

Proyección del aporte de carbono orgánico al suelo bajo diferentes escenarios de manejo agrícola en Pairumani, Vinto, Cochabamba

Mauricio Azero A.¹, Alejandra Kolbe Arce², José Sánchez Ponce³

¹Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana
Av. General Galindo s/n, Cochabamba, Bolivia

²Fundación GaiaPacha, Cochabamba, Bolivia

³Granja Modelo Pairumani, Fundación Simón I. Patiño, Cochabamba, Bolivia

e-mail: mzero@ucbcbba.edu.bo

Resumen

Una gran extensión de suelos agrícolas de la zona de los valles mesotérmicos de Cochabamba sufre de diferentes niveles de degradación debido a un insuficiente asesoramiento técnico y a limitaciones estructurales del ambiente físico. Una manifestación importante de ello es el bajo contenido de materia orgánica registrado en una alta proporción de los suelos. En este contexto, la Granja Modelo Pairumani estableció un modelo agrobiológico hace 10 años, con el objetivo de recuperar la productividad del suelo y lograr una producción estable. El modelo establecido incluye la mejora de las rotaciones, el uso de enmiendas orgánicas para recuperar la actividad biológica y la labranza conservacionista. Estas prácticas en conjunto, también permiten restaurar el balance de carbono del suelo al incrementar el ingreso de carbono en las parcelas y reducir las pérdidas por mineralización.

En este trabajo se realizaron proyecciones del balance de carbono del suelo en cinco años (2008-2012), sobre 6 parcelas situadas en diferentes ubicaciones de la Granja Modelo Pairumani. En las proyecciones se simuló diferentes escenarios alternativos, que incluyeron tres sistemas de labranza (disco, conservacionista y cero) y la aplicación de enmiendas humíferas: compost de estiércol vacuno (5.000 y 10.000 kg m.s. ha⁻¹ año⁻¹) y rastrojos de maíz (2.000 y 4.000 kg m.s. ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente). Además, se realizaron combinaciones de estas prácticas (labranza cero más 2.000 y labranza cero más 4.000 kg rastrojo de maíz ha⁻¹ año⁻¹). Se usó el modelo matemático DNDC8.6 que brindó información sobre las tendencias del carbono orgánico del suelo a través de los años.

Los resultados muestran una relación decreciente entre el contenido de materia orgánica del suelo inicial y el incremento potencial de carbono a lo largo del período de 5 años. Los datos sugieren una relación cuadrática inversa: suelos con menor contenido de materia orgánica inicial (1,36 – 2,20%) serían más eficientes en la acumulación de carbono, respecto a los que tienen un contenido mayor (2,71 –

4,48%), reproduciendo las observaciones de otros autores. Por otro lado, las labranzas conservacionista y cero por sí solas logran incrementar el aporte de carbono solamente en suelos con mayor contenido de materia orgánica inicial. En suelos más pobres en materia orgánica, se requiere una aplicación importante de biomasa. En el conjunto de los suelos, sobresalen la aplicación de compost en dosis de 10.000 kg y la labranza cero con aplicación de rastrojos (4.000 y 2.000) como las prácticas que permitirían una acumulación mayor de materia orgánica en el tiempo. Estos resultados señalan el potencial de la aplicación de compost, el cambio en el sistema de labranza y el uso de rastrojos como las prácticas más eficientes y eficaces para la recuperación de suelos en la región.

Palabras clave: DNDC, balance de carbono, secuestro de carbono

1 Introducción

En Bolivia, especialmente en la zona andina, una alta proporción de los suelos presenta contenidos de materia orgánica del suelo (MOS) deficientes [8]. Dado que el papel que desempeña el componente orgánico es fundamental para mantener la productividad del suelo [19] [7], es importante encontrar alternativas que permitan incrementar los niveles de MOS, principalmente en los suelos agrícolas, a fin de mejorar la producción de alimentos y de ingresos.

El principal componente elemental de la materia orgánica es el carbono. Por lo general, se acepta que el carbono orgánico del suelo (COS) en los horizontes superficiales constituye alrededor de 54-58% de la MOS [4] [39]; de esta manera, puede considerarse que el contenido de MOS y el contenido de COS varían de manera proporcional. Las existencias de COS son el resultado de un balance dinámico entre los aportes de material vegetal muerto y las pérdidas por mineralización de sustancias orgánicas del suelo [29]. En consecuencia, el contenido de carbono en el suelo se puede incrementar al implementar, mejorar o diversificar las prácticas agrícolas que generen o aporten biomasa, en una magnitud superior a las pérdidas naturales anuales que ocurren por degradación microbiana [29] [31]. Estas prácticas agrícolas son numerosas y algunas han sido identificadas por su mayor potencial humígeno. Así por ejemplo, el IPCC [14], recomienda tres grupos: prácticas de intensificación de la agricultura, labranza de conservación y control de erosión. Lal [20] habla de “Prácticas de Manejo Recomendadas” (PMR’s), entre las que destaca la labranza cero, los cultivos de cobertura, la aplicación de enmiendas húmicas y la agroforestería. Otros autores señalan algunas otras prácticas, no obstante, las nombradas son las más aplicadas. Al implementar prácticas agrícolas adecuadas se viabiliza la fijación neta de carbono orgánico en el suelo, reduciendo además una fracción de dióxido de carbono emitido desde el suelo hacia la atmósfera [31]. Con ello, se incide también en la disminución de los gases de efecto invernadero, debido al secuestro de carbono en el suelo.

La cuantificación del balance de carbono es posible a partir de modelos *ad hoc*, tales como el de Hénin-Dupuis [12], quienes utilizaron dos coeficientes para sintetizar los procesos básicos del balance de MOS: el coeficiente de humificación y el coeficiente de mineralización. El primero resume el aporte anual de humus al suelo, procedente de la descomposición-humificación de los residuos orgánicos depositados en la capa

superficial del suelo. El segundo involucra la tasa anual a la que la materia orgánica del suelo, la cual es esencialmente humus [6], se descompone.

El modelo de Hénin-Dupuis simplifica la composición diversa de la MOS asumiendo un comportamiento homogéneo para toda la fracción orgánica; por esta razón dicho modelo es denominado como monocompartmental. Otros modelos discriminan, con un criterio funcional, grupos dentro de la fracción orgánica. Por ejemplo, el modelo de Andriulo *et al.* [1] considera dos grupos funcionales, cada uno con una velocidad de descomposición diferente: una fracción activa, que incluye compuestos de fácil descomposición biológica y una segunda de degradación extremadamente lenta. Otros modelos se aproximan más a la realidad y asumen numerosas fracciones de MOS, cada una con diferentes tiempos de evolución y sometidas a la influencia de diversos parámetros externos e internos. Para simular los procesos de transformación y evolución en la forma en que se producen en la realidad, utilizan modelos computacionales de múltiples relaciones y multicompartmentales.

