

Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola-lecheros mixtos en Uruguay

Díaz-Rossello Roberto¹, Durán Henry²

¹INIA La Estanzuela, Programa de Producción Sustentable, Ruta 50 Km12, Colonia, Uruguay.

Correo electrónico: rdiaz@inia.org.uy

²INIA La Estanzuela, Programa de Lechería, Ruta 50 Km12, Colonia, Uruguay.

Recibido: 27/4/11 Aceptado: 14/9/11

Resumen

Los sistemas pastoriles de producción lechera de Uruguay presentan un acelerado proceso de intensificación con grandes cambios en el manejo del suelo en las últimas cuatro décadas. Sin embargo los sistemas de producción estuvieron siempre basados en el mismo concepto sustentable de rotaciones de cultivos forrajeros anuales y gramíneas perennes sembradas en asociación con leguminosas. El carbono orgánico del suelo (CO) de las parcelas de los Sistemas Lecheros de La Estanzuela fue analizado a partir de 1974 hasta el 2010. Esos registros cuantifican el efecto sobre el CO de cuatro sistemas de producción con diferente manejo del suelo en grandes períodos. Esta información es muy relevante, pues resultados de encuestas muestran que los sistemas comerciales de producción lechera de Uruguay siguieron el mismo sendero de cambios técnicos. Las modificaciones extremas en laboreo, carga animal e importación de forrajes determinaron dos períodos contrastantes en la dinámica del CO del suelo. Los primeros 17 años, presentaron fuertes pérdidas de CO a tasas anuales promedio estimadas de $0,89 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Esta tendencia se revirtió en los siguientes 18 años con ganancias de CO de $0,94 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Tres factores principales de manejo se plantean para explicar el rápido incremento de CO: la progresiva reducción de laboreos, mejoras de la productividad de las pasturas y cultivos e importación de alimentos al sistema. Se discute la gran acumulación de CO y nitrógeno (N) en áreas de semi-confinamiento y cómo capitalizar su alta disponibilidad de nutrientes en el suelo para la producción de cultivos.

Palabras clave: nitrógeno, siembra directa, sustentabilidad productiva, suelos

Summary

Soil Carbon Sequestration in Mixed Crop-dairy Systems in Uruguay

Pastoral dairy farming systems in Uruguay exhibit an accelerated process of intensification with major changes in soil management during the last four decades. However, the production systems were always based on the same concept of sustainable rotations of annual forage crops and perennial grasses sown in association with legumes. The soil organic carbon (OC) in the plots of the Dairy Experimental Farm at La Estanzuela was monitored since 1974 up to 2010. Those records quantify the effect on OC dynamics of four production systems with different soil management carried out in long periods. This information is extremely relevant considering that survey studies showed that commercial dairy farming systems followed the same general pathway of technical changes. The extreme modification in tillage, animal stocking rate and feed imported to the farm determined two contrasting periods in the OC dynamics. Heavy losses of OC were estimated at an average of

0.89 Mg ha⁻¹ year⁻¹ during a first period of 17 years. This tendency was reversed for the following 18 years when OC increased at 0.94 Mg ha⁻¹ year⁻¹. Three major management factors are discussed to explain the fast build up of OC: the progressive tillage reduction, improvements in pasture and forage crop productivity and imported feed coming into the system. The large OC and N gains in semi-confinement paddocks are discussed as an opportunity to capitalize the high nutrient availability in the soil for crop production.

Key words: nitrogen, no-till, sustainable production, soil

Introducción

Desde mediados de la década del 70 la producción lechera del país inicia un proceso de crecimiento que muestra su mayor dinamismo en los últimos 25 años. Esa intensificación tecnológica necesariamente impacta sobre la dinámica del carbono y la sustentabilidad de los suelos dedicados a la lechería ante los cambios en: 1) las operaciones de laboreo del suelo y el progreso de la adopción de siembra directa (SD) (Siri-Prieto *et al.*, 2006); 2) aumento de ingreso de alimentos extra prediales al aumentar la suplementación por vaca y la dotación (DIEA, 2009) y 3) potencial aumento de la productividad de pasturas y cultivos por ajustes tecnológicos.

La evolución del contenido de carbono orgánico (CO) del suelo, en función de las tecnologías aplicadas, es clave no solamente para asegurar su productividad futura, sino también por barreras comerciales originadas en la preocupación de los consumidores sobre los impactos ambientales cuantificables por ejemplo en la llamada «huella de carbono».

Sistemas lecheros pastoriles como el australiano (McKenzie, 2010) y el neozelandés (Shipper *et al.*, 2007), con relevante participación en el comercio internacional, han manifestado alta preocupación por la situación de pérdida progresiva de CO que tienen los suelos de sus principales regiones lecheras.

Los tres cambios mencionados en la estructura productiva del sector lechero nacional, tienen estrecho paralelismo con los sistemas experimentales que se implementaron en la Unidad de Lechería de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia, Uruguay). Por esta razón se decidió estudiar los posibles cambios en el CO del suelo de los potreros de los sistemas lecheros de La Estanzuela, abarcando un período de 35 años, que se inicia con los primeros análisis sistemáticos de suelos realizados en

1975 (Díaz, 1975) y repetidos en varias ocasiones hasta el presente.

Esta base de datos es de inestimable valor para estudiar y comprender cómo los cambios en las tecnologías de producción lechera provocan cambios en el manejo del suelo y en sus propiedades. Se trata de información inédita que se analiza por primera vez y que permite visualizar las oportunidades y amenazas en la sostenibilidad productiva y algunos impactos ambientales de la lechería uruguaya.

