

INDICADORES DE CALIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO EN UN ANDISOL CULTIVADO

Soil organic matter quality indicators in a cultivated Andisol

Erick Zagal¹ * y Carolin Córdova¹

ABSTRACT

Agricultural practices influence the dynamics of soil organic matter (MOS) and its fractions. In this study, the following labile fractions of soil organic matter were determined: free light fraction (FLL), intraaggregate light fraction (FLI), microbial biomass and mineralized C-CO₂, on volcanic soil with different rotations, and later their use was evaluated as biological indicators of the impact of agricultural practices on the soil. The study was carried out in an eight year field experiment, with different productive systems (rotations) in a randomized complete block design. The FLL was determined by density fractionation with NaI (1.8 g cm⁻³), and FLI was obtained by sonication (1,500 J s⁻¹). Microbial biomass was quantified using the chloroform fumigation-incubation (FI) technique, and the basal soil respiration (C-CO₂ evolution) was determined by incubation for a 10-day period. Increased soil use intensity decreased (P ≤ 0.05) C and N FLL contents, from 1.69 g C-FLL kg⁻¹ soil (5-year rotation with alfalfa, *Medicago sativa* L.), to 0.49 g C-FLL kg⁻¹ (annual crop rotation). However, these contents in FLI did not show a clear and consistent tendency (P ≤ 0.05). Soil biomass C and N decreased (P ≤ 0.05) with higher soil use intensity, from 551 to 264 μg C-CO₂ g soil⁻¹ and from 106 to 35 μg N-(NO₃⁻ + NH₄⁺) g soil⁻¹, respectively. The three studied indices were appropriate indicators to determine changes in soil organic matter quality as a result of agricultural practices.

Key words: free light fraction, physical fractionation, NaI, soil microbial biomass, fumigation-incubation.

RESUMEN

El manejo agronómico influye en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS) y sus diferentes fracciones. En este estudio se determinaron fracciones activas de la MOS: fracción liviana libre (FLL), fracción liviana intraagregados (FLI), biomasa microbiana y C-CO₂ mineralizado, en un suelo volcánico cultivado con distintas rotaciones, y posteriormente se evaluó su uso como indicadores biológicos del impacto del manejo agronómico en el suelo. El estudio se realizó en un experimento de campo de ocho años, con diferentes sistemas productivos (rotaciones) en un diseño de bloques completos al azar. La FLL fue determinada por fraccionamiento físico, usando NaI (1,8 g cm⁻³) y la FLI fue obtenida por sonicación (1.500 J s⁻¹). La biomasa microbiana se cuantificó a través de fumigación-incubación (FI), y la respiración basal del suelo (evolución de C-CO₂) por incubación durante 10 días. La rotación disminuyó (P ≤ 0,05) los contenidos de C y N de la FLL, de 1,69 g C-FLL kg⁻¹ suelo (rotación con 5 años de alfalfa, *Medicago sativa* L.) a 0,49 g C-FLL kg⁻¹ de suelo (rotación con cultivos anuales). Sin embargo, estos contenidos en la FLI no mostraron una tendencia clara y consistente (P ≤ 0,05). La biomasa C y N, disminuyeron (P ≤ 0,05) con la mayor intensidad de uso del suelo, de 551 a 264 mg C-CO₂ g suelo⁻¹, y de 106 a 35 μg N-(NO₃⁻ + NH₄⁺) μg suelo⁻¹, respectivamente. Los tres índices estudiados representaron indicadores apropiados para determinar cambios en la calidad de la MOS producto del manejo agronómico.

Palabras clave: fracción liviana, fraccionamiento físico, NaI, biomasa microbiana del suelo, fumigación-incubación.

¹ Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Av. Vicente Méndez 595, Chillán, Chile.

E-mail: ezagal@udec.cl *Autor para correspondencia.

Recibido: 10 de octubre de 2003. Aceptado: 24 de mayo de 2004.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS), constituida por residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, así como la biomasa microbiana, está estrechamente relacionada con las propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo (Christensen, 1996). En la mayoría de los suelos la MOS es el principal agente estimulando la formación y estabilización de agregados, que se diferencian según su tamaño en macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$) y microagregados ($< 250 \mu\text{m}$). La incorporación de la materia orgánica a los agregados del suelo la protege de la descomposición rápida, determinando su estabilidad en el suelo (Golchin *et al.*, 1994). Por el contrario, el cultivo de los suelos favorece la descomposición de la materia orgánica debido a una mejor aireación, que estimula la actividad de los microorganismos del suelo.

Las prácticas de manejo, tales como la labranza, la rotación de cultivos, la aplicación de fertilizantes, y el manejo de los residuos, también influyen en las transformaciones de la MOS (Gregorich *et al.*, 1994; Ladd *et al.*, 1994; Haynes, 2000), determinan la cantidad y calidad de los residuos que entran al suelo, su distribución en la superficie, y el destino de estos aportes, ya sea sobre o bajo el suelo (Christensen, 1996).

El contenido de materia orgánica total en suelos agrícolas cambia lentamente a través del tiempo; así, el ciclaje de todos sus componentes puede tardar desde décadas a siglos (Biederbeck *et al.*, 1994), producto del clima, y del uso y manejo del suelo. Sin embargo, la tasa de recambio de los diferentes componentes de la MOS varía continuamente (Christensen, 1996; Graham *et al.*, 2002). El estudio de la dinámica de la MOS requiere estimar cuantitativamente la estructura y función de las diferentes fracciones que la conforman, sin embargo, no todas las fracciones definidas son verificables con métodos de fraccionamiento químico (Christensen, 1996).

Las fracciones lábiles o activas corresponden a aquellos componentes más dinámicos de la MOS, que contribuyen a la liberación de nutrientes, y

que son afectados directamente por el manejo agronómico; la materia orgánica estable o pasiva es aquella de menor reacción en el suelo. Una de las fracciones de la MOS de significancia biológica en el suelo es la biomasa microbiana, que es la masa de organismos que habita en el suelo, cuya proporción respecto de la MOS asciende del 1 a 5%, y es una fracción lábil que contiene cantidades sustanciales de N y P (Jenkinson y Ladd, 1981). Es el agente degradador de los residuos de las plantas, cuya actividad contribuye a la liberación de nutrientes y formación de CO_2 . Además de su participación en el ciclaje de nutrientes, también es importante en la agregación del suelo.