A pesar de las dudas asociadas a las proyecciones basadas en modelos matemáticos, dichas herramientas son ampliamente utilizadas en los estudios de balance de carbono en el suelo y se han mostrado útiles para proveer información sobre las posibles tendencias en el COS [5]. Algunos de estos modelos, se aplican incluso en situaciones de escasa información empírica disponible. Estos modelos permiten además simular situaciones de distintas prácticas de manejo y posibles efectos simultáneos de cambio global, incluyendo cambios en políticas ambientales [5].

Por otro lado, los modelos computacionales se han situado en un lugar importante dentro de las investigaciones relacionadas con la lucha contra el cambio climático, debido a que la mayoría de los cambios en el COS requieren de décadas (por lo menos 20 años) para ser detectables mediante métodos analíticos, debido a que el diferencial de aporte de carbono anual es pequeño en relación con el stock de COS [5]. Con el uso de modelos matemáticos que consideren la interrelación e integralidad de los procesos es posible crear simulaciones que permitan obtener resultados aproximados de distintas actividades que no fueron implementadas. Además, posibilitan capturar adecuadamente los impactos de los mismos [27], lo cual permite tomar decisiones fundamentadas sobre el tipo de manejo agrícola que se desea realizar.

En la zona andina de Bolivia, esporádica ó habitualmente, en los terrenos de cultivo se aplican diversas PMR's, tales como la incorporación de abonos verdes, aplicación de estiércoles o prácticas de control de erosión. Se ha acumulado cierta experiencia acerca del potencial de estas PMR's en el mejoramiento de los niveles de producción [28] [37] [34] [30] [9]. Sin embargo, mucho menos habituales son la aplicación de compost y de rastrojos, o la labranza cero, prácticas muy utilizadas en otros países, pero que no obstante cuentan con escasas experiencias en el país.

La Granja Modelo Pairumani (GMP), de la Fundación Simón I. Patiño, estableció hace 10 años, con el fin de mejorar y estabilizar la productividad de los suelos, un modelo agrobiológico de producción. El modelo agrobiológico, basado en la unidad

biológica de producción (suelo-planta-animal-hombre), incluye entre otras prácticas la mejora de las rotaciones, el uso de enmiendas orgánicas para recuperar la actividad biológica y la labranza conservacionista. Estas prácticas en conjunto, también permiten restaurar el balance de carbono del suelo. Por un lado, incrementan el aporte anual de humus, a través de la aplicación de compost, estiércoles y purines. Por otro lado, reducen las pérdidas por mineralización, a través de la labranza de conservación. Desde el año 2007, también se implementó de manera experimental dos parcelas de labranza cero, los cuales no han sufrido ningún movimiento de tierra y han recibido aportes anuales de rastrojos de maíz.

Con el objetivo de evaluar y proyectar los beneficios probables de estas experiencias en función al balance de carbono del suelo, en el presente trabajo se aplicó el modelo Desnitrificación-Descomposición (DNDC). El mismo permitió proyectar el balance de carbono orgánico en diferentes escenarios de labranza y de aplicación de enmiendas humíferas. Los escenarios fueron proyectados en parcelas representativas de la GMP en Pairumani, provincia de Quillacollo, sección Vinto.

2 Metodología

Sitio de estudio

El trabajo se llevó a cabo entre los años 2006 y 2007, en una serie de terrenos seleccionados distribuidos en la GMP. La zona de estudio se localiza a 17 km al oeste de la ciudad de Cochabamba, en las laderas de la vertiente sur de la cordillera del Tunari y en gran parte del cono aluvial del río Pairumani. Las temperaturas medias mensuales varían entre 12,5°C en invierno y 18,5°C en primavera, y la precipitación anual promedio es de aproximadamente 600 mm, concentrada principalmente en cuatro meses del año (diciembre a marzo). La altitud de las zonas evaluadas varía entre 2.550 y 2.800 m.s.n.m. [10].

Se seleccionaron 6 terrenos con características diferentes de historial de manejo, posición en la pendiente y profundidad del suelo. Los seis terrenos seleccionados se distribuyen en tres zonas de la GMP, entre el piedemonte y el valle. Estos terrenos presentan de manera general un manejo agrobiológico que incluye labranza convencional (arado de discos) combinada en algunos casos con labranza conservacionista (arado actisol), aporte de enmiendas orgánicas (compost y purines), ausencia completa de agroquímicos sintéticos y rotaciones de cultivos con predominancia de maíz y alfalfa forrajeros.

Se tomaron muestras de suelo de la primera capa (0-30 cm, 12-30 submuestras) en las parcelas seleccionadas, con las que se realizó un análisis de suelos estándar en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad Mayor de San Simón. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos básicos de las parcelas de estudio

Variable	Parcela					
	Valenzuela		Balderrama		Munaypata	
	4-EN	4-J	12-D	12-E	18-A3	18-A5
Superficie, ha	4,0	1,1	2,9	2,9	1,5	3,2
PMP, %	16,18	7,72	8,81	8,93	12,98	12,84
CC, %	28,15	15,18	16,16	15,91	22,47	23,18
Arcilla, fracción	0,32	0,26	0,23	0,25	0,24	0,23
DA, g cm ⁻³	1,39	1,39	1,41	1,43	1,35	1,39
pH (1:2,5)	6,9	7,2	6,6	6,4	6,5	6,3
CE (1:2,5), dS m ⁻¹	0,089	0,043	0,305	0,116	0,259	0,562
MOS, g kg ⁻¹	27,1	13,6	22,0	21,3	35,0	44,8
COS, g kg ⁻¹	15,7	7,9	12,8	12,3	20,3	26,0
N total, %	0,161	0,075	0,112	0,111	0,189	0,213
P _d (Olsen), ppm	1,9	3,6	21,3	12,7	32,8	22,9
Ca ⁺⁺ cambiable, cmol kg ⁻¹	7,50	7,30	7,00	6,00	9,00	10,00
Mg ⁺⁺ cambiable, cmol kg ⁻¹	2,50	2,30	1,00	2,50	1,00	1,00
Na ⁺ cambiable, cmol kg ⁻¹	0,14	0,40	0,51	0,57	0,78	0,57
K ⁺ cambiable, cmol kg ⁻¹	0,15	0,15	0,29	0,22	0,25	0,44
CIC, cmol (+) kg ⁻¹	11,0	10,0	9,0	9,5	11,5	13,4
PSB, %	93,5	100	97,8	97,7	96,0	89,6
Pendiente promedio, %	1,0	1,0	4,5	4,5	5,5	5,5
Tipo de labranza aplicado	disco	disco	disco/actisol	disco/actisol	disco	disco

