

# Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina

*Sensitivity of soil biological indicators in an Argiudoll from the Argentinean Pampas*  
*Sensibilidade dos indicadores biológicos do solo num Argiudol da região das Pampas Argentinas*

Received: 23.04.2015 | Revised: 14.08.2015 | Accepted: 20.08.2015

## AUTORES

Ferreras L. A.<sup>@,1</sup>  
lferrera@unr.edu.ar

Toresani S. M. I.<sup>1</sup>

Faggioli V. S.<sup>2</sup>

Galarza C. M.<sup>2</sup>

<sup>@</sup> Corresponding Author

<sup>1</sup> Facultad Ciencias Agrarias (UNR). Campo Experimental J.F. Villarino, Casilla Correo 14. 2125 Zavalla, Santa Fe, Argentina.

<sup>2</sup> Estación Experimental Agropecuaria INTA Marcos Juárez. Ruta Provincial, n° 12, Casilla Correo 21. 2580 Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

## RESUMEN

Mantener la calidad de los suelos y la productividad de los cultivos es un desafío importante para la agricultura moderna. Prácticas de manejo que tiendan a incrementar el contenido de carbono del suelo y a la vez favorecer la supervivencia y actividad microbiana podrían contribuir a la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios producidos por diferentes prácticas de manejo (sistemas de labranza e inclusión de cultivo de cobertura) sobre parámetros biológicos, con el fin de determinar su capacidad como indicadores sensibles de calidad del suelo. En un ensayo ubicado en EEA-INTA Marcos Juárez (Provincia de Córdoba, Argentina), sobre muestras compuestas de suelo (profundidad de muestreo entre 0-7,5 cm) se evaluó: el carbono orgánico del suelo (CO), el carbono de la biomasa microbiana (CBM), el cociente metabólico ( $qCO_2$ ) y las actividades enzimáticas (fosfatasa ácida, ureasa y deshidrogenasa) durante seis fechas de muestreo. Los tratamientos fueron: labranza combinada (LC); siembra directa (SD) y siembra directa con cultivo de cobertura (SDCC). Se muestreo además un pastizal antiguo que no ha recibido laboreo desde el inicio del ensayo (año 1993), considerado como Suelo de Referencia (R). Las parcelas bajo cultivo presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a R para el CO, el CBM, el  $qCO_2$  y las tres enzimas evaluadas. Las pérdidas de CO en los tratamientos LC, SD y SDCC con respecto a R fluctuaron entre 39,2%, 35,1% y 29,1%, respectivamente. Comparando los sistemas de manejo a lo largo de los seis muestreos, LC presentó menor CBM, con valores que oscilaron entre 50% y 67% de lo hallado en SDCC. La eficiencia metabólica en SDCC fue mayor con respecto a LC, debido a que presentó valores significativamente menores de  $qCO_2$  (en promedio 32%). Asimismo, LC presentó una menor actividad enzimática (fosfatasa ácida, ureasa y deshidrogenasa), con respecto a SDCC ( $p < 0,05$ ). Se halló una correlación positiva entre actividades enzimáticas y CBM, y entre CBM y CO. A través de técnicas de análisis multivariado se pudieron diferenciar agrupamientos y obtener una variable resumen que podría interpretarse como un índice simple de calidad del suelo. El CO no resultó ser un indicador sensible para diferenciar los sistemas de manejo, pero no obstante fue sensible para separar el Suelo de Referencia del resto de los tratamientos. En cambio, las variables biológicas permitieron diferenciar el efecto de los distintos manejos, identificándose al sistema de SDCC como el que más aportó a la sustentabilidad y conservación biológica del suelo. Se propone al CBM como un indicador sensible, que además puede integrar diversas funciones edáficas puesto que presentó elevada correlación con la actividad enzimática y con el carbono orgánico del suelo. Asimismo, el cociente metabólico resultó ser un indicador apropiado puesto que determina la eficiencia metabólica de la población microbiana a través de su actividad respiratoria por unidad de carbono microbiano.

