

Simulación de la Dinámica del Carbono en Suelos bajo Siembra Directa y Labranza Tradicional

Durán, Regina¹; Scoponi, Liliana¹; Sánchez, Marisa¹; Galantini, Juan^{2,3};
Chimeno, Patricia²; Cordisco, Marina¹; Pesce, Gabriela^{1,5}; Oliveras,
Guadalupe^{4,6}; Merino, Lucía²; De Batista, Marianela^{1,7}

¹*Dpto. de Cs. de la Administración, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina*

²*Dpto. de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina*

³*Investigador Científico Comisión de Investigaciones Científicas*

⁴*Universidad Provincial del Sudoeste Bonaerense, Bahía Blanca, Argentina*

⁵*Becaria CONICET, ⁶Becaria CIC, ⁷Becaria UNS*

Resumen

La expansión acelerada de la Siembra Directa, que en pocos años ha llegado a superar el 70% de la superficie agrícola-ganadera de la Argentina, hace que no se conozcan detalladamente los efectos sobre el suelo y el ambiente. Los modelos de simulación cumplen un rol muy importante en el análisis de la dinámica de los flujos de carbono en diferentes fracciones del suelo. En este trabajo se presenta una herramienta basada en simulación continua que provee un laboratorio de experimentación para entender la dinámica del carbono en suelos de la región pampeana.

Abstract

The accelerated expansion of no-till farming that in a few years has exceeded 70% of the agricultural surface of Argentina, makes it difficult to know in detail the effects over soil and the environment. Simulation models have an important role in the analysis of the dynamics of carbon fluxes in different fractions of the soil. This work presents a tool based on continuous simulation that provides an experimental laboratory to understand the dynamics of carbon in Pampean soils.

Palabras Clave

Captura de Carbono, Labranzas, Simulación, Sistemas dinámicos.
Carbon sequestration, Tillage, Simulation, Dynamic systems.

1. Introducción

El carbono orgánico contribuye positivamente a la fertilidad del suelo, la producción de granos, y a la sustentabilidad global. Las diferentes prácticas de labranza pueden incrementar o disminuir la tasa de acumulación del carbono orgánico. El cambio de un sistema con labranzas (LC) a uno en siembra directa (SD) produce una serie de modificaciones en el suelo que pueden ser caracterizados por distintas etapas, llegando a estabilizarse luego de 20 años (Moraes Sa, 2003).

De acuerdo con el *Conservation Technology Information Center* de EE.UU., la SD es “el sistema de preparación del suelo y de vegetación para la siembra en el que el ‘disturbio’ realizado en el suelo para la colocación de las semillas es mínimo, ubicando éstas en una angosta cama de siembra o surco, que depende del uso de herbicidas para el control de las malezas. El suelo se deja intacto desde la cosecha hasta una nueva siembra, excepto para incorporar fertilizantes.”

La SD en sí misma, considerada como “no labranza”, no alcanza para hablar de agricultura productiva y sustentable. Para adquirir esa condición requiere un marco de rotación de cultivos (incluyendo cultivos de cobertura, si fuera necesario), manejo integrado de malezas, insectos y enfermedades, nutrición balanceada con reposición de nutrientes y un uso racional y profesional de insumos externos (incluyendo el manejo apropiado de agroquímicos y el tratamiento de los envases). Es decir, que constituye más que una mera técnica de labranza, en virtud de que funciona como sistema.

Si bien existe información sobre el efecto de la materia orgánica (MO) sobre algunas propiedades químicas, físicas y biológicas, la expansión acelerada de la SD, que en pocos años ha llegado a superar el 70% de la superficie agrícola-ganadera de la Rep. Argentina, hace que no se conozcan detalladamente los efectos sobre el suelo y el ambiente. Los modelos de simulación cumplen un rol muy importante en el análisis y entendimiento de la dinámica de los flujos de carbono en diferentes compartimientos de suelo. Existe una gran variedad de modelos desarrollados para diferentes escalas espaciales y pasos de tiempo (Molina, 1998). La mayoría de los modelos están basados en procesos, dividen la MO en compartimientos homogéneos y cada uno tiene su propia tasa de descomposición. Uno de los modelos más difundidos en esta categoría es el Century (Parton, 1996). Century modela la dinámica del carbono, nitrógeno, fósforo, y azufre en ciclos anuales y a escala de centurias o milenios. A partir de las plantas, el carbono (C) se transfiere a compartimientos de diferente estabilidad o fluye como CO₂ a la atmósfera. La descomposición entre las fracciones se describe de acuerdo a una dinámica de primer orden, y las constantes para la tasa de descomposición varían para diferentes sistemas tales como áreas cultivadas, pastos o foresta.

A partir de la propuesta de Parton, hemos desarrollado un modelo para la dinámica del C. El objetivo principal del modelo es desarrollar una herramienta de investigación y pedagógica, que tenga la flexibilidad de expandir el modelo para incorporar nuevos procesos o datos empíricos. En particular, se consideran características para modelar tierras cultivadas bajo siembra directa y labranza convencional.

