

CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN DEL MODELO AMG PARA SIMULAR LA EVOLUCIÓN DEL STOCK DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS DE URUGUAY¹

Rubio, V.¹; Sawchik, J.¹; Ernst, O.²; Quincke, A.¹; Siri G.²

¹ INIA La Estanzuela, Colonia. Uruguay; ² E.E.M.A.C, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Uruguay. vrubio@inia.org.uy

PALABRAS CLAVE: Modelo de simulación; Materia orgánica del suelo; rotaciones agrícolas.

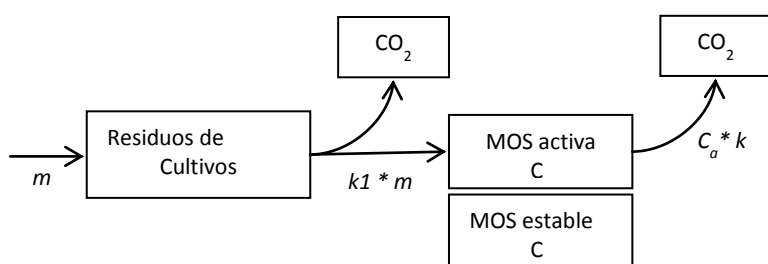
INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MO) es un factor determinante de la estructura y calidad del suelo, constituyendo además un reservorio de carbono, nitrógeno y otros nutrientes para las plantas. Conocer su evolución en el largo plazo permite evaluar la sustentabilidad del sistema. En este sentido, los modelos de simulación son una herramienta muy valiosa permitiendo predecir el impacto de las prácticas de manejo sobre la evolución del carbono orgánico para cada suelo (COS) y sistema en particular. Existen en la actualidad una amplia variedad de modelos de simulación del COS estos varían desde simples modelos analíticos a algunos más complejos, demandantes de una alta cantidad de información para su uso. El objetivo de este estudio fue evaluar el ajuste del modelo AMG, para suelos de Uruguay utilizando información de experimentos de rotaciones de largo plazo. El AMG es un modelo simple, de paso anual, que requiere una mínima cantidad de información para su funcionamiento y la calibración de poca cantidad de parámetros a pesar de su simplicidad ha mostrado resultados exitosos en la simulación del COS en el largo plazo para diferentes situaciones edafo-climáticas (Milesi et al., 2013; Saffi-Hdadi y Mary, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del modelo

El AMG es un modelo de paso anual que considera tres compartimientos de COS, restos de cultivos, materia orgánica humificada estable y labil. La figura 1 es una representación esquemática del modelo.



Saffi-Hdadi y Mary, 2008

Figura 1.: Diagrama del modelo AMG

Donde: m = masa de carbono aportado por los cultivos. $k1$ = coeficiente de humificación. K = constante de mineralización. MOS = materia orgánica del suelo. C_a = COS activo. C_e = COS estable.

En el modelo AMG, la tasa de mineralización k depende particularmente de la temperatura del suelo y del contenido de arcilla, esta relación fue descrita con éxito por las ecuaciones propuestas por Saffih-Hdadi y Mary (2008).

¹ Este artículo reporta para Uruguay parte de un proyecto regional que evaluó información climática y de experimentos de largo plazo para Argentina, Chile, Paraguay, Bolivia, Méjico y Uruguay. Proyecto BID/Fontagro RG-T1654

Caracterización de los sitios de estudio

Para este estudio se trabajó con tres experimentos de largo plazo cuyas características se describen a continuación:

a) Rotaciones y Laboreo de INIA La Estanzuela (rotaciones y laboreo-LE). Este experimento fue instalado en el año 1996 con el objetivo de evaluar los efectos del tipo de rotación: cultivo continuo (CC) vs. Rotación de cultivos y pasturas (Mixto), y del laboreo: Siembra directa (SD) vs. Laboreo mínimo (LC), sobre el contenido de MO del suelo. Se ubica sobre un *Argiudol vértico esmectítico* cuyo contenido de arcilla en el horizonte A es del 32% y pendiente menor a 2%. El esquema de rotación de cultivos se muestra en la tabla 1, de cada rotación se evalúan dos tratamientos LC y SD.

