



CIENCIA DEL SUELO

INDICADORES E ÍNDICES DE CALIDAD EN SUELOS ROJOS BAJO SISTEMAS NATURALES Y CULTIVADOS

DIANA MARCELA TOLEDO^{1*}; JUAN ALBERTO GALANTINI²; EUGENIA FERRECCIO¹; SILVIA ARZUAGA¹; LAURA GIMENEZ¹ & SARA VÁZQUEZ¹

Recibido: 01-03-13

Recibido con revisiones: 28-06-13

Aceptado: 30-06-13

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron: determinar indicadores de calidad de suelo, desarrollar índices funcionales y aplicar índices utilizados en la bibliografía, a fin de evaluar su sensibilidad para detectar los cambios producidos por el desmonte y posterior uso agrícola en Oxisoles del departamento de Oberá (Misiones). Se empleó un diseño completamente al azar, con tres tratamientos: Selva (S), cultivo de maíz con labranza convencional (*Zea mays* L.) (M) y cultivo de Té (*Camellia sinensis* L.) (T). Se muestrearon 12 lotes por tratamiento a 0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m. Las variables evaluadas fueron: respiración (RES), densidad aparente (Da), textura, pH, materia orgánica total (MO) y particulada (MOP), nitrógeno total (Nt) y potencialmente mineralizable (NPM). Se determinaron los índices: MOP/MO, NPM/Nt, NPM/MOP, MO/Li+Arc, MOP/RES y las relaciones de estratificación del carbono orgánico del suelo (COSr₁, COSr₂) y del potencial de mineralización del nitrógeno (NPMr₁, NPMr₂). Los resultados se analizaron mediante ANOVA, Test LSD ($p \leq 0,05$), y correlación de Pearson. Los indicadores: Da, RES, MO, Nt, y NPM y los índices NPM/Nt, MO/Li+Arc, NPM/MOP, IRC, IMC, COSr₁, COSr₂, permitieron diferenciar suelos bajo sistemas naturales de cultivados. La Da, la RES y el índice COSr₂ resultaron más sensibles, diferenciando también sistemas agrícolas: cultivo perenne de anual, indicando a este último como el más degradante. Si bien resultan necesarias más investigaciones, estos resultados indicarían que suelos de alta calidad, presentarían un índice de estratificación COSr₁ >2 y un COSr₂ >1,5 por lo que valores menores indicarían pérdida de calidad. El índice MOP/RES desarrollado detectó diferencias en la calidad de MOP y su ciclado, resultando los suelos vírgenes y bajo cultivo perenne, sin remoción de suelo (T), con un ciclado más lento que los suelos bajo cultivo anual (M).

Palabras clave. Calidad del suelo, indicadores, índices funcionales, sistemas de cultivo.

INDICES AND INDICATORS OF SOIL QUALITY IN NATURAL AND CULTIVATED RED SOIL SYSTEMS

ABSTRACT

The objectives of this study were to determine soil quality (SQ) indicators, develop proper soil quality indices and apply the indices from the literature so as to assess their sensitivity in detecting the SQ changes caused by deforestation and agricultural use in Oxisols at Oberá (Misiones), where rainforests have been removed and replaced with annual and perennial crops. The experimental design was completely randomized with three treatments: tropical forest (S), corn crop under conventional tillage (*Zea Mays* L.) (M) and tea crop (*Camellia sinensis* L.) (T). Twelve plots were sampled from each treatment at 0-0,10; 0,10-0,20 and 0,20-0,30 m depths. The following variables were evaluated on the soil samples: respiration (RES), bulk density (Da), texture, pH, organic matter (MO), particulate organic matter (MOP), total nitrogen (Nt), and potentially mineralizable nitrogen (NPM). The following indices were determined: MOP/MO, NPM/Nt, NPM/MOP, MO/Li+Arc, MOP/RES, and the stratification ratios of soil organic carbon (COSr₁, COSr₂) and of nitrogen mineralization potential (NPMr₁, NPMr₂). All data were analyzed through ANOVA, means were separated by the LSD Test ($p \leq 0,05$), and a Pearson correlation was performed. Soil indicators Da, RES, MO, Nt and NPM, and indices NPM/Nt, MO/Li+Arc, NPM/MOP, IRC, IMC, COSr₁ and COSr₂ revealed statistical differences between soils under natural systems and cultivated soils. Indicators Da and RES, and index COSr₂ turned out to be more sensitive; they showed differences between perennial and annual cropping systems, the latter causing higher soil degradation. Even though further research is needed, the results obtained from this study would indicate that high quality soils have a stratification ratio COSr₁ >2 and COSr₂ >1,5; lower values would therefore suggest loss of SQ. The elaborated ratio MOP/RES showed differences in MOP quality and its cycling, indicating that in virgin soils and perennial cropping systems without removal of soil (T), the cycling is slower than in soils under annual crops (M).

Key words. Soil quality, indicators, functional indices, crops systems.

¹ FCA-UNNE (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste), Sargento Cabral 2131. Corrientes (3400). Argentina.

² Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), CERZOS (UNS-CONICET)-Dpto. Agronomía (UNS), San Andrés 800, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

* Autor de contacto: marcelatoleado94@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

En el presente siglo, la degradación del recurso suelo constituye uno de los principales problemas medioambientales que afecta a la humanidad, impactando en la capacidad productiva y en la calidad ambiental (Reicosky, 2007). En la Argentina debido a la expansión de la frontera agrícola se han eliminado centenares a millones de hectáreas de bosques (Montenegro *et al.*, 2007), de manera que la conservación y el uso eficiente del suelo son hoy una prioridad.

En Misiones, ubicada en el nordeste de la Argentina, abundan las "tierras coloradas", que comprenden suelos ácidos de baja fertilidad y elevada susceptibilidad a la erosión del orden de los Alfisoles, Oxisoles y Ultisoles (Peña Zubiarte *et al.*, 1990).

En esta provincia, la selva abarcaba en el año 2002, 1.224.000 ha, y durante el período 2002-2006 se deforestaron 62.412 ha (Montenegro *et al.*, 2007; Bertolami *et al.*, 2009), en tanto que Organizaciones no gubernamentales, estimaron pérdidas 250.000 ha de selva en los últimos 20 años (Korol, 2009), siendo la tasa de deforestación provincial del orden del -1,33%, superando la tasa de deforestación media de la Argentina (-0,82%) (Dirección de Bosques, 2007).

En la actualidad, resulta necesario contar con información científica que permita seleccionar indicadores de calidad, y desarrollar índices a fin de evaluar la calidad de los suelos rojos bajo los distintos sistemas agrícolas y los efectos del cambio en el uso de las tierras.

La calidad de suelo (CS) se define como su capacidad para funcionar dentro de ciertos límites del ecosistema, sustentar la productividad biológica, mantener la calidad del agua y del aire, además de promover la salud de plantas, animales y humanos (Karlen *et al.*, 1997). Las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden ser buenos indicadores de CS aunque la mayoría no son universales, varían en función del ambiente, el tipo de suelo (Shukla *et al.*, 2005) y la escala de estudio.