Descripción del modelo

El modelo matemático Desnitrificación-Descomposición DNDC es un modelo basado en procesos bioquímicos y geoquímicos. Presenta dos componentes, uno de descomposición de MOS a partir de parámetros ecológicos (edafoclima, propiedades físicas del suelo, crecimiento de la vegetación y actividad antrópica) y un segundo componente de nitrificación, desnitrificación y fermentación. Considera que la MOS está repartida en todo momento en cuatro compartimentos: residuos vegetales, biomasa microbiana, humads (humus activo) y humus pasivo; los cuales presentan a su vez sub-compartimentos que incluyen componentes con tasas de descomposición específicas. Los compartimentos y sub-compartimentos en este modelo son dinámicos y las fracciones de MOS pasan de uno a otro, en un esquema cinético que integra ecuaciones de Michaelis Menten para simular la actividad microbiana.

El modelo DNDC fue desarrollado con el apoyo de agencias federales de los EEUU [24], tales como *Environmental Protection Agency* (EPA), *National Science Foundation* (NSF) y *United States Department of Agriculture* (USDA), además de un conjunto de investigadores de diferente procedencia [15]. Se desarrolló para simular el secuestro de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero en suelos agrícolas de EEUU, expandiéndose después a otras regiones y otros ecosistemas [24]. Hasta el presente ha sido utilizado y validado en diferentes regiones y para diferentes fines, por ejemplo, para estimar las pérdidas de N y C de los suelos arables de Europa [21], para proyectar la

dinámica del C en suelos cultivables de China [36] [25], para modelar emisiones de metano en cultivos de arroz en la India [3], para modelar impactos de prácticas de manejo agrícola sobre la emisión de gases de efecto invernadero [11] [23], entre otros numerosos (un listado abundante de estudios publicados puede encontrarse en ISEOS [16]).

En el presente trabajo se utilizó la versión DNDC 8.6 en la modalidad “sitio”.

Escenarios

Los datos recopilados en el campo, en reportes de laboratorio y en la revisión de registros históricos, fueron tabulados e introducidos en la base de datos del modelo. Con esta información inicial se realizaron simulaciones de cinco años (2008-2012) de diferentes escenarios con potencial de fijar carbono en suelos de la GMP. Las variables consideradas en el planteamiento de escenarios fueron: tipo de labranza, aporte de enmiendas orgánicas y manejo de rastrojos. Se definieron 9 escenarios (Tabla 2).

El escenario base (DISCO) es un manejo convencional común en la región, consistente en una rotación maíz (2 años)–alfalfa (3 años), el uso de arado de disco como instrumento de labranza, con retiro de toda la biomasa aérea y sin el aporte de enmiendas orgánicas.

La labranza conservacionista (ACTISOL) consiste en el mismo escenario descrito, a excepción del uso de un instrumento de labranza vertical que incluye una rastra rotativa (actisol).

La labranza cero está presente en tres escenarios: uno con las características del escenario base pero con ausencia de labranza (LAB-0), un segundo con una adición de 2.000 kg m.s. de rastrojos de maíz, estimado para dar una cobertura de 33% considerada por algunos autores como una cobertura mínima (LAB-0-2000), y un tercero que supone la adición de 4.000 kg m.s. de rastrojos (LAB-0-2000), estimado para una cobertura de 2/3, considerada como suficiente para proteger al suelo del impacto de la lluvia [18] y protegerlo de la erosión.

Tabla 2. Escenarios propuestos para los terrenos evaluados.

Labranza	Compost	Manejo de rastrojo	Escenario
Arado de disco	Sin abonado	Sin rastrojo	DISCO
Labranza conservacionista (arado actisol)	Sin abonado	Sin rastrojo	ACTISOL
Labranza cero	Sin abonado	Sin rastrojo	LAB-0
Labranza cero	Sin abonado	2.000 kg m.s.	LAB-0-2000
Labranza cero	Sin abonado	4.000 kg m.s.	LAB-0-4000
Arado de disco	Sin abonado	2.000 kg m.s.	RAST-2000
Arado de disco	Sin abonado	4.000 kg m.s.	RAST-4000
Arado de disco	5.000 kg m.s.	Sin rastrojo	COMP-5000
Arado de disco	10.000 kg m.s.	Sin rastrojo	COMP-10000

La aplicación de rastrojos sin labranza cero y con arado de discos, aunque es una abstracción, fue incluida para separar el efecto de la aplicación de biomasa del efecto de la ausencia de remoción del suelo. Figura en dos escenarios: 2.000 kg m.s. de rastrojo de maíz ha⁻¹ (RAST-2000) y 4.000 kg (RAST-4000).

Finalmente, se consideró la aplicación de compost elaborado con estiércol de ganado bovino más rastrojos de maíz, como una práctica habitual de la GMP. En la GMP se utiliza rutinariamente la aplicación de 5.000 kg m.s. ha⁻¹ como una dosis de “mantenimiento” (COMP-5000) y la aplicación de 10.000 kg m.s. ha⁻¹ (COMP-10000) como una dosis para recuperar los suelos menos productivos. Por otro lado, el aporte de 5.000 kg ha⁻¹ de estiércol, en comparación con el compost de estiércol, es una recomendación usual en la región.

Parámetros

En la Tabla 3 se presentan los parámetros requeridos por el modelo.

Tabla 3. Parámetros de ingreso para la simulación de escenarios.