Tabla 1.: Rotación del experimento rotaciones y laboreo La Estanzuela:

Año	1	2	3	4	5	6
Sistema de CC	T	Av-M	C-G	T	Av-M	C-G
Sistema Mixto	PP	PP	PP	T	Av-M	C-G

Donde: CC= cultivo continuo Mixto= Rotación cultivo-pasturas T= trigo, Av= avena, M= maíz C= cebada, G= girasol, PP= pastura perenne

b) Rotaciones de largo plazo instalado en el año 1963, en INIA La Estanzuela, (rotaciones largo plazo-LE), El suelo dominante en el área de estudio es *Argiudol típico* cuyo contenido de arcilla en el horizonte A es de 27,5% y su presenta una pendiente suave a moderada de 2 a 4%. Se seleccionaron para este trabajo dos tratamientos de CC y un tratamiento Mixto. La tabla 2 muestra la rotación de cultivos de los diferentes tratamientos. Se analizan los años comprendidos entre 1985 y 2008 para uniformizar el período en cuanto a prácticas de manejo y cultivos. Para el período analizado todos los tratamientos se manejan con LC. Las pasturas son cortadas y esparcidas uniformemente sobre la parcela.

Tabla 2.: Rotación del experimento rotaciones largo plazo-La Estanzuela (1985-2008):

Año	1	2	3	4	5	6
CC LC a	Sg	C-G	T	Sg	C-G	T
MIX LC	Sg	C-G	T-PP	PP	PP	PP
CC LC b	C- Sg	G	T	C-Sg	G	T

Donde: CC LCa = Cultivo continuo en laboreo convencional rotación a, MIX LC= Rotación cultivo-pasturas en laboreo convencional y CC LCb= Cultivo continuo en laboreo convencional rotación b. Sg = Sorgo, C= cebada, G= girasol, T= trigo, PP= pastura perene

La temperatura media anual, registrada por la estación meteorológica de la experimental donde se encuentran estos experimentos, es de 16,5⁰C. La precipitación anual acumulada es de 1094 mm anuales.

c) Rotaciones y laboreo de la estación experimental Mario A. Cassinoni (rotaciones y laboreo-EEMAC) de la Facultad de Agronomía, Fue instalado en el año 1993 con el objetivo de evaluar el efecto de rotaciones bajo sistemas de LC y SD. El suelo dominante del área de estudio es un *Argiudol típico* con una pendiente de 1% y el contenido de arcilla del horizonte A es de 28,1%. La temperatura media anual de 17⁰C y la precipitación anual acumulada media es de 1060 mm. Los tratamientos evaluados consisten en dos secuencias agrícolas (a y b), del año 1993 al 1997 la secuencia de cultivos es: cebada-sorgo / trigo-girasol / trigo- sorgo / maíz de primera, para ambos casos a partir de esa año las secuencias de cultivos difieren (ambas secuencias se muestran en la tabla 3). Además la secuencia "a" es analizada para dos manejos: LC y SD.

Tabla 3.: Secuencia de cultivos del experimento rotaciones y laboreo-EEMAC.

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

a	Av-M	M	T	T-S	G	T-S	G	C-S	T-S	C-S	T	S	S	T-S	T-S
b	Av-S	M	T	T-Sg	M	T-Sg	M	C-Sg	T-M	C-M	T	M	M	T-M	T-M

Donde: Av= avena, S= Soja, M= maíz, T= trigo, Sg= sorgo y G= girasol

Información disponible

Se contó con información anual de COS a 15 cm de profundidad para ambos ensayos ubicados en LE para cada tratamiento y repetición. Para el experimento ubicado en la EEMAC se contó con un valor de COS para los años 1993, 1995, 1998 y 2002 a 20 cm de para cada tratamiento. El stock de COS se calculó a masa constante, utilizando un valor de densidad aparente (Dap) promedio del período para cada tratamiento en los experimentos de LE, mientras que para el experimento de la EEMAC se asumió un valor único de 1.25 g/cm³.