La materia orgánica del suelo (MO) es considerada un importante indicador de CS y sustentabilidad (Reeves, 1997). Sus fracciones más lábiles, corresponden al material más joven, la materia orgánica particulada (MOP) (Galantini & Suñer, 2008), la cual es considerada junto con el potencial de mineralizar nitrógeno (NPM), indicadores tempranos de CS (Fabrizzi *et al.*, 2003; Galvis-Spínola & Hernández-Mendoza, 2004), siendo este último sensible a la calidad de MO (Drinkwater *et al.*, 1996).

Para evaluar la CS, se pueden también establecer numerosos índices y relaciones vinculadas a la MO, entre ellos la relación MOP/MO (Galantini *et al.*, 2004); el Índice de labilidad (IL), el índice de reserva de carbono (IRC), y el índice de manejo del carbono (IMC) aplicados por Blair *et al.* (1995) y el índice de estratificación del COS y el índice de estratificación del NPM (Franzluebbers, 2002). De acuerdo a Franzluebbers (2002), la estratificación del COS es un índice utilizado para evaluar calidad de suelo o el funcionamiento de el ecosistema suelo, considerando que la materia orgánica en superficie es esencial para el control de la erosión, favorece la infiltración y la conservación de nutrientes (Nieto *et al.*, 2012).

Otro atributo de la CS relacionado con su actividad biológica, es la respiración (RES) (Doran & Jones, 1996; Sarrantonio *et al.*, 1996). Algunos autores como Dalurzo *et al.* (2005, 2006) y Toledo *et al.* (2010), han efectuado estudios de CS en suelos de Misiones bajo cultivo agrícola, determinando como indicadores de calidad a los siguientes atributos del suelo: macro y microporosidad, densidad aparente, estabilidad de los agregados, MO, nitrógeno total, MOP, fósforo orgánico, capacidad de intercambio efectiva y actividad de la fosfatasa ácida. En tanto que Toledo *et al.* (2010), determinaron que en Oxisoles la incorporación de suelos vírgenes a la agricultura, produjo pérdidas del 50 y 72% de MO y de MOP, respectivamente.

Teniendo en cuenta que los indicadores de CS más sensibles para detectar los cambios debido al manejo, también pueden ser sensibles a las variaciones meteorológicas, edáficas, topográficas y/o estacionales, puede ser mejor aplicar índices vinculados al funcionamiento del sistema (índices funcionales) ya que los mismos son considerados de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008). Por este motivo, se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: los indicadores de CS más sensibles permitirán ver las grandes diferencias entre sistemas, mientras que los índices funcionales permitirán detectar pequeños cambios.

En Misiones, dentro de la producción para el autoconsumo, el cultivo anual de maíz, junto al de mandioca son los más importantes en el sistema productivo. El maíz es utilizado como cultivo multipropósito, ya que no sólo aporta alimento para la familia sino también para los animales de la chacra. Es común el uso de la tracción a sangre y la preparación comienza en los meses de julio-agosto, con dos aradas y dos rastreadas o bien dos pasadas de arado

tipo "tatú". La siembra se realiza de agosto a septiembre con sembradora manual taca-taca y la cosecha se realiza en otoño en forma manual (Cáceres, 2007).

Dentro de los cultivos industriales, se destacan en la provincia, los cultivos perennes de té y de yerba mate, correspondiendo a Misiones más del 90% de la superficie de té cultivada en el país, constituyendo junto con Corrientes, la región tealera más austral del mundo, entre los 26° y 28° de latitud sur (Lysiak, 2008). Un rasgo distintivo de la producción del té argentino es que el 100% de la cosecha se realiza en forma mecanizada. La recolección de los brotes se efectúa en forma mecánica, en el período comprendido entre octubre y mayo.

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar algunos indicadores de CS a fin de evaluar el efecto de la eliminación de la selva y su reemplazo por cultivos anuales y perennes en suelos rojos del departamento de Oberá, provincia de Misiones, 2) desarrollar índices funcionales de CS y 3) aplicarlos junto con algunos índices utilizados en la bibliografía para evaluar su sensibilidad frente a los cambios que se producen en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio, diseño y muestreo

El trabajo se llevó a cabo sobre Oxisoles del departamento de Oberá (27°22'S, 54°58'W), provincia de Misiones, caracterizados por una baja fertilidad natural, alta acidez, y predominancia de arcillas de baja capacidad de intercambio. El área bajo estudio corresponde a una planicie discontinua de relieve ondulado con lomas de pendientes medias, con altitudes de 350 a 500 m snm (Peña Zubiate *et al.*, 1990). La región, se caracteriza por presentar clima subtropical sin estación seca marcada, temperatura media anual oscila entre 20,5 y 21,5 °C, precipitación media anual de 1500 a 1700 mm y evapo-transpiración potencial media anual de 1050 a 1100 mm (tipo climático "Cfa" en el Sistema de clasificación climática Köppen-Geiger), Peel *et al.*, 2007.

Se empleó un diseño completamente al azar, con tres tratamientos: Selva (S), cultivo de maíz (*Zea mays* L.) (M), y cultivo de Té (*Camellia sinensis* L.) (T). Se muestrearon suelos de 12 lotes bajo cultivo de maíz con labranza convencional, 12 lotes bajo cultivo de té, y 12 reservas de selva subtropical próximas a los lotes de maíz y de té.

El tratamiento S, correspondió a selva subtropical, caracterizada por la presencia de gran variedad de árboles de gran porte, abundancia de lianas y plantas epifitas, y sin disturbio antrópico. Este tratamiento fue tomado como tratamiento de

referencia de alta CS, para comparar los cambios producidos por el uso agrícola.

El tratamiento M, correspondió a lotes de pequeños productores (1 a 3,5 ha) con 5 a 7 años de monocultivo de maíz y 20 años previos de uso agrícola continuo bajo labranza convencional (arado de disco y control mecánico de malezas), cosecha manual, con alternancia de cultivos anuales como maíz, tabaco, y mandioca, y sin aporte de enmiendas orgánicas ni fertilizaciones.

El tratamiento T correspondió a lotes de productores con cultivo de té de 40 años de edad ó más, con fertilizaciones anuales de nitrógeno (N), Urea (150-200 kg ha⁻¹), sin agregado de enmiendas orgánicas. En el manejo tradicional del cultivo la operación de cosecha consiste en despojar a las plantas de los brotes y hojas más jóvenes producidos en el ciclo anual vegetativo, no aportando prácticamente residuos al suelo, pues son su producto comercial. En la zona bajo estudio, la cosecha fue mecánica, efectuándose 4 ó 5 cortes anuales, con rendimientos de 2500 a 3000 kg ha⁻¹ por corte.

