

---

# **LOS SISTEMAS LECHEROS Y SU IMPACTO EN EL RECURSO SUELO**

Autores: Roberto Díaz Rossello \*  
Henry Durán \*\*

\* Ing. Agr., MSc., Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA La Estanzuela

\*\* Ing. Agr., MSc., Programa Nacional de Investigación Producción de Leche, INIA La Estanzuela (hasta 31/03/2010)

**Título: LOS SISTEMAS LECHEROS Y SU IMPACTO EN EL RECURSO SUELO**

Autores: Roberto Díaz Rossello \*  
Henry Durán \*\*

Serie Técnica N° 191

© 2011, INIA

ISBN: 978-9974-38-320-3

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA  
Andes 1365, Piso 12. Montevideo, Uruguay  
<http://www.inia.org.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Este libro no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

# Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

## **Integración de la Junta Directiva**

**Ing. Agr., MSc. Enzo Benech** - Presidente

**Ing. Agr., Dr. Mario García** - Vicepresidente



**MINISTERIO DE GANADERÍA  
AGRICULTURA Y PESCA  
REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY**

**Dr., MSc. Pablo Zerbino**

**Dr. Alvaro Bentancur**



**Ing. Agr., MSc. Rodolfo M. Irigoyen**

**Ing. Agr. Mario Costa**





## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	1
3. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL USO PREDOMINANTE DEL SUELO .....	3
3.1 Sistema S1; Secuencias no Planificadas .....	3
3.2 Manejo R1; Rotación Planificada.....	4
3.3 Manejo R2 y R3; Rotaciones con Siembra Directa .....	6
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	7
4.1 Cambios en el contenido de CO del suelo resultantes de los sistemas productivos empleados .....	7
5. CONCLUSIONES .....	17
6. BIBLIOGRAFIA .....	17



## **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 Jose Terra en la revisión del documento y opinión calificada en el cuadro de ponderación de los factores de manejo sobre el CO.



---

## 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 al considerar que, 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  $0.89 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Las ganancias de CO esperables durante la fase de pasturas de la rotación, aparentemente no fueron suficientes para compensar las pérdidas de CO debidas principalmente al intenso laboreo en la fase de cultivos forrajeros. 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 discuten 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. La gran acumulación de CO en áreas de semi-confinamiento se discute por las amenazas de contaminación de aguas, así como oportunidades para aprovechar su potencial de acumulación de nutrientes en el suelo para la producción de cultivos.

**Palabras clave:** carbono orgánico, nitrógeno, siembra directa, sustentabilidad productiva, sistemas mixtos.

---

## Summary

---

### **Effects on Soils of Dairy Mixed System**

Pastoral dairy farming systems in Uruguay exhibit an accelerated process of intensification with major changes in soil management during the last four decades, though the production systems were always based on similar 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 ley-farming systems with different soil management that were carried out in large 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  $0.89 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  during a first period of 17 years. The expected OC gains during the rotation pasture phase were apparently not enough to offset the OC losses mostly due to the intensive tillage in the annual cropping phase. This tendency was reversed for the following 18 years where OC increased at  $0.94 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . 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 gains of the sacrifice paddocks is discussed as a threat to water pollution, as well as an opportunity to capitalize the high nutrient availability for crop production.

**Key words:** organic carbon, nitrogen, no-till, productive sustainability, ley farming.



## LOS SISTEMAS LECHEROS Y SU IMPACTO EN EL RECURSO SUELO

### 1.- INTRODUCCIÓN

A mediados de la década del 70 la producción lechera del país rompe el estancamiento productivo que la caracterizó por más de 40 años, iniciando un proceso de crecimiento que muestra su mayor dinamismo en los últimos 25 años. La producción de leche nacional aumentó 1000 millones de litros, mientras la superficie total dedicada a la lechería cayó de 1:000.000 a 850.0000 ha.. Estas diferencias solamente son explicadas por importantes cambios tecnológicos a nivel de los tambos del país, que impactaron fuertemente en el uso del suelo.

La lechería no ha sido objeto de muchos estudios a pesar que sus sistemas productivos han involucrado un proceso muy intensivo de laboreo del suelo hasta la reciente adopción de la siembra directa (SD), presentan una alta frecuencia de cultivos anuales en las rotaciones predominantes (Durán, 1992; DIEA/MGAP, 2009) y constituye un rubro ganadero de alta extracción y exportación extra predial de nutrientes desde el suelo (La Manna *et al.*, 2005).

Ese sistema general de rotación forrajera, con alternancia de praderas y cultivos forrajeros anuales se mantiene hasta el presente pero progresivamente ocurrieron tres grandes cambios que impactan sobre la dinámica de carbono y la sustentabilidad de los suelos: 1) aumenta la productividad de pasturas y cultivos por ajustes tecnológicos, 2) se incrementa el ingreso de alimentos extra prediales por compra de raciones y forrajes y 3) disminuyen las operaciones de laboreo, principalmente en los últimos 15 años en que progresa la adopción de SD (Scarlato *et al.*, 2001; Siri-Prieto *et al.*, 2006).

Los cambios reseñados en el sector lechero tienen estrecho paralelismo con los sistemas

físicos de producción lechera que desarrolló la Unidad de Lechería de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia, Uruguay) desde comienzos de la década del 90 (Nózar, 2006).

La evolución del contenido de CO en función de los sistemas productivos que desarrolle la lechería del país es clave no solamente para asegurar su productividad futura, sino que también comprometerá su futuro comercio internacional mediante la consideración de la huella de carbono (Viglizzo, 2010). Sistemas productivos de leche como el australiano (McKenzie, 2010) y el neozelandés (Shipper *et al.*, 2007) con mucha participación en el comercio internacional, han hecho foco de alta preocupación sobre la situación de pérdida progresiva de CO que tienen los suelos de sus regiones dedicadas a la producción lechera.

El CO del suelo de las parcelas de los Sistemas Lecheros de La Estanzuela fue analizado a partir de 1975 (Díaz, 1976) y en diversos momentos a lo largo de los últimos cuarenta años. Esta información constituye una inestimable base para estudiar y comprender cómo los sistemas reales de producción lechera provocaron grandes cambios en el manejo del suelo y la calidad del mismo. 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.

### 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Desde 1974 hasta el 2010 se efectuaron muestreos de suelo en diversos años en los potreros de los sistemas lecheros de la Unidad de Lechería de la Estación Experimental La Estanzuela (Colonia, Uruguay) para analizar el contenido de CO. Hasta el año 2007

los análisis se efectuaron con digestión húmeda (Tinsley, 1967) y desde ese año al presente 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.

Desde 1974 hasta 1989 el predio de la Unidad de Lechería estaba subdividido en parcelas de 2 ha y a partir de ese momento la mayoría de los potreros se integran en grupos de tres, constituyendo parcelas de 6 ha. Para el ajuste de las regresiones la base de datos de CO se integró en base a las actuales unidades de 6 ha y para el período anterior se promediaron las 3 parcelas que los conformaban, cuya identidad se mantuvo hasta el presente.

En base a los registros de manejo de las parcelas de los sistemas de producción se caracterizaron y cuantificaron las principales variables que se presume pueden tener efectos significativos en la dinámica del CO del suelo: proporción del tiempo bajo pasturas o barbechos (%); tipo de laboreo; convencional o siembra directa; cantidad de laboreos (Nº de operaciones año<sup>-1</sup>); productividad de las pasturas por tecnología empleada (cate-

gorías por opinión; alta, media, baja); nivel de enmalezamiento por gramilla (*Cynodon dactylon*) (Categorías por opinión; alto, medio, bajo); fertilización nitrogenada aplicada (kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>); productividad de la rotación (L leche ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>); ingreso de ración y reservas al predio (kg MS ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

Estas variables se cuantifican para cuatro modelos productivos que presentaban claros contrastes de manejo del suelo, carga animal y productividad de leche. Esos modelos se aplican en diferentes períodos (Cuadro 1), se describen detalladamente más adelante (cuadro 2) 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" (A1, BX1, C8, D1, D4, F1, G1, G3, G8, G10, H1, H4, HX1, I1, I4 y IX1) recibieron el manejo S1, R1 y R3, y tuvieron asociadas 3 parcelas permanentes en campo natural (C4, C10, y F4) donde se realizaron confinamientos nocturnos y/o en períodos de mal tiempo con alimentación por reservas forrajeras y concentrados. Seis parcelas (A4, AX4, B1, BX4, C1 y E3) denominadas "Sistema Intensivo" fueron manejadas como S1 luego R1 y finalmente como R2. Tuvieron asociada una parcela permanente en campo natural (B4) para confinamiento con similar objetivo.