## ABSTRACT

The maintenance of soil quality and crop productivity is an important goal for modern agriculture. Soil tillage systems that improve the soil organic carbon and also favor the survival and activity of soil microorganisms could contribute to the sustainability of agricultural systems. The aim of the work was to assess the changes produced by different management practices (tillage systems and cover crop) on soil biological parameters in order to evaluate their capacity as sensitive soil quality indicators. The trial was carried out at the Agriculture Experimental Station INTA Marcos Juárez (Province of Córdoba-Argentina), with different soil management techniques. Soil organic carbon (OC), microbial biomass carbon (MBC), soil enzyme activities (acid phosphatase, dehydrogenase and urease) and metabolic quotient ( $qCO_2$ ) were determined on soil samples (0–7.5 cm sampling depth) at six sampling times. The management techniques were: combined tillage (CL), no-tillage (NT) and no-tillage with cover crop (NTCC). An old pasture that has not been tilled since 1993 was also sampled as a reference (R). Soil organic carbon, MBC and soil enzyme activities were higher in the undisturbed soil (R) than in the cropped plots ( $p < 0.05$ ), while the  $qCO_2$  was significantly lower. The OC decrease was 39.2%, 35.1% and 29.1% for CL, NT and NTCC, respectively. The CL treatment showed lower MCB values (between 50% and 67%) than those found in NTCC. Metabolic efficiency was significantly higher in NTCC than in CL ( $qCO_2$  was 32% lower). A lower enzymatic activity (acid phosphatase, urease and dehydrogenase) was found in CL with respect to NTCC ( $p < 0.05$ ). Soil enzymes were positively correlated with MBC, and OC with MBC. Multivariate data analysis allowed group treatments and a summary variable was obtained that could be interpreted as a simple index of soil quality. The OC was not a sensitive indicator to differentiate management systems. However, it was sensitive enough to detect changes between R with respect to the other treatments. Instead, biological parameters allowed for differentiation of effect of different management, identifying the system NTCC as the greatest contributor to the sustainability and biological soil conservation. Microbial biomass carbon is suggested as a sensitive indicator since it is related to various soil functions. Also, the metabolic quotient ( $qCO_2$ ) has proved to be a suitable indicator because it determines the metabolic efficiency of the microbial population through the relation between basal respiration per unit of MBC.

## RESUMO

Manter a qualidade dos solos e a produtividade das culturas é um importante desafio para a agricultura moderna. As práticas de gestão que tendam a aumentar o conteúdo de carbono do solo e por sua vez favoreçam a sobrevivência e a atividade microbiana são suscetíveis de contribuir para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações produzidas por diferentes práticas de gestão (sistemas de plantio incluindo as culturas de cobertura) sobre parâmetros biológicos com o objetivo de determinar a sua capacidade como indicadores sensíveis da qualidade do solo. Num ensaio levado a cabo em EEA-INTA Marcos Juárez (Provincia de Córdoba-Argentina), usando amostras de solo compostas (profundidade de amostragem 0–7,5 cm) avaliou-se: o carbono orgânico do solo (CO), o carbono da biomassa microbiana (CBM), o quociente metabólico ( $qCO_2$ ) e as atividades enzimáticas (fosfatase ácida, urease e desidrogenase) durante seis datas de amostragem. Os tratamentos efetuados foram: plantio combinado (PC); sementeira direta (SD) e sementeira direta com cultura de cobertura (SDCC). Para além disso, amostrou-se uma pastagem antiga que não tinha sido intervencionada desde o início do ensaio (ano 1993), considerado como Solo de Referência (R). As parcelas cultivadas apresentaram diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) relativamente a R para o CO, CBM,  $qCO_2$  e para as três enzimas avaliadas. As perdas de CO nos tratamentos PC, SD e SDCC relativamente a R flutuaram entre 39,2%, 35,1% e 29,1%, respetivamente. Comparando os sistemas de gestão ao longo das seis amostragens, PC apresentou menor CBM com valores que oscilaram entre 50% e 67% do encontrado em SDCC. A eficiência metabólica em SDCC foi maior para PC, devido a ter apresentado valores significativamente menores de  $qCO_2$  (em média 32%). Mesmo assim, PC apresentou uma menor atividade enzimática (fosfatase ácida, urease e desidrogenase), relativamente a SDCC ( $p < 0,05$ ). Encontrou-se uma correlação positiva entre as atividades enzimáticas e CBM; e entre CBM e CO. Recorrendo a técnicas de análise multivariada foi possível diferenciar agrupamentos e obter uma variável resumo que poderá interpretar-se como um índice simples de qualidade do solo. O CO não se mostrou como um indicador sensível para diferenciar os sistemas de gestão, não obstante tenha sido sensível para separar o Solo de Referência dos restantes tratamentos. Pelo contrário, as variáveis biológicas permitiram diferenciar o efeito das distintas técnicas de gestão, identificando o sistema de SDCC como o que mais contribuiu para a sustentabilidade e conservação biológica do solo. Propõe-se o CBM como um indicador sensível, que para além disso pode integrar diversas funções edáficas já que apresentou elevada correlação com a atividade enzimática e com o carbono orgânico do solo. O quociente metabólico surge como um indicador apropriado uma vez que determina a eficiência metabólica da população microbiana através da sua atividade respiratória por unidade de carbono microbiano.