Otras fracciones lábiles de la MOS han quedado definidas a partir del fraccionamiento físico del suelo. Estos métodos intentan evitar cambios químicos de la MOS y asumen que ésta puede ser dividida principalmente en dos compartimentos, que difieren en su estructura y función (Christensen, 1996). Al respecto, Sohi *et al.* (2001) propusieron un procedimiento que determina estas fracciones, llamadas fracción liviana libre (FLL) entre agregados, fracción liviana intraagregados (FLI), que corresponde a aquella fracción protegida dentro de los microagregados, y fracción órgano-mineral (también denominada fracción pesada). Cada una de ellas tiene distintas funciones en el ciclo del C y N.

El estudio de la sensibilidad de estas fracciones al manejo agronómico resulta útil en suelos cultivados derivados de cenizas volcánicas (Andisoles), por la necesidad de evitar su degradación, y por las características particulares de estos suelos, que muestran una lenta tasa de descomposición de materiales orgánicos (Zunino *et al.*, 1982), alto contenido de alofán y humus, y una baja disponibilidad de P. Se postula que estas fracciones pueden ser usadas como indicadores biológicos que determinan el impacto temprano del manejo agronómico en la calidad de la MOS en agroecosistemas. Por ello, la presente investigación tuvo como objetivo determinar fracciones activas de la MOS en un suelo volcánico con diferente uso agrícola, aplicando la técnica de fraccionamiento físico de la MOS o separación por densidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y diseño experimental. Las muestras se obtuvieron de un ensayo en la Estación Experimental "Santa Rosa" perteneciente al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Centro Regional de Investigación Quilamapu (36°31' lat. Sur, 71°54' long. Oeste) en la temporada 1992-1993. Las características físico-químicas del suelo serie Diguillín (medial, thermic, Typic Haploxerands) fueron descritas por Zagal *et al.* (2002b). El diseño experimental fue de bloques al azar con arreglo de parcela dividida, con cuatro repeticiones. El factor rotación en seis niveles, se aplicó a la parcela principal (560 m²), y el factor fertilización, en dos niveles, a la subparcela (280 m²). Los tratamientos consistieron en una combinación de sistemas de producción agrícola y fertilización, publicados antes por Zagal *et al.* (2002b).

La intensidad de cultivo en las rotaciones estudiadas varió de la siguiente manera: cultivos anuales (4 años): rotación M-T-F-C (maíz (*Zea mays* L.)-trigo (*Triticum aestivum* L.)-frejol (*Phaseolus vulgaris* L.)-cebada (*Hordeum vulgare* L.)); rotación R-T-F-C (remolacha (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris*)-trigo-frejol-cebada); cultivos anuales (2 años) y empastadas (dos años): rotación M-T-TR(2) (maíz -trigo -trébol rosado (*Trifolium pratense* L.) 2 años); rotación R-T-TR(2) (remolacha- trigo-trébol rosado dos años); cultivos anuales (3 años) y empastadas (5 años): rotación R-T-M-A(5) (remolacha-trigo-maíz-alfalfa (*Medicago sativa* L.) 5 años); rotación R-T-M-TB/Ba(5) (remolacha-trigo-maíz-trébol blanco/ballica (*Trifolium repens* L./*Lolium perenne* L.) 5 años) (Cuadro 1). Los niveles de fertilización estudiados correspondieron a la aplicación de 70 y 100% de la dosis óptima recomendada, según análisis de suelos y región del país.

Obtención de la muestra. Las muestras de suelo se colectaron en el mes de julio del 2000, a 10 cm de profundidad. En las rotaciones con cultivos anuales, las muestras se obtuvieron después de la temporada siguiente al cultivo de cebada. En los sistemas mixtos de cultivo, las muestras se obtuvieron después de que el suelo tuvo co-

bertura de trébol rosado. En tanto que en las rotaciones con 3 años de cultivo anual y 5 años de pradera, las muestras de suelo se colectaron después de que el suelo estuvo con 5 años de alfalfa y trébol blanco/ballica. Al momento del muestreo la mayor parte de las parcelas terminaba un período bajo empastadas (2 ó 5 años).

Análisis. En ambos experimentos se determinó la fracción liviana libre de la materia orgánica (FLL) y la fracción liviana intraagregados (FLI), a través de fraccionamiento físico de la MOS (separación por densidad con NaI, 1,8 g cm⁻³) (Sohi *et al.*, 2001). Se analizó en ambas fracciones el contenido de C y N por combustión seca.

Además, se determinó la biomasa C y biomasa N de los suelos, por la técnica de fumigación-incubación (FI) (Joergensen, 1995). La aplicación de esta técnica permitió la determinación de la tasa de respiración de los suelos (muestras no fumigadas usadas como control de la actividad basal) en un período de 10 días.

El C total del suelo (C₁₀) se determinó por combustión húmeda y colorimetría (Sims y Haby, 1970), y el N total del suelo (N₁₀) por oxidación húmeda usando el método de Kjeldhal. La concentración de C(N) en la fracción liviana (libre e intraagregados) se analizó con un analizador de elementos en línea con un espectrómetro de masas (ANCA-MS, Europa Scientific Ltd., Cheshire, United Kingdom) (Barrie, 1991).

Análisis estadístico. Los resultados se sometieron a análisis de varianza (prueba F, P ≤ 0,05). La separación de medias se realizó de acuerdo al test de diferencia mínima significativa (DMS). Análisis de correlación simple se aplicó cuando correspondía (P ≤ 0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rango de C₁₀ del suelo Diguillín fue levemente inferior al reportado por Aguilera *et al.* (1997) en suelos volcánicos, pero superior a los reportados por Stolpe y Kuzila (2002) para la misma serie de suelo. Los valores mayores fueron alcanzados por los sistemas de producción ganadera que incluyeron 5 años de pradera, seguidos

por el sistema M-T-TR(2), los cuales mostraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) del resto de las rotaciones. No hubo diferencias estadísticas entre estos últimos (Cuadro 1).