Parámetros utilizados

Los aportes anuales de carbono (m) fueron estimados a partir del rendimiento en grano de cada cultivo, utilizando los índices de cosecha mostrados en la tabla 4. La biomasa radicular se estimó como un 30% de la biomasa aérea para los cultivos anuales (Brisson et al., 2003) y de 50% para pasturas, en tanto que la concentración de carbono en los residuos se asumió como un 40% (Nicolardot et al. y otros citados por Saffih et al., 2008).

Tabla 4.: Índices de cosecha

Cultivo	IC
Maíz/Sorgo	0.5
Girasol	0.32
Cebada	0.4
Trigo	0.43

Los coeficientes de k1 usados para sistemas bajo LC fueron:

- 0,21 para maíz y trigo (Saffih-Hdadi y Mary, 2008), se asumen este mismo valor para los cultivos de cebada y sorgo.
- 0,076 para avena (Ancelin et al,2007)
- 0,29 para girasol y soja (Andriulo com. Pers).
- Para alfalfa y pasturas se estima el valor a partir de los datos disponibles.

En primer lugar se estima la relación del COS estable (COSe) con el COS al inicio del experimento (COSi) o con el COS de referencia o virgen (COSv), para los tratamientos de CC en LC. Una vez obtenida esta relación para los sistemas mixtos en LC de estima el coeficiente de k1 de pasturas y alfalfa, cuyo valor no está disponible en la bibliografía. Por último para los tratamientos bajo SD se estiman los factores de multiplicación de los coeficientes de k1 y k. El ajuste de los parámetros fue realizado mediante el método del complemento "Solver" del programa Excel, siguiendo el criterio de la minimización de la raíz cuadrada media del error (RMSE). En el experimento de rotaciones de largo plazo-LE se consideran previamente a la estimación de los distintos parámetros las pérdidas por erosión mediante el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo de la USLE, utilizando el programa de erosión 6.0 (Garcia Prechac et al., 2013). La validación de los resultados se realiza mediante el método de "leave one out" para los bloques de ambos experimentos de LE. En el caso del ensayo de la EEMAC por contar con datos promedio de las tres repeticiones no fue posible validar los resultados.

RESULTADOS

a) Rotaciones y Laboreo-LE: El coeficiente de k estimado mediante las ecuaciones pedoclimáticas fue de 0.082. El mejor ajuste del modelo se obtuvo con una relación COSe/COSv de 0.4, así, el COSe representa en promedio un 67% del COSi. El coeficiente de k1 del cultivo de alfalfa estimado fue de 0.17. Si bien este valor puede ser considerado bajo, es importante considerar que uno de los períodos con ésta pastura presentó graves problemas de enmalezamiento con *Cynodon dactylon*. Para las pasturas mezcla el coeficiente de k1 se estima en 0.289.

Los factores de multiplicación de los coeficientes k y k1 bajo SD los valores obtenidos fueron 0.7 y 0.62 respectivamente. Tal como era esperable para las condiciones de Uruguay el coeficiente de mineralización bajo SD resultó menor, lo que se asocia a la menor oxidación de COS cuando el

suelo no es disturbado. El coeficiente de humificación (k1) en SD es similar al reportado por varios autores para diferentes localidades de Argentina, Chile, México (Proyecto FONTAGRO RG-T1654, en publicación).

b) Rotaciones largo plazo-LE: El coeficiente k se estimó en 0.092. Una vez descontadas las pérdidas por erosión se estimó la relación COSe/COSv en 0.43. Debido a que al inicio de la simulación los sistemas ya tenían varios años bajo tratamientos contrastantes, la relación COSe/COSi varió, siendo 0.66, 0.82 y 0.77 para los sistemas MIX LC, CC LC a y CC LC b respectivamente. El mejor ajuste se obtiene con un valor de coeficiente de k1 de pasturas de 0.289, igual al obtenido para el experimento de rotaciones y laboreo-LE.

