dos situaciones, dado que la soja podría incluir una aceleración diferencial de la mineralización de determinados com-

puestos de la MOS nativa, induciendo a un fraccionamiento isotópico. En este trabajo se asume que los valores en $\delta^{13}\text{C}$ del Cg son los mismos que el Cdg bajo S.

La tabla 6 presenta los contenidos de C derivados de gramíneas (Cdg) y de soja (Cds), los % de C derivados de gramíneas (PCdg) y de soja (PCds) y el % de Cdg perdido (PPCdg) en los 3 horizontes después de 10 años de cultivo de soja. Tanto en el horizonte Ap como en el A12 el Cds es de aproximadamente 4 T ha⁻¹ mientras que el Cdg es el doble en el Ap (33 T ha⁻¹) que en el A12 (16 T ha⁻¹). El Cdg perdido es de 8 T ha⁻¹ en el Ap y de 9 T ha⁻¹ en el A12. En el horizonte A1, después de 10 años de monocultivo de soja, el Cdg ha disminuído un 25 % (16 T ha⁻¹) y no es compensado por el aporte de 8 T ha⁻¹ de C proveniente de la soja.

La Tabla 7 presenta los porcentajes de C derivado de soja (PCds) y los contenidos de Cds expresados en T ha⁻¹ en las fracciones estudiadas después de 10 años de monocultivo de soja. El PCds varía marcadamente con el tamaño de la fracción analizada. Prácticamente, el Cds ha entrado en todas las fracciones de los 3 horizontes. Solo en la fracción inferior a 50 μm del horizonte B1 su ingreso ha sido ínfimo o nulo.

Tabla 6. Contenidos de C expresados en $T ha^{-1}$, porcentajes de C derivado de gramíneas (PCdg) y de soja (PCds), y pérdida de C (PPCdg perdido) en los 3 horizontes considerados después de 10 años de cultivo de soja.

Horizonte (cm)	C inicial ($T ha^{-1}$)	C presente ($T ha^{-1}$)	PCds (%)	Cds ($T ha^{-1}$)	PCdg (%)	Cdg ($T ha^{-1}$)	PPCdg (%)	Cdg perdido ($T ha^{-1}$)
A11 / Ap	40.4	37.2	12	4,4	88	32.8	19.0	7.6
A12	24.6	19.5	18	3.6	82	15.9	35.0	8.7
A1	65.0	56.7	14	8.0	86	48.7	25.0	16.3

Tabla 7. Porcentajes de C derivado de soja (PCds) y contenidos de C expresados en $T ha^{-1}$ en diferentes fracciones granulométricas del suelo después de 10 años de cultivo de soja.

horizon	Ap		A12		B1	
	PCds (%)	Cds ($T ha^{-1}$)	PCds (%)	Cds ($T ha^{-1}$)	PCds (%)	Cds ($T ha^{-1}$)
fraccion (μm)						
150-2000	35	1.2	60	0.2	26	0.05
50-150	68	1.6	18	0.5	10	0.12
0-50	10	3.2	11	1.8	0	0.00

El PCds disminuye con la disminución del tamaño de la fracción y con el aumento de la profundidad. En el horizonte Ap se observa un decrecimiento brusco en la fracción 0-50 μm . Sin embargo, en los horizontes A12 y B1, ese decrecimiento se observa en las fracciones inferiores a 150 μm .

Todas las fracciones granulométricas han

perdido Cdg y ganado Cds. Por medio del PCds se puede decir que las fracciones de tamaño más grande tienen un reciclado de C mucho más rápido que las fracciones más finas. La fracción 0-50 μm contiene la mayor parte del Cdg, demostrando la existencia de un mayor efecto de protección del C que las fracciones superiores a 50 μm . A su vez, en la fracción 0-50 μm

existe el 53 % del Cds. Esta información está de acuerdo con la obtenida por Cerri *et al.*, 1985; Balesdent *et al.*, 1987, 1988 y Christensen, 1987, 1992, quienes encontraron un efecto estabilizador de las partículas finas sobre los productos microbianos formados durante la descomposición de sustratos agregados al suelo. La protección de sustratos orgánicos y metabolitos microbianos fácilmente descomposables puede llevarse a cabo por medio de las conocidas ligaduras arcilla-MOS y limo-MOS pero en este último caso, por mecanismos no conocidos. Por lo tanto, estos resultados nuevamente confirman que el C de las fracciones granulométricas del tamaño de las arenas representa un pool lábil (C figurado o libre) y de baja estabilidad mientras que el de las fracciones del tamaño de las arcillas y de los limos representa un pool relativamente más estable.

