

## COMPARACIÓN DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA REGIÓN ANDINO-PATAGÓNICA: EFECTOS DE LA VEGETACIÓN Y EL TIPO DE SUELO

LUDMILA LA MANNA<sup>1,2,3\*</sup>; CARLOS BUDUBA<sup>2,4</sup>; VIRGINIA ALONSO<sup>1,2</sup>; MIGUEL DAVEL<sup>1,2</sup>; CAROLINA PUENTES<sup>2</sup> & JORGE IRISARRI<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). CC 14, 9200 Esquel, Chubut. llamanna@ciefap.org.ar / valonso@ciefap.org.ar / mdavel@ciefap.org.ar

<sup>2</sup>Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Ruta 259 km 4, 9200 Esquel, Chubut. carolinapuentes2004@yahoo.com.ar

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Esquel). cgbuduba@correo.inta.gov.ar

<sup>5</sup>Universidad Nacional del Comahue. jirisarri@jetband.com.ar

\*Autor para correspondencia

Recibido: 30/07/07

Aceptado: 04/11/07

### RESUMEN

La determinación de la materia orgánica (MO) resulta fundamental para el conocimiento de la productividad agrícola y forestal de los suelos. En este estudio se evaluó la relación entre los contenidos de materia orgánica (MO) determinados por pérdida por ignición ( $MO_{PI}$ ) y combustión húmeda de Walkley-Black ( $MO_{CH}$ ) en suelos de la Región Andino Patagónica. La relación se evaluó para suelos volcánicos con y sin aluminosilicatos amorfos y con distintos tipos de vegetación: plantaciones de *Pinus ponderosa*, bosques de *Austrocedrus chilensis*, arbustales, estepa arbustiva y estepa herbácea. Se seleccionaron 100 sitios de muestreo, donde se tomaron muestras compuestas del horizonte A para la determinación de  $MO_{CH}$  y  $MO_{PI}$ . Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza y regresiones simples.

$MO_{CH}$  fue siempre inferior a  $MO_{PI}$ . Esto es esperable dado que  $MO_{PI}$  incluye la MO total, mientras que  $MO_{CH}$  discrimina las formas de carbono fuertemente condensadas. Si bien no se detectaron diferencias en la relación entre los métodos analíticos para suelos con y sin aluminosilicatos amorfos, sí existió una fuerte relación entre la presencia de estos y los contenidos absolutos de MO. La relación entre los métodos analíticos varió según el tipo de vegetación. Los suelos que sustentan vegetación de estepa herbácea y plantación de pino ponderosa presentaron las mayores diferencias entre los dos métodos analíticos.  $MO_{CH}$  fue, en promedio, un 37% inferior a  $MO_{PI}$  para estos tipos de vegetación, siendo significativamente superior a lo hallado en arbustales (26%). Los suelos con bosque denso de *Austrocedrus chilensis* y estepa arbustiva presentaron valores intermedios (30 y 35%, respectivamente). Las plantaciones de pino ponderosa (primera rotación, edad promedio 21 años) fueron realizadas en áreas de estepa herbácea. Las similitudes encontradas entre ambos suelos podrían estar asociadas a características de la MO propias del ambiente y tipo de suelo de la estepa herbácea, que aún se mantienen por el escaso tiempo transcurrido desde la implantación del bosque. Se generaron dos modelos de regresión lineal que evidencian la relación entre  $MO_{CH}$  y  $MO_{PI}$  para distintos tipos de vegetación:

Plantación de pino ponderosa y estepa herbácea

$$MO_{PI} (\%) = 1,37 \times MO_{CH} (\%) + 0,81 \quad (R^2 = 0,86; n = 40)$$

Estepa arbustiva, arbustal, y bosque denso de ciprés

$$MO_{PI} (\%) = 1,19 \times MO_{CH} (\%) + 1,58 \quad (R^2 = 0,93; n = 60)$$

Las ecuaciones generadas permiten comparar datos de contenido de MO obtenidos por los distintos métodos analíticos.

**Palabras clave.** Alófono, arbustal, *Austrocedrus chilensis*, herbáceas, pino ponderosa.

## COMPARISON OF ANALYTICAL METHODS FOR DETERMINING SOIL ORGANIC MATTER IN PATAGONIAN ANDEAN REGION: EFFECTS OF VEGETATION AND SOIL TYPES

### ABSTRACT

The determination of organic matter (OM) content is key for the knowledge of agricultural and forestry soil productivity. This study evaluated the relationship between OM content determined by weight loss-on ignition ( $OM_{WLOI}$ ) and Walkley-Black wet oxidation method ( $OM_{WO}$ ) in soils of the Patagonian Andean Region. The relation was evaluated for volcanic soils with and without amorphous components and with different vegetation types: *Pinus ponderosa* plantations, herbaceous steppe, shrubby steppe, shrubs and *Austrocedrus chilensis* forests. One hundred sampling sites were selected and composed samples were obtained from horizon A. Data were analyzed by means of analysis of variance and simple regressions.

$OM_{WO}$  was always lower than  $OM_{WLOI}$ . This is expectable since  $OM_{WLOI}$  includes the total OM, whereas  $OM_{WO}$  discriminates the strongly condensed carbon forms. Although differences in the relationship between the analytical methods for soils with and without amorphous components were not detected, a great relationship between these components and organic matter content was found. The relationship between the analytical methods varied according to the vegetation type. Soils with herbaceous steppe and pine plantations presented the greatest differences between the analytical methods.  $OM_{WO}$  was in average 37% lower than  $OM_{WLOI}$  for these types of vegetation, being significantly greater than soils with shrubs (26%). Soils with *Austrocedrus chilensis* forests and shrubby steppe presented intermediate values (30% and 35% respectively). *Pinus ponderosa* plantations (first rotation, average age 21 years) were located in areas with herbaceous steppe. The similarities found between both soils could be associated to the characteristics of OM in the herbaceous steppe environment and soil type, which did not change because of the little time passed since the implantation. Two linear regression models were generated that show the relationship between  $OM_{WO}$  and  $OM_{WLOI}$  for different vegetation types:

*Pinus ponderosa* plantation and herbaceous steppe

$$OM_{WLOI} (\%) = 1.37 \times OM_{WO} (\%) + 0.81 \quad (R^2 = 0.86; n = 40)$$

Shrubs, shrubby steppe and *Austrocedrus chilensis* forest

$$OM_{WLOI} (\%) = 1.19 \times OM_{WO} (\%) + 1.58 \quad (R^2 = 0.93; n = 60)$$

These equations allow the comparison of MO content data generated by different analytical methods.