Los valores de N_{to} registrados fueron inferiores a los informados por Nishiyama *et al.* (2001). De forma similar al C_{to} , las rotaciones con 5 años de pradera de alfalfa alcanzaron los valores más altos y significativos ($P \leq 0,05$) respecto de aquellas encabezadas por maíz, que obtuvieron valores intermedios, y las rotaciones de cultivo que comienzan con remolacha, que registraron los valores más bajos (Cuadro 1).

Las variaciones en el C_{to} y N_{to} se explican por las diferentes entradas y salidas de C y N desde cada sistema de rotaciones de cultivo, determinadas por los diferentes manejos agronómicos (Gregorich *et al.*, 1994). Ello provoca distinta cantidad y calidad del C y N que entra al suelo a través de los residuos de las especies cultivadas, y también diferentes grados de perturbación del suelo por el

cultivo. Esto coincide con lo encontrado por Campbell y Zentner (1993), quienes obtuvieron diferentes niveles de MOS en rotaciones con distinto cultivo después de 9, 13, 16 y 24 años, atribuyendo estas diferencias a la producción de residuos de los cultivos de cada rotación.

Los valores más altos y significativos ($P \leq 0,05$) de C_{to} obtenidos en los sistemas que incluyeron praderas de 5 años, concuerda con lo informado por Haynes (1999a, b), quien reportó que la acumulación de materia orgánica en sistemas de cultivo anual convertidos a pradera durante 5 años, es debida a mayores entradas de biomasa radical y aérea desde los pastos, y a la descomposición más lenta de materia orgánica por la ausencia de labores anuales de cultivo.

El alto contenido de C_{to} alcanzado por la rotación M-T-TR(2), cuyo valor fue estadísticamente ($P \leq 0,05$) igual al registrado por las rotaciones con 5 años de praderas, podría atribuirse según Haynes (2000) a una probable acumulación de

Cuadro 1. Carbono y nitrógeno total y fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo bajo diferentes rotaciones de cultivo en un suelo serie Diguillín (medial, thermic, Typic Haploxerands) en un experimento de campo de corto plazo.

Table 1. Total carbon and nitrogen content and labile soil organic matter fractions under different cropping systems from a Diguillín series (medial, thermic, Typic Haploxerands) soil in a short term field experiment.

Rotaciones ^a	Suelo		Biomasa				C mineralizado			
	C_{to}^d	N_{to}^e	C_{biom}^f	C_{biom}/C_{to}	N_{biom}^g	N_{biom}/N_{to}	C/N	C_{min}^h	C_{min}/C_{to}	Q_{met}^i
	---g kg ⁻¹ ---		μg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo		μg N(N ₀₃ +NH ₄) g ⁻¹ suelo			μg C-CO ₂ g ⁻¹ suelo		μg C-CO ₂ g ⁻¹ C _{biom}
M-T-F-C	45,77	4,07	375,92	0,81	35,27	0,88	10,11	353,13	0,77	1,08
R-T-F-C	43,61	3,99	264,52	0,61	44,42	1,13	6,63	163,15	0,37	0,76
M-T-TR(2)	49,94	4,29	314,41	0,63	34,99	0,82	9,59	103,86	0,21	0,37
R-T-TR(2)	44,55	3,95	273,11	0,61	44,38	1,12	6,13	137,63	0,31	0,67
R-T-M-A(5)	50,39	4,72	551,09	1,09	80,70	1,72	7,44	139,53	0,28	0,26
R-T-M-TB/Ba(5)	51,81	4,41	496,79	0,96	106,39	2,42	4,69	149,36	0,29	0,32
DMS ^b (0,05)	2,65	0,36	118,56	0,25	8,18	0,19	1,66	33,80	0,07	0,37
CV ^c (%)	3,69	5,69	29,75	30,30	13,50	13,59	21,28	18,44	18,92	61,06

^a M: maíz; R: remolacha; T: trigo; TR: trébol rosado; F: frejol; C: cebada; A: alfalfa; TB/Ba: trébol blanco/ballica. (2) dos años; (5) cinco años. En orden de aparición en el cuadro, las rotaciones corresponden a: IV, II, III, I, V, y VI, respectivamente, descritas en Zagal *et al.* (2002b).

^b DMS: Diferencia mínima significativa $P \leq 0,05$; ^c CV: Coeficiente de variación; ^d C_{to} : C total; ^e N_{to} : N total; ^f C_{biom} : C-biomasa; ^g N_{biom} : N-biomasa; ^h C_{min} : C-mineralizado. Respiración basal (10 días); ⁱ Q_{met} : Cuociente metabólico ($Q_{met} = C_{min}/C_{biom}$).

materia orgánica bajo la fase de 2 años de pradera después de 2 años de uso intenso del suelo. Pero, por otro lado, podría estar causado por el aporte de C del cultivo de maíz como inicio de la rotación, más que por la sustitución de cultivos anuales por 2 años de pradera de trébol rosado, ya que las rotaciones que comienzan con remolacha (R-T-F-C y R-T-TR(2)) presentaron contenidos de C y N más bajos (Cuadro 1).

El rango alcanzado por la razón C/N del suelo se situó dentro de lo informado para suelos agrícolas (Gregorich *et al.*, 1994), y no se registró diferencia significativa entre las rotaciones (datos no mostrados).

El tamaño de la biomasa C (C_{biom}) y su proporción respecto al C_{to} ($C_{\text{biom}}/C_{\text{to}}$) registró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto del manejo agronómico. Los valores más altos y significativos ($P \leq 0,05$) de C_{biom} entre tratamientos se obtuvieron en los sistemas que incluyeron 5 años de praderas. No se observaron diferencias ($P \leq 0,05$) entre los sistemas de uso intensivo del suelo (sólo cultivos anuales) respecto a los alternativos con pradera de trébol rosado. La tendencia mostró mayores valores de C_{biom} en las rotaciones que se inician con el cultivo de maíz (Cuadro 1).

Los valores mayores de C_{biom} bajo los sistemas que incluyen 5 años de praderas, se explicarían por el mayor aporte de C al suelo desde la biomasa aérea y radicular de las praderas, que estimulan el desarrollo de la población microbiana (Ladd *et al.*, 1994), en contraste con los suelos que estuvieron bajo laboreo, donde se retorna menos cantidad de materia orgánica al suelo (Haynes, 2000). Por otro lado, la liberación de exudados por parte de las raíces, además del aporte en materia orgánica (Manjaiah *et al.*, 2000), constituyen fuentes importantes de obtención de energía para los microorganismos.