2. Metodología

2.1. El Modelo

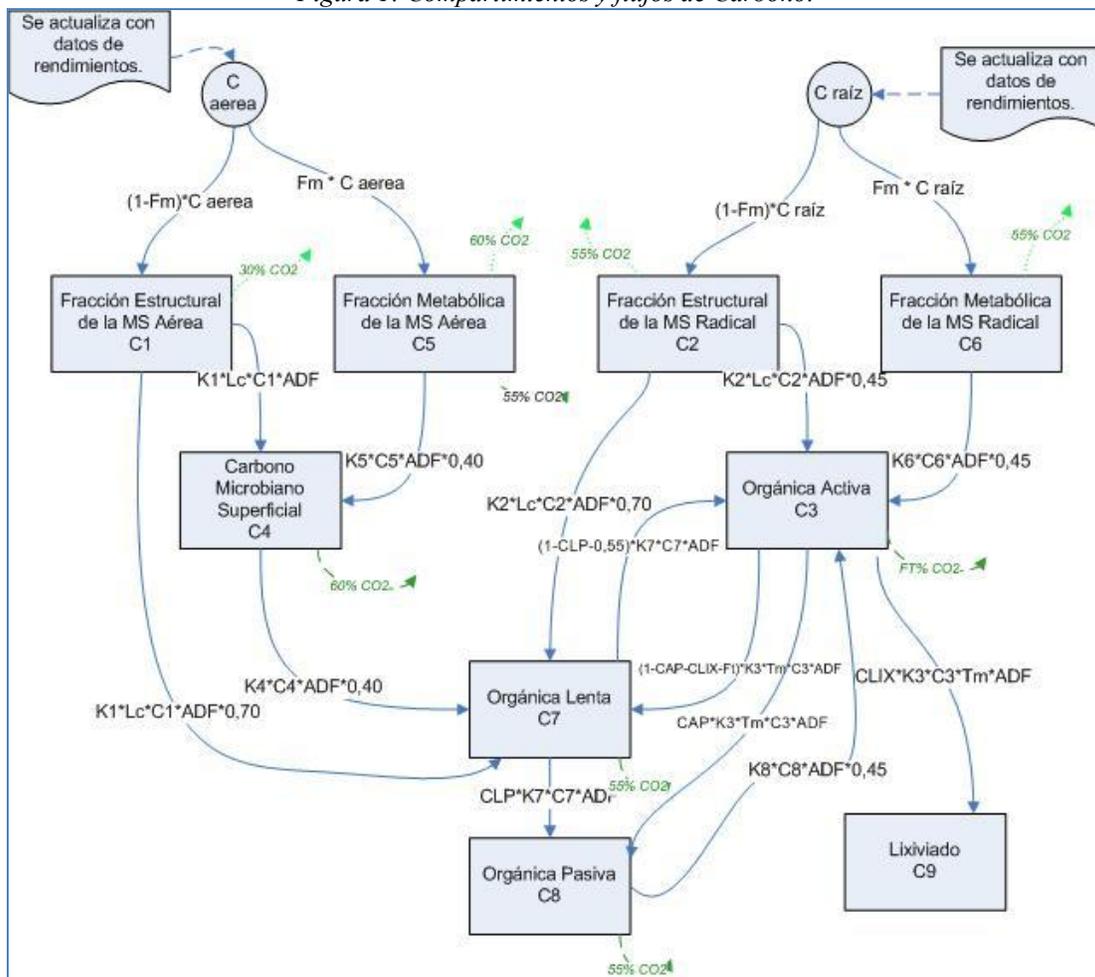
La materia orgánica del suelo consiste de una gran variedad de compuestos orgánicos. A efectos de modelado, generalmente, se clasifican en compartimientos en base a la tasa de mineralización y reciclado (Parton, 1996). Las componentes lábiles o fácilmente mineralizables, y las microbianas comprometen alrededor del 5-15% de la MO total. Este compartimiento tiene un tiempo de reciclado de meses a años. El compartimiento lento tiene un tiempo de reciclado de varias décadas y abarca del 20-40% de la MO total. Los compartimientos estables o recalcitrantes tienen un tiempo de reciclado de cientos o miles de años y comprometen el 60-70% de la MO (Polyakov, 2004).

El modelo consiste de los siguientes compartimientos o fracciones (Figura 1):

- *Fracción estructural de la materia seca aérea*, con un tiempo de reciclaje de 1 a 5 años.
- *Fracción metabólica de la materia seca aérea*, con un tiempo de reciclaje de 0,1 a 1 años.

- *Fracción estructural y metabólica de la MS seca radical*, que comprenden los residuos del sistema radicular.
- *Activo*, constituido por la biomasa microbiana del suelo, es de fácil descomposición y presenta un tiempo corto de reciclado (1 a 5 años de acuerdo al contenido de arena).
- *Lento*, derivado de material vegetal resistente (lignina) con un tiempo de reciclado de 20 a 40 años.
- *Pasivo*, con material muy resistente a la descomposición (200 a 500 años).
- *Carbono microbiano superficial*, con una tasa de reciclaje independiente de la textura de suelo.
- *Lixiviado*.

Figura 1: Compartimientos y flujos de Carbono.



Fuente: elaboración propia adaptado de (Leite, 2003).

El modelo puede describirse con el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dC_1}{dt} = (1 - F_m) \cdot M - K_1 \cdot A \cdot C_1 \cdot L_c$$

$$\frac{dC_2}{dt} = (1 - F_m) \cdot M - K_2 \cdot A \cdot C_2 \cdot L_c$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_5}{dt} &= F_M \cdot M - K_5 \cdot A \cdot C_5 \\ \frac{dC_6}{dt} &= F_M \cdot M - K_6 \cdot A \cdot C_6 \\ \frac{dC_4}{dt} &= K_1 \cdot A \cdot C_1 \cdot L_C \cdot (1 - D_{14}) + K_5 \cdot A \cdot C_5 \cdot (1 - D_{54}) - K_4 \cdot A \cdot C_4 \\ \frac{dC_3}{dt} &= K_2 \cdot A \cdot C_2 \cdot L_C \cdot (1 - D_{23}) + K_6 \cdot A \cdot C_6 \cdot (1 - D_{63}) + K_8 \cdot A \cdot C_8 \\ &\quad \cdot (1 - D_{83}) + K_7 \cdot A \cdot CLA - K_3 \cdot A \cdot C_3 \cdot T_M \\ \frac{dC_7}{dt} &= K_1 \cdot A \cdot C_1 \cdot L_C \cdot (1 - D_{17}) + K_4 \cdot A \cdot C_4 \cdot (1 - D_{47}) + K_2 \cdot A \cdot C_2 \cdot L_C \\ &\quad \cdot (1 - D_{27}) - K_3 \cdot A \cdot C_3 \cdot CAL - K_7 \cdot A \cdot C_7 \\ \frac{dC_8}{dt} &= K_7 \cdot A \cdot C_7 \cdot (1 - D_{78}) + K_3 \cdot A \cdot C_3 \cdot CAP - K_8 \cdot A \cdot C_8 \\ \frac{dC_9}{dt} &= K_3 \cdot A \cdot C_3 \cdot CLIX \end{aligned}$$

donde C_i , K_i , $1 \leq i \leq 9$ representan el contenido de carbono, y la tasa de descomposición asociados al compartimiento i -ésimo (ver Tabla 1); F_M es la fracción de residuo metabólico; M el material seco; D_{14} , D_{54} , D_{23} , D_{63} , D_{83} , D_{17} , D_{47} , D_{27} , D_{78} , representan el porcentaje de dióxido de carbono que se emiten a la atmósfera; L_C , CAL , CAP , $CLIX$, y CLA son coeficientes que consideran diferentes aspectos vinculados con el perfil del suelo y se definen como sigue:

$$\begin{aligned} L_C &= e^{-3 \cdot L_S} \\ CAP &= 0,003 + 0,023 \cdot T_C \\ CLIX &= \left(\frac{H_2O_{30}}{18} \right) \cdot (0,01 + 0,04 \cdot T_S) \\ CAL &= 1 - CAP - CLIX - F_T \\ CLP &= 0,003 - 0,009 \cdot T_C \\ CLA &= 1 - CLP - D_{78} \\ T_M &= 1 - 0,75 \cdot T \\ F_T &= 0,17 - 0,68 \cdot T \end{aligned}$$

donde T representa el contenido de limo y arcilla; T_S el contenido de arena; T_C el contenido de arcilla; L_S es una fracción de carbono estructural.