**Key words.** Allophane, shrubs, *Austrocedrus chilensis*, herbs, ponderosa pine.

## INTRODUCCIÓN

### Los suelos de la Región Andino Patagónica Argentina

Una de las características climáticas principales de la Región Andino Patagónica Argentina es la existencia de un fuerte gradiente pluviométrico oeste-este que presenta una disminución de 3.000 a 300 mm, en aproximadamente 50 km (Barros *et al.*, 1979). Dicha variación determinó la distribución del hielo durante las glaciaciones, generando un paisaje dominado por diferentes geformas, predominando la erosión glaciaria en el oeste y la acumulación en el este (Martínez, 2003). Durante el Holoceno este paisaje fue cubierto por depósitos piroclásticos provenientes de volcanes situados al oeste. Por acción del viento ese material fue distribuido sobre el paisaje, formando un manto de espesor variable según la expo-

sición, pendiente y pluviometría de cada sitio (Colmet Dâage *et al.*, 1995; Irisarri & Mendía 1997). Estos depósitos piroclásticos post glaciales: ceniza volcánica, lapilli, o bien depósitos de origen glacial contaminados con arena volcánica, constituyen los materiales originarios de la mayoría de los suelos de la región (Apcarian & Irisarri, 1993; Comet Dâage *et al.*, 1995). La ceniza volcánica, una vez meteorizada, originó suelos con alta fertilidad química y retención hídrica. El sector oeste con mayores precipitaciones es dominado por Andisoles, caracterizados por la presencia de aluminosilicatos amorfos (alófano e imogolita) y un alto contenido de materia orgánica (Wada & Aomine, 1973; Warkentin & Maeda, 1980). Los Andisoles están asociados a vegetación boscosa (bosque andino patagónico) y, en ciertas situaciones, a arbustales (Comet Dâage *et al.*, 1995).

Hacia el este, en el sector húmedo-subhúmedo, los suelos constituyen un área transicional hacia los suelos con arcillas cristalinas (Molisoles), presentando sus características volcánicas atenuadas (López, 1996). En general estos suelos ya no albergan vegetación boscosa, sino que se desarrolla vegetación de estepa herbácea, estepa arbustiva y arbustales (Comet Dâage *et al.*, 1995). Actualmente es en estas áreas, mayoritariamente degradadas por el sobrepastoreo, donde se promueve la implantación con especies exóticas (Buduba, 2006). La especie utilizada masivamente es el pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws.), pues se adapta y crece vigorosamente en la región (Gonda & Cortés, 2001).

### Determinación analítica de la materia orgánica

La materia orgánica (MO) se encuentra en los suelos formando parte de tres tipos de compuestos: a) Formas muy condensadas de composiciones próximas al carbono elemental (carbón vegetal, grafito, carbón de hulla); b) Residuos de plantas, animales y microorganismos, alterados y resistentes, denominados humus y humatos y c) Residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos (Jackson, 1976). La determinación de la MO resulta fundamental para el conocimiento de la productividad agrícola y forestal de los suelos (Labrador Moreno, 1996; Davel & Ortega, 2003; Álvarez & Steinbach, 2006). Existen diferentes técnicas analíticas para su determinación, dos de las cuales están muy difundidas y son las que se utilizan en los laboratorios de la región: el método de pérdida por ignición (Davies, 1974) y el método de combustión húmeda de Walkley-Black (Walkley & Black, 1934).

El método de pérdida por ignición se basa en determinar la pérdida de peso de una muestra de suelo al someterla a una temperatura de 430 °C en horno-mufla durante 24 h (Davies, 1974). Con temperaturas de 430 °C se lograría una completa oxidación de la MO. Así este método permite la determinación de la MO total del suelo, incluyendo las formas condensadas, humus, humatos y residuos orgánicos poco alterados (Davies, 1974). Otros estudios han determinado que aún a 600 °C parte de las sustancias húmicas permanecen resistentes a la oxidación. Sin embargo, temperaturas mayores a 500 °C pueden implicar importantes errores en la determinación por pérdidas de dióxido de carbono de los carbonatos, agua estructural de los minerales de arcilla, oxidación del ión ferroso, descomposición de sales hidratadas y óxidos (Rosell *et al.*, 2001). El método de pérdida por ignición resulta un método económico dado que no se utilizan reactivos químicos y requiere pocas horas hombre para su realización. Este método resulta razonablemente pre-

ciso en la estimación de MO del suelo si se consideran precauciones para evitar errores por higroscopicidad y contenido de sales (Rosell *et al.*, 2001).