Adicionalmente se analizó el contenido de nitrógeno total y potencial de mineralización de nitrógeno por incubación anaeróbica (Stanford y Smith, 1972) al grupo de parcelas que componen el Sistema Intensivo.

**Cuadro 1.** Periodos de aplicación de los sistemas de manejo que conformaron el Sistema General y el Sistema Intensivo.

Sistema General	Sistema Intensivo
S1 = 1966 -1983	S1 = 1966 -1983
R1 = 1984 -2003	R1 = 1984 -1998
R3 = 2003 -2010	R2 = 1999 -2010

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL USO PREDOMINANTE DEL SUELO, MANEJO Y PRODUCTIVIDAD DESDE 1966 AL 2010.

En el Cuadro 2 se resumen los principales cambios operados en el uso del suelo, manejo de las pasturas y productividad del área de la Unidad de lechería y del sector ocupado por el denominado Sistema Lechero Intensivo validado desde 1991 hasta el 2010.

La producción media de leche en Uruguay es actualmente de sólo 2400 Lha-1 (DIEA, 2009), pero esconde una importante variabilidad. Entre el año 1991 y el 2005 el porcentaje de productores remitentes ubicados entre los niveles considerados medios y altos, pasaron del 17 al 25 %, indicando un proceso de intensificación en concordancia con los sistemas evaluados en INIA La Estanzuela, (Nozar, 2006).

#### 3.1.- 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", ya que este último concepto no había sido aún aplicado para definir estrategias de producción y uso de pasturas. 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, considerando las demandas estimadas de alimento del rodeo, sin consideraciones respecto a optimizar el uso del suelo para producir forraje, ni destinar una pastura específica para conservación.

El concepto de rotación forrajera, que surge explícitamente a fines de los 80 (Durán, 1992) implica una planificación a mediano plazo de las mezclas y cultivares forrajeros puros que se usarán en todo el predio, pre-

**Cuadro 2.** Indicadores de uso del suelo y de productividad de las rotaciones predominantes en la Unidad de Lechería de INIA durante los últimos 44 años.

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	82	82
	Barbechos	28	19	18	18
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	15	9	0	0
	Superficiales	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 <sup>-1</sup> )		38	31	31	35
Productividad de Leche (L ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )		< 3000	3000-6500	8500-11500	6500-8500
Ingreso de Concentrados y Forrajes Kg/vaca/año * (vacas/ha) = (kg MS ha <sup>-1</sup> )		500*0.7 =350	800*0.9 =720	1700*1.4 = 2380	1200*1 =1200

definiendo para cada componente su duración y manejo, incluyendo la secuencia de especies, épocas de siembra, nivel de fertilización y momentos de cierre para hacer reservas, etc., de manera de generar una estructura forrajera equilibrada a través de los años y dónde se potencian las sinergias de los componentes y se minimizan efectos adversos conocidos.

En este primer período, el criterio de preparación de la cama de semillas se regía por los principios del laboreo convencional que implicaba alternar laboreos iniciales intensos de praderas viejas o campo natural (excén-

trica pesada, cincel, aradas) con períodos de barbecho largos, para dejar actual el clima y en dónde se aplicaban laboreos livianos (disqueras, rastras de dientes) para reducir el tamaño de los agregados hasta la siembra.

Por esta razón la secuencia no planificada (S1) del Cuadro 3, considerada como un promedio representativo de lo ocurrido en este período, presenta el mayor tiempo de barbecho (20 meses), parte del cual ocurre en invierno (4 meses) dónde existe el mayor riesgo de erosión de suelo desnudo. También esta secuencia acumula la mayor cantidad de laboreos (30) en el período de 72 meses.

**Cuadro 3.** Secuencia no Planificada (S1) de la Unidad bajo laboreo convencional entre los años 1966 y 1984.

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 <sup>1</sup>	6	12	12	7	8	7	8.7	52	72
Barbecho <sup>2</sup>	6	0	0	5	4	5	3.3	20	28
Época del barbecho	V- O	-	-	I - P	O - I	V- O	-	72	100

<sup>1</sup> meses con cobertura vegetal; <sup>2</sup> meses con suelo en barbecho con laboreos.

LC = Laboreo Convencional. P1 a P4 = praderas de 1er. a cuarto año.

V = Verano; O = Otoño; I = Invierno; P = Primavera

Asimismo, durante estos años, el uso de concentrados extra prediales y de reservas forrajeras producidas en el predio, tenía su mínima expresión en tanto se planificaban para suplementar básicamente el invierno, por lo cual su aporte a la dieta individual no pasaba de 10-15 % (500 kg) del consumo anual de las vacas, con lo cual no existían opciones de regular el consumo bajo pastoreo para aplicar un buen manejo a las pasturas.

Esta situación implicaba que ante un evento climático estacional que generara carencia o exceso de forraje, se producía invariablemente sobre pastoreo ó sub pastoreo. De esta manera se favorecía el avance de gramilla en las praderas, lo que a su vez determinaba la necesidad de laboreos más agresivos y barbechos más largos para alcanzar

una cama de semilla relativamente limpia para el cultivo forrajero siguiente.

Este manejo del suelo y de las pasturas sugieren condiciones muy negativas en relación al balance del carbono del suelo, pues se conjuntan: a) condiciones favorables para la pérdida por oxidación del CO dada la elevada frecuencia de laboreos y b) promoción de la erosión por períodos largos de suelo desnudo y suelo expuesto a las lluvias.

### 3.2.- Manejo R1; Rotación Planificada.

En este contexto tecnológico y durante la década del 80, dónde ya se había formalizado un crecimiento exportador de la lechería e interesaba aumentar la producción, a la vez de

mantener costos bajos, se desarrolló el concepto de "Rotación Forrajera" (Durán, 1992), buscando solucionar los notorios problemas de manejo del suelo y de control de malezas, y apuntando también a optimizar el uso del suelo en términos de producción y calidad del forraje.

Por consiguiente se realizaron un conjunto de trabajos experimentales con el propósito de explorar opciones que permitieran disminuir los períodos de barbecho a los efectos de aumentar el tiempo ocupado por las pasturas, tanto para pastoreo directo como para conservación (Durán, 1988). Estos trabajos, que pusieron énfasis en realizar las siembras de praderas asociadas con cultivos forrajeros anuales de invierno y verano, han sido resumidos por Carámbula (2007).

La consecuencia práctica de estos estudios fue la definición de la rotación forrajera R1 (Cuadros 2 y 3) que involucró el uso de siembras de praderas en otoño asociadas a trigo y de sorgos forrajeros asociados a la mezcla de trébol rojo (*Trifolium pratense*) y achicoria (*Cichorium intybus*) (Durán, 1988; 1992; 1996a). Esta rotación también incluyó un año con la secuencia avena – maíz, con lo cual se incluía en forma estable el ensilaje de maíz en febrero complementando el ensilaje del trigo asociado en noviembre. Esta rotación con una duración de 72 meses, permitió disminuir el tiempo de barbechos, reducir la cantidad de laboreos totales y de invierno e incluir y aumentar la producción de reservas en forma planificada y estable, liberando las praderas para uso exclusivo del pastoreo (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Rotación Planificada (R1) de la Unidad de Lechería bajo laboreo convencional entre los años 1985 y 2001 .

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

<sup>1</sup> meses con cobertura vegetal; <sup>2</sup> meses 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

Durante esta década del 80 y en paralelo con los trabajos sobre rotaciones de pasturas, se demostró el impacto de la suplementación con concentrados, utilizados principalmente como herramienta para aumentar la dotación, manteniendo la producción por vaca, en lugar del enfoque tradicional de suplementar en pastoreo para mejorar el desempeño individual ( Durán *et al.*, 1985).