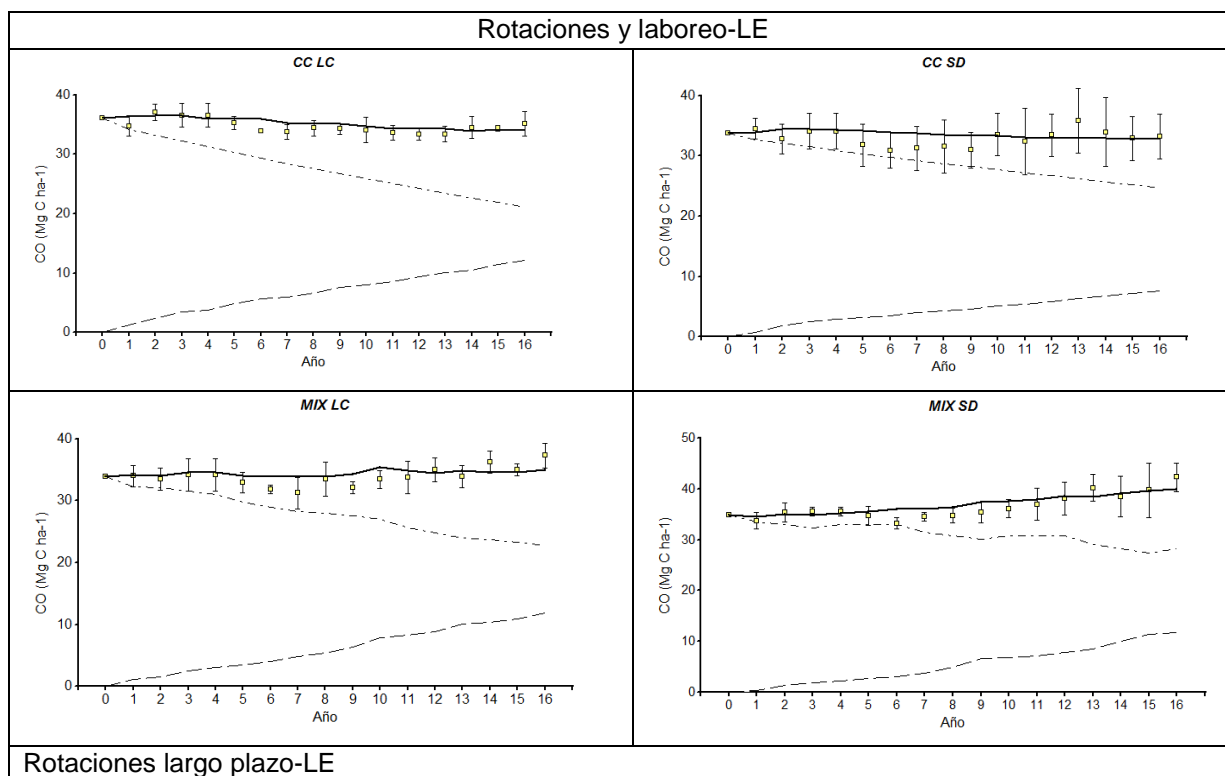
c) Rotaciones y Laboreo-EEMAC: El coeficiente de k se estimó en 0.1. El COSe se obtiene mediante su relación con el COSi, ya que no se contó con datos de COSv, la relación obtenida fue de 0.7 valor esperable considerando la historia agrícola del sitio. Se utilizaron los factores de multiplicación de los coeficientes k y k1 calibrados en el experimento de rotaciones y laboreo-LE, debido a que se contó con una menor cantidad de datos.

Las relaciones encontradas para el COSe tanto en relación con el COSi y COSv que minimizaron el cuadrado medio del error para todos los ensayos se encuentran dentro del rango esperado según lo reportado por varios autores en base a información generada con C marcado (Milessi et al., 2013; Safiih-Hdadi y Mary, 2007; Andriulo et al., 1999). En la tabla 5 y la figura 2 se presentan los resultados de ajuste de los diferentes ensayos.