Martin Neto *et al.*, (1994) encontraron bajo S, que las mayores condiciones oxidativas asociadas con un área recientemente cultivada, aceleran la mineralización de los Cdg y Cds, siendo las fracciones inferiores a 50 μm las que conservan un pool de C más estable y humificado que las fracciones superiores a 50 μm . Los autores también observaron que los residuos de soja se incorporan rápidamente a las fracciones de MO humificada debido a su composición bioquímica (alto contenido de compuestos hidrosolubles y relativamente alto contenido de lignina). Este residuo de soja, que presenta una relación C/N relativamente baja y que se incorpora en un área recientemente cultivada, (dos condiciones que favorecen una mayor tasa de mineralización de la MOS), tiene una composición bioquímica, que en esas mismas condiciones oxidativas, contribuyen a su humificación. Podría postularse que cuando los residuos de soja ingresan al suelo se encuentran en las fracciones del tamaño de las arenas. Una parte (la más fácilmente descomponible) es rápidamente mineralizada en estas fracciones. Otra parte es inmediatamente transformada y transferida a las fracciones finas del suelo en las cuales se protege. Y otra parte, va siendo trans-

formada in situ, y por fraccionamiento físico ingresa paulatinamente en las fracciones de tamaño cada vez más fino.

CONCLUSIONES

La introducción de la agricultura con una leguminosa introduce cambios cuali y cuantitativos en la MOS del horizonte A1:

- redistribución y pérdida de C total
- incremento de la biodegradabilidad del C en todas las fracciones analizadas
- incorporación significativa del C proveniente de soja en la fracción humificada

Las condiciones climáticas locales, el tipo de suelo y el área recientemente cultivada con soja estimulan la actividad microbiana. Como consecuencia se acelerarían la descomposición y la humificación de la MOS.

BIBLIOGRAFIA

- ALLISON, L.E. 1965. Organic carbon. In *Methods of Soil Analysis*, pp. 1367-1368. Part 2. Black (ed). Monograph n° 9. Amer. Soc. Agron., Madison, Wsconsin.
- ANDERSON, D.W. y COLEMAN, N. 1985. The dynamics of organic matter in grassland soils. *J. of Soil and Water Conservation*, 40, n° 2.
- ANDREUX, F.; CERRI, C.C.; VOSE, P.B. y VITORELLO, V.A. 1990. Potential of stable isotope ^{15}N and ^{13}C , methods for determining input and turnover in soils. In: *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems. Field methods, application and interpretation*. Edited by A.F. Harrison, P. Ineson and O.W. Heal. Elsevier applied Science, London and New York. 259-275.
- ANDRIULO, A.E. y GUERIF, J. 1993. Abundancia natural en ^{13}C y datación radiocarbónica en fracciones orgánicas de un suelo representativo de la pradera nativa de la región pampeana húmeda argentina.