Tabla 1: Tasa de descomposición anual (Leite, 2003)

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
3.9	4.8	7.3	6.0	14.8	18.5	0.2	0.0045

El factor de descomposición A se calcula considerando las siguientes expresiones (Parton, 1996):

$$A = A_w \cdot A_t$$

$$A_w = \begin{cases} 0, & \text{Si } (w - F_c) < 0 \\ \frac{(w - F_w)}{(F_c - F_w)}, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

donde F_w es el punto de marchitez promedio, F_c es la capacidad de campo, y w es el contenido de agua del suelo. El contenido de agua w se calcula en forma mensual de la siguiente forma:

$$w_i = \begin{cases} F_w, & \text{Si } w_{i-1} + p_i - nc_i < F_w \\ F_c, & \text{Si } w_{i-1} + p_i - nc_i \geq F_c \\ w_{i-1} + p_i - nc_i, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

donde p_i es la precipitación promedio mensual del mes i -ésimo (mm mes^{-1}), y nc_i es la necesidad hídrica de los cultivos en el mes i -ésimo. La necesidad hídrica de los cultivos (nc_i) es un valor mensual que depende del cultivo que se haya sembrado.

El cálculo del factor de temperatura del suelo A_t se basa en un trabajo de Raich (1995):

$$A_t = F \cdot e^{Q \cdot T} \cdot (P / (K + P))$$

donde F ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) define la tasa cuando la temperatura es cero y la humedad no limitante, Q ($^{\circ}\text{C}$) representa un coeficiente de temperatura, T ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura media mensual, P (cm) es la precipitación media mensual, y K (cm mes^{-1}) define el coeficiente de saturación de la función de precipitación.

Tabla 2: Parámetros para el cálculo del factor de temperatura del suelo (Raich, 1995)

	F	Q	K
Vegetación natural	0.579	0.0396	2.19
Área cultivada	0.695	0.0339	3.77

Los aportes destinados a los compartimientos estructurales y metabólicos se determinan considerando la fracción de residuo metabólico F_m :

$$F_m = 0.85 - 0.013 \cdot \frac{\text{Lignina}}{\text{Nitrógeno}}$$

Los valores para los aportes mensuales de lignina y nitrógeno dependen del cultivo realizado.

2.2. Parámetros para la simulación

Se implementó el modelo y se realizaron simulaciones para un período de 20 años (paso de integración mensual y algoritmos de Runge-Kutta de cuarto orden). La simulación se calibró para el horizonte superficial de suelo de la zona de Tornquist (Provincia de Buenos Aires) y permite analizar la dinámica del carbono para los casos de SD y LC. Se tomó como caso de estudio el establecimiento “Hogar Funke”, que ha mantenido parte de un lote con dos manejos diferentes: SD y LC, desde el año 1986. Detalles de sitio, manejo, y otras explicaciones metodológicas se encuentran en Kleine, Puricelli (2001) y Galantini *et al.* (2006b). Se consideró que en la SD, el aporte del carbono se produce en forma gradual, mientras que en la LC, el aporte concluye al pasar las máquinas para preparar el suelo para el próximo cultivo (en promedio luego de tres meses). Los experimentos para analizar cada alternativa se definieron considerando los rendimientos de los cultivos calculados según el modelo publicado en (Durán, 2009). Dicho modelo está basado en un análisis de regresión. El rendimiento de un cultivo es función del índice de lluvias, la necesidad hídrica de los

cultivos, el nivel de nitrógeno, y las heladas; y los coeficientes de la función de regresión dependen del tipo de labranza. En la simulación se ha considerado la secuencia de rotación de cultivos cebada-maíz-trigo-girasol, que es característica de la zona de Tornquist.

Stock inicial de C para las fracciones

Las divisiones entre fracciones están basadas en la relación lignina/nitrógeno. En la mayoría de los suelos, el compartimiento activo representa aproximadamente del 2 al 4% del carbono total del suelo. Los compartimientos estructurales tienen mayor contenido de residuo que los metabólicos, ya que estos últimos presentan tasas de descomposición mayores. Se han utilizado los porcentajes de C para las fracciones sugeridos en la documentación del Century Model (Century, 2009). El stock inicial total de C está basado en mediciones en la zona de Tornquist (Galantini, 2007).

Tabla 3: Stock inicial de C para un C total de 49.1 ton. ha⁻¹

	%	C en ton. ha ⁻¹
Superficie estructural	1.0	0.4910
Superficie metabólica	0.5	0.2455
Raíz estructural	1.0	0.4910
Raíz metabólica	0.5	0.2455
Superficie microbiana	10.0	4.9100
Activa	3.0	1.4730
Lenta	50.0	24.5500
Pasiva	30.0	14.7300
Lixiviado	4.0	1.9000
	100.0	49.1000

Aporte de materia seca

A partir de los valores de los rendimientos se aproxima el valor de aporte de materia seca (MS) al suelo. La materia seca está conformada por materia seca aérea, materia seca de raíz y el grano. Un tercio de la materia seca es grano, y la materia seca de raíz es aproximadamente el 25% de la materia seca aérea. El grano se extrae, por lo tanto, el aporte al suelo se calcula considerando las siguientes relaciones:

$$MS_{total} = MS_{aérea} + MS_{raíz}$$

$$MS_{aérea} = MS_{paja} + grano$$

$$\frac{1}{3} MS_{aérea} = grano \Rightarrow 2 \cdot grano = MS_{paja}$$

$$MS_{raíz} = 0.25 \cdot MS_{aérea}$$

$$Carbono = 0.42 \cdot MS_{total}$$

Por lo tanto, para un rinde en grano R_i , podemos calcular el aporte de carbono al suelo como:

$$MS_{paja_i} = 2 \cdot R_i$$

$$MS_{raíz_i} = 0.25 \cdot R_i \cdot 3$$

$$Carbono_i = 0.42 \cdot (MS_{paja_i} + MS_{raíz_i})$$

Los aportes destinados a los compartimientos estructurales y metabólicos se determinan considerando la fracción de residuo metabólico F_m . Los aportes mensuales de lignina y nitrógeno dependen del cultivo realizado (ver Tabla 4).