Materiales y métodos

Entre el año 1974 y 2010 se implementaron en la Unidad de Lechería de La Estanzuela diversos módulos físicos de producción lechera a los efectos de validar rotaciones forrajeras, cargas animales, niveles de suplementación, etc. (Durán y La Manna, 2009). Esos módulos presentaban entre 36 y 42 ha totales, divididas en potreros de 2 a 6 ha, en los cuales se efectuaron muestreos de suelo, a 15 cm de profundidad con 25 submuestras al azar para conformar una muestra compuesta del potrero, para el análisis contenido de CO y N. Hasta el año 2007 los análisis de CO se efectuaron por el método de digestión húmeda (Tinsley, 1967) y a posteriori del 2007 con un equipo Leco (NDIR) calibrado por la técnica anterior.

Los muestreos fueron aperiódicos y en ocasiones incompletos por lo que se trata de datos desbalanceados. Para el análisis de la evolución del contenido de CO a lo largo del período de estudio, se recurrió al ajuste de modelos polinomiales (GLM/SAS) que en la mayoría de los casos tuvieron representación de segundo orden. Para establecer si existieron diferencias significativas entre modelos de diferentes variables se analizaron las interacciones de los términos lineales y cuadráticos.

No se pudo contar con los indicadores necesarios para modelar el CO con los modelos Century (Parton, 1987) y Roth-C (Coleman, 2008), ya probadas en estos suelos y clima (Baethgen *et al.*, 1994). Por lo tanto, se recurrió a una evaluación más simple de los factores (semi-cuantitativa), mediante una tabla de puntaje por opinión calificada por cuatro especialistas evaluadores, de manera de discriminar cuantitativamente grandes efectos. Procedimientos parecidos se han empleado en evaluaciones de erosión (Vente *et al.*, 2008).

Los factores que se caracterizaron y cuantificaron fueron las principales variables que podrían tener efectos sobre la dinámica del CO del suelo: proporción del tiempo bajo pasturas o barbechos (porcentaje); sistema de laboreo (convencional o siembra directa); cantidad de laboreos (número de operaciones año⁻¹); productividad de las pasturas por tecnología empleada (categorías por opinión; alta, media, baja); nivel de enmalezamiento por gramilla (*Cynodon dactylon* L.) (categorías por opinión; alto, medio, bajo); fertilización nitrogenada aplicada (kg N ha⁻¹ año⁻¹); productividad de la rotación (L leche ha⁻¹ año⁻¹); ingreso de ración y reservas al predio (kg MS ha⁻¹ año⁻¹).

Los puntajes alcanzados en cada sistema son el resultado de calificar con cinco niveles de efecto

relativo entre sistemas para cada una de las 11 variables; (-2) muy negativo; (-1) negativo; (0) neutro; (1) positivo; (2) muy positivo. El efecto entre variables se discriminó con un coeficiente de ponderación (la suma de los 11 coeficientes es igual a 1,0). El producto del índice de calificación y el coeficiente de ponderación genera el índice de secuestro de CO.

Estas variables se cuantifican para cuatro modelos productivos (Cuadro 1) que presentaban claros contrastes de manejo del suelo, carga animal y productividad de leche. Esos modelos se describen detalladamente más adelante y se denominan: Secuencias no Planificadas (S1), Rotación Planificada (R1), Rotación del Sistema Intensivo (R2) y Rotación Planificada Avanzada (R3).

Dieciséis parcelas denominadas «Sistema General» recibieron el manejo S1 (1966-1983), R1 (1984-2003) y R3 (2003-2010) y tuvieron asociadas tres parcelas permanentes de campo natural donde se realizaron confinamientos nocturnos o durante períodos de mal tiempo, con suministro de reservas forrajeras y concentrados. Seis parcelas denominadas «Sistema Intensivo» fueron manejadas como S1 (1966-1983), R1 (1984-2003) y posteriormente como R2 (1999-2010) y tuvieron asociada una parcela de campo natural para confinamiento con similar objetivo.

Cuadro 1. Indicadores de uso del suelo y de productividad de las rotaciones predominantes en la Unidad de Lechería de INIA desde 1966 al 2010.

Sistemas de producción		S1	R1	R2	R3
Período de aplicación		1966 -1983	1984 -1998	1999 -2010	2003-2010
% de uso del tiempo anual por unidad de rotación	Pastura y Cultivos	72	81	80	78
	Barbechos	28	19	20	22
Barbecho por unidad de rotación (meses)	Totales	20	13	12	16
	En invierno	4	2	0	0
Tipo de Laboreo		LC	LC	SD	SD
Laboreos Anuales por Unidad de Rotación	Profundos (10-25 cm)	15	9	0	0
	Superficiales (5-10 cm)	15	12	0	0
	Total	30	21	0	0
Productividad de las pasturas por tecnología empleada		bajo	medio	alto	alto
Nivel de Gramilla		alto	medio	bajo	bajo
Uso anual máximo de N (kg ha ⁻¹)		38	31	31	35
Productividad de Leche (L ha ⁻¹ año ⁻¹)		< 3000	3000-6500	8500-11500	6500-8500
Ingreso de Concentrados y Forrajes (kg MS vaca ⁻¹ año ⁻¹) * (vacas ha ⁻¹) = (kg MS ha ⁻¹)		500*0,7 =350	800*0,9 =720	1700*1,4 = 2380	1200*1 =1200

Descripción de los cambios en el uso predominante del suelo, manejo y productividad desde 1966 al 2010

En el Cuadro 1 se resumen los principales cambios operados en el uso del suelo, manejo de las pasturas y productividad de las áreas en estudio desde el año 1966 hasta el 2010.

Sistema S1; Secuencias no Planificadas. En el primer periodo, desde aproximadamente 1966 a 1983, es más adecuado hablar de secuencias de praderas y cultivos forrajeros, más que de «rotación forrajera». En esos años no existía una rotación planificada. La práctica usual era que las áreas de praderas y cultivos forrajeros anuales se definían en cada año.

El concepto de rotación forrajera, que surge explícitamente a fines de los 80 (Durán, 1992) implica una planificación a mediano plazo de las diferentes especies que se usarán en el área de rotación.