**PALABRAS CLAVE**  
Actividad enzimática, carbono de la biomasa microbiana, calidad del suelo, labranzas, agricultura sostenible

## KEY WORDS

Soil enzyme activities, microbial biomass carbon, soil quality, soil management, sustainable agriculture

## PALAVRAS-CHAVE

Atividade enzimática, carbono da biomassa microbiana, qualidade do solo, gestão do solo, agricultura sustentável

## 1. Introducción

Los recursos de tierras son limitados, frágiles y no renovables, y representan aproximadamente una tercera parte de la superficie total de nuestro planeta. Entre ellos se incluye el suelo, que es la base para los sistemas de sustentación de la vida animal y vegetal, por lo que es primordial para las actividades agropecuarias, así como también un componente destacado del hábitat y el bienestar humano. Funciones tan importantes como la preservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo del agua, el almacenamiento y reciclaje de carbono y nutrientes, transcurren en el sistema suelo. Satisfacer la demanda mundial de alimentos, forrajes y fibras ha impulsado la intensificación de los sistemas, como así también la expansión de la frontera agrícola, convirtiendo a la obtención de alimentos en el principal factor que ejerce presión sobre este recurso. Se estima que alrededor de una cuarta parte de las tierras cultivables del planeta presentan algún signo de erosión y/o degradación, identificando como causas principales al empleo de prácticas de manejo inadecuadas, la deforestación y el sobrepastoreo (Azqueta Oyarzun 2007). Este proceso también se ha observado en la Región Pampeana Argentina, una de las áreas de producción agrícola más importantes del mundo (Eiza et al. 2005; Ferreras et al. 2007). En esta región predominan Molisoles, cuya composición mineral consiste en arcillas del tipo íltico y principalmente limo, fracción que le confiere mayor susceptibilidad a la degradación estructural (Cosentino y Pecorari 2002). Por otra parte, además de los aspectos vinculados a la textura, el monocultivo de soja o en combinación con el cultivo de trigo de modo que se puedan obtener dos cosechas al año, ha alterado la calidad de estos suelos, muchos de los cuales presentan un marcado deterioro físico y químico. En este sentido, se observa una elevada extracción de nutrientes que no han sido repuestos en igual magnitud, poniendo en peligro la sustentabilidad de los sistemas productivos (Reboratti 2010). Diferentes evaluaciones respecto a la cantidad de nutrientes incorporados a través de fertilizantes en los principales cultivos de la región (maíz, trigo, sorgo, soja y girasol), han determinado en promedio los siguientes porcentajes de

reposición: nitrógeno 44%, fósforo 58%, potasio 3% y azufre 35% (Cruzate y Casas 2009). Asimismo, la predominancia del cultivo de soja y/o trigo/soja en los sistemas productivos determina un menor aporte de carbono orgánico al suelo a través de sus rastrojos. Por otro lado, la ausencia de rotaciones agrícola-ganaderas con suelos bajo pastizales o bajo períodos de descanso ha provocado en esta región una disminución significativa de la materia orgánica del suelo (MOS), con caídas de hasta un 50% del nivel original (Ferreras et al. 2007; Sainz Rozas et al. 2011; Wingeyer et al. 2015). La adopción de la siembra directa – alrededor del 80% del área cultivada de la Argentina se realiza bajo este sistema (AAPRESID 2012) – conjuntamente con los avances en maquinaria agrícola y en biotecnología han permitido un crecimiento importante en la producción. Sin embargo, en algunas situaciones se observan con frecuencia signos de disminución de la capacidad productiva de los suelos.

Para lograr una producción sostenible es esencial el adecuado funcionamiento del suelo, por lo que es imprescindible comprender las relaciones entre las propiedades edáficas y la productividad de los cultivos. Un suelo de elevada calidad debe contar con las condiciones que permitan mantener alta productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de plantas y animales. La calidad de un suelo incluye componentes intrínsecos, determinados por las propiedades físicas, químicas y biológicas dentro de los límites establecidos por el clima y los ecosistemas. Asimismo está condicionada por un componente externo de índole antrópico, afectado por las prácticas de manejo y uso de las tierras (Doran y Zeiss 2000).