El método de combustión húmeda de Walkley-Black consiste en una oxidación con dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico. La reacción toma el calor de la disolución del ácido, lo que eleva la temperatura y logra la oxidación del carbono orgánico. El dicromato residual es posteriormente titulado con una sal ferrosa (Carreira, 2005). El método de combustión húmeda determina sólo una parte del carbono orgánico, discriminando las formas condensadas y excluyendo en un 90 a 95% el carbono elemental (Jackson, 1976). Dado que la oxidación de la MO que se logra es incompleta se utiliza un factor de corrección que puede variar de acuerdo al tipo de suelo y al horizonte considerado (Rosell *et al.*, 2001; Certini *et al.*, 2002; De Vos *et al.*, 2007). El factor de corrección generalmente utilizado es 1,32 que se basa en la suposición de que el 76% del carbono es oxidado ( $1/0,76=1,32$ ) (Rosell *et al.*, 2001). Otro factor que se utiliza es para convertir la determinación de carbono orgánico en valores de MO. Este factor también puede variar de acuerdo al tipo de suelo. En suelos de Patagonia otros trabajos han considerado un factor 2 (Buduba, 2006), basado en la suposición de que el carbono orgánico representa el 50% de la MO (Scheffer & Schachtschabel, 1992). A su vez, distintos autores sugieren un factor cercano a 2 para horizontes superficiales (Carreira, 2005). Distintas interferencias pueden afectar la cuantificación de MO por el método de Walkley-Black, por ejemplo, presencia de iones cloruro o ferroso y óxidos de manganeso. A pesar de estas dificultades este método es ampliamente utilizado porque requiere un equipamiento mínimo, puede adaptarse para la manipulación de gran número de muestras y no es muy costoso (Rosell *et al.*, 2001).

Las propiedades de la MO del suelo son influenciadas por el clima, la topografía, el material parental, la vegetación y el tiempo (Jenny, 1961). Dadas las características de los dos métodos analíticos es esperable que la diferencia en los resultados de MO obtenidos difiera en función de los tipos de suelo y vegetación. Otros trabajos han evidenciado diferencias en la relación entre métodos analíticos de determinación de MO en función del tipo de suelo, uso y vegetación (Brye & Slaton, 2003; De Vos *et al.*, 2005; Lettens *et al.*, 2007).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la relación entre los valores de MO obtenidos por pérdida por ignición y por combustión húmeda en suelos con y sin aluminosilicatos amorfos y con distintos tipos de vegetación en la Región Andino Patagónica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 100 sitios de muestreo en la Región Andino Patagónica Argentina, distribuidos desde el sur de la provincia de Neuquén (40° lat S) hasta el centro de la provincia de Chubut (43° lat S), con suelos desarrollados sobre ceniza volcánica bajo un gradiente pluviométrico de 425 a 2.000 mm anuales. Los sitios de muestreo fueron seleccionados en relación a la vegetación (20 sitios para cada tipo de vegetación): plantación de pino ponderosa; estepa herbácea con predominio de coirón (*Stipa* spp.); estepa arbustiva representada principalmente por neneo (*Mulinum spinosum*), calafate (*Berberis buxifolia*) o palo piche (*Fabiana imbricata*); arbustal de retamo (*Diostea juncea*), radal (*Lomatia hirsuta*), laura (*Schinus patagonicus*) y maitén (*Maytenus boaria*); y bosque denso de ciprés de la cordillera [*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Sern. & Bizarri].

En cada sitio se obtuvo una muestra compuesta del horizonte A que fue secada al aire, tamizada y homogeneizada. Cada muestra se hizo reaccionar con ácido clorhídrico (HCl) a fin de descartar la presencia de carbonatos (Schoeneberger *et al.*, 1998). Se determinó el pH en fluoruro de sodio (NaF) en una solución de NaF 1N, con una relación suelo:solución de 1:50 (Fieldes & Perrot, 1966). Cuando el pH a los 60 minutos fue superior a 9,2 se consideró como indicador de la presencia de aluminosilicatos amorfos (alófano o imogolita) (Irisarri, 2000). Se determinó también el porcentaje de MO de cada muestra, mediante dos técnicas diferentes: 1) Pérdida por ignición (Davies, 1974), 2) Método de combustión húmeda de Walkley-Black (Walkley & Black, 1934).

Para la determinación de MO por pérdida por ignición se utilizaron 5 g de muestra, tamizada a 2 mm, colocada en estufa (a 105 °C) durante 24 h para calcular la humedad higroscópica. Luego de pesadas, las muestras fueron colocadas en horno mufla a 430 °C durante 24 h. Antes de realizar las pesadas las muestras fueron colocadas en un desecador, con sílica gel, para que alcancen la temperatura ambiente y no absorban humedad.

El método de combustión húmeda fue realizado con muestras tamizadas a 0,5 mm. Esta molienda fina mejora la recuperación del carbono orgánico en suelos alofánicos, en los cuales la MO está fuertemente asociada con los minerales (Carreira, 2005). Se utilizó un factor de 1,32, estimando que el 76% del carbono fue oxidado (Rosell *et al.*, 2001; Carreira, 2005). Para convertir los valores de Carbono orgánico en MO se utilizó el factor 2 (Scheffer & Schachtschabel, 1992).

## Análisis de datos

Se evaluó la variación de los valores de MO y pH NaF en los distintos tipos de vegetación mediante análisis de varianza de un factor y contrastes múltiples con el método de Scheffé (Ramsey & Schafer, 1997).

Se realizó un análisis de varianza de dos factores considerando como variable dependiente la diferencia relativa entre los métodos de determinación de MO, calculada como:  $[(MO_{PI} - MO_{CH}) * 100 / MO_{PI}]$ , siendo  $MO_{PI}$  = contenido de MO obtenido por el método de pérdida por ignición;  $MO_{CH}$  = contenido de MO obtenido por el método de combustión húmeda. Los factores correspondieron a: factor presencia de aluminosilicatos amorfos (2 niveles; según pH NaF mayor o menor a 9,2) y factor vegetación (5 niveles; plantación de pino ponderosa, estepa herbácea, estepa arbustiva, arbustal y bosque denso de ciprés). Se realizaron contrastes múltiples con el método de Scheffé (Ramsey & Schafer, 1997).