En este primer periodo, el laboreo convencional implicaba alternar laboreos primarios intensos (excéntrica pesada, cincel, aradas) de praderas viejas, con periodos de barbecho largos, para dejar actual el clima y luego aplicar laboreos livianos (disqueras, rastras de dientes) para afinar el suelo. Por esta razón el manejo S1 (Cuadro 2) presenta el mayor tiempo de barbecho total (20 meses), parte del cual ocurre en invierno (cuatro meses) donde existe el mayor riesgo de erosión del suelo desnudo. También esta secuencia acumula la mayor cantidad de laboreos (30) en un periodo de 72 meses.

El uso de concentrados extra prediales y de reservas forrajeras producidas en el predio no pasaba de

10-15% (500 kg) del consumo anual de las vacas. Así no existían opciones para aplicar un buen manejo a las pasturas ante la variabilidad del clima y estas se degradaban con gramilla (*Cynodon dactylon* L.) y generaban necesidad de laboreos más intensos.

Manejo R1; Rotación Planificada. Durante la década del 80 se desarrolló el concepto de «Rotación Forrajera» (Durán, 1992), buscando identificar y cuantificar opciones tecnológicas que permitieran disminuir los periodos de barbecho improductivo (Durán, 1988). Así surgieron las siembras de praderas asociadas con cultivos anuales de invierno y verano con fines forrajeros.

Con ese enfoque se definió la rotación forrajera R1 (Cuadros 1 y 3) con siembras de praderas en otoño asociadas a trigo y de sorgos forrajeros asociados a la mezcla de trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) y achicoria (*Cichorium intybus* L.) (Durán, 1988, 1992, 1996a). También incluyó un año con la secuencia avena-maíz, con lo cual se integraba en forma estable el ensilaje de maíz complementando el ensilaje del trigo asociado a las praderas. Esta rotación, con una duración de 72 meses, permitió disminuir el tiempo de barbechos, reducir la cantidad de laboreos totales y de invierno y aumentar la producción total y de reservas forrajeras en forma planificada y estable (Cuadro 3), (Durán, 1992, 1996a, 1996b).

A partir de la década del 90, si bien se mantuvo la rotación R1, se incrementaron las reservas producidas en el predio y el uso los concentrados extra prediales, evaluándose sistemas lecheros que permi-

Cuadro 2. Secuencia no planificada (S1) de la unidad bajo laboreo convencional entre los años 1966 y 1983.

Años	1	2	3	4	5	6			
Secuencia S1	P1	P2	P3	P4-Sudan	RG	Raigrás-Avena	Media	total	%
m e s e s									
Pasturas ¹	6	12	12	7	8	7	8,7	52	72
Barbecho ²	6	0	0	5	4	5	3,3	20	28
Época del barbecho	V-O	-	-	I-P	O-I	V-O	0	72	100

¹ meses con cobertura vegetal; ² meses con suelo en barbecho con laboreos.
V = Verano; O = Otoño; I = Invierno; P = Primavera.

Cuadro 3. Rotación planificada (R1) de la unidad de lechería bajo laboreo convencional entre los años 1984 y 2003.

Años	1	2	3	4	5	6		
Rotación R1	T/P	P2	P3	P4/Sudán Grass + T. Rojo+Achicoria	T. Rojo y Achicoria	Maíz Avena /Maíz	meses	%
Pasturas ¹	9	12	12	8	12	7	59	81
Barbecho ²	3	0	0	4	0	5	13	19
Época del barbecho	O	-	-	I - P	-	V-O P	72	100

¹meses con cobertura vegetal; ²meses con suelo en barbecho con laboreos; P2 a P3 = praderas de 2º a 4º año. T/P = pradera de 1º año asociada a Trigo. V = Verano; O = Otoño; I = Invierno; P = Primavera.

tieron explorar productividades de leche desde 6500 a 11500 L ha⁻¹ (Durán y La Manna, 2009).

Manejo R2 y R3; rotaciones con siembra directa

Ante el conocimiento acumulado en la tecnología de siembra sin laboreo en 1998 se decide validar una propuesta de producción de leche basada en una rotación diseñada para implantar praderas y cultivos forrajeros con SD (Durán, 2003).

La rotación R2 se aplicó a partir del año 1999 en adelante en un grupo de parcelas que constituyen el «sistema intensivo», en tanto que la rotación R3 surge como variante de la R2, y se aplicó a partir del año

2003 en adelante en el «sistema general». En ambas rotaciones el tiempo de barbecho no cambia significativamente respecto a la R1, pero sí cambia a barbecho químico que evita toda presencia vegetal que consuma agua y nutrientes del suelo principalmente fuera del período invernal.

Sobre estas rotaciones se implementó un esquema de alta carga animal, basada en un alto uso de suplementos (40 a 60% de la dieta anual por vaca), lo que permitió lograr un alto control del pastoreo y alcanzar elevados rendimientos de leche (9500 a 11500 L ha⁻¹) (Duran y La Manna, 2009).

Cuadro 4. Rotación planificada avanzada de la unidad (R3: 2003-2010) y rotación del sistema intensivo (R2: 1999-2010).

	1	2	3	4	5	6		
Rotación R3	Trigo/P1	P2	P3	P4- Sudán	Raigrás-T. Alejandrino	Avena- Maíz	meses	%
Pasturas ¹	9	12	12	9	9	8	59	82
Barbecho ²	3	-	-	3	3	4	13	18
Época del barbecho	O			P	V	V - P	72	100
Rotación R2	T/P	P2	P3	P4/Maíz	Avena- Sudán		meses	%
Pasturas ¹	8	12	12	9	8		49	82
Barbecho ²	4	-	-	3	4		11	18
Época del barbecho	O			P	V		60	100

¹meses con cobertura vegetal; ²meses con suelo en barbecho con laboreos; LC = Laboreo Convencional. P1 a P4 = praderas de 1er. a cuarto año. T/P = pradera de 1º año asociada a Trigo. V = Verano; O = Otoño; I = Invierno; P = Primavera.