Parámetro	
Clima	Siembra de cultivos
<ul style="list-style-type: none"> • Latitud del sitio • Temperatura máxima y mínima diaria, °C • Precipitación diaria, cm • Concentración promedio anual de N en lluvia, ppm • Concentración atmosférica base de NH₃, µg N m⁻³ • Concentración atmosférica base de CO₂, ppm 	<ul style="list-style-type: none"> • Número de cultivos sembrados consecutivamente en el año • Número de cultivo • Tipo de cultivo • Mes de siembra (1-12) • Día de siembra (1-31) • Mes de cosecha (1-12) • Día de cosecha (1-31) • Modo de cosecha (1 mismo año, 2 siguiente año) • Fracción específica de residuos de cosecha aéreos
Suelo	Labranza
<ul style="list-style-type: none"> • Uso actual • Fracción de arcilla (0-1) • Densidad aparente en la capa superficial (0-5 cm), g cm⁻³ • pH en la capa superficial • Punto de marchitez permanente, adimensional (0-1) • Capacidad de campo, fracción, adimensional (0-1) • Contenido inicial de COS en la capa 0-5 cm, kg C kg⁻¹ • Contenido inicial de nitrato en la superficie, mg N kg⁻¹ • Contenido inicial de NH₄⁺ en la capa superficial, mg N kg⁻¹ • Índice de actividad microbiana, adimensional (0-1) • Pendiente, % 	<ul style="list-style-type: none"> • Método de labranza • Profundidad de labranza • Fertilización • Método aplicado (superficial, por inyección) • Cantidad de fertilizante aplicado, kg ha⁻¹
Manejo agrícola	Aplicación de enmiendas orgánicas
<ul style="list-style-type: none"> • Lapso de años de simulación • Número de rotaciones aplicadas en el plazo de simulación • Número de rotación • Tiempo que dura la rotación especificada, años • Tiempo que dura un ciclo de la rotación especificada, años • Prácticas de manejo para cada año, ciclo y rotación 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de abono • Cantidad de abono aplicado, kg C ha⁻¹ • Cantidad de veces que se aplica el abono • Relación C/N del abono
Desmalezado	Irrigación
<ul style="list-style-type: none"> • Problemas con malezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Modo de irrigación
	Pastoreo
	<ul style="list-style-type: none"> • Número de períodos de pastoreo en un año • Horas de pastoreo por día • Intensidad de pastoreo, cabezas ha⁻¹

Variable de respuesta

La variable de respuesta fue el cambio neto en el stock de carbono en el suelo ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), después de los 5 años de simulación.

3 Resultados y discusión

Debido a la rotación, que incluye una pastura de 3 años, todos los escenarios mostraron un balance de Carbono positivo luego de 5 años de simulación. Es importante indicar que el resultado más común en suelos puramente agrícolas es un balance neto negativo (p.e. [38]). Por otro lado, las proyecciones señalaron que los suelos incrementaron de manera importante el carbono acumulado, en relación a un manejo convencional (labranza de disco y sin aplicaciones de enmiendas orgánicas ni devolución de residuos de cosecha), mediante la inclusión de enmiendas humíferas como prácticas de manejo. Los datos de carbono acumulado en los 5 años se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Acumulación de carbono total, en cinco años de simulación, según escenarios y parcelas.

Parc.	DISCO	ACTISOL	LAB-0	LAB-0-2000	LAB-0-4000	RAST-2000	RAST-4000	COMP-5000	COMP-10000
<i>kg C ha⁻¹</i>									
4-EN	2.161	2.470	3.442	5.140	6.560	3.601	4.837	3.823	5.525
4-J	7.846	7.792	7.599	9.968	11.943	10.451	12.679	10.676	13.52
12-D	7.622	7.653	7.644	9.886	11.705	10.069	12.180	10.297	13.044
12-E	7.782	7.791	7.918	10.094	11.897	10.167	12.304	10.404	13.134
18-A3	3.159	3.400	4.031	5.880	7.474	4.905	6.416	5.123	7.133
18-A5	2.077	2.354	3.017	4.849	6.430	3.798	5.290	4.046	6.039
TOTAL	30.647	31.460	33.651	45.817	56.009	42.991	53.706	44.369	58.395

Análisis de escenarios de labranza dentro de cada parcela

La respuesta de la acumulación de C en función del tipo de labranza muestra en primera instancia que en terrenos con menor contenido de MOS inicial, es decir 4-J, 12-E y 12-D (1,36; 2,13 y 2,20 % MOS inicial), los tres escenarios de labranza exhiben casi la misma acumulación de C en los 5 años (Figura 1). En cambio, en los terrenos de mayor contenido de MOS inicial, es decir 4-EN, 18-A3 y 18-A5 (2,71; 3,50; y 4,48), la tendencia muestra una menor respuesta en general a todos los tratamientos de labranza, pero una mayor sensibilidad hacia la labranza conservacionista y labranza cero (Figura 1). Es decir, en los terrenos con mayor contenido de materia orgánica, los tratamientos de labranza cero y labranza conservacionista (en ese orden) son superiores al tratamiento de labranza con disco. Estos resultados muestran que en suelos con poca materia orgánica, la mineralización del humus promovida por la labranza es menos importante que cuando el contenido de materia orgánica es superior.

Este comportamiento diferenciado según el MOS inicial contrasta con otras publicaciones. P.e. Apezteguía *et al.* [2] bajo condiciones de MOS inicial consideradas aquí como medianas/bajas ($< 2,2\%$ MOS inicial), simularon (modelo EPIC) y midieron una respuesta más favorable ante el uso de labranza cero/conservacionista en relación a labranza convencional. Tendencias similares fueron obtenidas por otros autores [13] [17] [33] [40]. Será interesante verificar con mediciones reales esta tendencia sugerida por el modelo DNDC.

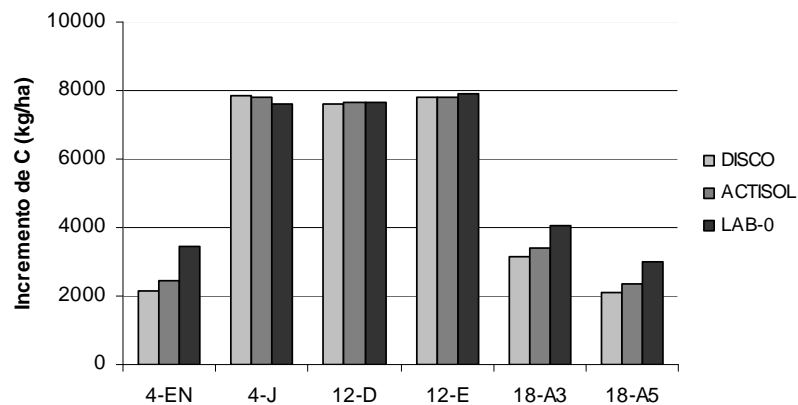


Figura 1: Acumulación total de carbono en el período de 5 años, en cada una de las 6 parcelas de estudio, con escenarios alternativos de labranza.

Sumando las acumulaciones de COS dentro de cada escenario, a fin de ver la tendencia general, se puede observar que el escenario LAB-0 (33.651 kg C) fue el sistema de labranza de mejor desempeño global frente a los tratamientos de labranza conservacionista con ACTISOL (31.460) y labranza convencional con DISCO (30.647) (ver Tabla 4). Proporcionalmente LAB-0 y ACTISOL incrementaron el COS en 9,8 y 2,6 % más que DISCO.