Tabla 4: Coeficientes de lignina y nitrógeno

	Lignina	Nitrógeno	Lignina/Nitrógeno
Soja	8	2.41	3.31950207
Vicia villosa	5.5	4.66	1.18025751
Maíz	5	1	5
Trigo	6.54	0.45	14.5333333
Girasol	12.5	0.5	25
Sorgo	9.9	3.2	3.09375
Cebada	7	0.5	14

Valores para calcular el contenido de agua del suelo

El contenido de agua del suelo (w) se calcula mensualmente considerando tres escenarios: uno de referencia (promedios de precipitaciones del período 1986-2006 para la zona de Tornquist), otro que caracteriza precipitaciones bajas; y otro escenario de precipitaciones abundantes. Para definir los escenarios se tuvieron en cuenta las precipitaciones promedio, mínimas y máximas de cada mes para el período 1986-2006. Para cada mes, el promedio de precipitaciones considerando el mínimo mensual resultó ser aproximadamente un 68% menor que los promedios. El promedio de precipitaciones considerando el máximo de cada mes, resultó ser un 50% superior que el promedio. Teniendo en cuenta estas características se definieron los escenarios. Cabe observar que para las precipitaciones altas, se define “alta extrema” (50% superior a la de referencia), y “alta” (30% superior).

Las necesidades hídricas se determinan de acuerdo a los cultivos realizados.

Lluvias durante el período de barbecho

Se consideró el efecto de las lluvias durante el período de barbecho. Galantini *et al.* (2006a) encontraron que las precipitaciones durante los meses de barbecho tienen impacto sobre la descomposición del carbono de los compartimientos Activo y Lento. El simulador facilita evaluar el efecto de las precipitaciones, incorporando las siguientes relaciones que se evalúan (opcionalmente) para los meses de barbecho:

$$\text{Si } \frac{p_i}{nc_i} > (1 + \alpha) \text{ entonces } K_{final} = K_j * (1 + \delta), \quad j \in \{3,7\}$$

$$\text{Si } \frac{p_i}{nc_i} < \alpha \text{ entonces } K_{final} = K_j * (1 - \delta), \quad j \in \{3,7\}$$

donde p_i es la precipitación promedio mensual del mes i -ésimo (mm mes^{-1}); nc_i es la necesidad hídrica de los cultivos en el mes i -ésimo; y K_j representa la tasa de descomposición de los compartimientos Activo o Lento.

2.3. Interfase del simulador

Se puso especial énfasis en la construcción de la interfase para facilitar el uso del simulador como un laboratorio. El usuario puede cambiar diversos parámetros, tales como valores iniciales de carbono para los compartimientos del suelo, valores para las tasas de descomposición, y contenidos de arena y arcilla del suelo. Los datos correspondientes a precipitaciones y temperaturas mensuales se leen desde un archivo en formato Excel, de modo que el usuario pueda experimentar con datos que ya tiene disponibles en ese formato. Las Figuras 2 a 4 muestran diferentes pantallas de la interfase del simulador.

Figura 2: Menú principal del simulador.

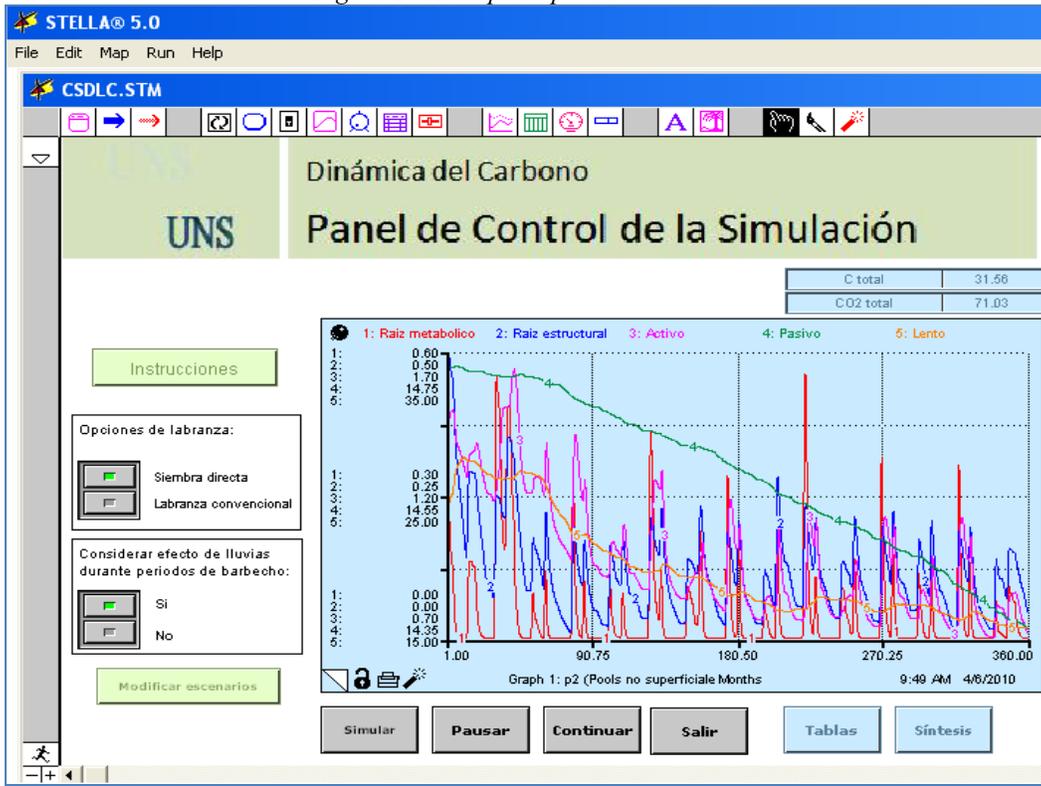


Figura 3: Menú principal y ventana de ayuda del simulador.