Tabla 5: Medidas de ajuste del modelo AMG para los distintos ensayos

Ensayo	N° obs	MBE	MRE	RMSE	RMSV	CD
Rotaciones y laboreo-LE	64	-0,54	-1,7	1.38	1.27	1.03
Rotaciones largo plazo- LE	69	0.153	0.27	1.47	1.47	0.86
Rotaciones y laboreo-EEMAC	15	0.41	0.005	4.46	4.44	0.48

Donde: MBE= media de la diferencia observado menos simulado (Mg C ha^{-1}); MRE= media de las diferencias observado menos simulado relativa a observado (%); RMSE= raíz cuadrada media del error (Mg C ha^{-1}); RMSV= raíz cuadrada media de la variación (Mg C ha^{-1}); CD= coeficiente de determinación.



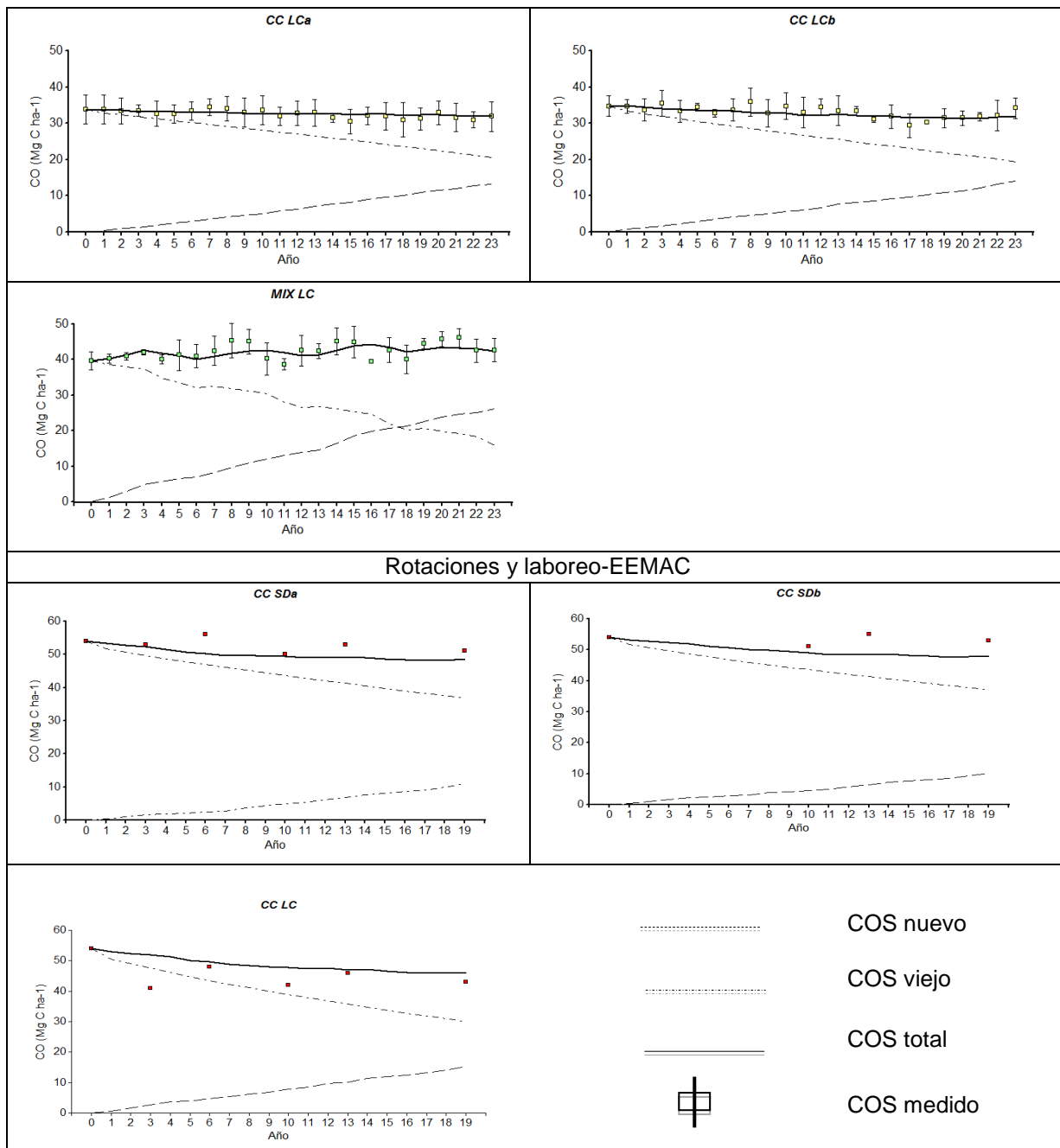


FIGURA 2.: Evolución del CO total del suelo simulado y observado, y de las fracciones de COS viejo y joven simulados, para los diferentes ensayos evaluados.

VALIDACION

Los resultados del ajuste de la validación, expresados como porcentaje del cuadrado medio del error (RMSE) en relación al COS promedio medido, se muestran las tablas 6 y 7. Los resultados muestran un buen ajuste siendo el error máximo obtenido de 6.3%.

Tabla 6.: Validación cruzada- Rotaciones y Laboreo de INIA LE.

Tratamiento	% de error
CC SD	5.3
CC LC	3.7
MIX SD	6.3
MIX LC	6.1
Media	5.35

Tabla 7.: Validación cruzada- Rotaciones de largo plazo de INIA LE.

Tratamiento	% de error
CC LC a	4.4
CC LC b	4.6
MIX LC	6.3
Media	5.09

CONSIDERACIONES

El modelo AMG permitió simular adecuadamente la evolución de carbono orgánico para los tres experimentos evaluados. En tal sentido se considera la misma una herramienta prometedora para la modelación de las tendencias a largo plazo del contenido de COS, bajo diferentes manejos, en las condiciones de Uruguay.

Para ambos ensayos en la LE, tanto en sistemas de CC o MIX con o sin presencia de erosión, aportes medios mayores a $3.3 \pm 0.