Estos estudios, unidos a un enfoque sistémico y ejercicios de simulación, permitieron formular rotaciones forrajeras que no sólo potenciaron la producción de pasto, sino que con estrategias integradas de conservación

y uso de las reservas y concentrados se aumentó la carga y se mantuvo una producción individual aceptable (4500 L vaca masa-1 año-1). Asimismo permitieron un considerable aumento de la productividad de leche por ha, mejorando simultáneamente el manejo y productividad de las pasturas (Durán, 1992; 1996a; 1996b).

A partir de la década del 90, si bien se mantuvo la rotación R1 iniciada a mediados de los 80, se incrementó notoriamente el uso de reservas producidas en el predio y de los concentrados extra prediales, evaluándose Sistemas Lecheros que permitieron explorar

productividades de leche desde 6500 a 9500 L ha<sup>-1</sup> (Durán, 2000; Durán y La Manna, 2009).

### 3.3.- Manejo R2 y R3; Rotaciones con Siembra Directa

Hacia fines de los 90, la acumulación de información sobre el uso de SD en cultivos agrícolas y su creciente y exitosa aplicación en los sistemas comerciales, plantean una oportunidad, a la vez que un gran desafío, para el sector lechero.

Es así que, ante la solidez de la información general disponible, en 1998 se decide validar una propuesta de producción de leche basada en una rotación diseñada para implantar praderas y cultivos forrajeros con SD, sin pasar por una etapa previa de confirmación experimental bajo pastoreo de la viabilidad de cada componente.

De esta forma se da origen a un sistema de alta producción de leche por vaca y por ha con SD (Sistema Intensivo, rotación R2; Durán, 2003)

La rotación usada fue la que con algunas variantes, se aplicó, a partir del año 2001, en toda el área de rotación de la Unidad de Lechería y en el Cuadro 5 se denomina R3. En estas rotaciones con SD el tiempo de barbecho no cambia significativamente respecto a la R1, pero cambia drásticamente el concepto de barbecho. Ahora el concepto implica que se usa herbicida para matar a todas las especies vegetales presentes en el suelo y que durante el período de barbecho no hay crecimiento vegetal que consuma agua y nutrientes del suelo. Obviamente los laboreos desaparecen y el uso de herbicidas ayuda a mantener las praderas con baja presencia de gramilla y otras malezas.

Como en forma complementaria se ha mantenido un esquema de alto a muy alto manejo de suplementos producidos intra y extra prediales (de 40 a 60 % de la dieta anual por vaca), se logra un alto control del manejo del pastoreo y por consiguiente se optimiza el rendimiento de las pasturas, a la vez de alcanzar muy altos rendimientos de leche (9500 a 11500 L ha<sup>-1</sup>; Durán 2004), con un reciclaje muy importante de P y N dentro del predio (Duran y La Manna, 2007).

**Cuadro 5.** Rotación Planificada Avanzada de la Unidad (R3: 2001-2010) y Rotación del Sistema Intensivo (R2: 1998-2008)

Años	1	2	3	4	5	6			
Rotación R3	Trigo/P1	P2	P3	P4-Sudan	Raigrás-T. Alejandrino	Avena-Maíz	meses	%	
Pasturas <sup>1</sup>	9	12	12	9	9	8	59	82	
Barbecho <sup>2</sup>	3	-	-	3	3	4	13	18	
Época del barbecho	O			P	V	V - P	72	100	
	Rotación Sistema 2000-2009 SD								
Rotación R2	T/P	P2	P3	P4/Maíz	Avena-Sudan		meses	%	
Pasturas <sup>1</sup>	8	12	12	9	8		49	82	
Barbecho <sup>2</sup>	4	-	-	3	4		11	18	
Época del barbecho	O			P	V		60	100	

<sup>1</sup> meses con cobertura vegetal; <sup>2</sup> meses con suelo en barbecho con laboreos.

LC = Laboreo Convencional. P1 a P4 = praderas de 1er. a cuarto año. T/P = pradera de 1er. año asociada a Trigo.

V = Verano; O = Otoño; I = Invierno; P = Primavera

## 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 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 análisis de los contenidos de CO resultante de los sistemas de producción lechera que se emplearon merece un enfoque que caracterice su evolución a lo largo del período de estudio. Para eso se modelaron los cambios ajustando modelos polinomiales para valorar su consistencia en las diferentes parcelas de modo de identificar un modelo general de evolución frente a los cambios ocurridos en los sistemas a lo largo del tiempo.

En primer lugar se ajustó una ecuación de segundo orden que representó el comportamiento de todos los valores de CO a largo de

un período de 35 años en el que se hicieron 10 muestreos incompletos (Figura 1). Ciertamente la dispersión es importante como consecuencia de promediar parcelas que tienen niveles originales de CO muy diferentes al pertenecer a suelos diferentes dentro de la Unidad de Lechería. Para modelar el comportamiento del CO a lo largo de los años se ajustó una regresión de segundo orden con los valores promedio en los años que se efectuaron análisis de CO.

En la figura 1 se aprecia un período de disminución del CO que coincide en buena parte con el desempeño del sistema S1. Luego el CO se estabiliza hacia el año 1992, cuando se aplica 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 (2.05 %), que es 21 % inferior al valor original de 1975 (2.59 %), y luego de 1990 una ganancia del 28.8 %, alcanzado 2.64 % en el 2010.

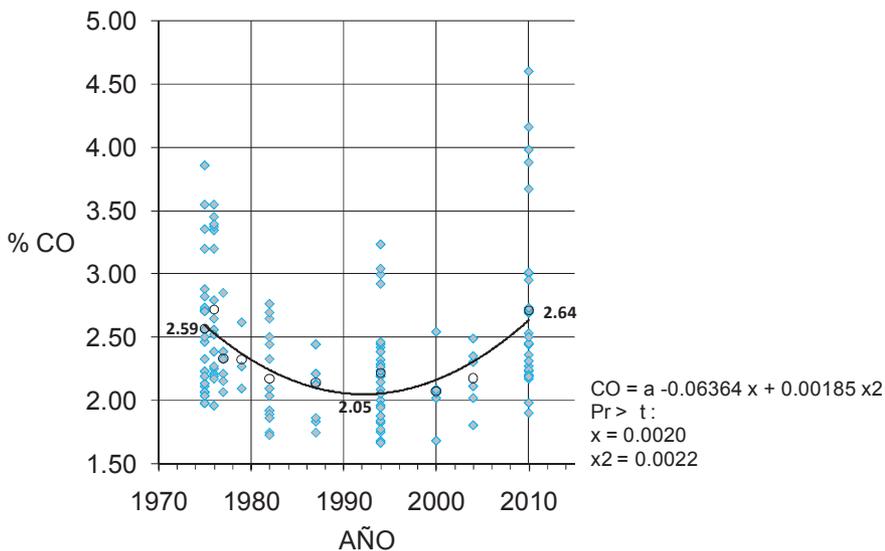


Figura 1. Evolución del contenido de CO (%) para las 26 parcelas analizadas.

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 las pérdidas y secuestro de CO expresadas en tasas anuales se empleó un valor de densidad aparente

de 1.43 gr cm<sup>-3</sup> para una profundidad de 20 cm de suelo. Ese registro corresponde a la densidad aparente promedio de suelos del mismo tipo en muchos establecimientos lecheros de la región (Morón *et al.*, 2009). De esta manera se estimó una pérdida anual

0.89 t ha<sup>-1</sup> de CO para los primeros 17 años y una recuperación de 0.94 t ha<sup>-1</sup> 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).

Múltiples factores del sistema productivo pueden ser responsables de esa dinámica. Seguramente la mejor manera de comprender las causas y los efectos de esos cambios es a través de su modelización con herramientas ya probadas en estos suelos y ambiente climático, tales como los modelos Century (Parton, 1987) y Roth-C (Coleman, 1999).

Como no se contó con toda la información de indicadores necesaria para los modelos mencionados, se recurrió a una evaluación más simple de los factores, mediante una tabla de puntaje por opinión calificada, de manera de discriminar cuantitativamente grandes efectos (Cuadro 6). Procedimientos parecidos se han empleado en evaluaciones de erosión (de Vente, et al., 2008).

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.