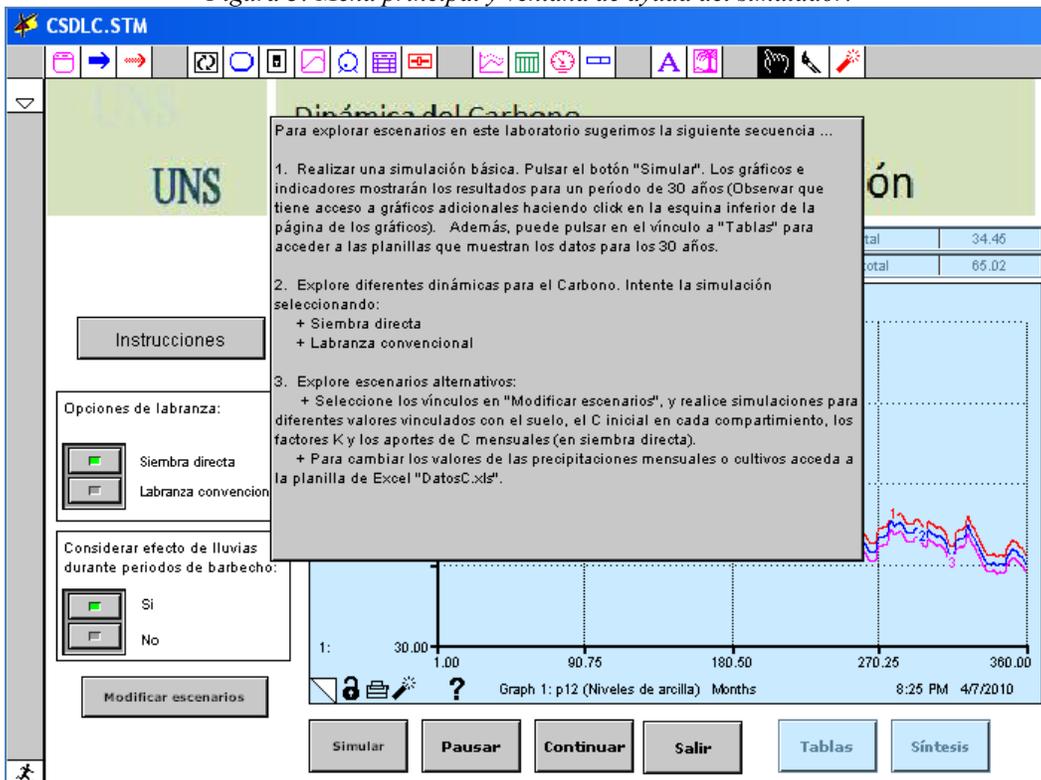
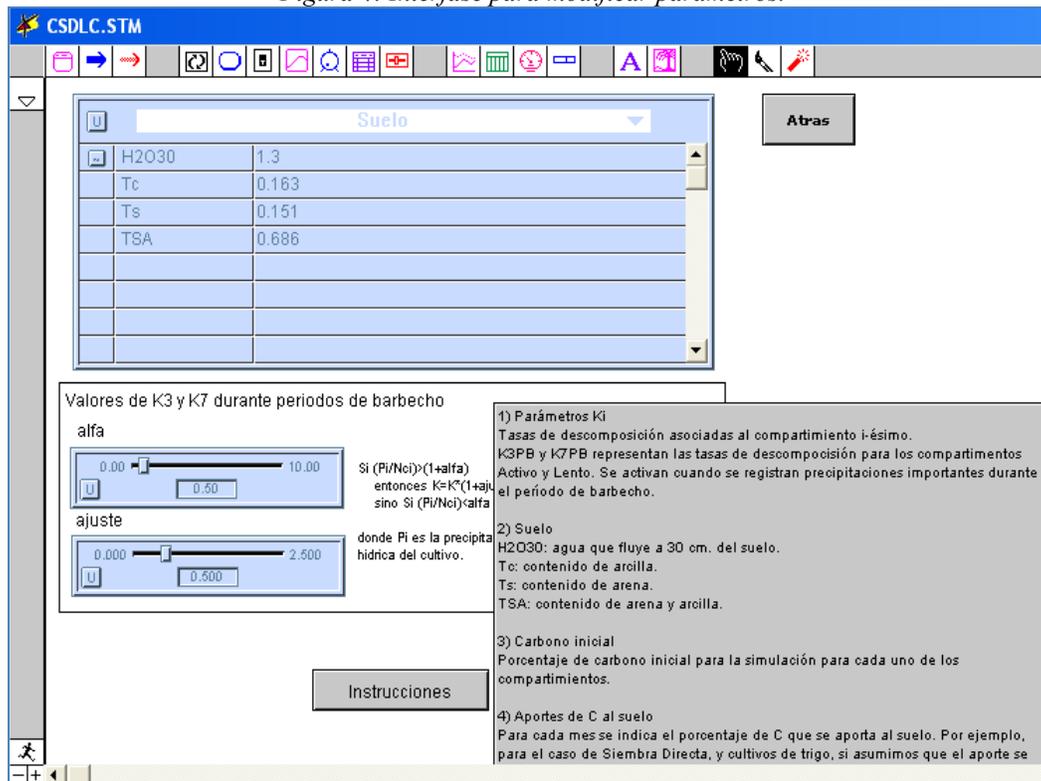


Figura 4: Interfase para modificar parámetros.



3. Resultados

Se utilizó la herramienta como laboratorio para experimentar con diferentes escenarios. En particular, se analizó el efecto de las precipitaciones en la dinámica del C. A continuación, se sintetizan los resultados para tres escenarios de precipitaciones; considerando el efecto de las lluvias durante los períodos de barbecho, y sin evaluar este impacto; y diferentes niveles de nitrógeno.

En primer lugar, para niveles altos de nitrógeno se observó un rendimiento superior para LC. Como se explicó en la Sección 2.2, el rendimiento se calcula utilizando los resultados de un estudio de regresión (Duran, 2009). En la función de regresión el coeficiente para el nivel de nitrógeno es 0.06 para SD y 0.30 para LC (una diferencia del 80%). Por lo tanto, los niveles altos de nitrógeno favorecen mejores rindes para la LC. El coeficiente vinculado con las precipitaciones es de 15.74 para SD y 16.70 para LC (la diferencia es sólo del 5%). Teniendo en cuenta el efecto conjunto de las precipitaciones y el nivel de nitrógeno, tenemos que para todos los escenarios de lluvias y un nivel alto de nitrógeno, la LC tendrá rendimientos superiores. A mejores rendimientos, mayor será el aporte de materia seca, y esto incrementa el nivel de carbono. De todos modos, se observa que para un escenario de precipitaciones bajas y un menor aporte de materia seca para la SD, no hay diferencias importantes en el carbono final de SD y LC.

La Tabla 5 sintetiza algunos experimentos. En estos casos, el rinde para SD siempre es superior que bajo LC. En la Tabla 6 se incluye un resumen anual para algunos escenarios.

Para todos los casos se observa que el aumento en precipitaciones favorece la descomposición y aumenta la pérdida de carbono como dióxido de carbono. Este compartimiento se acentúa si se considera una tasa de descomposición superior cuando hay lluvias abundantes durante el período de barbecho (ver resultados para diferentes valores de δ).

Tabla 5: Síntesis de resultados para 30 años, Nitrógeno U(27.6,100).