En cada tratamiento, se extrajeron de cada uno de los lotes muestras de suelo compuestas, las cuales fueron tomadas a 3 profundidades de muestreo (0-0,10; 0,10-0,20 y 0,20-0,30 m), obteniendo 36 muestras por tratamiento y un total de 108 muestras de suelo en toda la experiencia. Para determinar densidad aparente, en cada tratamiento se extrajeron 3 muestras simples, para cada una de las profundidades consideradas, manteniendo intacta la estructura del suelo utilizando cilindros de Kopecki.

Variables evaluadas

A principios de otoño, se determinaron en campaña, respiración de suelo (RES), empleando cámaras enterradas 0,10 m, durante 1 hora y tubos draeger para la medición del dióxido de carbono desprendido (Sarrantonio *et al.*, 1996; USDA, 1999) y densidad aparente, por el método del cilindro (Forsythe, 1975).

En laboratorio, las 108 muestras de suelo extraídas, fueron secadas al aire, molidas y tamizadas por malla de 2 mm. A *posteriori*, se determinaron: textura por el método de Bouyoucos (Dewis & Freitas, 1970); carbono orgánico (CO), por el método de Walkley y Black modificado (Nelson & Sommers, 1996); materia orgánica particulada (MOP) por modificación del fraccionamiento físico de Cambardella *et al.*, 1999, separando la MOP con un tamaño entre 53 y 2000 µm; nitrógeno total (Nt) por método semi-micro Kjeldahl por Bremner & Mulvaney (1982); nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM) por Waring & Bremner modificado por Keeney & Nelson (1982). Para la conversión de CO a materia orgánica (MO), se aplicó el factor de Van Bemmelen, asumiendo un contenido promedio de 58% de carbono en la MO del suelo (Nelson & Sommers, 1996; Tabatabai, 1996). Posteriormente, se calcularon los

índices: MOP/MO; NPM/Nt, NPM/MOP, MO/Li+Arc (Quiroga *et al.*, 2008), y MOP/RES. Las relaciones de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) y del potencial de mineralización del nitrógeno (NPM) fueron calculadas a partir de las concentraciones de COS y de los valores de NPM obtenidos a la profundidad de 0-0,10 m, dividida la correspondiente a 0,20-0,30 m (COS_{r1} y NPM_{r1} respectivamente) (Franzluebbers, 2002), como así también las relaciones de estratificación considerando las profundidades 0-0,10 m y 0,10-0,20 m (COS_{r2} y NPM_{r2} respectivamente). Siguiendo lo aplicado por Blair *et al.* (1995), se calcularon: carbono no lábil (CNL), labilidad del carbono (L), y los índices de: reserva de carbono (IRC), de labilidad (IL), y de manejo del carbono (IMC).

La labilidad del carbono (L) fue calculada dividiendo el contenido de carbono lábil (CL) por el de carbono no lábil (CNL); el índice de labilidad (IL) fue calculado mediante el cociente: L cultivo/L selva y el índice de reserva de carbono (IRC) dividiendo el carbono del suelo cultivado por el carbono del suelo virgen (selva). *A posteriori*, se determinó el índice de manejo de carbono (IMC), a partir del IRC y del IL, mediante la ecuación:

$$IMC = IRC * IL * 100$$

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un ANOVA y se efectuaron comparaciones de medias utilizando el Test LSD ($\alpha < 0,05$). Para evaluar las relaciones entre variables, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre pares de variables ($\alpha < 0,05$). Los datos fueron procesados mediante el programa estadístico Infostat 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos evaluados resultaron de reacción ácida y textura arcillosa, con contenidos de limo+arcilla de 82 a 89%, sin diferencias significativas ($p < 0,112$).

Indicadores de calidad

Los resultados de los atributos evaluados se observan en la Tabla 1.

El uso agrícola produjo un aumento de la Da, en las tres profundidades, en el orden Té > Maíz > Selva. La no remoción del suelo bajo cultivo perenne, y el repetido paso y el

Tabla 1. Valores medios de densidad aparente (Da), nitrógeno total (Nt), materia orgánica (MO), nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM), materia orgánica particulada (MOP) y respiración (RES) en suelos bajo selva (S), té (T) y maíz (M).

Table 1. Mean contents of bulk density (Da), total nitrogen (Nt), organic matter (MO), potentially mineralizable nitrogen (NPM), particulate organic matter (MOP) and respiration (RES) of soils under subtropical rainforest (S), tea (T) and corn crops (M).

	Prof. (m)	S	M	T	CV	P ≤ F
Da Mg m ⁻³	0-0,10	0,76a	1,09b	1,46c	9,27	<0,0001
	0,10-0,20	0,86a	1,08b	1,35c	10,70	<0,0001
	0,20-0,30	0,83a	1,06b	1,25c	10,20	<0,0001
Nt g kg ⁻¹	0-0,10	3,43b	1,82a	1,80a	29,90	<0,0001
	0,10-0,20	1,95b	1,41a	1,39a	25,84	0,0024
	0,20-0,30	1,44b	1,07a	1,06a	27,36	0,0103
MO g kg ⁻¹	0-0,10	66,23b	39,06a	40,70a	23,17	<0,0001
	0,10-0,20	37,57b	31,00a	27,59a	18,60	0,0009
	0,20-0,30	29,10b	21,61a	22,97a	18,80	0,0008
NPM g kg ⁻¹	0-0,10	0,16b	0,04a	0,05a	52,92	<0,0001
	0,10-0,20	0,10b	0,03a	0,03a	53,61	<0,0001
	0,20-0,30	0,05b	0,02a	0,02a	41,82	<0,0001
MOP g kg ⁻¹	0-0,10	12,38b	7,57a	8,70a	41,41	0,0150
	0,10-0,20	4,08a	5,04a	5,28a	44,57	0,3579
	0,20-0,30	3,00a	3,03a	2,62a	39,43	0,6247
RES kg C-CO ₂ ha ⁻¹ día ⁻¹	0-0,10	46,19b	65,94c	26,80a	33,59	<0,0001

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

Different letters within rows represent least significant differences ($p < 0,05$).

peso de las cosechadoras de té, produjeron la mayor densificación del suelo. Van Dang (2007), señaló que la Da y la resistencia mecánica a la penetración (RMP) en Ultisoles bajo plantaciones de Té (10 a 40 años), tendieron a incrementarse en respuesta al tiempo, reflejando compactación de suelo y pérdida de calidad respecto a la situación original. Dalurzo *et al.* (2006) determinaron en Oxisoles bajo cultivo de Citrus, un aumento de la Da y de la RMP respecto a la situación prístina. En tanto que Botta *et al.* (2003), señalaron que el número de pasadas reiteradas de maquinarias en una misma senda, inducen a una compactación subsuperficial del suelo por cuanto la Da, como la superficie y la profundidad del suelo compactado aumentan con el número de pasadas (Jorajuría *et al.*, 1997), siendo mayores los riesgos de compactación a niveles que afecten la producción agrícola, en suelos de textura arcillosa (Hakansson & Reeder, 1994). En suelos tropicales de arcillas de baja actividad Píccolo *et al.* (2008) observaron pérdidas de carbono, de nitrógeno y de porosidad, luego de la tala y quema de la selva, y posterior implantación de cultivo de yerba mate y lo atribuyeron a la escasa incorporación de materia seca y al continuo control mecánico de malezas.