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ permitieron mantener las reservas de COS (ensayo rotaciones y laboreo y ensayo de rotaciones largo plazo para el tratamiento CC LCb). En el ensayo de la EEMAC, donde los niveles de COS iniciales son mayores se necesitan mayores aportes para mantener los niveles de C. No se evidenciaron grandes impactos en COS por el sistema de labranza, dado que en SD el menor ingreso de C (menor k1) es compensado por las menores pérdidas por mineralización de COS en relación a LC.

Los peores ajustes se obtuvieron sistemáticamente en los sistemas con pasturas. El modelo mostró cambios menores en CO durante los ciclos de pastura que los valores medidos. A pesar de eso el coeficiente de humificación de pasturas (0.289) generó el mejor ajuste en ambos experimentos evaluados, pudiéndose considerar un buen indicador de la humificación de pasturas mezcla en las condiciones de Uruguay para simulaciones de largo plazo. Bajo SD el ciclo de agricultura posterior a las pasturas se caracterizó por una menor oxidación de la fracción lábil respecto a LC, siendo mejor el ajuste del modelo y mayores los aumentos de COS en estos sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- Ancelin, O.; J. Duranel; A. Duparque, C. Dersigny et L. Fleury. 2007. Sols et matières organiques. Mémento pour des notions utiles et contre les idées reçues. Chambres d'Agriculture Picardie y Agro-transfert-Ressources et Territoires.
- Andriulo, A.; Mary, B.; Guerif, J. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, vol. 19 (5), pp. 365–377.
- Brisson, N.; Gary C; E. Justes et al. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, vol. 18, no. 3-4, pp. 309–332.
- Milesi, L. A.; Irizar, A. B; Andriulo A. E.; Mary, B. 2013. Effect of continuous agriculture of grassland soils of the Argentine rolling pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Applied and Environ Soil Sci*. Volumen 2013. Pp: 17.
- Saffih-Hdadi, K.; B. Mary. 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 40 (3), pp. 594–607.
- Kemanian AR, Stockle C. 2010. C-Farm : A Simple Model to Evaluate the Carbon Balance of Soil Profiles.; 1-20.