La proporción de C_{biom} del C_{to} del suelo fue generalmente menor al 1%, y las mayores proporciones de C_{biom} se registraron en sistemas con 5 años de pradera y en la rotación M-T-TR(2) (Cuadro 1). Ello puede ser explicado por los altos niveles de C_{to} que presentó el suelo (sobre el 4%). El

tamaño de la biomasa está relacionado con el C_{to} (Witter, 1996), y en este estudio el grado de asociación ($P \leq 0,05$) obtenido entre ambos fue de 64% (Cuadro 2).

Los tratamientos de fertilización no afectaron al C_{biom} del suelo, contrario a lo informado por Ladd *et al.* (1994). Existiría una relación entre la fertilización y el incremento de la biomasa microbiana, porque la fertilización incrementa la producción de los cultivos, y con ello los retornos de C(N) orgánico al suelo, que constituyen el sustrato para el crecimiento de la población microbiana. Puede ser que en este estudio la dosis de aplicación de 70% fue suficiente para mantener altos rendimientos de cultivo, por lo que la materia orgánica no fue afectada.

En cambio se produjo una interacción entre la fertilización aplicada y la rotación sobre el N de la biomasa (N_{biom}), cuya causa está en los altos valores registrados en la rotación M-T-F-C, por lo que se consideró sólo el efecto de la intensidad de uso sobre el N_{biom} . Los valores de N_{biom} se observaron dentro de los reportados por McCarty *et al.* (1995), quienes también usaron el método de fumigación-incubación. Tanto el N_{biom} como la relación $N_{\text{biom}}/N_{\text{to}}$ mostraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) por efecto de la rotación, observándose mayores cantidades en los sistemas con inclusión de empastadas por cinco años (Cuadro 1).

La respiración basal de la biomasa del suelo Diguillín fue estadísticamente distinta ($P \leq 0,05$) en los diferentes sistemas de producción agrícola estudiados (Cuadro 1). Las rotaciones de uso más intenso del suelo alcanzaron los mayores valores ($P \leq 0,05$) de respiración en 10 días, y particularmente la rotación M-T-F-C superó el doble de las cifras registradas por el resto de las rotaciones. Valores intermedios similares a los de la rotación R-T-F-C y sin diferencia entre ellos ($P \leq 0,05$), fueron alcanzados por las rotaciones con praderas de 5 años. El menor valor ($P \leq 0,05$) se registró bajo la rotación M-T-TR(2) (Cuadro 1).

Para determinar la actividad microbiana de la biomasa, ésta debe ser asociada con el contenido

de C_{10} del suelo y con el C mineralizado (C_{min}) (Gregorich *et al.*, 1994). Hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre las rotaciones en la proporción del (C_{min}) respecto del C_{10} del suelo, o cociente microbiano ($Q_{mic} = C_{min}/C_{10}$). De forma similar a la respiración basal, los valores significativamente más altos ($P \leq 0,05$) fueron obtenidos de las rotaciones con uso más intenso del suelo, y la cifra más baja ($P \leq 0,05$) se produjo en la rotación M-T-TR(2) (Cuadro 1).

A partir del C_{min} desde la biomasa del suelo y del C_{biom} , se obtuvo el cociente metabólico ($Q_{met} = C_{min}/C_{biom}$) o eficiencia de conversión de C (Haynes, 1999a). También se observaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre tratamientos, sin embargo, la tendencia fue distinta, ya que el valor de Q_{met} en la rotación R-T-TR(2) se aproximó al valor observado para las rotaciones con cultivo anual (Cuadro 1).

Se observó una mayor degradación del C_{10} bajo las dos rotaciones de uso más intenso del suelo que en las rotaciones que incluyeron praderas; así también, las primeras registraron los valores para el Q_{met} y el Q_{mic} más altos (Cuadro 1). Este último ha sido señalado como indicador de los cambios en la disponibilidad de la materia orgánica, y por lo general se asocia con el contenido de C del suelo (Haynes, 1999a), sin embargo, en este estudio la tendencia observada fue diferente a la descrita, ya que las rotaciones con mayores contenidos de C_{10} y C_{biom} mostraron los valores más bajos de C_{min} , y con ello el Q_{mic} fue menor bajo suelos con empastadas y más alto en sistemas de cultivo arables, demostrado también por un grado de asociación igual a -0,41 entre C_{10} y Q_{mic} (Cuadro 2). Al respecto, se ha atribuido una mayor actividad metabólica de la biomasa bajo condiciones limitantes para su desarrollo, por ejemplo Chander y Brookes (1991) registraron un incremento de la actividad de la población microbiana como respuesta a altas concentraciones de metales pesados en el medio cuando es comparada con los suelos no contaminados. En sistemas de uso intensivo del suelo con cultivos anuales, donde la disponibilidad de material orgánico fue más limitada durante los 8 años de cultivo, hubo una respuesta similar a la experiencia descrita anteriormente, puesto que los valo-

res de Q_{met} reflejaron una mayor actividad respiratoria por unidad de biomasa.

Respecto al fraccionamiento físico por densidad de la MOS, varios autores (Christensen, 1996; Haynes 1999b, 2000; Sohi *et al.*, 2001; Freixo *et al.*, 2002) han informado que a través de esta metodología se pueden evaluar los compartimentos lábiles de la MOS que son más sensibles al manejo agrícola que el C_{10} o N_{10} en suelos de clima templado. En Chile, Zagal *et al.* (2002a) aplicaron una aproximación al fraccionamiento físico determinando sólo la FLL a través de sedimentación en un suelo volcánico (serie Santa Bárbara). Sin embargo, se señalaron algunas limitaciones del método utilizando sedimentación, por la re-suspensión de partículas minerales del suelo. Los valores de C(N) FLL reportados por Zagal *et al.* (2002a) fueron más altos que los obtenidos en este estudio.