- Actas del XII Cong. Lat. Ciencia del Suelo.* 19-23 Septiembre, tomo 1, pp. 161-170.
- BALEDANT, J., MARIOTTI A. y GUILLET B. 1987. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil Biol. & Bioch.* 19, 25-30.
- BALEDANT, J., WAGNER G.H. y MARIOTTI, A. 1988. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 118-124.
- BURKE, I.C.; YONKER, C.M.; PARTON, W.J.; COLE, C.V.; FLACH, K.; y SCHIMMEL, D.S. 1989. Texture, Climate, and Cultivation Effects on Soil Organic Matter Content in U.S. Grassland Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 800-805.
- CASAS, R.R. 1985. La agricultura permanente y la degradación de los suelos en la República Argentina. *IDIA* 433-436:62-74.
- CERRI, C.C.; FELLER C.; BALEDANT, J.; VICTORIA, R.L. y PLENECASSAGNE, A. 1985. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R.Acad. Sci., Paris*, T. 300, II, 9 : 423-428.
- CERRI, C.C.; ANDREUX, F., EDUARDO, B.P., CHONE, T. y PICCOLO, M.C. 1994. Incubador para estudos sobre decomposição de material orgânico no solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*. Campinas, 18:1-5.
- CHRISTENSEN, B.T. 1987. Use of particle size fractions in soil organic matter studies. *INTECOL Bull*, 15, 113-123.
- CHRISTENSEN, B.T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.*, 20, 1-90.
- DALAL, R.C. y MAYER, R.J. 1986b. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II) Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 281-92.
- DALAL, R.C. y MAYER, R.J. 1986c. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. III) Distribution and kinetics of soil organic carbon in particle-size fractions. *Aust. J. Soil Res.*, 24, 293-300.
- DE BATTISTA, J.J.; ANDRIULO, A.E.; FERRARI, M.C. y PECORARI, C. 1994. Evaluation of the soils structural condition under various tillage systems in the pampa humeda (Argentina). (In press). *13 ISTRO Conference*, Aalborg, Denmark, 24-29 July.
- DESJARDINS, T.; ANDREUX, F.; VOLKOFF, B. y CERRI, C.C. 1994. Organic carbon and ^{13}C contents, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, 61, 103-118.
- FELLER, C. 1988. Effet de différents systèmes de culture sur les stocks organiques de sols argileux tropicaux des Petites Antilles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIV, n° 4, 341-343.
- INTA. 1972. *Carta de Suelos de la Republica Argentina*. Hoja 3360-32, Pergamino, Bs. As., pp., 106, Serie 2.
- MARTIN, A.; MARIOTTI, A.; BALEDANT, J.; LAVELLE, P. y VUATTOUX, R. 1990. Estimate of organic matter turnover rate in a savana soil by ^{13}C natural abundance measurements. *Soil Bio. Bioch.*, 22, pp. 517-523.
- MARELLI, H. 1989. La erosión hídrica. En: Degradación de suelos por intensificación de la agricultura, pp. 113-124. *Publ. Miscel. n° 47 INTA*, EEA Rafaela, Argentina.
- MICHELENA, R.O.; IRURTIA, C.B.; VAVRUSKA, F.A., MON, R. y PITTALUGA, A. 1989. *Degradación de suelos en el norte de la región pampeana*. *Publ. Téc. n°6*, Proyecto de Agricultura Conservacionista, INTA, EEA Pergamino, Argentina.
- MARTIN-NETO, L.; ANDRIULO, A. y TRAGHETTA, D.G. 1994. Effects of cultivation on the ESR spectra of different

- soil organic size fractions of a mollisol. *Soil Sci.* 157, 6, 365-372.
- PAGE, A.L.(Ed.).1982. *Methods of soil analysis*. Part 2. Am. Soc. Agron. In Agronomy Series. Madison, WI.
- PECORARI, C.; GUERIF, J. y STENGEL, P.1991. Fitolitos en suelos pampeanos: incidencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8 (2):135-141.
- SENIGAGLIESI, C. y FERRARI, M.1993. Soil and crop responses to alternative practices (In press). In: *International Crop Science I*, D.R.Buxton et al. (Ed.), pp. 27-35, Crop Sci. Soc. of Am., Madison, WI, USA.
- SCHÖNWITZ, R.; STICHLER, W. y ZIEGLER, H.1986. $\delta^{13}C$ values of CO_2 from soil respiration on sites with crops of C3 and C4 type of photosynthesis. *Oecologia*, 69, 305-308.
- TIESSEN, H. y STEWART, J.W.B.1983. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter. II) Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 47, 509-513.
- VOLKOFF, B.; MATSUI, E. y CERRI, C.C.1982. Discriminação isotópica do carbono nos humus de latossolo e podzol da região Amazônica do Brasil. In *Proc. of the Regional Colloquium on Soil Organic Matter Studies*. Piracicaba, Brasil, CENAPROMOCET, pp. 147-154.