La relación entre ambos métodos de determinación de MO fue analizada para cada tipo de vegetación mediante regresiones lineales simples. Se consideró como variable independiente  $MO_{CH}$  y como variable dependiente  $MO_{PI}$ . Otros autores han encontrado una fuerte relación entre los distintos métodos de determinación de MO, sugiriendo que pueden utilizarse regresiones lineales simples para recalcular datos de MO del suelo entre distintas metodologías analíticas (Jankauskas *et al.*, 2006). Las pendientes de las rectas fueron comparadas mediante pruebas de t (Steel & Torrie, 1993).

## RESULTADOS

Existió una gran variación en los contenidos de MO y en los valores del pH NaF entre los distintos tipos de vegetación. Las plantaciones de pino, la estepa herbácea y la estepa arbustiva presentaron los valores más bajos de MO determinada por combustión húmeda (Figura 1). Los suelos con vegetación de arbustal presentaron valores intermedios, que resultaron significativamente mayores a los registrados en plantaciones de pino y en la estepa herbácea. El bosque de ciprés presentó los valores máximos, significativamente mayores a los hallados en los otros tipos de vegetación (Figura 1). Resultados similares se obtuvieron al analizar la MO determinada por el método de pérdida por ignición (datos no presentados). A su vez, el pH NaF fue significativamente mayor en el suelo bajo bosque de ciprés que en el resto de los tipos de vegetación (Figura 2). Estos resultados están en relación con la precipitación asociada a los distintos ambientes (Tabla 1). La formación de aluminosilicatos amorfos requiere la existencia de precipitaciones cercanas o superiores a los 1.000 mm (Colmet Dâage *et al.*, 1995) situación que sólo fue frecuente en los sitios con vegetación de bosque de ciprés (Tabla 1). En sitios con vegetación de plantaciones de pino, estepa herbácea y estepa arbustiva sólo se registraron suelos con presencia de aluminosilicatos amorfos en 3 de los 20 lugares evaluados para cada tipo de vegetación. En arbustales, 6 sitios presentaron pH NaF superior a 9,2. En tanto los suelos con bosques de ciprés siempre evidenciaron la presencia de aluminosilicatos amorfos.

Todas las muestras presentaron reacción negativa a carbonatos, evidenciando que los valores del contenido de MO obtenidos por pérdida por ignición no están sesgados por la presencia de carbonatos (Rosell *et al.*, 2001).

Independientemente del tipo de vegetación y de la presencia o no de aluminosilicatos amorfos, los valores de MO determinados mediante combustión húmeda fueron siempre inferiores a los obtenidos con el método de pérdida por ignición. A pesar de existir una interacción entre los valores absolutos de MO, el tipo de vegetación

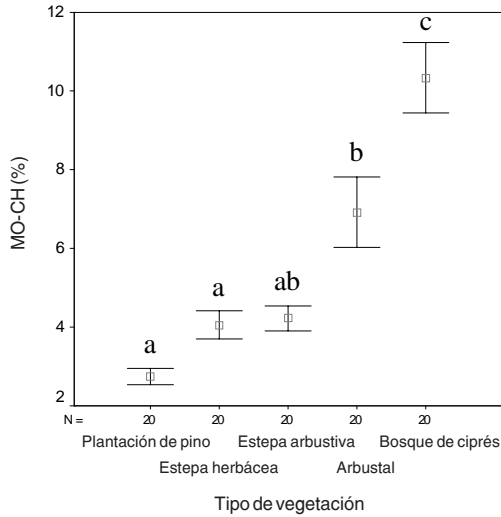


Figura 1. Valores medios ( $\pm 1$  error estándar) del contenido de MO del suelo determinado por combustión húmeda (MO-CH) en sitios de la Región Andino Patagónica con distintos tipos de vegetación. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Figure 1. Mean values ( $\pm 1$  standard error) of soil organic matter content determined by Walkley-Black wet oxidation method (MO-CH) in sites of the Patagonian Andean Region with different vegetation types. Lower case letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

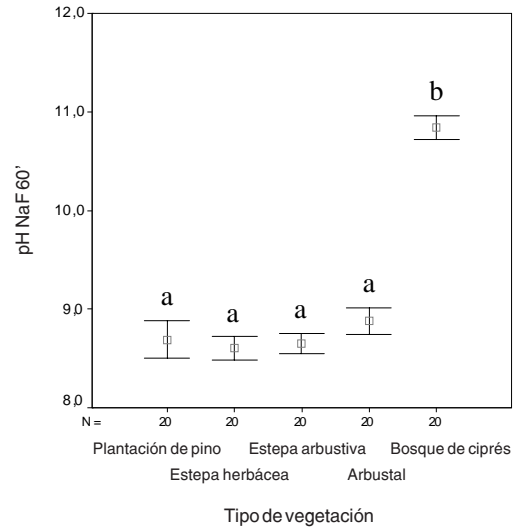


Figura 2. Valores medios ( $\pm 1$  error estándar) de pH NaF a los 60' en suelos de la Región Andino Patagónica con distintos tipos de vegetación. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Figure 2. Mean values ( $\pm 1$  standard error) of pH NaF in soils of the Patagonian Andean Region with different vegetation types. Lower case letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

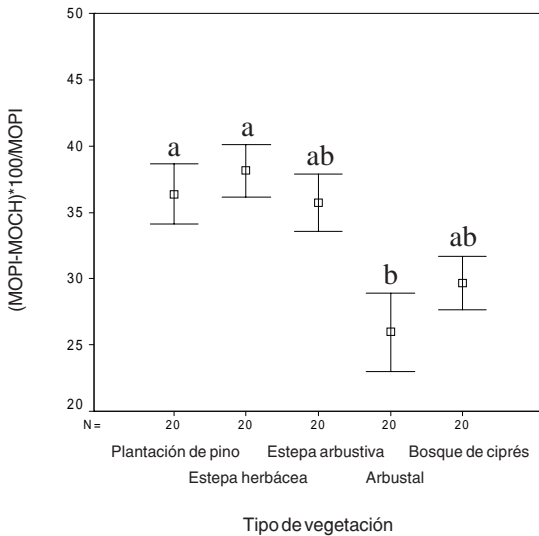


Figura 3. Diferencia relativa entre los métodos de determinación de materia orgánica (MO): combustión húmeda (CH) y pérdida por ignición (PI) para distintos tipos de vegetación. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Figure 3. Relative difference between analytical methods for determining organic matter content (MO): wet oxidation (CH) and weight loss-on ignition (PI) for different vegetation types. Lower case letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