En este estudio se registraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre rotaciones de cultivo, en el contenido de C en la FLL (C-FLL), en la fracción liviana intraagregados (C-FLI) y en el contenido de N en la FLL (N-FLL). Sin embargo, no hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en los contenidos de N en la FLI (N-FLI) (Cuadro 3).

En el contenido de C-FLL los valores significativamente más altos ($P \leq 0,05$) se registraron bajo suelos con praderas, particularmente la rotación R-T-M-A(5), que alcanzó el contenido de C-FLL mayor. Las dos rotaciones con uso intensivo del suelo (4 años de cultivos anuales) registraron los valores menores ($P \leq 0,05$) del contenido de C en la fracción, siendo el más bajo en la rotación R-T-F-C (Cuadro 3). Por otro lado, el contenido de C-FLL fue más sensible que el mostrado por el C_{10} . De esta forma, el contenido de C-FLL fue significativamente mayor ($P \leq 0,05$) en las rotaciones R-T-M-A(5) y M-T-TR(2), con respecto al resto de los tratamientos R-T-M-TB/Ba(5) > R-T-TR(2) > M-T-F-C > R-T-F-C. El contenido de N-FLL mostró la misma tendencia (Cuadro 3).

La rotación que incluyó 3 años de cultivo anual más 5 años de alfalfa, mostró el efecto de la acumulación de material vegetal de la pradera, que

Cuadro 2. Correlaciones entre las fracciones lábiles de la materia orgánica en un Andisol serie Digullín (medial, thermic, Typic Haploxerands) bajo diferentes rotaciones de cultivo en un experimento de campo de corto plazo.
Table 2. Correlations between labile soil organic fractions from an Andisol, Digullín series soil (medial, thermic, Typic Haploxerands) under different cropping systems in a short term field experiment.

	Q_{mic}	C_{biom}	C_{biom}/C_{to}	Q_{met}	N_{biom}	N_{biom}/N_{to}	C_{to}	N_{to}	C_{FLL}	C_{FLL}/C_{to}	N_{FLL}	N_{FLL}/N_{to}	C_{FLI}	C_{FLI}/C_{to}	N_{FLI}	N_{FLI}/N_{to}
C_{min}	0,99*	-	-	0,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Q_{mic}	-	-	-	0,61	-	-	-0,41	-	-	-	-0,42	-	-	-	-	-
C_{biom}	-	0,98	-	0,74	0,83	0,75	0,65	0,72	0,54	0,50	0,51	0,48	-	-	-	-
C_{biom}/C_{to}	-	-	-	0,71	0,77	0,71	0,51	0,65	0,48	0,45	0,44	0,41	-	-	-	-
Q_{met}	-	-	-	0,49	-0,42	-0,42	-0,61	-0,54	-0,52	-0,47	-0,51	-0,49	-	-	-	-
N_{biom}	-	-	-	0,99	0,99	0,99	0,65	0,49	0,43	-	-	-	-	-	-	-
N_{biom}/N_{to}	-	-	-	0,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C_{to}	-	-	-	-	0,98	0,65	0,54	0,62	0,58	0,52	0,58	0,52	-	-	-	-
N_{to}	-	-	-	-	0,43	-	-	0,42	-	-	-	-	-	-	-	-
C_{FLL}	-	-	-	-	-	-	0,99	0,99	0,95	0,84	0,79	0,54	0,84	0,79	0,54	0,44
C_{FLL}/C_{to}	-	-	-	-	-	-	0,99	0,98	0,94	0,83	0,80	0,53	0,83	0,80	0,53	0,46
N_{FLL}	-	-	-	-	-	-	-	0,96	0,85	0,80	0,51	0,42	0,85	0,80	0,51	0,42
N_{FLL}/N_{to}	-	-	-	-	-	-	-	0,81	0,76	0,47	-	-	0,81	0,76	0,47	-
C_{FLI}	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99	0,47	-	-	0,99	0,47	-	-
C_{FLI}/C_{to}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	-	-	0,44	-	-	-
N_{FLI}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99	0,99

* Coeficiente de correlación r ($P \leq 0,05$).

(-) Valor no significativo ($P \leq 0,05$).

C_{min} : C mineralizado en 10 días; Q_{mic} : C biomasa; Q_{met} : C biomasa; Q_{to} : C total; N_{to} : N total; C_{FLL} : contenido de C en la fracción liviana libre de la materia orgánica; N_{FLL} : contenido de N en la fracción liviana libre de la materia orgánica; C_{FLI} : contenido de C en la fracción liviana intraagregados de la materia orgánica; N_{FLI} : contenido de N en la fracción liviana intraagregados de la materia orgánica.

Cuadro 3. Contenidos de carbono y nitrógeno en la fracción liviana libre (FLL) e intraagregados (FLI) de la materia orgánica en un Andisol serie Diguillín (medial, thermic, Typic Haploxerands) bajo diferentes rotaciones de cultivo en un experimento de campo de corto plazo.

Table 3. Carbon and nitrogen contents in the free (FLL) and intra-aggregate (FLI) light fractions of organic matter in an Andisol, Diguillín series (medial, thermic, Typic Haploxerands) soil under different crop rotations in a short term field experiment.

Rotaciones ^a	Fracción liviana libre (FLL)		Fracción liviana intraagregados (FLI)	
	g C-FLL kg ⁻¹ suelo	g N-FLL kg ⁻¹ suelo	g C-FLI kg ⁻¹ suelo	g N-FLI kg ⁻¹ suelo
	M-T-F-C	0,77	0,05	0,13
R-T-F-C	0,49	0,04	0,07	0,01
M-T-TR(2)	1,32	0,10	0,17	0,01
R-T-TR(2)	0,90	0,07	0,12	0,01
R-T-M-A(5)	1,69	0,14	0,18	0,02
R-T-M-TB/Ba(5)	1,00	0,07	0,10	0,01
DMS ^b (0,05)	0,46	0,04	0,06	ns
CV ^c (%)	29,49	32,70	31,92	57,14

^a M: maíz; R: remolacha; T: trigo; TR: trébol rosado; F: frejol; C: cebada; A: alfalfa; TB/Ba: trébol blanco/ballica. En orden de aparición en el cuadro, las rotaciones corresponden a: IV, II, III, I, V, y VI, respectivamente, descritas en Zagal *et al.* (2002b).