Resultados y discusión

Cambios en el contenido de CO del suelo resultantes de los sistemas productivos empleados

a. Efecto general para el conjunto de parcelas y sistemas

El comportamiento de todos los valores de CO (promedios anuales), a largo de un período de 35 años en el que se hicieron 10 muestreos, se manifestó con un modelo de segundo orden (Figura 1). La dispersión es importante debido a que las parcelas, con distintos suelos, tienen niveles originales de CO muy diferentes.

Se observó un período de disminución del CO que coincide en buena parte con el desempeño del sistema S1 (Figura 1). Luego el CO se estabilizó hacia 1992, cuando se aplicó el sistema R1, e inicia un período de rápida recuperación cuando se aplican los sistemas R2 y R3. El balance final de CO es positivo con un valor mínimo en 1990 de 20,5 g C Kg⁻¹ que es 21% inferior al valor original de 1975 (25,9 g C Kg⁻¹), y luego de 1990 una ganancia del 28,8%, alcanzado 26,4 g C Kg⁻¹ en 2010.

Las medidas de CO a lo largo de los años de este estudio no se vieron acompañadas por registros de densidad aparente. A los efectos de estimar cuantitativamente los cambios anuales de CO y referenciarlos a otros sistemas productivos reportados en la literatura se empleó un valor de densidad aparente de 1,43 gr cm⁻³ para una profundidad de 20 cm de suelo. Ese registro corresponde a la densidad aparente promedio de suelos de texturas similares en muchos

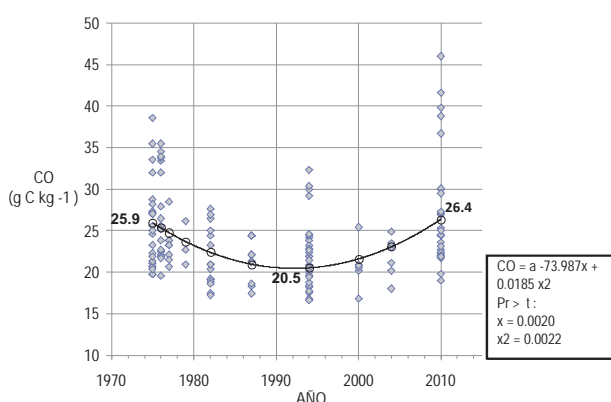


Figura 1. Evolución del contenido de CO (%) para las 26 parcelas analizadas.

establecimientos lecheros de la región (Morón *et al.*, 2009) y presenta muy baja variación (desvío estándar H» 6%). De esta manera se estimó una pérdida anual 0,89 t ha⁻¹ de CO para los primeros 17 años y una recuperación de 0,94 t ha⁻¹ en los siguientes 18 años. Estos registros de recuperación de CO, en suelos con historia de uso agrícola, están entre los más altos reportados en la literatura para zonas de ambientes templados (McLauchlan, 2006).

El resultado del «scoring model» por opinión calificada tuvo coincidencias claras tanto entre los índices de secuestro y el comportamiento general de ganancias y pérdidas de CO que ocurrió por la aplicación de diferentes sistemas de producción.

Los 11 factores considerados en el Cuadro 5 generan diferentes efectos sobre el balance de CO. (1) La proporción de pasturas en el tiempo total de la rotación favorece la acumulación. (2) La proporción del tiempo en barbecho incrementa el riesgo de pérdida por suelo descubierto a la erosión. (3) Los meses de invierno en barbecho coadyuvan a la pérdida por más frecuencia de escurrimientos erosivos superficiales. (4) El laboreo convencional facilita pérdidas por mineralización mientras que la siembra directa promueve la acumulación superficial. (5 y 6) La mayor frecuencia de operaciones de laboreos superficiales y profundos promueve pérdidas por mineralización y erosión. (7) La mejor tecnología de manejo de pasturas (fertilización y pastoreo controlado) aumentan su productividad y contribución de CO. (8) La gramilla es una especie C4 que hace grandes aportes de materia orgánica y por ser estolonífera su presencia disminuye el riesgo de pérdida de CO por erosión. (9) Los fertilizantes nitrogenados contribuyen a incrementar la productividad de los cultivos forrajeros y a que los residuos se establezcan como CO en el suelo. (10) La mayor productividad de leche implica principalmente mayor extracción de N del sistema lo que disminuye la capacidad de acumulación de CO. (11) El ingreso extra predial de forrajes y concentrados es una vía directa de incremento de CO en el suelo.

La frecuencia e intensidad de laboreos en las dos primeras décadas fue un factor relevante en la declinación del CO. Si bien los resultados de los experimentos de rotaciones agrícolas-ganaderas (Díaz-

Cuadro 5. Puntuación (Scoring) de las variables de uso del suelo y de productividad de las rotaciones predominantes y totales por sistema.

Variable	S1		R1		R2		R3		CP
	1966-1983		1984-1998		1999-2010		2003-2010		
	IC	ISC	IC	ISC	IC	ISC	IC	ISC	
1. Pastura	1	0,18	2	0,35	2	0,35	2	0,35	0,175
2. Barb. Total	-1,75	-0,17	-0,5	-0,05	0,25	0,02	0	0	0,095
3. Barb. Inv.	-1,25	-0,09	-0,5	-0,04	0	0	-0,25	-0,02	0,0725
4. Tipo Lab.	-1,75	-0,14	-1,5	-0,12	1	0,08	1	0,08	0,008
5. Lab. Prof.	-2,0	-0,2	-1,25	-0,12	0,75	0,07	0,75	0,07	0,0975
6. Lab. Sup.	-1,5	-0,17	-1	-0,11	0,75	0,08	0,75	0,08	0,11
7. Prod. Past.	-0,5	-0,05	0,25	0,02	1,25	0,12	1,25	0,12	0,0975
8. Gramilla	1,25	0,12	0,5	0,05	-0,25	-0,02	-0,25	-0,02	0,095
9. Nitrógeno	0,75	0,03	0,75	0,03	0,75	0,03	0,75	0,03	0,0425
10. Prod. Leche	0,25	0,02	0	0	-1	-0,09	-1,25	-0,11	0,09
11. Extra-pred.	-0,25	-0,01	0,25	0,01	1,5	0,07	0,5	0,02	0,0425
Total		-0,47		0,03		0,72		0,61	

Índice de Calificación de variables (IC) = (-2) muy negativo; (-1) negativo; (0) neutro; (1) positivo; (2) muy positivo.