Por otro lado, el sistema de labranza cero obtuvo una menor dispersión de los datos, sugiriendo una mayor seguridad de respuesta alta. No solamente logró la mayor acumulación absoluta (parcela 12-E, con 7.918 kg C) sino también la mayor acumulación mínima (parcela 18-A5, con 3.017 kg C).

Análisis de escenarios de aplicación de enmiendas húmicas dentro de cada parcela

La acumulación de C en los escenarios de aplicación de enmiendas orgánicas fue, naturalmente, superior a la acumulación en escenarios de labranza, mostrando la gran importancia del uso de enmiendas orgánicas para recuperar más rápidamente los niveles de materia orgánica del suelo. Además, mostró variaciones apreciables entre escenarios. En todas las parcelas la acumulación de C fue superior con la aplicación de compost en una dosis de 10.000 kg m.s. ha⁻¹ (Figura 2). Le sigue la aplicación de rastrojo de maíz, en una cantidad de 4.000 kg m.s. ha⁻¹, con la cual se logra también una cobertura eficiente

contra la erosión hídrica. La aplicación de 5.000 kg de compost y de 2.000 kg de rastrojos fue consistentemente inferior y con poca diferencia entre ambas.

Para apreciar la tendencia global, nuevamente la suma de los incrementos de C en las 6 parcelas (Tabla 4) fue superior en el escenario COMP-10000 (58.395 kg C), seguido de RAST-4000 (53.706), COMP-5000 (44.369) y RAST-2000 (42.991). Todos estos valores además son significativamente superiores al manejo convencional con arado de disco y sin enmiendas (DISCO, 30.647), respectivamente, en 90,5; 75,2; 44,8 y 40,3 %.

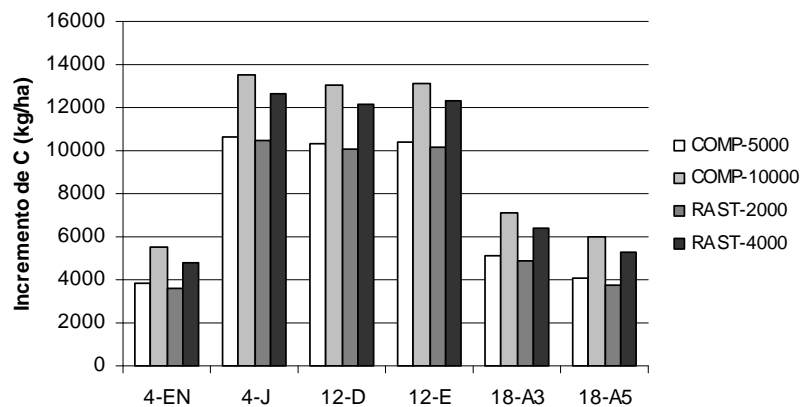


Figura 2: Acumulación total de carbono en el período de 5 años, en cada una de las 6 parcelas de estudio, con escenarios de aplicación de enmiendas.

Análisis de labranza cero con y sin presencia de rastrojos

La práctica de labranza cero es ejecutada de manera tradicional acompañada de un aporte importante de rastrojo, capaz de generar una bioestructura de manera natural, además de controlar el crecimiento de plantas adventicias. Con el propósito de evaluar la importancia del aporte de rastrojos en sistemas productivos de alta demanda de forraje, como se tiene en la zona de valles mesotérmicos, de manera independiente de la labranza, se contrastó estos escenarios (LAB-0 sin rastrojos, LAB-0-2000 y LAB-0-4000) también con el aporte de rastrojos, en las mismas cantidades, pero con labranza convencional de disco (RAST-2000 y RAST-4000), sabiendo que la manutención de una capa de rastrojo es excluyente al arado de discos. Los resultados muestran que en los terrenos con mayor contenido de MOS inicial se logra una mayor acumulación de C en ausencia de labores de remoción del suelo, a igualdad de aportes de rastrojos (Figura 3). Sin embargo, en los terrenos donde el contenido de materia orgánica inicial es menor, la labranza convencional con aporte de rastrojos es más eficaz para incrementar la materia orgánica, de manera consistente. Esta observación tiene relación con la baja respuesta a la labranza cero/conservacionista en situaciones de bajo contenido de materia orgánica inicial. En cambio, como se observó anteriormente, aquellos suelos que ya tienen una acumulación de carbono mediana/alta, responden favorablemente a la labranza

cero/conservacionista, sugiriendo que en estas condiciones pasa a ser importante el ahorro de COS proveniente de una menor mineralización.

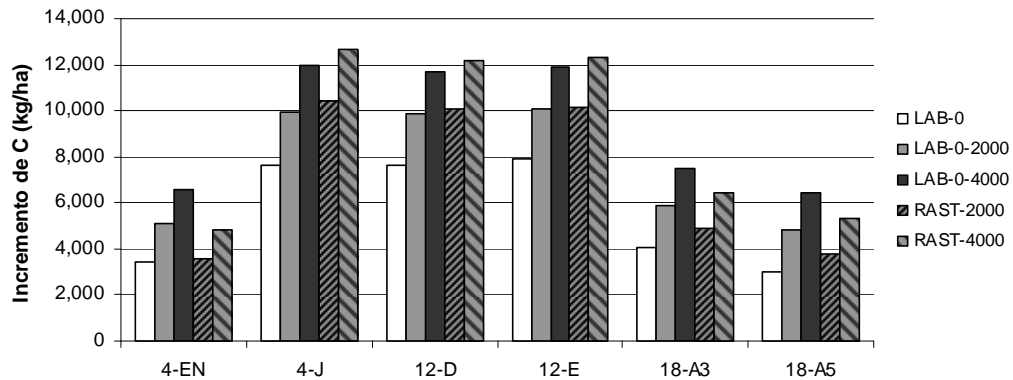


Figura 3: Acumulación total de carbono en el período de 5 años, en cada una de las 6 parcelas de estudio, con escenarios alternativos de labranza cero y aporte de residuos de cosecha de maíz.

Fue interesante observar también que la dispersión de los datos es menor, nuevamente, en el sistema de labranza cero ya sea que la práctica de siembra directa vaya acompañada de rastrojos o no. Es interesante notar que los valores más bajos con labranza cero son mayores que los valores más bajos obtenidos con labranza convencional, sugiriendo nuevamente una mayor seguridad de respuesta positiva bajo labranza cero.