Precipitación	Rindes ton. ha ⁻¹ en 30 años	Siembra directa C ton. ha ⁻¹		Rindes t ha ⁻¹ en 30 años	Labranza convencional C ton. ha ⁻¹	
		S/ efecto de lluvia durante barbecho	C/ efecto de lluvia durante barbecho		S/ efecto de lluvia durante barbecho	C/ efecto de lluvia durante barbecho
Baja	42.45	51.19	46.24	40.91	50.05	45.18
Referencia	45.22	41.26	35.49	43.85	38.60	34.51
Alta	47.82	34.90	($\delta = 0.5$) 31.56 ($\delta = 0.2$) 33.43	46.61	33.89	($\delta = 0.5$) 30.56 ($\delta = 0.2$) 32.42
Alta extrema	49.56	33.29	30.25	48.45	32.25	29.21

Tabla 6: Resumen anual de C ton. ha⁻¹) para un escenario de lluvias bajas y sin considerar el efecto de lluvias durante el período de barbecho.

Año	SD (*)	LC (**)
1986	47.14	47.14
1987	46.45	46.65
1988	46.11	45.82
1989	48.87	48.49
1990	48.46	47.19
1991	48.87	49.42
1992	47.24	47.37
1993	48.96	49.76
1994	47.75	47.17
1995	48.05	48.06
1996	47.24	46.53
1997	49.51	48.89
1998	47.86	46.46
1999	48.93	48.51
2000	47.77	46.68
2001	49.88	48.55
2002	48.07	45.84
2003	49.13	48.52
2004	50.15	49.14
2005	52.11	51.53
2006	51.24	49.99
2007	52.12	51.50
2008	50.58	49.36
2009	52.90	51.69
2010	52.31	50.48
2011	52.40	52.70
2012	53.05	53.38
2013	53.73	53.79
2014	51.24	50.27
2015	51.47	50.68
2016	51.19	50.05

(*)Rinde total de 42.45 toneladas.

(**)Rinde total de 40.91 toneladas.

A modo de referencia, en la Tabla 7 se incluyen algunos escenarios de simulación cuya precipitación y temperaturas coinciden con las del período 1986-2006, y donde los valores de C se calcularon a partir de mediciones de MO en la zona de Tornquist. Cabe aclarar que la secuencia de rotación utilizada en la simulación no coincide con la realizada en los lotes

donde se efectuó el ensayo, aún cuando se trata de los mismos cultivos (trigo, cebada, maíz y girasol). Por lo tanto, la comparación es muy relativa. En algunos casos las diferencias pueden explicarse considerando fenómenos no incluidos en el modelo tales como daños de liebre (campaña 88/89), heladas, o fertilizaciones.

Tabla 5: Comparación de algunas simulaciones con valores de C basados en mediciones de MO en la zona de Tornquist.

	Labranza convencional			Siembra directa		
	C simulado (s/b)(*)	C simulado (c/b)(**)	C medido (20cm)	C simulado (s/b)(*)	C simulado (c/b)(**)	C medido (20cm)
1986	47.14	47.14	42.75	47.14	47.14	42.75
1987	45.73	45.45	36.00	45.52	45.19	45.90
1988	44.38	43.74	36.18	44.77	44.02	43.47
1989	47.00	46.37	36.36	47.44	46.69	39.60
1990	45.20	43.99	36.54	46.41	45.21	39.96
1991	47.06	45.89	39.51	46.52	45.22	47.52
1992	44.62	42.50	36.81	44.73	42.34	43.56
1993	46.42	44.43	34.20	45.72	43.57	42.66
1994	43.28	40.45	31.59	44.17	41.07	41.76
1995	43.57	40.93	33.03	44.11	40.90	42.84
1996	41.50	38.71	35.91	42.75	39.42	46.80
1997	43.56	40.86	37.98	44.69	41.42	43.56
1998	41.14	37.69	38.70	43.11	39.04	45.45
1999	43.11	39.69	30.69	44.41	40.03	46.80
2000	40.72	36.98	36.99	42.76	37.97	36.81
2001	41.93	38.38	N/A	44.17	39.55	N/A
2002	39.33	35.21	42.75	42.62	37.26	45.00
2003	40.96	37.13	42.84	42.70	37.33	49.14
2004	40.14	36.20	N/A	42.24	36.91	N/A
2005	41.96	38.23	N/A	44.03	38.46	N/A
2006	40.49	36.42	N/A	43.35	37.36	N/A

Referencias: (*) Sin considerar efecto de lluvias durante el período de barbecho. (**) Considera efecto de lluvias durante el periodo de barbecho.

Tabla 6: Stocks de C para precipitaciones de referencia y sin considerar efecto de lluvias durante barbecho.

Tiempo	SD				LC			
	C total	Activo	Lento	Pasivo	C total	Activo	Lento	Pasivo
inicio	47.14	1.47	24.55	14.73	47.14	1.47	24.55	14.73
fin	41.26	1.15	24.63	14.52	38.60	1.07	22.44	14.49

Se utilizó la herramienta para efectuar diferentes análisis de sensibilidad. Por ejemplo, la dinámica del carbono manifiesta sensibilidad al contenido de limo y arcilla del suelo (Figura 5 y Apéndice I); al contenido de arcilla (Figura 6).

Figura 5: Sensibilidad al contenido de limo y arcilla (TSA) (1: TSA=0.2; 2: TSA=0.45; 3: TSA=0.7). SD con precipitaciones de referencia y sin considerar efecto durante barbecho.