Tabla 1. Precipitación media anual de los sitios de muestreo. Se indica valor medio, mínimo y máximo para cada tipo de vegetación. Los datos son aproximados dada la escasez de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Table 1. Mean annual precipitation of sampling sites. The mean value and the range of values are shown for each type of vegetation. Precipitation data are approximated since meteorological stations are scarce in the study area.

	Precipitación media anual	Mínimo	Máximo
	(mm)		
Plantación de pino	606	425	979
Estepa herbácea	780	676	746
Estepa arbustiva	780	683	953
Arbustal	810	652	957
Bosque de ciprés	1.200	633	2.000

y el pH NaF, al analizar la diferencia relativa entre los métodos de determinación de MO los resultados son diferentes. El análisis de varianza evidencia que no existió interacción entre el tipo de vegetación y la presencia o no de aluminosilicatos amorfos; y la diferencia relativa entre los métodos de determinación de MO no varió en función de la presencia o no de compuestos amorfos (Tabla 2). Por el contrario, la diferencia relativa entre ambos métodos varió significativamente en función del tipo de vegetación (Tabla 2). Los suelos que sustentan plantaciones de pino ponderosa o vegetación de estepa herbácea presentan las mayores diferencias entre los métodos de determinación de MO, siendo significativamente superiores a las diferencias encontradas para vegetación de arbustal. En tanto, los suelos con estepa arbustiva y bosque denso de ciprés presentan valores intermedios (Figura 3). El bosque de ciprés, que presentó valores de pH NaF significativamente superiores a los otros tipos de vegetación (Figura 2) no evidenció diferencias en la relación entre los métodos de determinación de MO con respecto a ningún tipo de vegetación (Figura 3).

Tabla 2. Tabla del análisis de varianza de dos factores: Factor pH NaF (presencia/ausencia de aluminosilicatos amorfos) y Factor vegetación (Pino ponderosa, estepa herbácea, estepa arbustiva, arbustal y bosque de ciprés).

Table 2. Analysis of variance with two factors: Factor pH NaF (presence/absence of amorphous components) and Vegetation factor (*Pinus ponderosa* plantations, herbaceous steppe, shrubby steppe, shrubs and *Austrocedrus chilensis* forests).

	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	p
Factor vegetación	4	348,8	3,24	0,016
Factor pH NaF	1	29,3	0,27	0,603
Vegetación * pH NaF	3	98,1	0,91	0,438
Error	99	107,5		

Las ecuaciones de las rectas de regresión que muestran la relación de los contenidos de MO obtenidos por ambos métodos para los distintos tipos de vegetación fueron las siguientes:

Plantación de pino ponderosa

$$MO_{PI} (\%) = 1,48 \times MO_{CH} (\%) + 0,34 \quad (R^2 = 0,79; n = 20)$$

(Ecuación 1)

Estepa herbácea

$$MO_{PI} (\%) = 1,25 \times MO_{CH} (\%) + 1,42 \quad (R^2 = 0,85; n = 20)$$

(Ecuación 2)

Estepa arbustiva

$$MO_{PI} (\%) = 1,0278 \times MO_{CH} (\%) + 2,21 \quad (R^2 = 0,79; n = 20)$$

(Ecuación 3)

Arbustal

$$MO_{PI} (\%) = 1,13 \times MO_{CH} (\%) + 1,35 \quad (R^2 = 0,94; n = 20)$$

(Ecuación 4)

Bosque denso de ciprés

$$MO_{PI} (\%) = 1,09 \times MO_{CH} (\%) + 3,28 \quad (R^2 = 0,86; n = 20)$$

(Ecuación 5)

Siendo:

$MO_{PI}$  = contenido de MO obtenido por el método de pérdida por ignición.

$MO_{CH}$  = contenido de MO obtenido por el método de combustión húmeda.

La pendiente de la curva correspondiente a plantación de pino ponderosa fue significativamente mayor que la pendiente correspondiente a estepa arbustiva ( $p = 0,042$ ). El resto de las pendientes no presentaron diferencias significativas entre sí ( $p > 0,05$ ). En función de estos resultados y de las variaciones en contenido de MO (Figura 1) y en diferencias relativas entre los métodos de determinación (Figura 3) se generaron dos nuevas regresiones lineales: una agrupando las muestras correspondientes a pino ponderosa y estepa herbácea y otra agrupando las muestras de arbustal y estepa arbustiva. Las pendientes de estas curvas fueron significativamente diferentes ( $p = 0,016$ ). La pendiente correspondiente a bosque de ciprés fue similar a la pendiente de la recta de estepa arbustiva y arbustal ( $p = 0,945$ ) y tendió a ser menor que la pendiente correspondiente a plantación de pino ponderosa y estepa herbácea ( $p = 0,076$ ).

En función de estos resultados se generaron dos regresiones lineales: una para plantación de pino ponderosa y estepa herbácea (Figura 4, Ecuación 6) y otra para vegetación de estepa arbustiva, arbustal y bosque denso de ciprés (Figura 5; Ecuación 7).