^b Diferencia mínima significativa $P \leq 0,05$.

^c Coeficiente de variación.

incrementa el tamaño del contenido de C lábil a la forma de FLL. En el contenido C-FLL en la rotación M-T-TR(2) se observaron valores más altos que en la rotación que incluyó 5 años de TB/Ba. Dado que la FLL es un pool que refleja en el suelo la composición de los cultivos (Freixo *et al.*, 2002) y el estado de descomposición de la materia orgánica adicionada por ellos (Gregorich *et al.*, 1994), los altos valores del contenido de C-FLL en la rotación M-T-TR(2) pueden explicarse por algunas de las siguientes causas: i) la influencia del bajo nivel de residuos del cultivo de remolacha en la rotación R-T-M-TB/Ba(5), ii) el menor rendimiento de la pradera TB/Ba en los dos últimos años de su ciclo por encontrarse en estados avanzados de producción (el rendimiento en materia seca de la pradera de TB/Ba fue menor en 4 t MS ha⁻¹ respecto a la de TR), iii) la persistencia del C derivado del cultivo de maíz. Algo similar también fue reportado por Haynes (2000) en sistemas de producción mixta, quien afirmó que es posible que se incrementen las fracciones lábiles por el aumento de C en la fase de la pradera, y similarmente puede ocurrir una disminución de dichas fracciones en la fase de cultivo anual del suelo, aunque el C₁₀ no muestre variación. Respecto de este último, los resultados obtenidos en este estudio mostraron que el C₁₀ en la rotación R-T-M-TB/Ba (5 años) regis-

tró un valor más alto que aquel en las rotaciones que incluyeron 2 años de trébol rosado, especialmente sobre la rotación R-T-TR(2).

A partir del contenido de C en la fracción y en el suelo, se obtuvo la proporción del C en la fracción respecto del C₁₀ (C-FLL/C₁₀), que fue más baja que las reportadas por Bremer *et al.* (1994) (de 9 a 24%). De acuerdo a estos valores, fue posible distinguir dos grupos significativamente distintos ($P \leq 0,05$) entre las seis rotaciones. El primero de ellos, compuesto por el suelo bajo la rotación R-T-M-A(5), seguida por la rotación M-T-TR(2) y R-T-TR(2). De esta forma, el segundo grupo quedó definido por las rotaciones con valores menores de porcentaje de C-FLL respecto del C₁₀, y fueron R-T-F-C, M-T-F-C y R-T-M-TB/Ba(5) (Figura 1). El análisis anterior constituye un ejemplo de la utilidad de la FLL como herramienta de evaluación de sistemas mixtos de producción.

El mayor contenido de N en la FLL fue registrado en la rotación R-T-M-A(5), que alcanzó 0,14 g N-FLL kg suelo⁻¹. Valores intermedios fueron mostrados por los sistemas mixtos con 2 años de pradera de trébol rosado (rotaciones M-T-TR(2) y R-T-TR(2)) y en la rotación R-T-M-TB/Ba(5). Por lo tanto, los valores más bajos del contenido

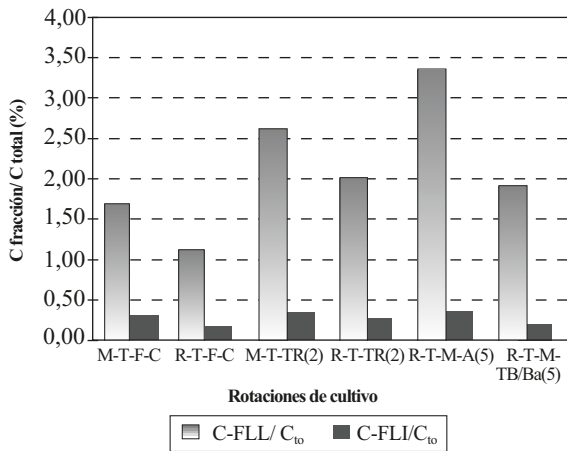


Figura 1. Relación entre el carbono en la fracción liviana libre (FLL) e intraagregados (FLI) de la materia orgánica y el carbono total en un Andisol serie Diguillín (medial, thermic, Typic Haploxerands) bajo diferentes rotaciones de cultivo en un experimento de campo de corto plazo.

Figure 1. Relation between carbon in the free (FLL) and intra-aggregate (FLI) light fractions of organic matter to total carbon in an Andisol, Diguillín series (medial, thermic, Typic Haploxerands) soil under different crop rotations in a short term field experiment.

M: maíz, R: remolacha, T: trigo, TR: trébol rosado; F: frejol, C: cebada, A: alfalfa, TB/Ba: trébol blanco/ballica.

Rotaciones corresponden a IV, II, III, I, V, y VI, respectivamente, descritas en Zagal *et al.* (2002b).

C-FLL: contenido de carbono en la fracción liviana libre; C₁₀: carbono total del suelo, C-FLI: contenido de carbono en la fracción liviana intraagregados.

de N-FLL fueron registrados bajo rotaciones con uso más intensivo del suelo. Hubo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre el valor más alto registrado de N-FLL y el resto de los tratamientos (Cuadro 3).

De la misma forma, la proporción de N en la fracción respecto al N₁₀ (N-FLL/N₁₀) fue significativamente mayor ($P \leq 0,05$) entre la rotación que incluyó 5 años de alfalfa, seguida de la rotación M-T-TR(2), y las demás rotaciones (Figura 2).

Según estos resultados, la FLL obtenida por fraccionamiento físico del suelo demuestra que a mayor intervención por labores de cultivo, la FLL disminuye, especialmente si se observa la ten-

dencia decreciente del contenido de C-FLL en función del aumento de la rotación. Esto permite la utilización satisfactoria del contenido de C-FLL para evaluar los cambios ocurridos en la MOS producto del manejo de producción de diferentes agro-ecosistemas.