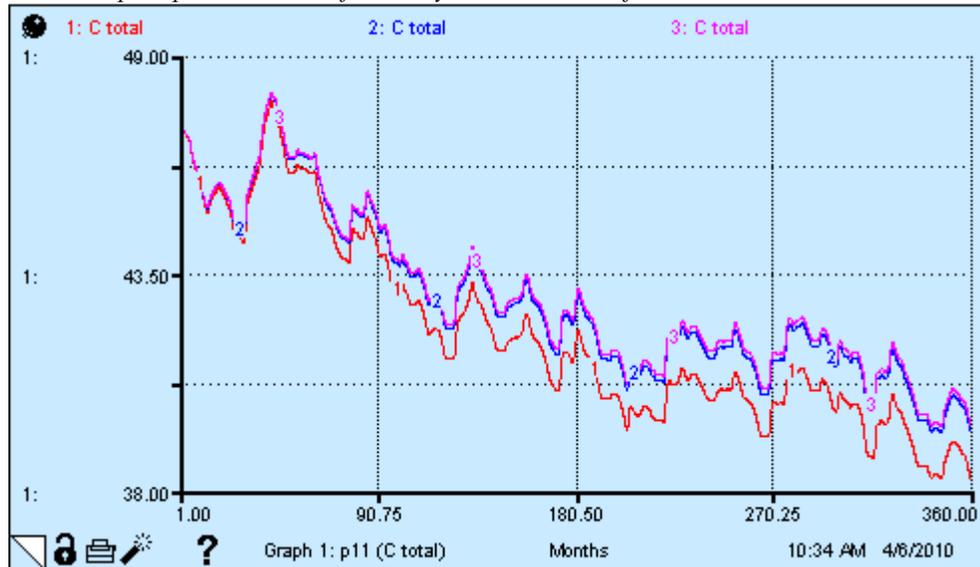
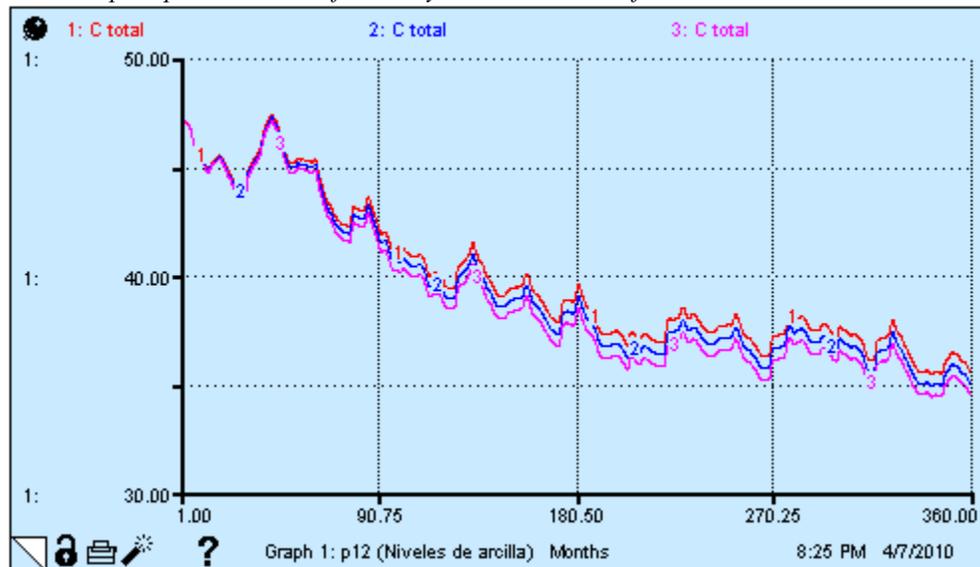


Figura 6: Sensibilidad al contenido de limo y arcilla (Tc) (1: Tc=0.163; 2: Tc=0.332; 3: Tc=0.5). SD con precipitaciones de referencia y considerando el efecto durante barbecho.



Finalmente, se destaca que la herramienta permite ingresar un factor de mejora en el rendimiento, de forma tal de explorar en cuánto debiera mejorar el rinde para obtener diferentes stocks de carbono. Por ejemplo, en la Figura 7 se incluye un análisis de sensibilidad para este factor, y se observa que con un incremento del 25% el contenido de carbono se mantiene estable en los 30 años de la simulación. El porcentaje es similar tanto para SD como para LC –excepto que en la LC se observan cambios más abruptos en el contenido de C (recordar que en la simulación aporte de materia seca al suelo se realiza en tres meses).

Figura 7: Sensibilidad a la mejora en el rendimiento (M) ($1:M=1$; $2:M=1.25$; $3:M=1.5$) con precipitaciones de referencia, y sin considerar efecto durante barbecho (SD).

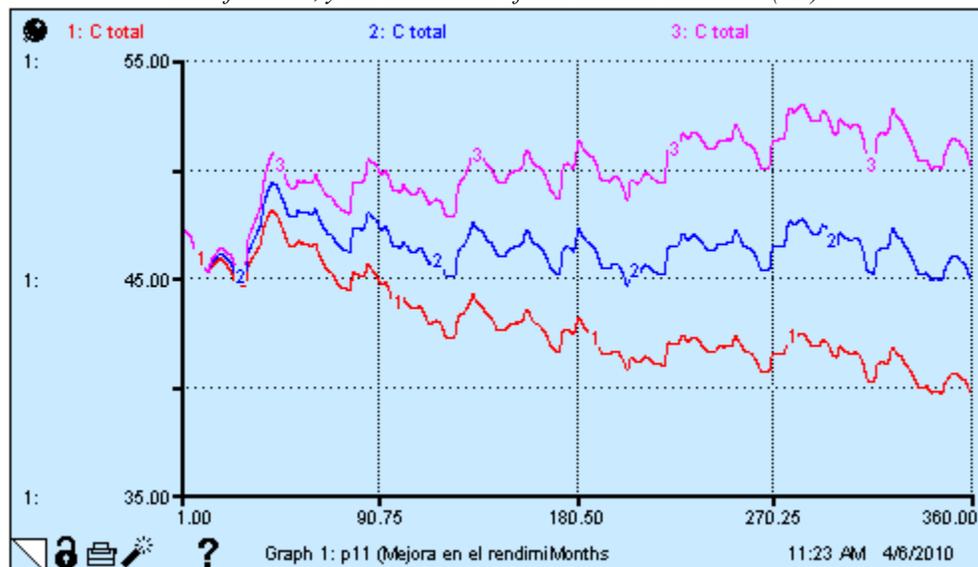
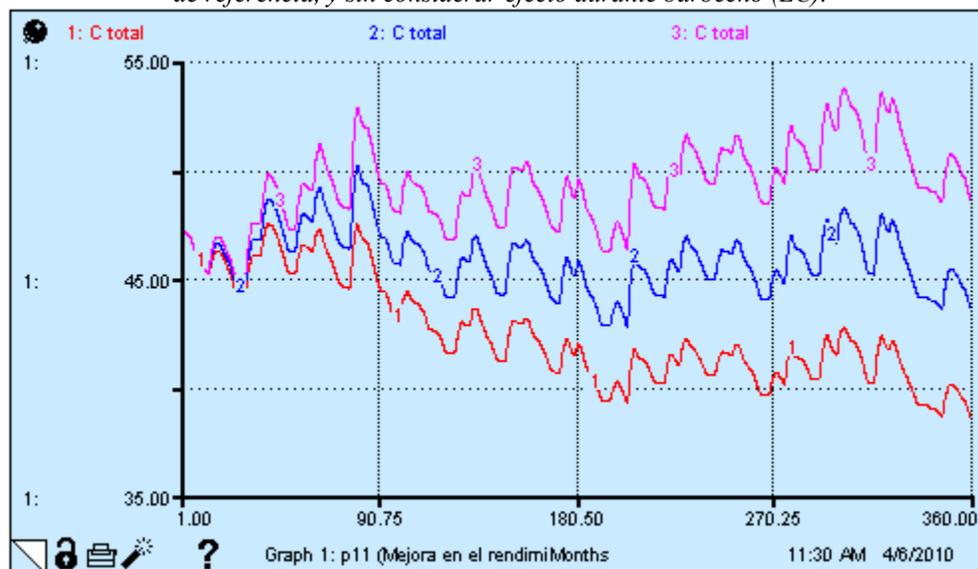


Figura 8: Sensibilidad a la mejora en el rendimiento (M) ($1:M=1$; $2:M=1.25$; $3:M=1.5$) con precipitaciones de referencia, y sin considerar efecto durante barbecho (LC).