El contenido de MO, fue menor en suelos cultivados para todas las profundidades con diferencias significativas respecto a suelos bajo S. Las pérdidas de MO fueron del orden del 40% para los primeros 0, 10 m del perfil y del 31% para el espesor de 0-0,30 m. Similares resultados fueron encontrados bajo cultivo de Citrus por Dalurzo *et al.* (2005), en tanto que Toledo *et al.* (2010), determinaron bajo Tabaco pérdidas del 46%. Otros autores como Píccolo *et al.* (1998) en Ultisoles bajo cultivo de yerba y Amado *et al.* (2006) en Hapludoxes bajo cultivo de poroto negro-maíz determinaron también pérdidas similares. En regiones subtropicales, los suelos bajo S, reciben un constante aporte de MO no sólo desde la hojarasca sino también por la gran abundancia de raíces y raicillas que se renuevan constantemente (Dalurzo *et al.*, 2005); en tanto que suelos con laboreo sufren una mayor aireación que favorece la rápida mineralización del material orgánico existente. Tanto la destrucción de los agregados, acelerando la degradación de los materiales orgánicos lábiles, como la disminución de residuos por extracción por las cosechas producen una disminución de la MO (Píccolo *et al.*, 2004). En el caso del T, la cosecha del material foliar produce una disminución de los aportes, y en el caso del M no hubo incorporación de rastrojos y sí, un laboreo periódico.

Tanto en suelos vírgenes como en cultivados, los mayores valores de MO y MOP se presentaron en superficie, debido a una mayor acumulación de material vegetal (hojarasca y/o residuos) en los primeros centímetros del perfil lo que favorece la acumulación de MO, principalmente de material particulado (Eiza *et al.*, 2005). La MOP sólo presentó diferencias significativas entre selva y suelos bajo cultivo en los primeros 0, 10 m, correspondiendo los mayores valores de MOP a suelos bajo S.

Las pérdidas de MOP por efecto del uso agrícola fueron del orden del 30 al 39%. Este material joven y activo del suelo, fue sensible al uso, resultando menor en los sistemas agrícolas, considerándola responsable de la rápida caída de los contenidos de MO que se puede observar al cultivar suelos vírgenes (Dalurzo *et al.*, 2005; Amado *et al.*, 2006; Galantini & Suñer, 2008).

El Nt y el NPM, presentaron diferencias significativas entre suelos prístinos y cultivados en las tres profundidades evaluadas, siendo mayores en S atribuido al mayor aporte de hojarasca en la superficie bajo selva subtropical. En todos los casos los contenidos de Nt se mantuvieron dentro del intervalo considerado medio para suelos tropicales de América Latina (Fassbender *et al.*, 1987), en tanto que las reducciones de NPM en los suelos cultivados fueron del orden del 69 al 75% bajo uso agrícola. Valles de la Mora *et al.* (2008) encontraron valores similares de NPM, en los primeros centímetros en Oxisoles de México. El NPM acumulado en los primeros 0,30 m de suelo para los diferentes tratamientos fue mayor en los suelos de referencia (300 mg kg^{-1}) respecto de T y M (100 mg kg^{-1}). Resultados similares fueron hallados por Dalurzo *et al.* (2005) y por Videla *et al.* (2005). La disminución en la mineralización del nitrógeno observada en suelos cultivados, indica una menor actividad microbiana y una degradación de las propiedades biológicas del suelo (Deenik *et al.*, 2006).

La RES fue mayor en suelos que sufrieron remoción (M), menores en Symás bajos en T. El menor valor para S, respecto al M, fue atribuido a la menor temperatura del suelo bajo selva por la mayor sombra y mayor espesor de hojarasca en superficie, en comparación con la mayor insolación y temperatura del suelo bajo el cultivo de escarda. Asimismo, la mayor RES en M, fue atribuida a la abundancia de raíces y raicillas que presenta esta especie en los primeros centímetros de suelo, y al sistema de labranza aplicado que aumentó la aireación y promovió la actividad microbiana y descomposición de los materiales orgánicos. La labranza con arado puede ocasionar pérdida de carbono del suelo,

debido a que la remoción del suelo afecta a la agregación, exponiendo la MO que se encuentra protegida dentro de los agregados al ataque microbiano (Elliott, 1986), produciéndose una mayor descomposición de la MO, liberación de CO₂ y aumento de la RES (USDA, 1999). Esta mayor liberación en suelos bajo M se condice con la menor MO hallada para los primeros 0,10 m. Los menores valores de RES en suelos bajo T, se atribuyeron a la no remoción del suelo, y a la densificación del mismo con la consecuente disminución de la macroporosidad. Autores como Reicosky & Lindstrom (1993) y Reicosky (2000) destacaron que las pérdidas de C-CO₂ son directamente proporcionales al volumen de suelo disturbado por la herramienta de labranza, corroborando un incremento de la respiración del suelo con el incremento de la intensidad y profundidad de laboreo.

Toledo *et al.* (2010) determinaron valores similares de RES en suelos rojos subtropicales bajo selva (47,32 Kg C-CO₂ ha⁻¹ día⁻¹) y bajo cultivo de tabaco (38,31 Kg C-CO₂ ha⁻¹ día⁻¹), en tanto que Dalurzo *et al.* (2005) determinaron valores similares a los hallados en T, cuando midieron RES en suelos rojos bajo otro cultivo perenne (*Citrus sp.*; 33,37 Kg C-CO₂ ha⁻¹ día⁻¹). De acuerdo a los valores de RES dados por la USDA (1999), en cuanto a clases de respiración y estado del suelo, bajo T la actividad biológica sería mediana mientras que en suelos bajo S y M presentarían una actividad ideal.

Los coeficientes de variación de RES, MOP y NPM fueron elevados, los mismos resultan inherentes a la variación propia de los atributos y fueron similares a los encontrados por otros autores como Tang & Baldocchi (2005), Dalurzo *et al.* (2006) y Toledo *et al.* (2010).

Índices funcionales

Se evaluó luego el efecto del uso del suelo a través del desarrollo de los índices: MOP/MO, NPM/Nt, MO/Li+Arc,

NPM/MOP, MOP/RES, calculados para los primeros 0,10 m de profundidad (Tabla 2); los índices de estratificación de nitrógeno potencial: NPM_{r1}, NPM_{r2} (Fig. 1); los índices de estratificación de carbono orgánico: COS_{r1} (Franzluebbers, 2002), y COS_{r2} (Fig. 2); y los índices de Blair *et al.*, 1995: de labilidad, IL; de reserva de carbono, IRC y de manejo del carbono, IMC (Tabla 3).