La fracción FLI obtenida en el suelo serie Diguillín, o las partículas de material orgánico protegido dentro de los microagregados (Sohi *et al.*, 2001), mostró alta variación en cada una de sus determinaciones (Cuadro 3). El contenido de C-FLI se encontró bajo los rangos que se han reportado para dicho contenido de C, que van de 0,9 a 2,6 g C-FLI kg⁻¹ de suelo (Sohi *et al.*, 2001), y de 0,3 a 0,5 g C-FLI kg⁻¹ de suelo (Freixo *et al.*, 2002). Los contenidos de C en la fracción

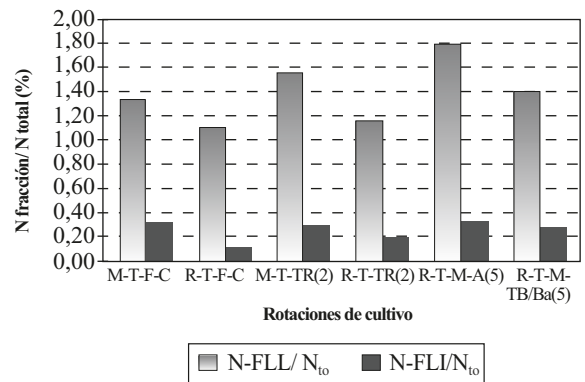


Figura 2. Relación entre el nitrógeno en la fracción liviana libre (FLL) e intraagregados (FLI) de la materia orgánica y el nitrógeno total en un Andisol serie Diguillín (medial, thermic, Typic Haploxerands) bajo diferentes rotaciones de cultivo en un experimento de campo de corto plazo.

Figure 2. Relation between nitrogen in the free (FLL) and intra-aggregate (FLI) light fractions in organic matter and total nitrogen in an Andisol, Diguillín series (medial, thermic, Typic Haploxerands) soil under different crop rotations in a short term field experiment.

M: maíz, R: remolacha, T: trigo, TR: trébol rosado; F: frejol, C: cebada, A: alfalfa, TB/Ba: trébol blanco/ballica.

Rotaciones corresponden a IV, II, III, I, V, y VI, respectivamente, descritas en Zagal *et al.* (2002b).

N-FLL: contenido de nitrógeno en la fracción liviana libre, N₁₀: nitrógeno total del suelo, N-FLI: contenido de nitrógeno en la fracción liviana intraagregados.

intraagregados (C-FLI) y de N (N-FLI) sólo representaron una pequeña proporción de los contenidos de C_{10} y N_{10} del suelo (Figuras 1 y 2).

A pesar de las diferencias estadísticas ($P \leq 0,05$) registradas en el contenido de C-FLI, no se observó una tendencia clara y consistente. Así, no se observó el efecto de la introducción de pradera (2 años) en las rotaciones de cultivos anuales. De igual forma tampoco se observaron tendencias en la proporción de C-FLI respecto del C_{10} (C-FLI/ C_{10}) (Figura 1).

Los resultados de N-FLI de acuerdo a la rotación, no registraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) ni se relacionaron con los resultados de N en la fracción liviana (N-FLL) (Cuadro 2).

De esta manera, los bajos valores del contenido de C registrados en la fracción FLI, y la escasa consistencia de los resultados, podrían indicar que en el suelo serie Diguillín ocurre una rápida estabilización química del C de la FLL en complejos órgano-minerales. Esto impediría el flujo de materia orgánica en vías de degradación hacia el interior de los agregados estables del suelo (Sohi *et al.*, 2001), enlazándose con el Al del material amorfo no cristalino (alofán) que caracteriza a estos suelos. Probablemente, el mecanismo químico por el cual la fracción orgánica de la FLL es estabilizada en suelos volcánicos sea de tal relevancia, que dificulta la formación de una fracción FLI. Esto querría decir, que dada la naturaleza de los suelos volcánicos, el pool lábil de C(N)-FLL en estos suelos dominaría preferentemente respecto del C(N)-FLI.

Las fracciones lábiles de la MOS estudiadas se relacionaron con el contenido de C_{10} y N_{10} del suelo, lo que corrobora las tendencias descritas anteriormente, y a su vez coinciden con las reportadas por Haynes (2000). Las correlaciones indican un grado de asociación positiva entre el C_{10} (N_{10}) y C(N)-FLL, reflejando esta última los cambios en la materia orgánica lábil producidos en las rotaciones con baja y media rotación, que se mostraron siempre diferentes de los sistemas de alta intensidad de uso (cultivos anuales) (Cuadro 2).

Por otro lado, el contenido de C de la FLI se relacionó con el C_{10} y obtuvo un alto grado de asociación con el CLF y con el NLF, lo que significa que existe una dinámica común entre estas fracciones y el C_{10} (Cuadro 2). El contenido de N-FLI alcanzó correlaciones significativas con el C-FLL, C-FLI y con el N-FLL, sin embargo, no se relacionó significativamente con el C_{10} ni el N_{10} (Cuadro 2).

El C_{biom} se correlacionó con el C_{10} del suelo y con el contenido de C de la FLL, lo que coincide con lo reportado por otros autores (Biederbeck *et al.*, 1994; Witter, 1996). La proporción de C_{min} desde la biomasa (Q_{met}) se relacionó inversamente con el C_{10} , lo que implica que a bajos contenidos de C_{10} el C respirado fue mayor por unidad de biomasa. Por otro lado, la biomasa del suelo y la actividad microbiana no se relacionaron ($P \leq 0,05$) con el C-FLI y N-FLI (Cuadro 3), lo que se explica por la variabilidad de los resultados, pero es necesario también considerar la ubicación espacial que ocupa el C(N) de la fracción intraagregados, que al encontrarse protegido dentro de los agregados es menos disponible al ataque microbiano.

El N_{biom} registró asociación significativa ($P \leq 0,05$) con el N_{10} del suelo y contenido de C de la FLL, pero no se relacionó con el contenido de N de la FLL. En general y para este estudio, las determinaciones de N mostraron una variabilidad mayor que aquellas de C. Otros autores han reportado una correlación positiva entre la N_{biom} y el contenido de N de la FLL (Biederbeck *et al.*, 1994).

CONCLUSIONES

A través de la técnica de fraccionamiento físico de la materia orgánica, separación por densidad, aplicada en suelos volcánicos, fue posible obtener las fracciones lábiles de la materia orgánica del suelo, fracción liviana libre y fracción liviana intraagregados, que se relacionan con la dinámica de transformación de la materia orgánica en el suelo.