4. Discusión

Se ha presentado el desarrollo de una herramienta de apoyo para analizar el efecto de diferentes escenarios de lluvias, temperaturas, y características del suelo en tierras cultivadas bajo siembra directa y labranza convencional. La herramienta constituye un laboratorio de experimentación para entender y comprobar diferentes hipótesis. Se ha prestado particular énfasis a proveer de una interfase amigable a través de la cual el usuario pueda ingresar datos fácilmente.

El modelo considera diferentes fracciones del suelo. Actualmente, la validación de los resultados es limitada debido a la falta de datos experimentales sobre el contenido de carbono en cada una de las fracciones. Solo se ha podido evaluar el contenido total. Esto

representó una limitación al calibrar el modelo de simulación para representar la dinámica del C para la región bajo estudio. Asimismo, el cálculo del factor de descomposición (A) se efectuó a partir del contenido mensual de agua en el suelo, contemplando promedios de precipitación por mes, sin ponderar la distribución de lluvias durante dicho lapso, en virtud de no contar con valores diarios. Como trabajo futuro, se planea acceder a datos de un mayor número de mediciones en diferentes explotaciones. Esto permitirá ajustar el modelo e incorporar otros factores relevantes en la dinámica del carbono.

Agradecimientos

Los autores agradecen de manera especial al Ing. Agr. Cristian Kleine a cargo del establecimiento “Hogar Funke” (Tornquist, BA), por su disponibilidad para acceder a la información.

Referencias

- [1] Century Soil Organic Matter Model Version 5, Help System. Disponible en <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5>, accedido el 10 de noviembre de 2009.
- [2] CTIC (1992). *1992 National survey of conservation tillage practices*, CTIC, West Lafayette, IN, EEUU.
- [3] Durán, R., Galantini, J., Scoconi, L., Chimenó, P., Sánchez, M., Cordisco, M., Pesce, G., Oliveras, G., Merino, L. y De Batista, M. (2009). Sistemas de labranza en el SO bonaerense: medición de sus beneficios y costos ecológicos para sustentar el gerenciamiento ambiental de la empresa rural socialmente responsable, *Cuartas Jornadas de la Asociación Argentina Uruguaya de Economía Ecológica (ASAUEE)*, UNGS (BA), nov. 2009 [CD,1] ISBN 978-987-22038-3-2, 15 p.
- [4] Echeverría, Nora E, Vallejos, Adrián G y Silenzi, Juan C. Erodabilidad de suelos del sur de la región semiárida Argentina. *Cienc. Suelo*, ene./jul. 2006, vol.24, no.1, p.49-57. ISSN 1850-2067.
- [5] Galantini J, Rosell R. (2006a). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil & Tillage*, 87:72-79.
- [6] Galantini J.A.; Iglesias J.O.; Maneiro C.; Santiago L.; Kleine C. (2006b). Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense. Efectos de largo plazo sobre las fracciones orgánicas y el espacio poroso del suelo, *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA) – INTA*, 35:15-30.
- [7] Galantini J.A., Iglesias J., Maneiro C., Kleine, C. (2007) Efectos de largo plazo sobre la materia orgánica del suelo, *Rev. Técnica Especial en sd, AAPRESID*, octubre 2007, p.11-15.
- [8] Kleine, C.; Puricelli, A. (2001). Comparación de los rendimientos y algunos parámetros químicos luego de varios años bajo LC y SD en el sudoeste de Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas INPOFOS* 12, p. 15-19.
- [9] Leite, L., Mendonça E. (2003). Century Model of soil organic matter dynamics. Equations and assumptions. *Ciencia Rural*, 33(4):679-686. ISSN 0103-8478.
- [10] Molina J., Smith P. (1998). Modeling carbon and nitrogen processes in soils. *Advances in Agronomy*, 62: 253-98.
- [11] Moraes Sa, J.C., Rastrojos: Alimento del suelo, *X Congreso Nacional de AAPRESID*, Rosario (SF), 2003, p.135-138.
- [12] Parton W., Haxeltine A., Thornton P., Anne R., Hartman M. (1996). Ecosystem sensitivity to land-surface models and leaf area index. *Global and Planetary Change*, 13:89-98.
- [13] Polyakov V., Lal R. (2004). Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. *Environment International*, 30:547-556.
- [14] Raich J., Potter C. (1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical*, 9 (1):23-36.
- [15] Shibu M., Leffelaar P., Keulen H., Aggarwal P. (2006). Quantitative description of soil organic matter dynamics – A review of approaches with reference to rice-based cropping systems. *Geoderma*, 137:1-18.

Datos de Contacto:

Marisa A. Sánchez. Dpto. Cs. de la Administración, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. E-mail: mas@uns.edu.ar.

Apéndice I: Sensibilidad al contenido de limo y arcilla.

Año	C (1)	C(2)	C(3)
1986	47.14	47.14	47.14
1987	45.34	45.46	45.48
1988	44.43	44.63	44.66
1989	47.09	47.3	47.32
1990	46.07	46.4	46.44
1991	45.95	46.34	46.39
1992	43.89	44.39	44.46
1993	44.89	45.47	45.56
1994	43.09	43.77	43.87
1995	42.69	43.41	43.52
1996	41.31	42.08	42.2
1997	43.19	43.99	44.11
1998	41.51	42.38	42.51
1999	42.46	43.33	43.46
2000	40.69	41.6	41.74
2001	42.04	42.99	43.12
2002	40.32	41.31	41.45
2003	40.09	41.09	41.24
2004	39.75	40.78	40.93
2005	41.06	42.11	42.26
2006	40.27	41.35	41.51
2007	40.98	42.06	42.22
2008	39.33	40.43	40.59
2009	40.98	42.1	42.26
2010	40.51	41.65	41.81
2011	40.46	41.6	41.76
2012	38.96	40.12	40.28
2013	40.4	41.57	41.73
2014	38.56	39.74	39.9
2015	38.76	39.94	40.1
2016	38.3	39.48	39.63