Coefficiente de Ponderación entre variables (CP) (la suma de los 11 coeficientes es igual a 1,0).

Índice de Secuestro de C (ISC) = índice de calificación (IC) * coeficiente de ponderación (CP).

Rossello, 1992b). mostraban que era factible mantener el contenido de CO en sistemas mixtos (50% pasturas y 50% fase agrícola) esto ocurría con menor frecuencia de laboreos y sin el efecto del pastoreo animal.

En el caso de S1 parece que la alta frecuencia de laboreos y los extensos períodos en barbecho sin cobertura, generaron pérdidas tan altas (1,1 % año⁻¹) como las verificadas en una rotación agrícola continua en la misma Unidad de Suelos (Díaz-Rossello, 1994).

En el período de R1 se estabilizó el contenido de CO y comenzó una lenta recuperación que se acentuó con los sistemas R2 y R3. Esos cambios coinciden con la valoración por puntaje otorgada al complejo de factores evaluados en el Cuadro 6. Durante la aplicación del sistema R1 los factores que serían más relevantes en mejorar la acumulación de CO son: la reducción de las operaciones de laboreo, la mejora del manejo con incremento de la productividad de las pasturas y la disminución de barbechos sin cobertura en invierno.

A partir del año 1995 se aceleró la acumulación de CO presumiblemente por progresivas reducciones del laboreo, el ingreso en SD, aumento de la productividad de las pasturas y el ingreso de forrajes y concentrados extra-prediales y en 2010 supera el nivel de CO al comienzo de la evaluación en 1974.

Para tener un balance positivo de CO es imprescindible alcanzar un balance positivo de N. La fijación biológica de nitrógeno por las pasturas de leguminosas en la rotación es el factor clave para ese balance positivo (Drinkwater, 1998). La fase de tres años pasturas con leguminosas en la rotación con cultivos, incorpora al suelo aproximadamente 450 kg ha⁻¹ de N, según registros locales realizados sin pastoreo (Díaz-Rossello, 1992a). De esta manera, en estas rotaciones de seis años sería esperable que la fijación biológica fuera del orden de 80 kg N ha⁻¹ año⁻¹. En condiciones de pastoreo las pérdidas gaseosas del N fijado y consumido en el forraje pueden ser relativamente importantes en las deyecciones (Orwin *et al.*, 2009) y limitar algo la capacidad de contribuir a la retención de carbono en la materia

orgánica del suelo. Dentro de un gran espectro de prácticas tecnológicas que pueden desarrollarse para mejorar el balance de emisiones tanto de C como de N entre las más valoradas se ubican la incorporación de pasturas permanentes con leguminosas y la aplicación de técnicas de cero labranza (Novak *et al.*, 2010; Dell *et al.*, 2008).

b. Evolución del CO en dos sistemas productivos

Los sistemas productivos R2 y R3 difieren en el manejo en la fase final, que comprende prácticamente la última década. En ese período ambos sistemas compartieron la incorporación de la SD, aunque el sistema intensivo la adoptó tres años antes. Las diferencias principales se derivan del mayor uso de concentrado y reservas en el SI que determinaron además una mayor productividad lechera (Figuras 2 y 3). (Durán y La Manna, 2009).

Las diferencias ponderadas en el «scoring» (+0,72 y +0,61; Cuadro 5) no serían tan contrastantes

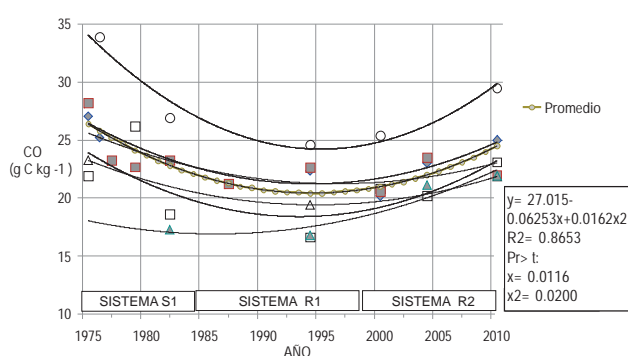


Figura 2. Evolución del contenido de CO de todas las parcelas del Sistema Intensivo y de su promedio.

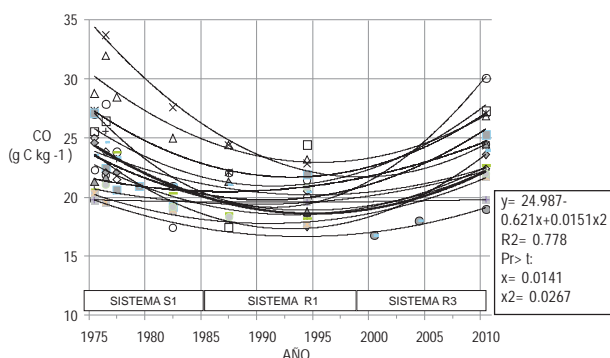


Figura 3. Evolución del contenido de CO de todas las parcelas del Sistema General y de su promedio.

como para tener efectos significativos en ese período de acumulación del CO. El seguimiento futuro permitirá verificar si se acumulan efectos que establezcan diferencias significativas en el contenido de CO.

c. Dinámica del CO en cuatro tipos de suelos dominantes

Las parcelas que integraron este estudio se ubicaron sobre la diversidad de suelos que comprende la Unidad «Ecilda Paullier-Las Brujas» (DSF, 1979) y se clasificaron en base a un mapa a escala 1:10.000. Aquellas parcelas que presentaban más de un tipo de suelo se identificaron por el tipo predominante, bajo cuatro grandes grupos: vertisoles, brunosoles, planosoles y halomórficos según la clasificación de suelos de Uruguay y que se corresponden respectivamente con los grandes grupos hapluderts, arguidoles, argiaboles y natracuoles del Soil Taxonomy, (Durán *et al.* 2005).