El contenido de C(N) de la FLL y su proporción respecto al C(N) total del suelo fueron diferen-

tes según la rotación, registrándose una disminución a medida que se incrementó el cultivo del suelo como respuesta a los balances de C(N) propios de cada sistema productivo.

La biomasa microbiana y fracción liviana libre de la materia orgánica del suelo (rendimiento, contenido de C y N en la fracción liviana libre) fueron sensibles al manejo agronómico y/o uso del suelo, apareciendo como indicadores biológicos apropiados para determinar los cambios tempranos en la calidad de la MO en el suelo.

La determinación de la fracción liviana libre de la materia orgánica fue mejor aislada que la fracción liviana intraagregados de la materia orgánica del suelo, posiblemente por la naturaleza de los suelos volcánicos, donde aparentemente

mecanismos químicos estabilizan en forma rápida el material orgánico en complejos órgano-minerales.

RECONOCIMIENTOS

Al financiamiento entregado por el proyecto FONDECYT 1990456. Al Ingeniero Agrónomo D. Nicasio Rodríguez, del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Centro Regional de Investigación Quilamapu, por facilitar el ensayo de campo para este estudio. Al Centro de Investigación Rothamsted (UK) por análisis de C(N). Al Departamento de Suelos de la Universidad de Concepción por permitir el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Aguilera, S.M., G. Borie, P. Peirano, and G. Galindo. 1997. Organic matter in volcanic soils in Chile: chemical and biochemical characterization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28:899-912.
- Barrie, A. 1991. New methodologies and approaches in stable isotope analysis. p. 3-5. Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies. *Proceedings of a Symposium, Vienna.* 1-5 October 1990. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Biederbeck, V.O., H.H. Janzen, C.A. Campbell, and R.P. Zentner. 1994. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biol. Biochem.* 26:1674-1656.
- Bremer, E., H.H. Janzen, and A.M. Johnston. 1994. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Can. J. Soil Sci.* 74:131-138.
- Campbell, C.A., and R.P. Zentner. 1993. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:1034-1040.
- Chander, K., and P. Brookes. 1991. Microbial biomass dynamics during the decomposition of glucose and maize in metal-contaminated and non contaminated soils. *Soil Biol. Biochem.* 23:917-925.
- Christensen, B.T. 1996. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: Revision of model structure. p. 144-160. *In* Powlson D. S., P. Smith, and J. Smith (eds.). Evaluation of soil organic matter models using long-term datasets. U. NATO ASI Series I: Global Environmental Change. Vol I 38. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Freixo, A.A., P.L.O. De A. Machado, H.P. Dos Santos, C.A. Silva, and F. De S. Fagigas. 2002. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferrasol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 64:221-230.
- Golchin, J., M. Oades, J.O. Skemstad, and P. Clarke. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32:1043-1068.
- Graham, M.H., R.J. Haynes, and J.H. Meyer. 2002. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biol. Biochem.* 34:93-102.
- Gregorich, E.G., M.R. Carter, D.A. Angers, C.M. Monreal, and B.H. Ellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-385.

- Hassink, J., A.P. Whitmore, and J. Kubát. 1997. Size and density fractionation of soil organic matter and the physical capacity of soils to protect organic matter. *Eur. J. Agron.* 7:189-199.
- Haynes, R.J. 1999a. Size and activity of the soil microbial biomass under grass and arable management. *Biol. Fertil. Soils* 30:210-216.
- Haynes, R.J. 1999b. Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys. *Soil Biol. Biochem.* 31:1821-1830.
- Haynes, R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32:211-219.
- Jenkinson, D.S., and J.N. Ladd. 1981. Microbial biomass in soil, measurement and turnover. p. 415-472. *In* E.A. Paul y J.N. Ladd (eds.). *Soil Biochemistry*, Vol 5. Marcel Dekker, New York, USA.
- Joergensen, R.G. 1995. The fumigation incubation method. p. 376-381. *In* Alef, K. and P. Nannipieri (eds.). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press Limited, London, Great Britain.
- Ladd, J.N., M. Amato, Z. Li-kai, and J.E. Schultz. 1994. Differential effects of rotation, plant residue and nitrogen fertilizer on microbial biomass and organic matter in an Australian Alfisol. *Soil Biol. Biochem.* 26:821-831.
- Manjajiah, K.M., R.P. Voroney, and U. Sen. 2000. Soil organic carbon stocks, storage profile and microbial biomass under different crop management systems in a tropical agricultural ecosystem. *Biol. Fertil. Soils* 31:273-278.
- McCarty, G.W., J.J. Mesinger, and F.M.M. Jenniskens. 1995. Relationships between total-N, biomass-N and active-N in soil under different tillage and N fertilizer treatments. *Soil Biol. Biochem.* 27:1245-1250.
- Nishiyama, M., Y. Sumikawa, G. Guan, and T. Marumoto. 2001. Relationship between microbial biomass and extractable organic carbon content in volcanic and non-volcanic ash soil. *Appl. Soil Ecol.* 17:183-187.
- Sims, J.R., and V.A. Haby. 1970. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Sci.* 112:137-141.
- Sohi, S., N. Mahieu, J.R.M. Arah, D.S. Powlson, B. Madari, and J. Gaunt. 2001. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1121-1128.
- Stolpe, N.B., and M.S. Kuzila. 2002. Relative mobility of atrazine, 2,4-D and dicamba in volcanic soils of south-central Chile. *Soil Sci.* 167:338-345.
- Witter, E. 1996. Soil C balance in a long-term experiment in relation to the size of the microbial biomass. *Biol. Fertil. Soils* 23:33-37.
- Zagal, E., N. Rodríguez, I. Vidal, y A.B. Flores. 2002a. La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. *Agric. Téc. (Chile)* 62:284-296.
- Zagal, E., N. Rodríguez, I. Vidal, y L. Quezada. 2002b. Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. *Agric. Téc. (Chile)* 62:297-309.
- Zunino, H., F. Borie, M. Aguilera, J.P. Martín, and K. Haider. 1982. Descomposición of C¹⁴-labeled glucose, plant and microbial products and phenols in volcanic ash-derived soils of Chile. *Soil Biol. Biochem.* 14:37-43.