Plantación de pino ponderosa y estepa herbácea

$$MO_{PI} (\%) = 1,37 \times MO_{CH} (\%) + 0,81 \quad (R^2 = 0,86; n = 40)$$

(Ecuación 6)

Estepa arbustiva, arbustal, y bosque denso de ciprés

$$MO_{PI} (\%) = 1,19 \times MO_{CH} (\%) + 1,58 \quad (R^2 = 0,93; n = 60)$$

(Ecuación 7)

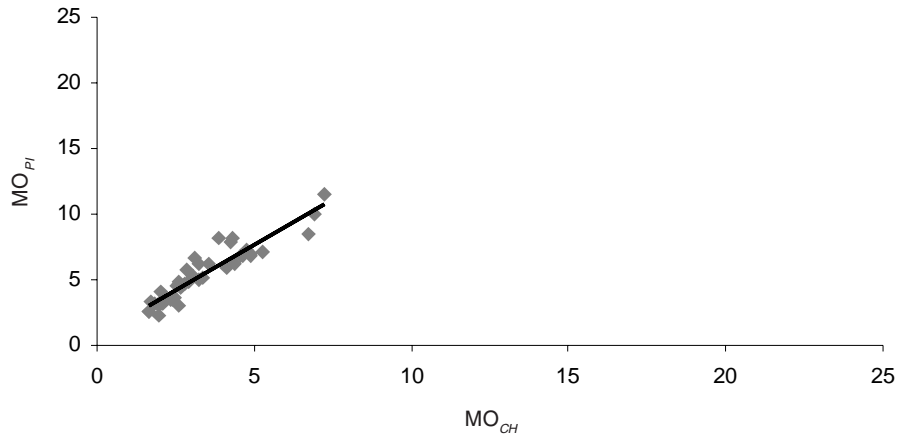


Figura 4. Contenido de materia orgánica obtenido por pérdida por ignición (%  $MO_{PI}$ ) y combustión húmeda (%  $MO_{CH}$ ) para suelos de la Región Andino Patagónica con plantación de pino ponderosa o estepa herbácea.

Figure 4. Relationship between organic matter content determined by weight loss-on ignition ( $MO_{PI}$ ) and wet oxidation method ( $MO_{CH}$ ) in soils of the Patagonian Andean Region with *Pinus ponderosa* plantations or herbaceous steppe.

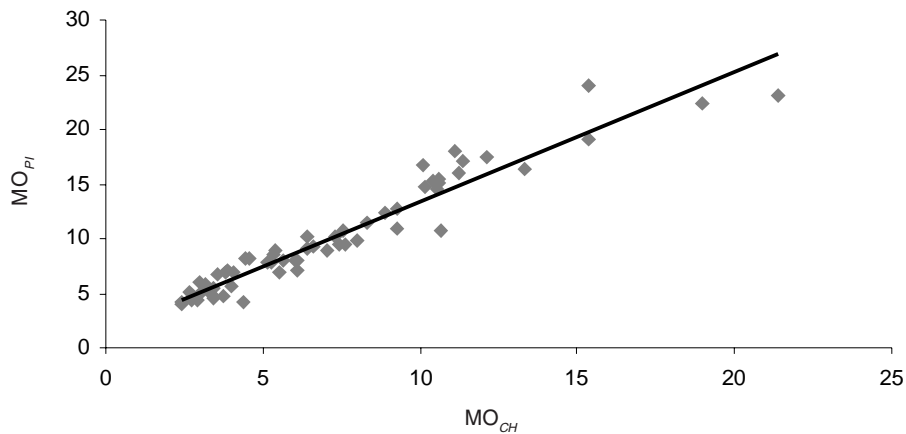


Figura 5. Contenido de materia orgánica obtenido por pérdida por ignición (%  $MO_{PI}$ ) y combustión húmeda (%  $MO_{CH}$ ) para suelos de la Región Andino Patagónica con vegetación de estepa arbustiva, arbustal, o bosque denso de ciprés.

Figure 5. Relationship between organic matter content determined by weight loss-on ignition ( $MO_{PI}$ ) and wet oxidation method ( $MO_{CH}$ ) in soils of the Patagonian Andean Region with shrubby steppe, shrubs or *Austrocedrus chilensis* forests.

## DISCUSIÓN

La formación de aluminosilicatos amorfos a partir de la alteración de materiales volcánicos está asociada a precipitaciones superiores a 1.000 mm en el caso de la imogolita y a precipitaciones superiores a 1.500 mm anuales en el caso del alófono. Estos rangos pueden modificarse debido a variaciones microtopográficas (Colmet Dâage

*et al.*, 1995). En el área de estudio los sitios correspondientes a bosque de ciprés correspondieron a sitios con altas precipitaciones, mayores a 1.000 mm en la mayoría de los casos. Todos los sitios con ciprés evidenciaron la presencia de aluminosilicatos amorfos, y a su vez, correspondieron a los sitios con mayor contenido de MO del suelo. La acumulación de MO es una de las característi-

cas principales de los suelos con presencia de aluminosilicatos amorfos. En estos suelos la MO es muy estable, tanto por adsorción en la superficie de los alófanos, como por protección física dentro de los microporos, que limita el ataque de enzimas y microorganismos (Wada & Aomine, 1973; Warkentin & Maeda, 1980).

En el caso de vegetación de arbustal, con precipitaciones promedio de 810 mm anuales, se evidenció la presencia de aluminosilicatos amorfos en seis de los 20 sitios evaluados, presentando valores intermedios de MO al comparar con los otros tipos de vegetación. En los sitios con plantaciones de pino ponderosa y vegetación de estepa herbácea o arbustiva, con precipitaciones siempre inferiores a 1.000 mm, sólo se evidenció la presencia de aluminosilicatos amorfos en tres de los 20 sitios evaluados para cada tipo de vegetación. A su vez estos suelos coincidieron con los valores más bajos de MO.