Calculando la sumatoria en las diferentes parcelas de los escenarios, se observa un mayor incremento de C en los escenarios con siembra directa (Tabla 4). Más específicamente, aplicar 2.000 kg de m.s. de rastrojos con labranza cero, en las parcelas de la GMP rindió una acumulación mayor (en 6,6 % en promedio) que aplicar los mismos 2.000 kg seguidos de arado de discos. Análogamente con la aplicación de 4.000 kg de rastrojos (en 4,3 % en promedio).

Comparación de escenarios entre parcelas

La comparación global de escenarios entre parcelas pone de manifiesto una tendencia observada en los anteriores análisis, referida a la clara relación inversa entre el contenido de MOS inicial y el potencial de acumulación de COS. En la figura 4 se observa que en los terrenos de Balderrama, donde los suelos son más pobres, y parcialmente en la zona de Valenzuela, la acumulación de COS es claramente superior a la de Munaypata, donde están los suelos con mayor MOS inicial. Esta tendencia ha sido reportada por otros autores [31] [38] [22] [40].

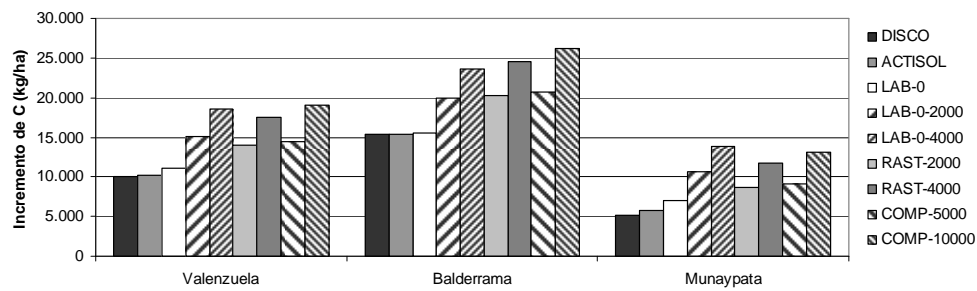


Figura 4: Acumulación de carbono en el suelo por zona y escenario evaluado.

La curva de respuesta de la acumulación de COS en función de la MOS inicial muestra esta relación inversa (Figura 5), donde el modelo que mejor responde a la dispersión de los puntos es un modelo cuadrático (Tabla 5). Esta tendencia sugeriría que la inversión en la recuperación de los suelos más degradados sería más eficiente en términos de recuperación de materia orgánica. En contraposición, las prácticas de manejo y conservación de suelos tradicionalmente se enfocan en los suelos menos degradados, pues a corto plazo la respuesta en términos de productividad agrícola suele ser mayor.

Tabla 5. Acumulación de carbono total, en cinco años de simulación, según escenarios y terrenos.

Escenario	Tendencia lineal	R ²	Tendencia cuadrática	R ²
DISCO	$y = 12709 - 6460,2x$	0,8169	$y = 19279 - 18149x + 4715,2x^2$	0,8540
ACTISOL	$y = 12462 - 6135,2x$	0,8217	$y = 18660 - 17163x + 4448,2x^2$	0,8585
LAB-0	$y = 11867 - 5319,1x$	0,8637	$y = 16802 - 14099x + 3541,7 x^2$	0,8964
LAB-0-2000	$y = 14490 - 5824,9x$	0,8421	$y = 20079 - 15769x + 4011,3x^2$	0,8762
LAB-0-4000	$y = 16587 - 6163,4x$	0,8216	$y = 22755 - 17137x + 4426,7 x^2$	0,8578
RAST-2000	$y = 15843 - 7374,7x$	0,7909	$y = 23918 - 21742x + 5795,5x^2$	0,8325
RAST-4000	$y = 18595 - 8196,3x$	0,7752	$y = 28234 - 25345x + 6917,3x^2$	0,8223
COMP-5000	$y = 16065 - 7368,8x$	0,7898	$y = 24260 - 21948x + 5880,9x^2$	0,8327
COMP-10000	$y = 19533 - 8329,2x$	0,7721	$y = 29501 - 26063x + 7153,5x^2$	0,8207

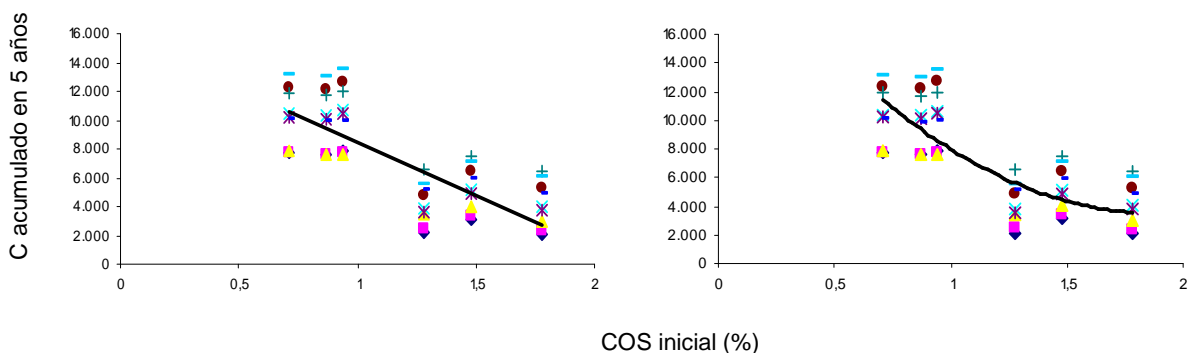


Figura 5: Tendencia del incremento de C en función del contenido de COS inicial.

Al graficar la acumulación global de carbono en función de los nueve escenarios (Figura 6), se observó que la mayor acumulación de carbono en los suelos se obtiene con la implementación de los escenarios que representan a las prácticas de aporte creciente de enmiendas humíferas. Los datos muestran que las modificaciones en el sistema de labranza por sí solas no provocan cambios rápidos en el balance de carbono, aunque sí cuando se las combina con un aporte significativo de material carbonado. La aplicación de compost en la dosis que para la GMP corresponde a una dosis de “recuperación” y no de “mantenimiento”, casi duplica (90,5% más) el aporte del escenario de manejo convencional (DISCO). La labranza cero en su concepción tradicional (con aplicación de rastros) es el segundo mejor escenario (82,8% más en LAB-0-4000) y el cuarto (49,5% más en LAB-0-2000), sugiriendo un importante potencial para la labranza cero en la recuperación de suelos en la región.