El resultado de este "scoring model" por opinión calificada tiene 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 6 generan diferentes tendencias 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

**Cuadro 6.** Puntuación (Scoring) de las variables de uso del suelo y de productividad de las rotaciones predominantes y totales por sistema.

Variable	S1 1966-1983		R1 1984-1998		R2 1999-2010		R3 2003-2010		Coef. de Pond.
	Índice Calif.	Índice Secues.	Índice Calif.	Índice Secues.	Índice Calif.	Índice Secues.	Índice Calif.	Índice Secues.	
1. Pastura	1.00	0.18	2.00	0.35	2.00	0.35	2.00	0.35	<b>0.175</b>
2. Barb. Total	-1.75	-0.17	-0.50	-0.05	0.25	0.02	0.00	0.00	<b>0.095</b>
3. Barb. Inv.	-1.25	-0.09	-0.50	-0.04	0.00	0.00	-0.25	-0.02	<b>0.0725</b>
4. Tipo Lab.	-1.75	-0.14	-1.50	-0.12	1.00	0.08	1.00	0.08	<b>0.008</b>
5. Lab. Prof.	-2.00	-0.20	-1.25	-0.12	0.75	0.07	0.75	0.07	<b>0.0975</b>
6. Lab. Sup.	-1.50	-0.17	-1.00	-0.11	0.75	0.08	0.75	0.08	<b>0.11</b>
7. Prod. Past.	-0.50	-0.05	0.25	0.02	1.25	0.12	1.25	0.12	<b>0.0975</b>
8. Gramilla	1.25	0.12	0.50	0.05	-0.25	-0.02	-0.25	-0.02	<b>0.095</b>
9. Nitrógeno	0.75	0.03	0.75	0.03	0.75	0.03	0.75	0.03	<b>0.0425</b>
10. Prod. Leche	0.25	0.02	0.00	0.00	-1.00	-0.09	-1.25	-0.11	<b>0.09</b>
11. Extra-pred.	-0.25	-0.01	0.25	0.01	1.50	0.07	0.50	0.02	<b>0.0425</b>
<b>Total</b>		<b>-0.47</b>		<b>0.03</b>		<b>0.72</b>		<b>0.61</b>	

la pérdida porque son más frecuentes los 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 labores superficiales y profundos promueve pérdidas por mineralización y erosión. (7) La tecnología de manejo de pasturas principalmente por los factores de fertilización y pastoreo controlado aumentan su productividad y contribución de CO. (8) La gramilla es una maleza C4 que hace grandes aportes de materia orgánica y por ser estolonífera su presencia disminuye el riesgo de pérdida de CO por erosión, (9) La cantidad de fertilizantes nitrogenados empleados en la rotación 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.

No puede establecerse una relación cuantitativa directa entre la escala de puntaje y la magnitud de los efectos observados en cambios del contenido de CO del suelo. No obstante, el sentido y magnitud general de las tendencias es muy congruente con otros antecedentes experimentales en sistemas lecheros (Bronick, *et al.* 2005). La enorme frecuencia e intensidad de labores en las dos primeras décadas aparece como un factor muy relevante en la declinación del CO. Si bien los resultados de los experimentos de rotaciones agrícolas-ganaderas (Díaz-Rossello, 1994) mostraban que era factible mantener el contenido de CO en sistemas mixtos (50% pasturas y 50% fase agrícola) esto ocurría con menor frecuencia de labores y sin el efecto del pastoreo animal.

Los efectos de la intensidad de laboreo y de los pastoreos están integrados o confundidos tanto en los registros de CO del Experimento de Largo Plazo de La Estanzuela como en los de la Unidad de Lechería en S1 y no se pueden cuantificar separadamente.

Es muy probable que el pastoreo también afecte negativamente el balance de carbono por tres causas principales: 1) reducción de la productividad de la pastura por compactación del suelo 2) disminución del retorno de CO y nutrientes por el retiro en producto animal. y 3) indirectamente por pérdidas de N por volatilización de amonio en los puntos de concentración de orina y menor devolución del mismo en el resto del área.

Estos resultados cuestionan dar por cierto que simplemente por realizar una rotación de cultivos anuales con mezclas de leguminosas y gramíneas perennes se alcanza un balance neutro o positivo de CO. En el caso del sistema S1 la alta frecuencia de labores, los grandes períodos en barbecho sin cobertura y los pastoreos en condiciones excesivamente húmedas generaron pérdidas de CO que no pudieron ser compensadas por la contribución de las pasturas de la rotación. De hecho, las pérdidas de CO que se registraron en S1 son tan altas (1.1% año<sup>-1</sup>) como las verificadas en una rotación agrícola continua en la misma Unidad de Suelos (Díaz-Rossello, 1994).

En el período del sistema R1 se estabiliza el contenido de CO y comienza 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 importantes 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 los períodos de barbecho sin cobertura, principalmente en invierno.

A partir del año 1995 se acelera la acumulación de CO con progresivas reducciones del laboreo e ingreso en SD. Simultáneamente aumenta la productividad de las pasturas y el ingreso de forrajes y concentrados extra prediales que se puede suponer que también contribuyen a la acumulación de CO. En relativamente pocos años se logra sobrepasar significativamente el nivel de CO

con que se inició la evaluación en 1974. No hay ningún indicio aún de disminución en el ritmo de acumulación con la tecnología de producción y manejo actual del suelo en SD.

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). Los ciclos de 3 años de pasturas con leguminosas incorporan al suelo en promedio aproximadamente 450 kg ha<sup>-1</sup> de N, en registros locales realizados sin pastoreo (Díaz-Rossello, 1992-a). De esta manera, en estas rotaciones de 6 años sería esperable que la fijación biológica fuera del orden de 80 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. 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. Por otra parte, el máximo aportado por fertilización nitrogenada de los cultivos anuales es de 30 a 40 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> pero sujeto a importantes pérdidas por tratarse de fertilizaciones en cobertura. De esta manera, lo que quedaría retenido en el suelo por las fertilizaciones aplicadas en la fase de cultivos sería muy inferior a lo fijado biológicamente en la fase de pasturas. Las posibles vías de pérdida de N, no parecen haber limitado seriamente el balance positivo de N, e indirectamente de CO, cuando los demás factores de manejo (laboreo, tiempo en barbecho, etc.) se modificaron para reducir las pérdidas por mineralización y erosión.

Los resultados verifican los antecedentes de otros estudios en sistemas lecheros. 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).

Los cambios en el contenido de CO tienen importante asociación con la productividad de los cultivos de grano en este tipo de suelos (Díaz *et al.*, 2009). Aunque aún no se han establecido relaciones entre el contenido de CO y la producción de forraje, todo hace presumir la misma naturaleza de relación. A los efectos de estimar un orden de magnitud del potencial deterioro productivo por pérdida del CO en los sistemas lecheros se hace a continuación un ejercicio de estimación de esa pérdida con los coeficientes disponibles.