Índice MOP/MO: no presentó diferencias significativas entre usos de suelo indicando que del total de la MO entre un 19 y un 22% corresponde a la fracción más activa, la cual participa fundamentalmente en la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y contribuye a la estructura del suelo (Bouajila & Gallali, 2010). Estos resultados mostraron que si bien en los suelos cultivados disminuyó la MOP, también lo hizo la MO, manteniéndose la proporción que existía en suelos bajo condición original, de manera que la degradación producida por el uso fue de magnitud proporcionalmente semejante en las dos fracciones consideradas. Las variaciones en la proporción de MOP, respecto de la MO total, permitieron inferir acerca del enriquecimiento o pérdida de MO en suelos sometidos a diferentes manejos, así valores bajos del índice MOP/MO, indicarían condiciones muy favorables para la transformación del material orgánico que ingresa al suelo (Galantini, 2008). Galantini *et al.* (2002), trabajando en Haplustoles bajo clima templado, hallaron valores similares para suelos cultivados (COP/COT: 0,17 a 0,22). Sin embargo, para suelos de referencia encontraron valores más elevados (0,29). Piccolo *et al.* (1998) encontraron igual valor de COP/COT en suelos de Misiones bajo selva que en suelos bajo 40 años de monocultivo de yerba mate. Al igual que Piccolo *et al.* (1998), no se encontraron diferencias en la proporción de la fracción orgánica particulada entre suelos prístinos y cultivados. Estos resultados podrían sugerir que en regiones subtropicales caracterizadas por altas temperaturas y precipitaciones, los marcados procesos de descompo-

Tabla 2. Índices MOP/MO, NPM/NT, NPM/MOP y MO/Li+Arc obtenidos para los 0,10 m de suelo bajo los diferentes tratamientos.
Table 2. Ratios MOP/MO, NPM/NT, NPM/MOP y MO/Li+Arc, obtained for 0,10 m under different treatments.

Tratamiento	MOP/MO	NPM/Nt	NPM/MOP	MO/li+Arc	MOP/RES
Selva	0,19a	0,05b	0,013b	0,08b	0,27b
Maíz	0,19a	0,02a	0,006a	0,04a	0,13a
Té	0,22a	0,03a	0,007a	0,04a	0,33b

El CV medio de los 5 índices fue=35.

The mean CV of the 5 indices was=35

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre tratamientos.

Different letters represent significant statistical differences among treatments (p<0,05).

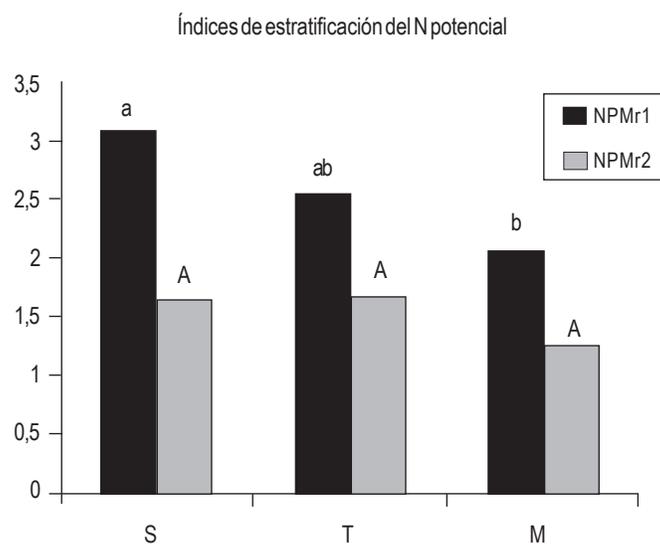


Figura 1. Índices de estratificación del nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM) de 0-0,10 m/0,20-0,30 m (NPM_{r1}) y de 0-0,10 m/0,10-0,20 m (NPM_{r2}) para los tratamientos: selva subtropical (S), cultivo de Té (T) y cultivo de Maíz (M). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Figure 1. Stratification ratios of potentially mineralizable nitrogen (NPM) from 0-0,10 m/0,20-0,30 m (NPM_{r1}) and 0-0,10 m/0,10-0,20 m (NPM_{r2}) depths under different treatments: subtropical rainforest (S); tea (T), and corn crops (M). Different letters represent significant statistical differences among treatments ($p < 0,05$).

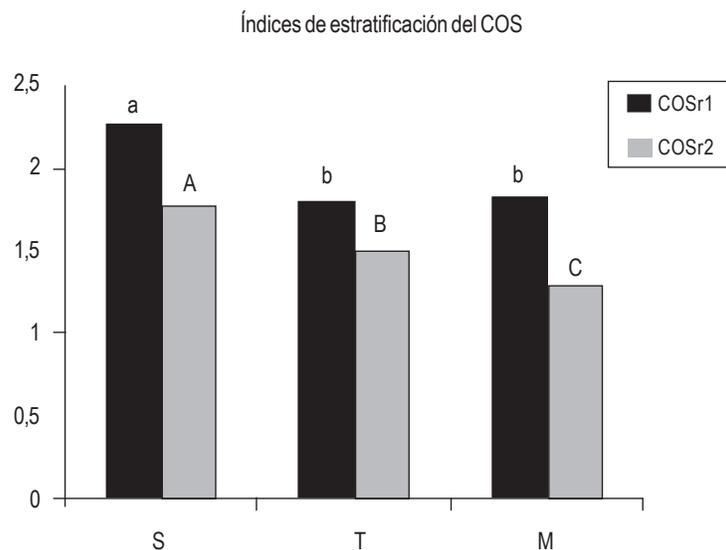


Figura 2. Índices de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) bajo selva (S), té (T) y maíz (M). COS_{r1} : 0-0,10 m/0,20-0,30 m; COS_{r2} : 0-0,10 m/0,10-0,20 m. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Figure 2. Stratification ratios of soil organic carbon under different treatments: subtropical rainforest (S); tea (T), and corn (M) crops. COS_{r1} : 0-0,10 m/0,20-0,30 m; COS_{r2} : 0-0,10 m/0,10-0,20 m depths. Different letters represent significant statistical differences among treatments ($p < 0,05$).

sición llevarían a que suelos que se encuentran bajo cultivo por más de 20 a 40 años alcancen un equilibrio con un 19 a 22% de material orgánico joven y un 81 a 78% de material orgánico estable, independientemente del uso del suelo.

Índice NPM/Nt: representó la proporción del nitrógeno total del suelo que es potencialmente disponible para las plantas en el próximo ciclo de cultivo. En la Tabla 2, se puede observar que resultó sensible para diferenciar suelos prístinos de cultivados. Dalurzo *et al.* (2006) encontraron en Oxisoles bajo cultivo, valores de NPM de 0,089 g kg⁻¹ y de Nt de 2,4 g kg⁻¹, lo que arrojaría una relación NPM/Nt similar a la encontrada en suelos bajo T y M.