Los contenidos de MO determinados por combustión húmeda fueron, en todos los casos, inferiores a los valores obtenidos mediante el método de pérdida por ignición. Esto es consecuencia de las características intrínsecas de cada método. El método de pérdida por ignición, donde la muestra es sometida a una temperatura de 430 °C, permite la determinación de la MO total del suelo, incluyendo las formas muy condensadas de composiciones próximas al carbono elemental, humus, humatos y residuos orgánicos poco alterados. Por el contrario, el método de combustión húmeda discrimina las formas condensadas excluyendo en un 90 a 95% el carbono elemental (Jackson, 1976). En este método la MO es oxidada únicamente por la acción del dicromato y la temperatura aumenta por la mezcla exotérmica del dicromato acuoso y el ácido sulfúrico concentrado, alcanzando valores de 120 °C (Rosell *et al.*, 2001).

La relación entre los dos métodos analíticos evaluados varió según el tipo de vegetación. Los suelos que sustentan vegetación de estepa herbácea y plantación de pino ponderosa presentan las mayores diferencias entre los dos métodos analíticos. La MO determinada por combustión húmeda fue, en promedio, un 37 % inferior a los valores obtenidos por pérdida por ignición para estos tipos de vegetación. Esta diferencia entre los métodos resultó significativamente superior a la hallada en suelos con vegetación de arbustal (26%). En tanto, los suelos con estepa arbustiva y bosque denso de ciprés presentaron valores intermedios, con diferencias promedio de 30 y 35%, respectivamente. No se halló una relación entre ambos métodos analíticos y la presencia o no de aluminosilicatos amorfos, coincidiendo con lo registrado por La Manna *et al.* (2006).

Si bien estos resultados parecerían adjudicar toda la variabilidad a diferencias en la vegetación, existió una

fuerte relación entre el clima (*i.e.*, precipitación), la presencia de aluminosilicatos amorfos y los contenidos de MO edáfica que estarían actuando de manera compleja. Sin embargo, al analizar las diferencias relativas entre los dos métodos de determinación de MO utilizados no se halló una interacción entre el tipo de vegetación y la presencia o no de aluminosilicatos amorfos. Esto permitió generar dos curvas de regresión lineal, en función de los tipos de vegetación, que relacionan los valores de MO obtenidos por combustión húmeda y pérdida por ignición: una regresión para plantación de pino ponderosa y estepa herbácea y otra para vegetación de estepa arbustiva, arbustal y bosque denso de ciprés. Los rangos de variación en contenido de MO para ambos grupos de vegetación fueron disímiles: de 2,4 a 11,6% para pino y estepa herbácea, y de 3,9 a 24,1% para estepa arbustiva, arbustal y ciprés. Esta gran variación sugiere que en las ecuaciones generadas están implícitas las diferencias de suelo, donde menores precipitaciones y ausencia de aluminosilicatos amorfos se asocian con bajos valores de MO.

Las diferencias halladas entre los tipos de vegetación podrían estar influenciadas por las características intrínsecas de la MO, relacionadas con la composición del tipo de residuo vegetal incorporado al suelo (pino, hierba, arbusto, ciprés), principalmente diferencias en los contenidos de formas de carbono condensadas y a la estabilidad que alcanzarían al combinarse con la fracción inorgánica (Mazzarino, 2002). Es importante remarcar que las plantaciones de pino ponderosa incluidas en este estudio, cuya edad promedio es de 21 años, fueron realizadas en áreas de estepa herbácea. Las similitudes encontradas en ambos suelos (pino ponderosa y estepa herbácea) en cuanto a la relación entre los métodos analíticos de determinación de MO, podría también estar asociada a características de la MO propias de ese ambiente y tipo de suelo que aún se mantienen por el escaso tiempo transcurrido desde la implantación del bosque. Los resultados no pueden tomarse como concluyentes dado que se trata de plantaciones de primera rotación. Lupi *et al.* (2006) no hallaron cambios significativos en el carbono orgánico del suelo ante el reemplazo de pastizales naturales por forestaciones con pino ponderosa en Patagonia. Gobbi *et al.* (2002) destacan que cuando los pinos se instalan reemplazando a la estepa, lo hacen sobre suelos de baja fertilidad y, por lo tanto, los cambios sobre el mismo son escasos o nulos. Por el contrario, cuando las plantaciones de pinos se instalan sobre suelos fértiles, reemplazando a cipresales o ñirantales, el efecto depende de las condiciones de fertilidad del suelo (mayor efecto a mayor fertilidad), produciendo un marcado empobrecimiento del suelo en MO, bases y nutrientes. Estos antecedentes sugieren que la relación entre los métodos analíticos de determinación de MO para pino ponderosa podría ser diferente a la



hallada si se analizaran suelos bajo plantaciones de pino realizadas en otros ambientes.

Los métodos analíticos de determinación de MO que fueron evaluados en este estudio son los utilizados por los distintos laboratorios de suelos de la Región Andino Patagónica, de manera que contar con estas ecuaciones constituye una herramienta útil para la comparación de datos. Esta metodología de trabajo fue evaluada y aprobada por estudios realizados en otros países (Jankauskas *et al.*, 2006). En futuros estudios podría evaluarse la relación entre los dos métodos analizados y el contenido de carbono determinado mediante analizadores automáticos de carbono. Este tipo de estudios permitiría discriminar cuál de los dos métodos utilizados por los laboratorios se correlaciona mejor con los valores reales de carbono (De Vos *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2005).

#### AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a los dos revisores anónimos cuyos comentarios y observaciones permitieron mejorar el manuscrito.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R & H Steinbach. 2006. Valor agronómico de la materia orgánica. Pp. 13-29 *En: Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Apcarian, A & J Irisarri. 1993. Caracterización mineralógica de suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas en las provincias de Neuquén y Río Negro. *Actas II Jornadas de Vulcanología, Medio ambiente y Defensa Civil*. Zapala, Neuquén, Argentina. 23 pp.
- Barros, V; B Scian & H Matto. 1979. Campos de precipitación en la provincia de Chubut (período 1931-1960). *Geoacta* 10: 175-192.
- Brye KR & NA Slaton. 2003. Carbon and Nitrogen storage in a typic Albaqualf as affected by assessment method. *Comm. in Soil Sc. and Plant Anal.* 34: 1637-1655.
- Buduba, C. 2006. Modificaciones en el pH y contenido de materia orgánica en suelos del ecotono estepa/bosque andino patagónico por implantación de pino ponderosa. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Carreira, D. 2005. Carbono oxidable. Una forma de medir la materia orgánica del suelo. Pp. 91-102. *En: L Marbán & S Ratto (eds.)*. Tecnologías en análisis de suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Certini, G; G Corti & M Fernández Sanjurjo. 2002. Comparison of two soil organic matter extractants and determination of the «Walkley-Black» correction factors for organic fractions from a volcanic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 685-693.
- Colmet Dâage, F; ML Lanciotti & A Marcolin. 1995. Importancia Forestal de los suelos volcánicos de la Patagonia Norte y Central. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Bariloche, Argentina. 27 pp.
- Davel, M & A Ortega. 2003. Estimación del índice de sitio para pino oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia Andina Argentina. *Bosque* 24: 55-69.
- Davies, B. 1974. Loss-on ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Sci. Proc.* 38: 150.
- De Vos, B; B Vandecasteele; J Deckers & B Muys. 2005. Capability of Loss-on-Ignition as a Predictor of Total Organic Carbon in Non-Calcareous Forest Soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2899-2921.
- De Vos, B; S Lettens; B Muys & JA Deckers. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management* 23: 221-229.
- Fieldes, M & K Perrot. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand. J. Sci* 9: 623-629.
- Gobbi, ME; MJ Mazzarino & J Ferrari. 2002. Efecto de plantaciones de coníferas sobre la fertilidad del suelo en la región andinopatagónica. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Argentina.
- Gonda, H & G Cortés. 2001. Ecuaciones para el manejo de las plantaciones de pino ponderosa en Neuquén. Publicación técnica N° 30. CIEFAP. Esquel, Chubut. 24 pp.
- Irisarri, J. 2000. La propuesta de reclasificación de los Andepts de Argentina, de acuerdo al Orden Andisoles. Workshop Soil Taxonomy. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AICET, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Irisarri, J & J Mendía. 1997. Relaciones suelo-paisaje en la evaluación de la potencialidad forestal de la región central andinopatagónica, Argentina. *Bosque* 18(1): 21-30.
- Jackson, M. 1976. Análisis químico de suelos. Ed. Omega. Barcelona. 662 pp.
- Jankauskas, B; G Jankauskiene; A Slepeliene; M Fullen & C Booth. 2006. International Comparison of Analytical Methods of Determining the Soil Organic Matter Content of Lithuanian Eutric Albeluvisols. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37: 707-720.
- Jenny, H. 1961. Derivation of state factor equations of soil and ecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25: 385-388.
- La Manna, L; V Alonso; C Buduba; M Davel; C Puentes & J Irisarri. 2006. Contenido de materia orgánica del suelo en la Región Andino Patagónica: comparación entre métodos analíticos. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta y Jujuy, Argentina.
- Labrador Moreno, J. 1996. La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Mundi-Prensa, Madrid. 174 pp.
- Lettens, S; B De Vos; P Quataert; B Van Wesemael; B Muys & J Van Orshoven. 2007. Variable carbon recovery of Walkley-Black analysis and implications for national soil organic carbon accounting. *Eur J of S Sci.* 1365-2389.
- López, CR. 1996. La carta de suelos en apoyo a la evaluación del potencial forestal de las tierras de la región andina patagónica norte. *En: G Moscatelli; J Panigatti & R Di Giacomo*. Utilización de la cartografía para el uso sustentable de las tierras. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.

- Lupi, AM; P Laclau; T Boca; G Stecher; A Alfieri; L Gómez & V Nakama. 2006. Carbono Orgánico del suelo en pastizales naturales y en plantaciones forestales de reemplazo. Evaluación Inicial. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina.
- Martínez, O. 2003. Geomorfología y geología del cuaternario en el noroeste de la provincia de Chubut. *Actas II Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*. San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Mazzarino, MJ. 2002. Circulación de nutrientes en ecosistemas naturales: conservación en la vegetación y dinámica en el suelo. *Actas del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Pto. Madryn, Chubut, Argentina.
- Ramsey, FL & DW Schafer. 1997. *The Statistical Sleuth: a course in methods of data analysis*. Duxbury Press. Belmont, USA. 742 pp.
- Rosell, RA; JC Gasparoni & JA Galantini. 2001. Soil organic matter evaluation. Pp. 311-322. *En: R Lal; J Kimble; R Follett & B Stewart (eds.)*. Assessment Methods for Soil Carbon. Lewis Publishers, USA.
- Scheffer, F & P Schachtschabel. 1992. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart, Alemania. 491 pp.
- Schoeneberger, PJ; DA Wysocky; E Benham & W Broderson. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, USA. 159 pp.
- Steel, R & J Torrie. 1993. *Bioestadística: principios y procedimientos*. 2da edn. McGraw-Hill. México, D.F., México. 622 pp.
- Wada, K & S Aomine. 1973. Soil development on volcanic materials during the Quaternary. *Soil Science* 116: 170-177.
- Walkley, A & I Black. 1934. An examination of the Degtjareff method and a proposed modification of the chromic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 34: 29-38.
- Warkentin, B & T Maeda. 1980. Physical and mechanical characteristics of Andisols. Pp. 281-301. *In: BK Theng. (ed.)*. Soil with variable charge. New Zealand Society of Soil Science.
- Zhang, M; Y Li & P Stoffella. 2005. Comparison of Analytical Methods for Organic Matter in Composts and Organic Mulches. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2587-2599.