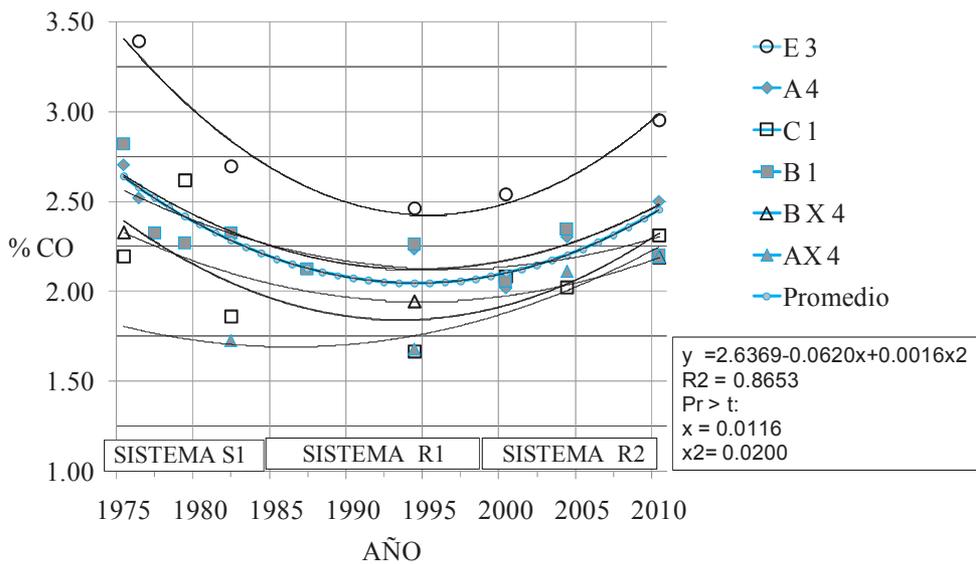
Para estimar las pérdidas y ganancias de productividad se debe caracterizar el contenido relativo de CO respecto al valor original o en condición indisturbada de ese suelo. Este valor no puede ser medido en los suelos de la Unidad de Lechería porque no existen sitios indisturbados en el entorno. Se considerará que el contenido relativo de CO actual es equivalente al promedio (79%) determinado en un relevamiento de establecimientos en la cuenca lechera (Moron *et al.*, 2008 y 2009). Si se asume ese valor relativo como el actual, los valores mínimos registrados a mediados de los años 90 habrían sido aún 23% inferiores a los actuales. Por lo tanto habrían estado, en esos años, en 56% de los valores de referencia para el suelo indisturbado. En esa condición la pérdida de productividad que hubiera tenido el suelo, según el modelo que vincula CO y productividad (Díaz *et al.*, 2009), sería del orden del 21%. Esa pérdida de productividad es la debida principalmente a degradación física no corregible por fertilización nitrogenada o de otros nutrientes. La recuperación de CO que ocurrió desde mediados de la década del 90 hasta el 2010 (23%) determinaría que actualmente las pérdidas de productividad por degradación estimadas por el modelo serían marginales.

Luego de analizado el comportamiento general de todas las parcelas en su conjunto se analizó el comportamiento de la dinámica de CO en función de tres variables: Sistemas Productivos, Tipo de Suelos y Parcelas de Campo Natural Mejorado usadas como patio de alimentación nochero.

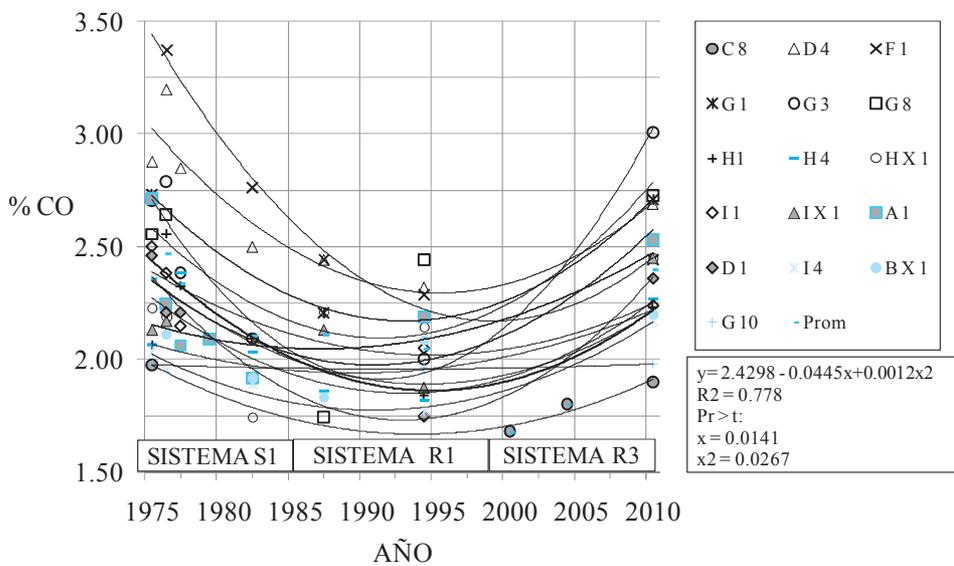
**b. Evolución del CO en dos sistemas productivos.**

El sistema productivo general de la Unidad de Lechería está conformado por 16 parcelas o potreros mientras que el Sistema Intensivo tan solo tiene 6 parcelas. Como puede apreciarse en las figuras 2 y 3, existen diferencias importantes en los contenidos

de CO entre potreros como consecuencia de las variaciones de suelos que existen en el área experimental. Sin embargo, el comportamiento general de todos los potreros es similar representado por modelos de segundo grado que muestran una fase decreciente hasta comienzos de la década del noventa y luego se acumula CO hasta la actualidad.



**Figura 2.** Evolución del contenido de CO en las parcelas del Sistema Intensivo.



**Figura 3.** Evolución del contenido de CO en las parcelas del Sistema General.

Los dos sistemas productivos 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 3 años antes. Las diferencias principales se derivan del mayor uso de concentrado y reservas en el SI que determinaron además de una mayor productividad lechera y un mayor reciclaje de N y P (Durán y La Manna, 2007).

Cuando se compara el comportamiento promedio del CO en el suelo del Sistema General y el Sistema Intensivo se tiene la restricción de no tener una representatividad experimental en los diferentes tipos de suelos. Por lo tanto podría haber cierto desvío porque un sistema tenga mayor proporción de un tipo de suelo u otro. No obstante, las regresiones promedio para los contenidos de CO de ambos sistemas, tienen un comportamiento extremadamente similar con un modelo de segundo orden que en la fase de los 10 últimos años tampoco evidencia las diferencias esperables al tener sistemas di-

ferentes. Las diferencias ponderadas en el "scoring" (+7 y +5; Cuadro 6) no parecen haber sido tan contrastantes 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 diferentes parcelas que integran este estudio se ubican sobre la diversidad de suelos que comprende el paisaje de la Unidad "Ecilda Paullier-Las Brujas" (MGAP/DSF, 1979). La dinámica del CO en los principales tipos de suelo que componen la Unidad de Lechería puede presentar diferencias, por lo que las parcelas se clasificaron en base a un mapa semidetallado a escala 1:10.000 (Figura 4). Aquellas parcelas que presentaban más de un tipo de suelo se identificaron por el tipo dominante bajo cuatro grandes grupos: vertisoles, brunosoles, planosoles y halomórficos.

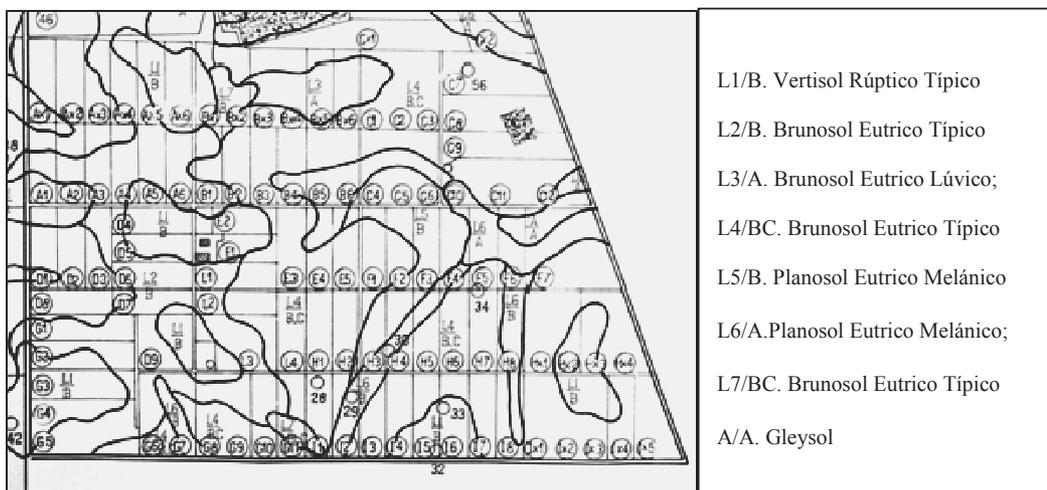


Figura 4. Mapa de suelos y parcelas de la Unidad de Lechería de La Estanzuela (1:10.000).