Índice MO/Li+Arc: sólo resultó sensible para distinguir suelos bajo sistemas naturales, de sistemas cultivados. Considerando que no se encontraron diferencias significativas en las fracciones limo+arcilla, el índice estaría respondiendo únicamente a las diferencias en los contenidos de MO y su utilización sería más recomendable cuando los suelos bajo las situaciones a comparar difieran en su granulometría, a fin de minimizar los efectos en las variaciones debidos a la textura (Quiroga *et al.*, 2008).

Índice NPM/MOP: indica el potencial del suelo de suministrar N a los vegetales a partir del material orgánico más fácilmente descomponibles. Permitió distinguir entre suelos disturbados y no disturbados, denotando que en suelos de alta calidad, un valor medio de 1,3% de la MOP podría proporcionar NPM, es decir N disponible para los vegetales en un lapso de tiempo más o menos breve; en tanto que en suelos agrícolas la proporción resultó 50 veces menor. Si relacionamos con la proporción de MOP dentro de la MO total del suelo, la cual fue similar en los distintos sistemas, vemos que si consideramos que el NPM

proviene principalmente de la MOP, la diferencia radicaría entonces en la calidad de esa MOP.

Índice MOP/RES: estaría asociado a la susceptibilidad a la degradación biológica del material más lábil del suelo, y ligado a la velocidad de ciclado de la MO y a la disponibilidad de nutrientes. Distinguió suelos bajo cultivo anual de escarda (M) de suelos sin remoción dentro de los que se incluyen suelos bajo T y S (Tabla 2) y estaría indicando que suelos bajo M y T, si bien no difieren en cantidad de MOP, difieren en la dinámica de su descomposición resultando la MOP bajo T con un ciclado más lento. En el suelo bajo selva se encontró igual cantidad de MOP y mayor proporción de N lábil que en los cultivados, lo que estaría indicando una fracción orgánica más rica en N, confirmado por la mayor relación NPM/MOP. Sin embargo, la degradabilidad del material orgánico lábil (MOP/RES) pone en evidencia diferencias en la actividad biológica en los suelos cultivados, con mayor actividad en M, posiblemente debido a que el suelo bajo M posee menores densidad aparente y cobertura, y mayor temperatura, que bajo T.

Índices de estratificación NPM_{r1} y NPM_{r2}: corresponden al potencial de mineralización de N. Sólo el NPM_{r1} resultó sensible para distinguir suelos prístinos de suelos bajo cultivo anual, tomando los suelos bajo cultivo perenne una posición intermedia (Fig. 1). Suelos sin disturbar presentaron los mayores potenciales, con índices superiores a 2,5 en tanto que los suelos bajo cultivo presentaron un NPM_{r1} < 1,5, en coincidencia con la información otorgada por los mayores valores NPM/MOP encontrados en suelos bajo vegetación climax.

Índice de estratificación COS_{r1}: permitió distinguir entre suelos naturales y cultivados (Fig. 2). Los suelos sin

Tabla 3. Carbono lábil (CL) y no-lábil (CNL), carbono total (CT), índice de reserva de carbono (IRC), labilidad del carbono (L), índice de labilidad (IL), e índice de manejo del carbono (IMC) en suelos naturales y cultivados considerando los primeros 0,10 m del perfil de suelo.

Table 3. Labile (CL) and non-labile carbon (CNL), total carbon (CT), carbon pool index (IRC), lability of carbon (L), lability index (IL), and carbon management index (IMC) for cropped and uncropped soils of 0,10 m.

	CL	CNL	CT	IRC	L	IL	IMC
Selva	7,18a	31,23a	38,41a	1,00a	0,25a	1,00a	100,00a
Maíz	4,39b	18,26b	22,66b	0,59b	0,24a	0,99a	58,88b
Té	5,05b	17,87b	23,61b	0,61b	0,29a	1,19a	71,88b

L=CL/CNL; IL=L cultivo/L selva; IRC=CT cultivo/CT selva; IMC=IRC*IL*100

El CV medio de los 7 índices fue=31,9.

The mean CV of the 7 indices was=31,9.

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05) entre tratamientos.

Different letters represent significant statistical differences among treatments (p<0,05).

disturbar, presentaron un índice COS_{r1} superior a 2. Estos valores coinciden con lo encontrado por Franzluebbers (2002), quien informó en análisis preeliminares que independientemente del tipo de suelo y del régimen climático, valores de los índices de estratificaron de $COS > 2$ indicarían que se está proveyendo de calidad al suelo y valores < 2 corresponderían a suelos bajo condiciones de degradación. Nieto *et al.* (2012) determinaron índices $COS_{r1} < 2$ para suelos bajo labranza convencional y > 2 para suelos bajo cultivos de cobertura y bajo labranza cero y asociaron estos dos últimos manejos a una mayor calidad de suelo y a un mayor potencial para secuestrar carbono.

Índice de estratificación COS_{r2} : fue desarrollado a partir del índice de estratificación de carbono propuesto por Franzluebbers (2002), pero con una modificación en las profundidades consideradas ya que se relacionaron los primeros centímetros del perfil (0-0,10 m) con la profundidad subsuperficial (0,10-0,20 m). En este caso el índice aplicado resultó más sensible que los anteriores, distinguiendo suelos prístinos, de cultivados y dentro de éstos diferenció estadísticamente suelos bajo cultivo perenne de cultivo anual (Fig. 1).

El valor del índice COS_{r2} hallado para suelos climax fue $> 1,5$ y para suelos cultivados fue $< 1,5$. Ciertamente se necesitarán más investigaciones, pero estos valores menores a 1,5 indicarían pérdidas de calidad debido al uso agrícola, siendo menor la estratificación del carbono en suelos bajo cultivo anual que bajo cultivo perenne, lo cual es atribuido a la remoción de suelo por efecto de las labranzas. Moraes Sá & Lal (2009) determinaron en Oxisoles, índices de estratificación de COS relacionando distintas profundidades, comparando suelos bajo 22 años de labranza convencional y suelos bajo vegetación natural, y concluyeron que todos los índices disminuyeron respecto a la situación natural, y lo atribuyeron a la ruptura de los agregados y la consecuente exposición de la MO a los procesos microbianos.

El índice de estratificación de COS aumentó con el aumento de la profundidad considerada para su cálculo, siendo mayores los valores de COS_{r1} respecto a COS_{r2} , en coincidencia con lo hallado en Oxisoles por Moraes Sá & Lal (2009).

Índice de labilidad (IL): relaciona el carbono lábil respecto al no lábil y su proporción respecto a la misma relación en la condición original del suelo. No presentó sensibilidad para distinguir entre usos de suelo (Tabla 3).

Índice de reserva de carbono (IRC): indica la proporción del carbono que quedó en el suelo respecto a la re-

serva original contenida en suelos bajo condición prístina. El índice sólo distinguió entre suelos vírgenes de cultivados, indicando que en suelos agrícolas se conservó entre el 59 y el 61% del carbono orgánico contenido en el suelo de referencia u original.