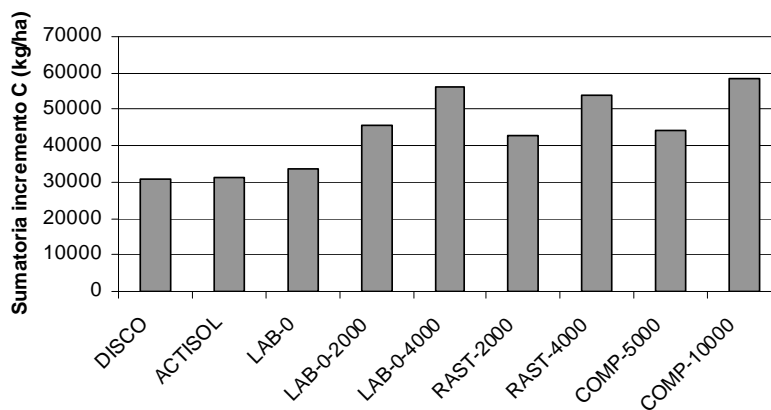


Figura 6: Acumulación de carbono en el suelo por escenario evaluado.

El tercer escenario es la aplicación de 4.000 kg de rastrojos sin labranza cero (75,8% más) el cual es una abstracción. El quinto mejor escenario es la aplicación de 5.000 kg de compost (44,8% más), o dosis de “mantenimiento” de la GMP.

Interesantemente, la labranza cero con rastrojos mostró una eficiencia cercana a la aplicación de compost. En la práctica, la aplicación a campo de esta técnica es más simple y económica ya que evita el proceso de compostaje y reduce costos de transporte en el interior de la unidad productiva.

Considerando el caso de las fincas lecheras de la región, la elaboración del compost de estiércol es importante pues permite reciclar un residuo como abono. La contribución de este abono es muy importante para lograr la recuperación de la materia orgánica del suelo, independientemente del sistema de labranza que se utilice.

No se encontró en la literatura el registro de niveles óptimos de aplicación de compost a nivel regional. Se han publicado varias experiencias con estiércol seco, aunque no aplicado a cultivos de maíz (salvo en FAO [9], donde apenas se menciona una serie de experiencias en Tiraque y Pocona) y alfalfa, que tradicionalmente no se abonan, sino esencialmente a cultivos de papa. Las dosis evaluadas en papa oscilaron entre 5.000 y 20.000 kg m.s. [28] [37], habiéndose obtenido una respuesta creciente a mayor dosis, en varias variables de respuesta.

4 Conclusiones

Todos los escenarios mostraron un balance positivo de COS luego de los 5 años de rotación maíz-maíz-alfalfa, posiblemente atribuible a la presencia de la pastura. No obstante, la tasa de acumulación fue significativamente diferente de acuerdo con los escenarios de manejo.

Los escenarios de mayor incremento de COS fueron aquellos asociados a aportes importantes de biomasa (sin embargo, dentro de rangos normales de aplicación). El resultado superior fue el escenario de aplicación de 10.000 kg m.s. ha⁻¹ de compost con labranza de discos, superando al manejo convencional en un promedio de 90,5%. Le siguió la aplicación de 4.000 kg m.s. ha⁻¹ de rastrojo bajo labranza cero (+82,8%), la aplicación de 2.000 kg m.s. ha⁻¹ de rastrojo bajo labranza cero (+49,5%) y la aplicación de 5.000 kg m.s. ha⁻¹ de compost con arado de discos (+44,8%). La mayor simplicidad y el menor costo asociados a este segundo escenario lo convierten en una opción más económica e interesante en un sistema agrícola. Sin embargo, en las fincas lecheras de la región, la realización de compost continuará siendo la práctica de manejo más adecuada.

El cambio de sistema de labranza, desde uno convencional (discos) a uno conservacionista (actisol) o inclusive a labranza cero, cuando no iba acompañado de una aplicación de enmiendas humíferas, no incrementó el COS notablemente, a pesar de que se ha asociado reiteradamente la labranza convencional con una acelerada mineralización de la materia orgánica del suelo. Los resultados fueron específicamente de +2,6% y +9,8% en promedio, respectivamente.

A pesar de lo anterior, es interesante destacar que los suelos con un contenido de MOS inicial mayor (2,7-4,5%) sí respondieron al cambio en el sistema de labranza, de convencional a conservacionista y a siembra directa, de una manera consistente. En cambio, los suelos con menor contenido inicial de MOS (1,3-2,2%) mostraron poca respuesta ante un cambio en el sistema de labranza, en contraste con otras publicaciones similares.

Los resultados obtenidos muestran una relación inversa entre el valor inicial del contenido de carbono orgánico en el suelo y la tasa de acumulación de carbono a través del tiempo. Es decir que a medida que el valor inicial del carbono orgánico del suelo disminuye, la capacidad potencial de acumulación de carbono de dicho suelo se incrementa. Esta información sugiere la importancia de destinar recursos para la recuperación de los suelos más degradados, dado que su potencial de recuperación es mayor. Esta observación contradice interesantemente el criterio usual utilizado por los técnicos de conservación de suelos, que recomienda invertir los recursos limitados en los suelos menos degradados, dado que su productividad actual es mayor.

Referencias

- [1] Andriulo, A., B. Mary y J. Guerif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, Vol. 19, N° 5, 365-377.
- [2] Apezteguía, H.P., R.C. Izaurralde y R. Sereno. 2009. Simulation study of soil organic matter dynamics as affected by land use and agricultural practices in semiarid Córdoba, Argentina. *Soil & Tillage Research* 102, 101-108.
- [3] Babu, Y. J., C. Li, S. Frohking, D. R. Nayak, A. Datta y T. K. Adhya. 2005. Modelling of methane emissions from rice-based production systems in India with the denitrification and decomposition model: Field validation and sensitivity analysis. *Current Science*, Vol. 89, N° 11.
- [4] Baize, D. 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Institut National de la Recherche Agronomique, INRA. Paris.
- [5] Batjes, N. H. 1999. Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 4100 200 031. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change & Technical Paper 30. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen-The Netherlands.
- [6] Brady, N.C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils, Twelfth Edition. Prentice Hall, Inc. 881 pp.
- [7] Bot, A. y J. Benites. 2005. The importance of soil organic matter. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Soils Bulletin 80. Rome.