La dinámica del CO en el tiempo, entre suelos, no difirió de los patrones generales ya descritos y que acompañan el desempeño de los sistemas productivos implementados en los diferentes períodos (Figura 5). Las principales conclusiones se

desprenden de diferencias en la intensidad de los cambios analizadas a través de la significación estadística de la interacción entre regresiones. Aquellos suelos de menor productividad natural (halomórficos) con restricciones de salinidad, tienen una

baja dinámica de pérdidas y ganancias, mientras que los suelos de mayor productividad (planosoles) son los que en la fase de recuperación mostraron las mayores tasas de acumulación. Si bien no se verificó una interacción significativa entre los 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). También se observa que la magnitud relativa de los cambios fue mayor cuanto mejor era la condición original y productividad de estos agrupamientos de suelos. Eso puede deberse a la mayor proporción de fracciones activas de CO que probablemente tienen los suelos de mayor productividad.

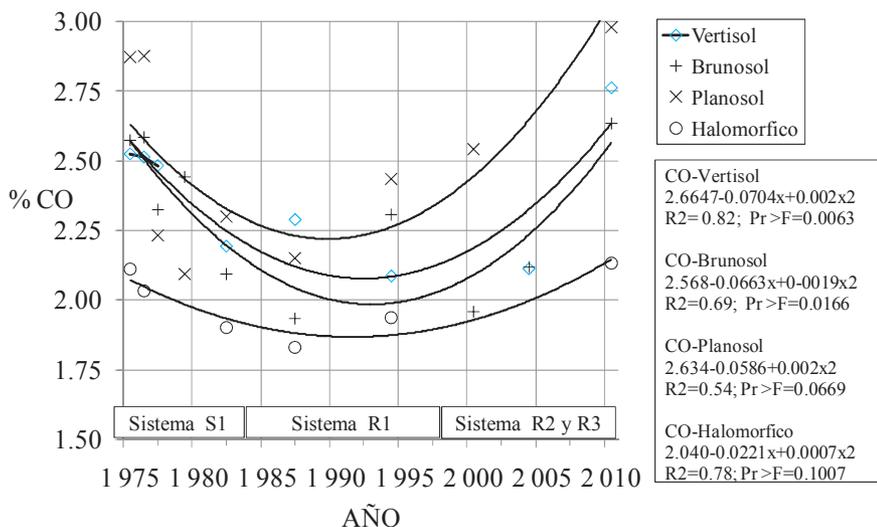


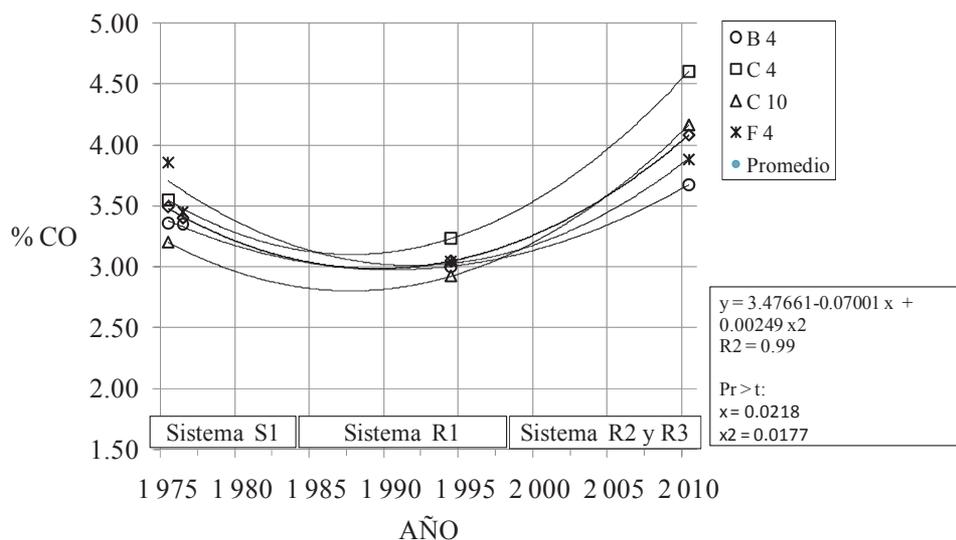
Figura 5. Evolución del CO según Grandes Tipos de Suelos.

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

Tal cual ocurre en los tambos comerciales, existe un grupo de parcelas que se destinan al confinamiento del ganado, ya sea para evitar los pastoreos de pasturas cultivadas en períodos de lluvia, como para suministrar concentrados, henos y silos en forma confinada, y que se denominan genéricamente “campo natural mejorado”. Son parcelas que tienen producción forrajera y que a lo largo del tiempo han sido mejoradas con fertilización fosfatada e introducción de leguminosas en cobertura, básicamente trébol blanco y *Lotus corniculatus*. En el caso de la Unidad de Lechería esta área comprende aproximadamente 27% de la superficie total.

Las parcelas de estos semi-confinamientos muestran la misma dinámica general del CO que las parcelas del resto del sistema manejadas bajo rotación de pasturas y cultivos (Figura 6). Se aprecia un período de fuertes pérdidas hasta comienzos de la década del 90 y luego recuperaciones muy importantes. En primer lugar cabe preguntarse por qué se registró un ciclo de fuertes pérdidas de CO, cuando en el campo natural mejorado no se efectuaban laboreos ni períodos de barbechos improductivos, que fueron los factores con mayor asociación a los cambios de CO en el Sistema General y el Sistema Intensivo.

La explicación a este comportamiento se puede encontrar en cuatro características de manejo de estas parcelas durante el período del sistema S1: 1) Hasta inicios de los años



**Figura 6.** Evolución del CO en las parcelas de campo natural mejorado con semi-confinamiento para uso de reservas prediales y extra prediales.

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. y 4) Por último, no es menos relevante que 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.

Tal cual se aprecia en las regresiones de las diferentes parcelas de campo natural mejorado, éstas difirieron algo en las velocidades y niveles de recuperación. Estas diferencias parecen atribuibles principalmente a diferencias en las cantidades de concentrados y forrajes que se suministran, ya que algunos potreros por proximidad a las instalaciones de ordeño o a los lugares de almacenamiento de reservas tienen mayor intensidad de uso, lo que se reflejó en mayores tasas de recuperación de CO.

Lo más relevante de esta información cuantitativa es la intensidad de la recuperación o secuestro de carbono por el suelo. El cuadro 7 presenta los valores de CO, N y la relación CO/N para los años 1994 y 2009 de las parcelas en campo natural mejorado. El año 1994 es muy cercano a los valores mínimos determinados para todas las parcelas. Algunas parcelas con mucho suministro de forrajes y concentrados, tales como la C10 y C4, incrementaron aproximadamente 1.35 % la concentración de CO en el suelo en 15 años. Las parcelas de semi-confinamiento presentan un incremento promedio de 1.10% de CO. Si se considera que un suelo lechero de la zona tiene una densidad aparente promedio de 1.43 gr cm<sup>-3</sup>, el secuestro promedio de CO por las parcelas determinaría un ingreso

anual hasta 20 cm de profundidad de 1.75 t CO ha<sup>-1</sup>.

La relación C/N de la materia orgánica del suelo mostró cierto enriquecimiento de N, ya que pasó de 10.25 a 9.51 siendo algo superior a otros antecedentes locales en rotaciones con pasturas (García *et al.*, 2009). Por lo tanto, esa acumulación de CO no es ajena al incremento del N en el suelo, ya que para secuestrar carbono es imprescin-

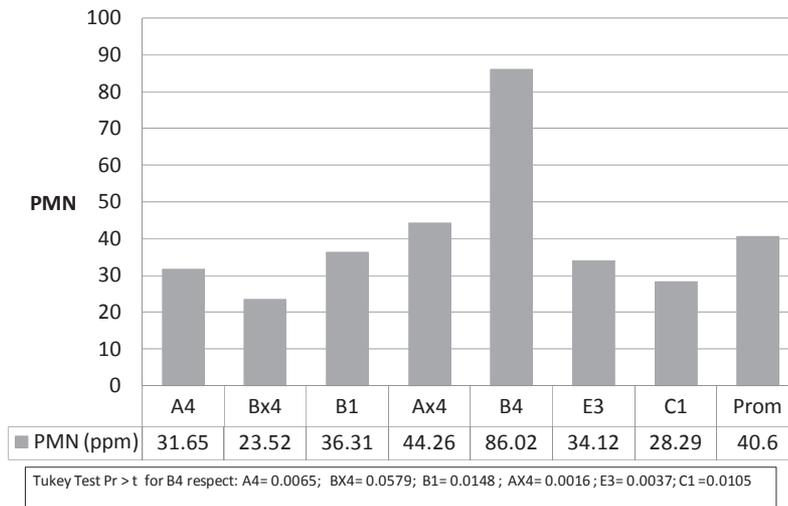
dible el ingreso de N. La acumulación de N en esos 15 años pasa de 0.301 % en 1994 a 0.429 % en 2009. Ese cambio permite estimar que anualmente se acumularon 244 kg ha<sup>-1</sup> de N hasta 20 cm de profundidad, con una densidad aparente del suelo estimada en 1.43 gr cm<sup>-3</sup>. Esta tasa de acumulación de N es más alta que la registrada en ciclos con pasturas y sería atribuible a la intensidad de las deyecciones en los semi-confinamientos.