En general, las posibilidades de expansión de las áreas agrícolas son escasas, por lo tanto la producción de granos debería basarse en una intensificación sostenible de los sistemas, es decir, en busca de rendimientos más altos para evitar la expansión de la agricultura a ecosistemas frágiles. El uso sostenible involucra prácticas de manejo tales como la siembra directa, la rotación con cultivos que aporten

grandes volúmenes de rastrojo, la alternancia de ciclos agrícolas con ciclos bajo pastizales y la implementación de los cultivos de cobertura con la finalidad de mitigar los efectos negativos causados por el uso inadecuado e intensivo de las tierras (Restovich et al. 2011; Zibilske y Makus 2009). Para evaluar el impacto de estas prácticas, es necesario la identificación de indicadores sensibles asociados a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que permitan monitorear de manera eficaz los cambios que se puedan producir, y así percibir a tiempo signos de restauración o degradación. Numerosos autores han estudiado los parámetros físicos y químicos como sensores de calidad edáfica debido a que son propiedades vinculadas a las funciones de retención y provisión de agua y nutrientes. Sin embargo, generalmente se requieren varios años para detectar cambios significativos como resultado de perturbaciones (Costa et al. 2014; Trasar Cepeda et al. 2008). Sin dudas, la MOS es uno de los indicadores de calidad de suelo por excelencia debido a que impacta sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas. Por tal motivo, se siguen destinando esfuerzos para identificar, entre los componentes de la MOS, cuál se comporta como un indicador sensible para detectar diferencias ambientales o de manejo (Lal 2008; Vezzani y Mielniczuk 2009). La mineralización de la MOS es controlada principalmente por el tamaño y la actividad de la biomasa microbiana que puede responder a las perturbaciones en una escala de tiempo menor, por lo que los parámetros biológicos presentan un interesante potencial como atributos de alta sensibilidad a los cambios provocados por el uso del suelo (Melero et al. 2009; Trasar-Cepeda et al. 2008). Los indicadores biológicos explican procesos microbianos que ocurren en el suelo en forma global o a través de reacciones específicas, lo cual permite evaluar la actividad metabólica y, de esta forma, entender la funcionalidad del suelo. La diversidad funcional comprende el conjunto de capacidades metabólicas presentes en un ambiente, información que no requiere de conocimientos detallados acerca de la identidad de los microorganismos involucrados, pero expresa su actividad fisiológica dentro del ecosistema. Se

puede generalizar que la diversidad funcional es el conjunto de características de los organismos que influyen en las propiedades del ecosistema. Esta definición sugiere que un ecosistema con una alta diversidad funcional opera más eficientemente en términos de productividad, resiliencia y resistencia (Ricotta 2005). Debido a que los organismos pueden responder sensiblemente a las perturbaciones por el manejo y están bien correlacionados con las funciones benéficas del suelo, pueden constituirse en excelentes herramientas para detectar cambios en la recuperación o servir como advertencia en cuanto a riesgos de degradación de un suelo, incluso antes que las propiedades físicas y químicas (Doran y Zeiss 2000; Ruzek et al. 2004). Nuestra hipótesis de trabajo fue que, tanto la disminución de la perturbación del suelo como la inclusión de los cultivos de cobertura, podrían favorecer la supervivencia y actividad de la microflora del suelo. Un mayor aporte de carbono orgánico lábil y la presencia de raíces vivas durante un período de tiempo más prolongado en comparación con el suelo bajo barbecho sin cultivo, provocaría un estímulo en la actividad microbiana. Esta situación podría impactar positivamente sobre la calidad edáfica con un aporte significativo a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los cambios producidos por diferentes prácticas de manejo (sistema de labranza e inclusión de cultivo de cobertura) sobre variables biológicas, con el fin de determinar su capacidad como indicadores sensibles de calidad de suelo.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Sitio experimental