Aquellos suelos de menor productividad natural (halomórficos) con restricciones de salinidad, tuvieron baja dinámica de pérdidas y ganancias, mientras que los suelos de mayor productividad (planosoles) mostraron las mayores tasas de acumulación (Figura 4). Si bien no se verificó una interacción significativa entre los grupos de suelos de mayor fertilidad natural (planosoles, brunosoles y vertisoles) estos se diferenciaron significativamente en su dinámica de aquellos de menor fertilidad o productividad natural (halomórficos). Aunque brunosoles y vertisoles no se diferenciaron significativamente de los planosoles, estos últimos muestran una primera fase

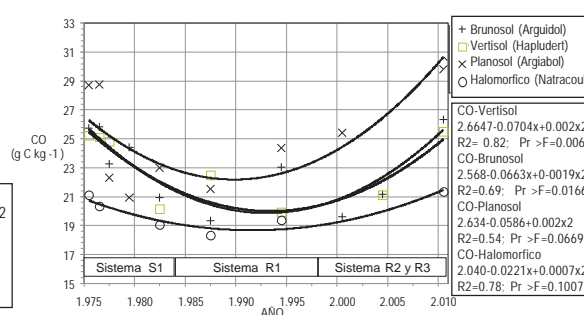


Figura 4. Evolución del CO para los tres sistemas en los cuatro suelos dominantes. Modelo ajustado con los datos promedio de cada grupo de suelos.

de degradación de tendencia menos intensa, presumiblemente por menor riesgo de erosión.

d. Comportamiento del CO en parcelas de campo natural mejorado usadas para semi-confinamiento

Los potreros de sacrificio o semi-confinamiento en predios de la cuenca lechera de Uruguay se corroboraron en los últimos años niveles generalizadamente altos de N P y CO ante las altas cargas y suministro de alimentos extraprediales (Ciganda y La Manna 2009).

En el subconjunto de potreros (27% de la superficie total) de campo natural mejorado, destinados al confinamiento del ganado, también se aprecia un período de fuertes pérdidas hasta comienzos de la década del 90 y luego recuperaciones muy importantes (Figura 5).

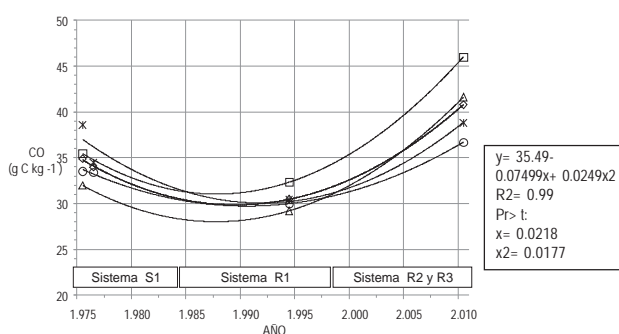


Figura 5. Evolución del CO de todas las parcelas de campo natural mejorado con semi-confinamiento y de su promedio.

Las pérdidas de CO registradas en campo natural podrían atribuirse a cuatro factores en el período del Sistema S1: 1) Hasta inicios de los años 90 no se daban concentrados ni reservas en semi-confinamiento por lo que no había traslado sistemático de nutrientes ni un ingreso extra predial de CO a esos potreros. 2) En el mismo período no se habían consolidado mejoras acumulativas del tapiz natural por fertilización fosforada e introducción sistemática de leguminosas. 3) Hasta los años 90 la carga animal de estos potreros fue considerablemente más baja que en el último período estudiado. 4) La dinámica de CO del campo natural mejorado no es un evento aislado y está interconectada en todo el sistema, ya que los animales manejados bajo pastoreo rotativo

reciclan los residuos por todas las parcelas y esos residuos varían de acuerdo a la dieta y carga animal.

Bajo el manejo R1 se equilibran pérdidas y ganancias, y en los manejos R2 y R3 se aprecian muy fuertes ganancias de CO con probable origen en: las mejoras en la productividad del tapiz; los incrementos muy importantes de las reservas forrajeras y de concentrados que se suministran en esas parcelas; el fuerte traslado de nutrientes por uso de altas cargas animales; y períodos de ocupación más extensos al no depender exclusivamente del forraje en pie sino también de los suplementos.

Lo más relevante de esta información cuantitativa es la intensidad de la recuperación o secuestro de carbono por el suelo. El Cuadro 6 presenta los valores de CO, N y la relación CO/N para los años 1994 y 2009 de las parcelas en campo natural mejorado. Las parcelas de semi-confinamiento presentan un incremento promedio de 1,1 % de CO. Asumiendo una densidad aparente promedio de 1,43 g cm³, el secuestro promedio de CO por las parcelas determinaría un ingreso anual hasta 20 cm de profundidad de 1,75 t CO ha⁻¹.

Esa acumulación de CO no es ajena al incremento del N en el suelo, ya que para secuestrar carbono es imprescindible el ingreso de N (García *et al.*, 2009). La acumulación de N en esos 15 años pasó de 3,01 g N Kg⁻¹ 1994 a 4,29 g N Kg⁻¹ en 2009. Ese cambio implica que anualmente se acumularon 244 kg N ha⁻¹ hasta 20 cm de profundidad.