**Cuadro 7.** Registros de CO, NT, CO/N en las parcelas de Campo Natural Mejorado con semi-confinamiento en los años 1994 y 2009.

Parcela	CO (%)		N (%)		CO/N	
	1994	2009	1994	2009	1994	2009
B4	3.00	3.67	0.260	0.410	11.54	8.95
C4	3.23	4.60	0.320	0.48	10.10	9.58
C10	2.93	4.16	0.297	0.43	9.86	9.67
F4	3.18	3.89	0.327	0.396	9.74	9.82
<b>Promedio</b>	<b>3.09</b>	<b>4.08</b>	<b>0.301</b>	<b>0.429</b>	<b>10.25</b>	<b>9.51</b>

El enriquecimiento de N que ocurre en los potreros de semi-confinamiento se expresa también en significativos incrementos del potencial de mineralización de N (PMN). Cuando se compara el PMN del semi-confinamiento del sistema intensivo (B4, Figura 7), se observa que es más del doble que las otras parcelas del sistema. Ese nivel de

PMN, permite alcanzar niveles de absorción de N dentro del rango de suficiencia para altos rendimientos de cereales según estudios locales de calibración del índice PMN (García A. *et al.*, 2009). Por lo tanto este tipo de parcelas otorgarían una gran economía de dicho insumo, si se incorporaran a la rotación del predio.



**Figura 7.** Valores de PMN (ppm) en las parcelas que integran el Sistema Intensivo

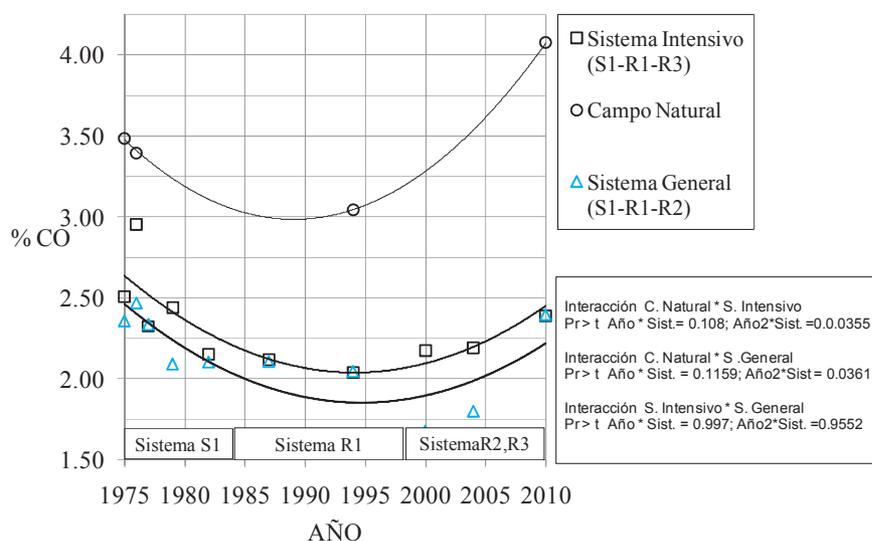
El cuadro 7 muestra para las parcelas del sistema intensivo en el año 2009, los valores de CO, N total en el suelo, y la relación carbononitrógeno. La parcela B4 es la correspondiente a campo natural mejorado de este sistema y en el contexto de todas las parcelas de semi-confinamiento de la Unidad de lechería tuvo moderado incremento del CO. Aunque su recuperación de CO no haya sido tan alta, tanto las concentraciones de CO, NT y el PMN son más altas en relación a la media de las parcelas en rotación. Registros altos de estas variables también fueron verificados en relevamientos realizados en parcelas de similar manejo en predios lecheros de Uruguay, donde se comprobó una notoria estratificación del CO con altos valores superficiales (Ciganda y La Manna, 2009; 2010).

Las acumulaciones de CO y N en las parcelas en semi-confinamiento, provenientes de volúmenes altos de estiércol, están en parte constituidas por una proporción importante de fracciones muy lábiles. Desde el punto de vista del riesgo de contaminación ambiental estas parcelas se perciben riesgosas por la potencial contaminación local de aguas subterráneas con coliformes totales y nitratos (Perdomo *et al.*, 2001), ya que están en alta proporción en las fracciones orgánicas frescas. Asimismo, el escurrimiento superficial es potencialmente fuente de contaminación de aguas superficiales.

Cuando se compara la evolución promedio de las parcelas del Sistema Intensivo, Sistema General y el Campo Natural Mejorado (Figura 8) 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 presentan una dinámica bien diferente a la de ambos sistemas. Parten 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 erosionados, pero muestran un dinamismo con pérdidas similares a las parcelas en rotación de los sistemas, y ganancias mucho mayores en los últimos años. Este comportamiento es atribuible principalmente a la intensidad de los efectos del confinamiento, con una fase inicial de pérdida por sobre pastoreo y sin ingreso extra predial de reservas, y una segunda fase de altísima recuperación por mejoramientos forrajeros e ingreso significativo de alimentos extra prediales.

16



**Figura 8.** Evolución del CO en los suelos para las parcelas bajo campo natural mejorado y en los sistemas general e intensivo.

## 5. CONCLUSIONES

La evolución del manejo del suelo como consecuencia de los cambios técnicos de los sistemas productivos de la Unidad de Lechería puede considerarse representativa de los cambios ocurridos y en proceso en la cuenca lechera nacional. Quizás en la Unidad de Lechería sucedieron con cierta anticipación, pero reflejan la situación actual de los sistemas comerciales cuya productividad por vaca masa transitan desde 4500 L ha<sup>-1</sup> a niveles superiores a 6500 L ha<sup>-1</sup>. Los trabajos de relevamiento del estado actual de los suelos dedicados a lechería cuantificaron un deterioro del contenido original de CO del orden del 22%. Complementariamente, el presente trabajo diagnostica una situación promisoriosa de posible restauración de la fertilidad productiva y de notable capacidad de secuestro de carbono (aproximadamente 2 % de acumulación anual) con la misma tecnología que viene siendo adoptada en la actualidad por los productores lecheros más intensivos.

Las diferencias de dinámica del CO reportadas para los diferentes tipos de suelos ponen en evidencia las naturales desigualdades en capacidad de recuperar CO según sea la productividad potencial del suelo. Aquellos suelos con restricciones de capacidad de almacenaje de agua o restricciones químicas, tales como los suelos halomórficos de la Unidad de Lechería, recuperan mucho más lentamente el CO con el mismo sistema productivo que aquellos más profundos y sin factores de estrés químico.

La fijación biológica de nitrógeno por las pasturas de leguminosas en la rotación parece haber sido el factor clave para sostener un balance positivo del CO, cuando los demás factores de manejo (laboreo, tiempo en barbecho, etc.) se modificaron para reducir las pérdidas por mineralización y erosión.

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. Si esto no fuera posible por restricciones operativas del establecimiento se abren dos estrategias a considerar y valorar; 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.

## 6. BIBLIOGRAFIA

**Baethgen, W., Morón, A.,** Díaz-Rossello, R. 1994. Modelling Long-term Soil Organic Carbon Changes in Six Cropping Systems os SW Uruguay. En: Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, Volume 9, pp 300-301.

**Bronick C., Lal R.,** 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA, Soil and Tillage Research, Vol. 81, Issue 2, pp 239-25.