Índice de manejo del carbono (IMC): considera la labilidad de la reserva de carbono que hay en el suelo, y para su cálculo se tuvieron en cuenta las dos reservas de carbono (lábil, CL y no-lábil, CNL), y representaría mejor lo que ocurre en el suelo que si se toma cada uno en forma individual (Blair *et al.*, 1995). En la Tabla 3, se puede observar que ambos compartimentos (CL y CNL) han disminuido por efecto del uso agrícola y han impactado sobre este índice de manejo del carbono que se presentó en el orden $M = T < S$. Blair *et al.* (1995) sostienen que no hay un valor ideal de IMC sino que el índice provee una medición sensible de la tasa de cambio en la dinámica del carbono de los sistemas evaluados en relación a un sistema de referencia más estable, en nuestro caso la situación climax dada bajo selva subtropical.

Relación entre variables

Al calcular la correlación de Pearson ($p < 0,05$), considerando todas las profundidades (0-0,30 m), resulta interesante destacar que el NPM mostró una correlación positiva y significativa ($p < 0,05$) con las variables MOP ($r = 0,51$), MO ($r = 0,74$), Nt ($r = 0,74$), y con el índice MO/Li+Arc ($r = 0,76$). Valores similares con MOP y MO fueron halladas por Fabrizzi *et al.* (2003) y con MO, Nt y RES por Benintende *et al.* (2012). Cuanto mayor es el índice MO/Li+Arc, mayor será el NPM. Esto es atribuido a que la textura del suelo afecta la disponibilidad de nutrientes esenciales como el N, por su influencia en la MO y en la actividad microbiana (Hassink *et al.*, 1993). Por un lado el tamaño de poros es reducido y dificulta el acceso de las bacterias al sustrato orgánico (Galantini *et al.*, 2004) y otro, particularmente en suelos ricos en óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio, ocurren mecanismos de protección a través de la formación de complejos órgano minerales que disminuyen la descomposición de las fracciones orgánicas (Galantini *et al.*, 2004) y por ende el potencial del suelo de mineralizar nitrógeno.

CONCLUSIONES

Los indicadores Da, RES, MO, Nt, y NPM y los índices: NPM/Nt, MO/Li+Arc, NPM/MOP, IRC, IMC, COS_{r1} , COS_{r2} ,

mostraron sensibilidad para distinguir los suelos bajo sistemas naturales de los cultivados.

La Da, la RES y el índice de estratificación COS_{12} , resultaron más sensibles diferenciando también entre sistemas agrícolas: cultivo perenne de cultivo anual, indicando a este último como el sistema más degradante. Estos resultados preliminares indicarían que suelos Oxisoles bajo vegetación climax presentarían un índice de estratificación $COS_{12} > 1,5$ y que valores menores indicarían pérdida de calidad.

El índice MOP/RES detectó diferencias en la calidad de la MOP y de su ciclado, resultando los suelos vírgenes y los suelos cultivados sin remoción (T), con un ciclado más lento que los suelos bajo cultivo anual.

La combinación de la información obtenida en los diferentes atributos en índices funcionales, contribuyó a conocer lo que sucede en el suelo por efecto del uso y orientar las decisiones relacionadas con el manejo de los suelos y los sistemas de cultivo. Este abordaje brinda índices que caracterizan el comportamiento del sistema, por lo que representan una herramienta más adecuada, si bien resulta necesario mayor conocimiento de las variaciones en diferentes ambientes y la ponderación entre ellos.

AGRADECIMIENTOS

A la AGENCYT, por la financiación a través del proyecto PICTO-UNNE-111 y a la Ing. Agr. S.M. Contreras Leiva, por la determinación de la textura de los suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Amado, TJC; C Bayer; PC Conceição; E Spagnollo; B Costa de Campos & M da Veiga. 2006. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. *J. Environ. Qual.* 35: 1599-1607.
- Benintende, S; M Benintende; D. David; M Sterren & M Saluzzio. 2012. Caracterización de indicadores biológicos y bioquímicos en Alfisoles, Molisoles y Vertisoles de Entre Ríos. *Cl. Suelo (Argentina)* 30(1): 23-29.
- Bertolami, F; J Bono; E Wabö; P Picchio; E Manghi; M Strada; MG Parmuch; M Stamati & C Montenegro. 2009. Superficie deforestada, destino de las áreas y características dasométricas de los bosques sustituidos en la región Selva Misionera en el período 1998-2006. II Jornadas Argentinas de Ecología de Paisajes. CD.
- Blair, GJ; D Rod; B Lefroy & L Lisle. 1995. Soil Carbon Fractions Based on their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index for Agricultural Systems. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 1459-1466.
- Botta, G; R Balbuena; L Draghi; H Rosatto; J Claverie & F Ferrero. 2003. Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de labranza convencional. *Agro-ciencia* 19: 99-106.
- Bouajila, A & T Gallali. 2010. Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *Afr. J. Agric. Res.* 5(8): 764-774.
- Bremmer, AE & CS Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In: Page *et al.* (eds.). *Methods of soil analysis, Part 2*, Pp. 595-624. Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison.
- Cáceres, DM. 2007. Catálogo de tecnologías para pequeños productores agropecuarios. Proyecto de desarrollo de pequeños productores agropecuarios. Variedades de maíz adaptadas para el consumo familiar. Ficha 92. http://www.proinder.gov.ar/Productos/Hipermedia/contenidos/ta1/Archivos/fichas/mejoramiento_genetico/ficha_092.htm. Consultado: 7/05/2013.
- Cambardella, CA; AM Gajda; JW Doran; BJ Weinhold & T Kettler. 1999. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. In: R Lal, JF Kimble & RF Follet (eds). *Carbon methods*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Dalurzo, HC; DM Toledo & S Vazquez. 2005. Parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola. *Cienc. Suelo (Argentina)* 23: 159-165.
- Dalurzo, HC; S Vazquez & DM Toledo. 2006. Calidad de Suelos en Agroecosistemas de Misiones. En: A. Paz González (ed). *Bases para la conservación de suelos y aguas en la cuenca del Rio Paraná*. Pp. 109-117. Xunta de Galicia. España.
- Deenik, J. 2006. Nitrogen mineralization potential in important agricultural soils of Hawai'i. College of Tropical Agriculture and Human Resources (CTAHR), Soil and Crop Management. <http://www.ctahr.hawaii.edu/deenikj/Downloads/SCM-15.pdf>. Consultado: 27/04/2013.
- Dewis J & F Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N° 10. FAO. Roma. Pp. 36-57.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat, Versión 2011. Grupo InfoStat. FCA, UNC, Córdoba, Argentina.
- Dirección de Bosques. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina. Pp.10. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Dirección de Bosques. Unidad de manejo del sistema de evaluación forestal.
- Doran, JW & A Jones. 1996. Methods for assessing soil quality. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Drinkwater, LE; C Cambardella; JD Reeder & CW Rice. 1996. Potentially mineralizable nitrogen as an indicator of biologically active soil nitrogen. p. 217-230. In: JW Doran & AJ Jones (eds.). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc. Madison, WI.
- Eiza, MJ; N Fioriti; GA Studdert & HE Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Cl. Suelo* 23(1): 59-67.
- Elliott, ET. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Fabrizzi, KP; A Morón & FO García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1831-1841.