Cuando se compara la evolución promedio de CO de las parcelas del Sistema Intensivo, Sistema General y el Campo Natural Mejorado (Figura 6) se aprecia a través de las interacciones entre regresiones que el Sistema Intensivo no difiere significativamente del Sistema General, lo que es razonable hasta el año 2000 en que tuvieron el mismo manejo. Las diferencias de intensidad de manejo implementadas en la última década aun no se han expresado en diferencias significativas de acumulación de CO.

Por el contrario, las parcelas de semi-confinamiento en campo natural mejorado presentaron una dinámica bien diferente a la de ambos sistemas. Partieron de niveles iniciales de CO más altos, quizás por no tener un uso agrícola anterior y ser zonas de bajos que acumularon sedimentos de los potreros

Cuadro 6. Registros de CO, N, y CO/N en las parcelas de campo natural mejorado con semi-confinamiento en los años 1994 y 2009.

Parcela	CO (g C kg ⁻¹)		N (g N kg ⁻¹)		CO/N		
	Año	1994	2009	1994	2009	1994	2009
B4		30	36,7	2,6	4,1	11,54	8,95
C4		32,3	46	3,2	4,8	10,1	9,58
C10		29,3	41,6	2,97	4,3	9,86	9,67
F4		31,8	38,9	3,27	3,96	9,74	9,82
Promedio		30,9	40,8	3,01	4,29	10,25	9,51

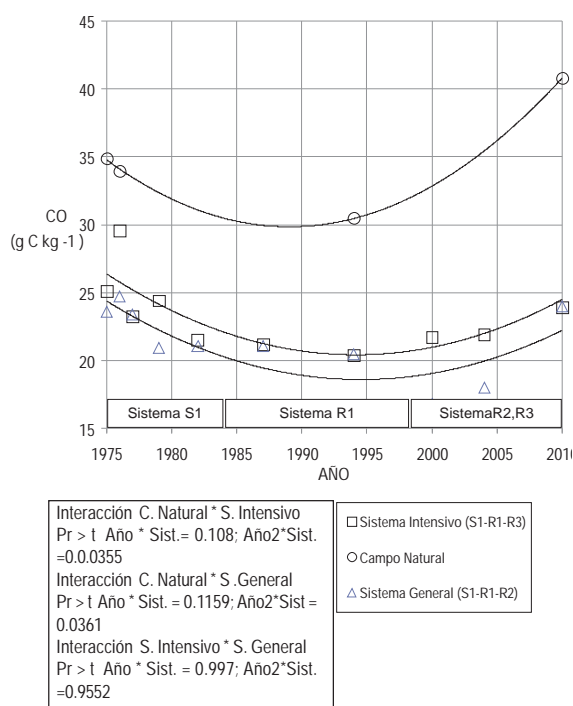


Figura 6. Evolución del CO en los suelos para las parcelas bajo campo natural mejorado y en los sistemas general e intensivo.

erosionados, pero mostraron un dinamismo con pérdidas similares a las parcelas en rotación de los sistemas, y ganancias mayores en los últimos años.

Conclusiones

El presente trabajo diagnosticó una situación promisorio de posible restauración de la fertilidad productiva y de notable capacidad de secuestro de carbono ($H \gg 2\%$ anual) en suelos en los que se implementaron modelos de muy alta productividad leche-

ra (6500 a 11500 L ha⁻¹), basados en rotaciones bajo siembra directa de cultivos forrajeros anuales y praderas mixtas de gramíneas y leguminosas pluri-anuales.

La evolución del CO del suelo como consecuencia de los cambios técnicos introducidos en los sistemas experimentales evaluados en la Unidad de Lechería, puede considerarse representativo de los cambios ocurridos y de los actualmente en curso en los suelos de los establecimientos que integran el segmento de mayor productividad de la lechería nacional.

La dinámica del CO reportada para los diferentes tipos de suelos pone en evidencia la capacidad diferencial de recuperar CO según sea la productividad potencial del suelo. Los suelos con restricciones de capacidad de almacenaje de agua o restricciones químicas, parecen recuperarlo mucho más lentamente.

El diagnóstico realizado sobre la acumulación de CO en las parcelas de semi-confinamiento plantea la oportunidad de capitalizar esa condición de los suelos, con inmejorable situación de fertilidad incorporándolos a la fase agrícola del sistema. O por el contrario; a) dispersar las áreas de suministro de concentrados y reservas hacia mayor número de parcelas de la rotación o b) concentrar esos suministros en patios de alimentación diseñados para hacer viable el reciclaje de los efluentes hacia las parcelas con pasturas.

Estas alternativas deben ser evaluadas considerando no solamente los beneficios productivos sino de contaminación ambiental y su posible manejo a la luz de las capacidades y restricciones para su implementación propias de cada establecimiento.

Cabe interrogarse acerca de la necesidad de desarrollo de tecnologías apropiadas para su manejo por la investigación local, ya que el área que ocupan estos potreros en los establecimientos lecheros es muy significativa y también lo es la dimensión de las oportunidades productivas y amenazas ambientales que se plantean.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración de Juan Molfino en la clasificación de suelos; de Juan Mieres y Yamandú Acosta en los registros de funcionamiento de los sistemas productivos de la Unidad de Lechería, y de Alejandro Morón, Jorge Sawchik, Adriana García, Andrés Quincke, Alejandro La Manna y José Terra en la revisión del documento y opinión calificada en el Cuadro de ponderación de los factores de manejo sobre el CO₂.