- [8] FAO, 1993. Evaluación de la fertilidad de los suelos del Altiplano, Valle Central y Llanos de Bolivia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Informe Técnico AG: GCPF/BOL/018/NET. Roma.
- [9] FAO. 1999. La panoplia de la productividad agrícola. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Proyecto Fertisuelos. Documento de Campo N° 20, GCPF/BOL/018/NET. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
- [10] Fundación Simón I. Patiño. 2002. The Pairumani Agricultural Estate. Ginebra, Suiza.
- [11] Grant, B., W. N. Smith, R. Desjardins, R. Lemke y C. Li. 2004. Estimated N₂O and CO₂ emissions as influenced by agricultural practices in Canadá. *Climatic Change* 65, 315-332.
- [12] Hénin, S. y M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales Agronomiques* 15.
- [13] Huggins, D. R., G. A. Buyanovsky, G. H. Wagner, J. R. Brown, R. G. Darmody, T. R. Lesoing, G. W. Peck, M. B. Vanotti y L. G. Bundy. 1998. Soil organic C in the tallgrass prairie-derived region of the corn belt: effects of long-term crop management. *Soil & Tillage Res.* 47: 219–234.
- [14] IPCC. 2000. *Land use, land use change and forestry*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK.
- [15] ISEOS, 2007. *User's guide for the DNDC model*. Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire.
- [16] ISEOS, 2008. Papers/publications. Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire. En: <http://www.dndc.sr.unh.edu/Pubs.html> (Acceso 13.01.09)
- [17] Janzen, H. H., C. A. Campbell, R. C. Izaurralde, B. H. Ellert, N. Juma, W. B. McGill y R. P. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil & Tillage Res.* 47: 181–195.
- [18] Kohnke, H. y A.R. Bertrand. 1959. Soil conservation. McGraw-Hill. New York.
- [19] Labrador, M. J. 2001. *La materia orgánica en los agrosistemas*. Segunda Edición. Ediciones MUNDI-PRENSA. España.
- [20] Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, Vol. 304, 1623-1629.
- [21] Leip, A., G. Marchi, R. Koeble, M. Kempen, W. Britz y C. Li. 2008. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen and carbon losses from soils in Europe. *Biogeosciences* 5, 73-94.
- [22] Li, C., W. Salas y M. Los Huertos. 2004a. Quantifying carbon dynamics and greenhouse emission in agricultural soils of California: a scoping study. 500-04-

- 0.38. PTER. En: www.energy.ca.gov/reports/2004-10-08_500-04-038.pdf (Acceso 28.04.2007)
- [23] Li, C., S. Frolking, X. Xiao, B. Moore III, S. Boles, J. Qiu, Y. Huang, W. Salas, y R. Sass. 2004b. Modeling impacts of farming management alternatives on CO₂, CH₄, and N₂O emissions: A case study for water management of rice agriculture of China. *Global Biochemical Cycles*, Vol. 19.
- [24] Li, C. 2008. Quantifying soil organic carbon sequestration potential with modelling approach. En: http://www.dndc.sr.unh.edu/papers/2008_Li_C_model.pdf (Acceso 15.12.2008)
- [25] Liu, Y., Z. Yu, J. Chen, F. Zhang, R. Doluschitz y J. C. Axmacher. 2006. Changes of soil organic carbon in an intensively cultivated agricultural region: A denitrification-decomposition (DNDC) modelling approach. *Science of the Total Environment* 372, 203-214.
- [26] Meza, W. 1997. Técnicas de conservación de suelos y su efecto en la producción agrícola de la Cuenca Taquiña. En: Primer Seminario Nacional de Conservación de suelos y aguas en la agricultura. PEIRAV, DAI, PAAC, FOBOMADE, CIAPROT y INDRI. Cochabamba, Bolivia.
- [27] Mitcheil, P., P. Lakshminarayan, O. Toshitsugu y B. Babcocl. 1996. The impact of soil conservation policies on carbon sequestration in agricultural soils of the Central United States. Working paper 96-WP170. Centre for Agricultural and Rural Development. Iowa State University.
- [28] Parra, V., A. Devaux, P. Mamani, V. Orsag, R. Botello y B. Condori. 1999. Efecto de las épocas de incorporación y dosis de estiércol en la conservación de la humedad del suelo y la productividad de la papa (*Solanum tuberosum* ssp. andigena) en zonas de altura de Cochabamba. En: Dorado, L. y S. Laguna (Eds.) 2001. *Memorias del Primer Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo. La Paz.
- [29] Paustian, K., O. Andrés, H.H. Janzen, R. Lal, P. Smith, G. Tiad, H. Tiessen, M. Van Noordwijk y P.L. Woomer. 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management* 13: 230-244.
- [30] PROLADE, 1999. Las leguminosas como coberturas y abonos verdes. Proyecto Laderas, DFID y SRI. Sucre, Bolivia.
- [31] Ringius, L. 1999. *Soil Carbon sequestration and the CDM opportunities and challenges for Africa*. Report 1999:7. UNEP. Collaborating Centre on Energy and Environment. UCCEE.CICERO. ISSN: 0804-4562. University of Oslo
- [32] Robbins, M. 2004. *Carbon trading, agriculture and poverty*. World Association of Soil and Water Conservation, WASWC. Special Publication Nº 2. Thailand.

- [33] Sherrod, L. A., G. A. Peterson, D. G. Westfall y L. R. Ahuja, 2003. Cropping intensity enhances soil organic carbon and nitrogen in a no-till agroecosystem, *Soil Sci. Soc. Amer.*, 67, 1533–1543,
- [34] Siles, A. y E. Ajhuacho. 1997. Estudio del comportamiento y utilización de abonos verdes. En: Seminario Taller Nacional sobre manejo de suelos y aguas para una productividad agropecuaria sostenible. SNAG y JICA. Cochabamba, Bolivia.
- [35] Soussana, J.-F., P. Loiseau, N. Vuichard, E. Ceschia, J. Balesdent, T. Chevallier y D. Arrouays. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219-230.
- [36] Tang H., J. Qiu, E. Van Ranst, C. Li. 2005. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. *Geoderma* 134, 200-206.
- [37] Terán R. y R. Calisaya. 1999. Evaluación de abonos orgánicos en el cultivo de dos variedades de papa. En: Dorado, L. y S. Laguna (Eds.) 2001. *Memorias del Primer Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo*. Sociedad Boliviana de la Ciencia del Suelo. La Paz.
- [38] Vleeshouwer, L. y A. Verhagen. 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biology* 8: 519-530.
- [39] White, R.E. 1997. *Principles and practice of soil science. The soil as a natural resource*. Third edition. Blackwell Science Ltd.
- [40] Zhang, F., C. Li, Z. Wang y H. Wu. 2006. Modelling impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Northwest China. *Biogeosciences* 3: 451-466.