**Carámbula, M.** 2007. Verdeos de verano asociados. En "Verdeos de Verano" Editorial Hemisferio Sur SRL. Montevideo, Uruguay. <http://www.hemisferiosur.com> pp

**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, v. 29 1, pp. 376-377

**Ciganda, V., La Manna, A.** 2010. Acumulación y Distribución de Nutrientes en Suelos de Potreros Sacrificio en Predios Lecheros de Uruguay: Avances de Resultados. En: Jornada de Lechería, La Estanzuela, Colonia.

**Coleman, K. Jenkinson D.,** 1999. The Rothamsted Carbon Model, RothC-26.3, En: <http://www.iacr.bbrsc.ac.uk/aen/carbon/rothc.htm>

**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. En: Journal of Soil and Water Conservation vol. 63 no. 3 pp 136-142

**Díaz, R.** 1976. Fertilidad de los Suelos. En: Sistemas de Producción Lechera. La Estanzuela, Colonia, Uruguay. pp. 1-10.

**Díaz, R., Sawchik, J., Quincke, A., Morón, A., Ibañez, V., Balzarini, M.** 2009. Efecto de la Degradación del Carbono Orgánico del Suelo en la Productividad Potencial de Cultivos. En: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas. pp 69-75

**Díaz-Rossello, R.** 1992a. Evolución del Nitrógeno Total en Rotaciones con Pasturas. Revista INIA de Investigaciones Agronómicas N°1 Tomo 1. p 27-35.

**Díaz-Rossello, R.** 1992b. Evolución de la Materia Orgánica en Rotaciones de Cultivos con Pasturas. Revista INIA de Investigaciones Agronómicas N°1 Tomo 1. pp 111-126.

**Díaz-Rossello, R.** 1994. Long-term Changes of Soil Carbon and Nitrogen under Rotation of Legume Pastures and Arable Crops. In: Transactions of the 15th World Congress of Soil Science, Volume 9, pp 304-305

**Drinkwater L. E., Wagoner P., Sarrantonio M.** 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. En: Nature 396, pp 262-265.

**Durán, H., Cea, A., Acosta, Y., Mieres, J.** 1985. Efecto de la presión de pastoreo y el suministro de concentrado en la lactancia temprana sobre vacas Holando de parición de otoño. In DIALOGO X, Manejo de pasturas cultivadas y suplementación para producción de leche. IICA, Montevideo, pp 249.

**Durán, H.** 1988. Siembras asociadas de Trebol Rojo y Achicoria con Sorgos forrajeros. CIAAB. Est. Exp. La Estanzuela, Hoja de divulgación No. 71.

**Durán, H.** 1992. Productividad y alternativas de rotaciones forrajeras para producción de leche. Revista INIA de Investigaciones Agropecuarias No. 1, tomo II, pp 189-204.

**Durán, H.** 1996a. "Sistema 1: Alta producción de leche por ha. I. Resultados productivos de los ejercicios 1992-93-94. Serie Actividades de Difusión No. 100, INIA La Estanzuela.

**Durán, H.** 1996b. "Sistema 2: Alta producción de leche por vaca y por ha. Serie Actividades de Difusión No. 100, INIA La Estanzuela.

**Durán, H.** 2000. Cambios tecnológicos e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay. XVI Reunión Latinoamericana de Producción Animal. 28 al 31 de marzo del 2000. Montevideo, Uruguay.

**Durán, H.** 2003 Validación de un Sistema lechero de alta producción por vaca y por ha con Siembra Directa. In "Siembra Directa para producción de leche," Serie Actividades de Difusión Nro. 314, INIA La Estanzuela, 36p.

**Durán, H.** 2004 Cambios tecnológicos e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay In " Serie Actividades de Difusión Nro. 361, INIA La Estanzuela.

**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, LATU. Agosto 2009.

**García, A., Díaz, R., Morón, A., Sawchik, J., Quincke, A.** 2009. El Balance de N y la Sostenibilidad de los Agro-Ecosistemas. En: Efectos de la Agricultura la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas. INIA Uruguay, Actividades de Difusión N° 587. pp 7-16.

**García, A., Morón, A., Quincke, A.** 2009. El Indicador del Potencial de Mineralización de Nitrógeno (PMN): Posible uso para recomendación de fertilización en trigo por el método del balance. En Resúmenes de: Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de Cultivos. Simposio de Fertilidad 2009. Rosario Argentina., pp 218-220.

**La Manna, A., Fernández, E., Durán, H., Torres, I.** 2005. Sostenibilidad ambiental en los sistemas agrícola-ganaderos y lecheros del Uruguay. In Reunión del Congreso Argentina de Producción Animal, Bahía Blanca, Argentina, 18-20 de octubre del 2005.

**McKenzie, D.** 2010. Soil Carbon Secuestation under Pasture in Australian Dairy Regions; En: Report to Dairy Australia. <http://www.dairyingfortomorrow.com/uploads/documents/file/Reports/Final.pdf>

**McLauchlan, K.**, 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review, En: *Ecosystems* 9: 1364-1382.

**MGAP/DSF.** 1979. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, Tomo III. Apéndice: Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.

**Morón, A., Molfino, J., Ibañez, W., Sawchik, J., Califra, A., Lazbal, E., La Manna, A., Malcuori, E.** 2008. The physical soil quality in the main areas of pastures in dairy

production in Uruguay. En: CD XVIII International Grassland Congress, China.

**Morón, A., Molfino, J., Ibañez, W., Sawchik, J., Califra, A., Lazbal, E., La Manna, A., Malcuori, E.** 2009. Calidad del suelo en las Principales Areas de Producción Lechera de Uruguay. En: Efectos de la Agricultura la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas. INIA Uruguay, Actividades de Difusión N° 587 pp. 31-34.

**Novak S., Fiorelli, J.** 2010. Review article: Greenhouse gases and ammonia emissions from organic mixed crop-dairy systems: a critical review of mitigation options. En: *Agron. Sustain. Dev.* 30, 215–236.

**Nozar, G.** 2006. Evaluación del impacto económico, social y ambiental de la investigación del INIA en arroz y lechería. Período 1990 – 2005. IICA/Procisur. Montevideo, Uruguay, Julio 2006.

**Orwin, K., J. Bertram, T. Clough, L. Condron, R. Sherlock, and M. O'Callaghan.** 2009. Short-term consequences of spatial heterogeneity in soil nitrogen concentrations caused by urine patches of different sizes. En: *Applied Soil Ecology*. Vol. 42, N° 3, pp 271-278.

**Parton, W.J.; Schimel, D.S.; Cole, C.V.; Ojima, D.S.** 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1173-1179..

**Perdomo, C.H., Casanova, O.N., Ciganda, V.S.** 2001. Contaminación con Nitratos y Coliformes de Aguas Subterráneas en el Suroeste del Uruguay. En: *Agrociencia* Vol. V N°1 pp. 10-22.

**Scarlato, G., Buxedas, M., Franco, J., Pernas, A., Ernst, O., Bentancur, G., Siri, G. Lazbal, E.** 2001. Adopción y demandas de investigación y difusión en siembra directa: encuestas a la agricultura y lechería del suroeste de Uruguay. INIA, Serie FPTA No. 06.

**Siri-Prieto, G., Ernst, O., Bentancur, O., Carballo, C., Lazbal, E.** 2006. Nivel de adopción y situación de la siembra directa en establecimientos de producción lechera. 2a. Encuesta quinquenal. INIA, Serie FPTA No. 16.

**Shipper, L.A., Baisden, W.T., Parfitt, R.L., Ross, C., Claydon, J.J., 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, 1138-1144.

**Stanford, G., Smith, S.J.** 1972. Nitrogen Mineralization Potential of Soils. *Soil Science Society of American Proceedings*, 36(3):465-472.

**Tinsley, J.** 1967. *Soil Science Manual of Experiments*. Aberdeen, University of Aberdeen, Department of Soil Science, 124p.

**Viglizzo, E.** 2010. Huella de carbono, ambiente y agricultura en el Cono Sur de Sudamérica. En: *La Huella de Carbono*, Ed. ProCisur, Uruguay, pp 2-44.

Impreso en Junio de 2011  
PRONTOGRAFICA S.A.  
Cerro Largo 850 - Tel.: 2902 3172  
E-mail: [pgrafica@adinet.com.uy](mailto:pgrafica@adinet.com.uy)  
Depósito Legal 356.022/2011