Bibliografía

- Baethgen W, Morón A, Díaz-Rossello R. 1994. Modelling long-term soil organic carbon changes in six cropping systems on SW Uruguay. En: 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México. Transactions. Volume 9. Acapulco : ISSS. pp. 300 - 301.
- Ciganda V, La Manna A. 2009. Acumulación y distribución de nutrientes en suelos de potreros sacrificio en predios lecheros de Uruguay. *Revista Argentina de Producción Animal* 29(supl.1): 375 - 376.
- Coleman K, Jenkinson DS. 2008. RothC-26.3 : a model for the turnover of carbon in soil. [En línea]. Harpenden : Rothamsted Research. Consultado: 10 agosto 2011. Disponible en: http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/aen/carbon/mod26_3_win.pdf
- Dell C, Salon P, Franks C, Benham E, Plowden Y. 2008. No-till and cover crop impacts on soil carbon and associated properties on Pennsylvania dairy farms. *Journal of Soil and Water Conservation* 63(3): 136 - 142.
- Díaz R. 1975. Fertilidad de los suelos. En: Sistemas lecheros: informe anual. La Estanzuela: CIAAB. pp. 1-4.
- Díaz-Rossello R. 1994. Long-term changes of soil carbon and nitrogen under rotation of legume pastures and arable crops. En: 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, México. Transactions. Volume 9. Acapulco : ISSS. pp. 304 - 305.
- Díaz-Rossello R. 1992a. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas* 1(1): 27 - 35.
- Díaz-Rossello R. 1992b. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas* 1(1): 103-110.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2009. La producción lechera en el Uruguay Año 2007. Serie Encuestas, 278. 76p.
- Drinkwater LE, Wagoner P, Sarrantonio M. 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396(6708): 262 - 265.
- DSF (Dirección de Suelos y Fertilizantes). 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Tomo 3. Montevideo : MAP. 452 p.
- Durán H, La Manna A. 2009. Implicancias productivas, económicas y ambientales de la intensificación de la producción de leche pastoril en Uruguay. En: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas, Montevideo, Uruguay. Resúmenes expandidos. La Estanzuela : INIA. (Serie Actividades de Difusión ; 587). pp. 81-84.
- Durán A, Califra A, Molfino JH, Lynn W. 2005. Keys to Soil Taxonomy for Uruguay. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Durán H. 2003. Validación de un sistema lechero de alta producción por vaca y por ha con siembra directa. En: Siembra Directa de Pasturas para Producción de Leche, La Estanzuela, Colonia, Uruguay. La Estanzuela : INIA. (Actividades de Difusión; 314). pp. 115-121.
- Durán H. 1996a. Sistema 1: alta producción de leche por hectárea : I. resultados productivos de los ejercicios 1992-93-94 [i.e. 1992-1993-1994]. En: Jornada de Producción Animal, Lechería y Pasturas, La Estanzuela, Colonia, Uruguay. La Estanzuela : INIA. (Actividades de Difusión; 100). pp. 1-15 [sic].
- Durán H, Alvarez J, Molina C. 1996b. «Sistema 2: alta producción de leche por vaca y por hectárea. En: Jornada de Producción Animal, Lechería y Pasturas, La Estanzuela, Colonia, Uruguay. La Estanzuela : INIA. (Actividades de Difusión; 100). pp. 1-14 [sic].
- Durán H. 1992. Productividad y alternativas de rotaciones forrajeras para producción de leche. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas* 1(2): 189 - 204.
- Durán H. 1988. Siembra asociada de trébol rojo y achicoria con sorgos forrajeros. La Estanzuela: CIAAB. [2] p. (Hoja de divulgación: 71).
- García A, Díaz R, Morón A, Sawchik J, Quincke A. 2009. El balance de N y la sostenibilidad de los agro ecosistemas. En: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas, Montevideo, Uruguay. Resúmenes expandidos. La Estanzuela : INIA. (Serie Actividades de Difusión ; 587). pp. 7-16.
- McKenzie D, Mason W. 2010. Soil carbon sequestration under pasture in Australian dairy regions [En línea]. [Report]. [Southbank, Victoria]: Dairy Australia. 42 p. Consultado: 10 agosto 2011. Disponible en: <http://www.dairyingfortomorrow.com/uploads/documents/file/Reports/Final.pdf>.
- McLaughlan K. 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: a review. *Ecosystems* 9: 1364 - 1382.
- Morón A, Molfino J, Ibañez V, Sawchik J, Califra A, Lazbal E, La Manna A, Malcuori E. 2009. La calidad de los suelos en las principales áreas de producción lechera en Uruguay. En: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas, Montevideo, Uruguay. Resúmenes expandidos. La Estanzuela: INIA. (Serie Actividades de Difusión ; 587). pp. 31-34.
- Novak S, Fiorelli J. 2010. Greenhouse gases and ammonia emissions from organic mixed crop-dairy systems: a critical review of mitigation options. *Agronomy for Sustainable Development* 30(2): 215 - 236.
- Orwin K, Bertram J, Clough T, Condon L, Sherlock R, O'Callaghan M. 2009. Short-term consequences of spatial heterogeneity in soil nitrogen concentrations caused by urine patches of different sizes. *Applied Soil Ecology* 42(3): 271 - 278.
- Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal* 51(5): 1173 - 1179.
- Schipper LA, Baisden WT, Parfitt RL, Ross C, Claydon JJ, Arnold G. 2007. Large losses of soil C and N from soil profiles under pasture in New Zealand during the past 20 years. *Global Change Biology* 13(6): 1138 - 1144.
- Siri-Prieto G, Ernst O, Bentancor O, Carballo C, Lazbal E. 2006. Nivel de adopción y situación de la siembra directa en establecimientos de producción lechera: 2a. encuesta quinquenal. Montevideo : INIA. 34 p. (Serie FPTA; 16).
- Tinsley J. 1967. Soil science manual of experiments. Aberdeen: University of Aberdeen. 124 p.
- Vente J de, Poesen J, Verstraeten G, Van Rompaey A, Govers G. 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Global and Planetary Change* 60(3/4): 393 - 415.