Las mediciones se llevaron a cabo en un Ensayo de Larga Duración ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Marcos Juárez (32° 43' 30" S - 62° 05' 30" O). El clima de la región es templado húmedo subhúmedo con 17,5 °C de temperatura media, con una máxima de 30,5 °C en enero y una mínima de 4,8 °C en julio. El promedio anual histórico de precipitaciones es de 860 mm (Estación Meteorológica, INTA Marcos Juárez 2010). El ensayo se inició en la campaña 1993/94 con la rotación Soja 1<sup>ra</sup> (*Glycine max* (L.) Merr.) - Maíz (*Zea mays* L.) -Trigo (*Triticum aestivum* L.) / Soja 2<sup>da</sup>, sobre un Argiudol típico serie Marcos Juárez (Soil Survey Staff 2014) con la siguiente composición mineral en el horizonte superficial: arcilla 251 g kg<sup>-1</sup>, limo 689 g kg<sup>-1</sup> y arena 60 g kg<sup>-1</sup>. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con tres repeticiones (tamaño unidad experimental: 450 m<sup>2</sup>). Se implementaron los siguientes sistemas de labranza: labranza combinada (LC) que consistió en realizar labranza mínima en Trigo, labranza vertical en Maíz y Soja 1<sup>ra</sup>, y siembra directa en Soja 2<sup>da</sup>; siembra directa en todos los cultivos (SD) y siembra directa con avena (*Avena sativa* L.) como cultivo de cobertura antes de los cultivos de verano (SDCC). Paralelamente con la implantación del ensayo, en el año 1993 se dispuso un sector para la siembra de un pastizal combinando especies de gramíneas y leguminosas. Dicho sitio ha permanecido inalterado, sin actividad agrícola hasta la fecha y fue considerado como Suelo de Referencia (R) para las evaluaciones realizadas en el presente estudio. La aplicación de fertilizantes nitrogenados y fosfatados se realizó según el uso actual medio de los productores. Asimismo, la protección y el manejo de los cultivos fueron los usuales para la zona.

### 2.2. Muestreos y determinaciones de suelo

Debido a la influencia que presenta el clima edáfico sobre la microflora del suelo, se realizaron dos muestreos al año a los fines de considerar el período otoño/invernal y primavera/estival. Se extrajeron para cada tratamiento y sus

repeticiones, como así también para el Suelo de Referencia tres muestras de suelo compuestas de 15 sub-muestras a 0-7,5 cm de profundidad en noviembre 2006 (Nov-06), mayo 2007 (My-07), noviembre 2007 (Nov-07), mayo 2008 (My-08), noviembre 2008 (Nov-08) y mayo 2009 (My-09). Los muestreos se realizaron teniendo en cuenta un ciclo completo de rotación, con los siguientes cultivos para cada campaña: 2006/07 Soja 1<sup>ra</sup>, 2007/08 Maíz y 2008/09 doble cultivo Trigo/Soja 2<sup>da</sup>.

Las muestras fueron tamizadas por una malla de 2 mm y conservadas a 4 °C hasta su análisis, dentro de los 15 días de recolección, evaluando los siguientes parámetros químicos y bioquímicos:

- **Carbono orgánico (CO):** Para las determinaciones de CO las muestras fueron previamente secadas al aire y se utilizaron las correspondientes a los meses de noviembre (2006, 2007 y 2008). El carbono se determinó por el método de Walkley-Black, que consiste en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson y Sommers 1982).

- **Carbono de la biomasa microbiana (CBM):** se determinó a través del método de fumigación-incubación (Jenkinson y Powlson 1976). El suelo se expuso a cloroformo durante 24 horas, luego se removió el fumigante y se realizó una incubación de 10 días, al cabo de la cual se determinó la producción de CO<sub>2</sub>. Controles no fumigados se incubaron bajo las mismas condiciones y sobre ellos se determinó además la actividad respiratoria microbiana al cabo de 10 días, midiendo la variación de CO<sub>2</sub> en sistemas cerrados. Las muestras se incubaron en recipientes herméticos, el CO<sub>2</sub> se recogió en trampas de álcali en exceso y el exceso se tituló a la fenoltaleína con ácido clorhídrico 0,5N en presencia de cloruro de bario (Frioni 1999). Se calculó el cociente metabólico microbiano (qCO<sub>2</sub>) como la relación entre el

CO<sub>2</sub> producido por respiración microbiana diaria y el CBM. Los resultados de CBM y respiración se expresaron como µg de C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de suelo en base seca.

- **Actividades enzimáticas:** la actividad de la fosfatasa ácida, deshidrogenasa y ureasa fueron determinadas según Tabatabai (1982). La estimación de la fosfatasa ácida se basa en la determinación del p-nitrofenol liberado por la actividad de la enzima cuando el suelo es incubado con una solución de p-nitrofenil fosfato disódico (pH 6,5). La actividad deshidrogenasa se determinó utilizando un aceptor artificial de electrones, el trifeniltetrazolium que se reduce a trifenilformazán por los protones y electrones transferidos por las deshidrogenasas. La actividad ureasa se estimó mediante la determinación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> liberado a partir del suelo incubado con una solución de urea. La concentración de los productos de la acción de las tres enzimas se determinó por fotocolorimetría. Los resultados de actividad enzimática se expresaron como µg de producto h<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup> de suelo en base seca.