- Fassbender, HW & E Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina IICA. San José. Costa Rica. 420 pp.
- Forsythe, W. 1975. Física de Suelos. IICA. San José. Costa Rica. 212 pp.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Res.* 66: 95-106.
- Galantini JA, RA Rosell, G Brunetti & N Senesi. 2002. Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Cienc. Suelo* (Argentina) 20(1): 17-26.
- Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti & R Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Galantini, JA. 2008. Calidad de las fracciones orgánicas en suelos naturales y cultivados. En: J Galantini *et al.* (eds.). Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Pp. 71-95. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Galantini JA & L Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia* Vol. XXV: 41-55.
- Galvis-Spínola A & T Hernández-Mendoza. 2004. Cálculo del nitrógeno potencialmente mineralizable. *Interciencia* 29: 377-383.
- Hakansson, I & J Reeder. 1994. Swedish experiments on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use Manage* 1: 113-116.
- Hassink, J; LA Bouwman; KB Zwart; J Bloem & L Brussaard. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma* 57: 105-128.
- Jorajuría, D; L Draghi & A Aragon. 1997. Effects of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil Till. Res.* 41: 1-12.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RG Cline; RF Harris & GE Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Keeney, DR & RA Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. p. 643-698. In: Page *et al.* (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy monogr. N° 9. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Korol, S. 2009. Argentina: Misiones, la deforestación, el cambio climático y el tornado de San Pedro. Argenpress. <http://www.argenpress.info/2009/09/argentina-misiones-la-deforestacion-el.html>. Consultado 22/02/2013.
- Lysiak, E. 2008. Sistema agroindustrial del Té. p. 75-78. En: Economía de los cultivos industriales: algodón, caña de azúcar, maní, tabaco, té y yerba mate. Bongiovanni, (ed.). Proyecto Específico Análisis económico y de Mercado, Oportunidad, Riesgo y Competitividad para los Sistemas Productivos y los Productos Agroindustriales (PIND3262). Manfredi, Córdoba (AR): Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Montenegro, C; M Strada; MG Parmuchi; J Bono; M Stamati; E Manghi; M Brouver; E Wabo & F Bertolami. 2007. Informe sobre deforestación en Argentina 2007. Dirección de bosques. Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable. http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UMSEF/File/deforestacion_argentina_v2.pdf. Consultado 22/02/2013.
- Moraes Sá, JC & R Lal. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* 103: 46-56.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: JM Bigham (ed.). Methods of soil analysis, Part. 3. Chemical Methods. Pp. 961-1010. Am. Soc. Agron. & Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, WI.
- Nieto, OM; J Castro & E. Fernández Ondoño. 2012. Sustainable agricultural practices for Mediterranean olive groves. The effect of soil management on soil properties. *Spanish Journal of Soil Science* 2: 70-77.
- Peel MC; Finlayson BL & TA Mc Mahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1633-1644.
- Peña Zubiata CA; D Maldonado Pinedo; A D'Hiriart; & AA Marchi. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. Tomo II. SAGPyA. Proyecto PNUD/ARG 85/019. INTA. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Imprenta La Paz. Buenos Aires, Argentina.
- Piccolo, GA; JA Galantini; RA Rosell & AM Miglierina. 1998. Transformaciones de la materia orgánica en un suelo laterítico (Misiones, Argentina): II. Cambios en la materia orgánica particulada y humificada. *Agricultura Técnica* (Chile) 58(2): 142-150.
- Piccolo, GA; JA Galantini & RA Rosell. 2004. Organic carbon fractions in a yerba mate plantation on a subtropical Kandihumult of Argentina. *Geoderma* 123: 333-341.
- Piccolo, GA; AE Andriulo & B Mary. 2008. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones Province (Argentina). *Sci. Agric.* (Piracicaba, Brazil) 65: 290-297.
- Quiroga, A; R Fernandez; D Funaro & N Peinemann. 2008. Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. En: J Galantini *et al.* (eds.) Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Pp. 97-116. Editorial UNS.
- Reeves, D. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43: 131-167.
- Reicosky, DC & MJ Lindstrom. 1993. Fall tillage method: Effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.* 85: 1237-1243.
- Reicosky, DC. 2000. Concepts and strategies on conservation tillage. p.11. In: Conservation tillage: A viable option for sustainable agriculture in Eurasia. Karabayev *et al.*, (eds.). CIMMYT, ICARDA. Free download in: http://books.google.com.ar/books?id=-EriA4pLaMoC&sitesec=buy&hl=es&source=gbs_vpt_read. Consultado: 8/05/2013.
- Reicosky, DC. 2007. Carbon sequestration and environmental benefits from no-till systems. In: Goddard, T; M Zoebisch; Y Gan; W Ellis; A Watson & S Sombatpanit (eds.). No-till farming systems. Special publication N° 3 by The World Association of Soil and Water Conservation (WASWC).
- Sarrantonio, M; JW Doran; MA Liebig & JJ Alvorson. 1996. On farm assessment of soil quality and health. p. 83-105. In: JW Doran & AJ Jones (eds.). Methods for assessing soil quality. SSSA Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- Shukla, MK; R Lal & M Ebinger. 2005. Soil quality indicators for reclaimed mine soils in southeastern Ohio. *Soil Sci.* 169: 133-142.
- Tabatabai, MA. 1996. Soil organic matter testing: An overview. p. 1-10. In: F Magdoff *et al.* (eds.). Soil organic matter: Analysis and interpretation. SSSA Spec. Publ. 46. American Society of Agronomy. Madison, WI.

- Tang, J & DD Baldocchi. 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry* 73: 183-207.
- Toledo, M; H Dalurzo & S Vazquez. 2010. Fosfatasa ácida en Oxisoles bajo cultivo de tabaco. *Cienc. Suelo* (Argentina) 28(1): 33-38.
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Traducción al Español del: «Soil Quality Test Kit Guide» Realizada por los investigadores: Alberto Lutens Juan Carlos Salazar Lea Plaza del: «Área de Cartografía de Suelos y Evaluación de Tierras». CRN -CNIA-INTA.
- Valles de la Mora, B; G Cadisch & E Castillo Gallegos. 2008. Mineralización de nitrógeno en suelos de pasturas con Arachispintoi. *Tec. Pecu. Mex.* 46(1): 91-105.
- Van Dang, M. 2007. Quantitative and qualitative soil quality assessments of tea enterprises in Northern Vietnam. *Afr. J. Agric. Res.* 2(9): 455-462.
- Videla C; A Pazos; PC Trivelin; HE Echeverría & GA Studdert. 2005. Mineralización bruta de nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. *Cienc. Suelo* (Argentina) 23(2): 133-144.
- Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2079-2087.