### 2.3. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron empleando el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al. 2011). Se realizó un análisis de varianza, previas pruebas de homogeneidad de varianzas y normalidad. Se utilizó el test de Dunnett para realizar las comparaciones entre los tratamientos del suelo bajo cultivo y el Suelo de Referencia. Las diferencias estadísticamente significativas para todas las variables fueron establecidas a un nivel de  $p < 0,05$ . Se realizaron análisis de regresión simple para explicar la relación entre variables biológicas (CBM y actividades enzimáticas), como así también la relación entre CO y CBM. Con el fin de obtener mayor conocimiento sobre la estructura de las observaciones en estudio, se realizó un Análisis de Clusters utilizando el método jerárquico de encadenamiento de Ward, denominado método de mínima varianza. La distancia utilizada fue

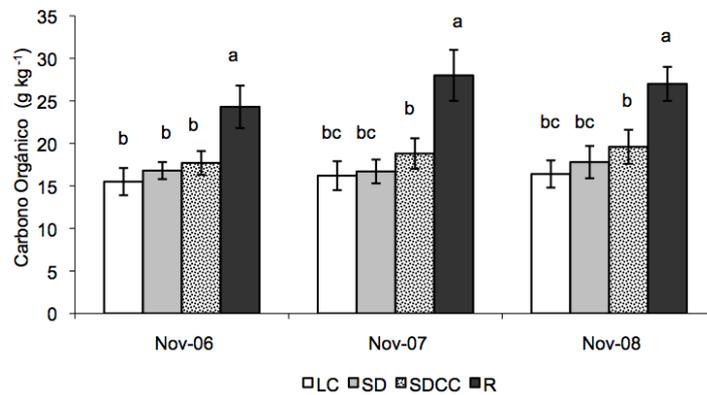
la Euclídea promedio. Además, se realizó un Análisis de Componentes Principales para reducir la dimensionalidad de los datos, observar si existen agrupamientos, y tratar de hallar una variable que resuma la información para considerarla como índice simple.

## 3. Resultados

La perturbación del suelo por el cultivo provocó una reducción significativa del contenido de carbono orgánico del suelo, y la situación considerada como referencia presentó en todos los momentos de muestreo valores superiores con respecto a las parcelas bajo cultivo (**Figura 1**). Al analizar las alternativas de manejo (labranzas y cultivo de cobertura), no se hallaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ), aunque el tratamiento SDCC manifestó una leve tendencia a acumular mayor contenido de CO con respecto a LC y SD. Las pérdidas promedio de CO de las parcelas cultivadas con respecto al Suelo de Referencia que permaneció con vegetación de pastizal y sin cultivo fluctuaron entre 39,2%, 35,1% y 29,1% para los tratamientos LC, SD y SDCC, respectivamente.

Los resultados obtenidos para las variables biológicas se expresaron en términos relativos, a través del cociente entre el valor promedio obtenido para cada tratamiento con respecto al Suelo de Referencia, expresando el resultado en porcentaje. En cuanto al CBM, el Suelo de Referencia se diferenció estadísticamente ( $p < 0,05$ ) en todos los muestreos realizados, registrando los valores más elevados con respecto a las parcelas cultivadas. Dentro de los sistemas de manejo, LC presentó los valores más bajos de CBM, manifestando diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto a SDCC en las seis fechas de muestreo (**Figura 2**).

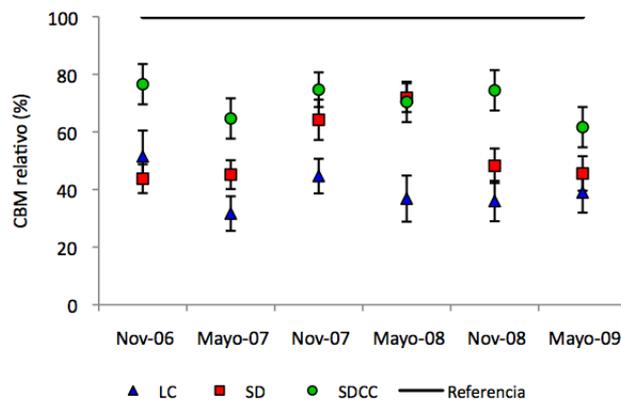
Los muestreos realizados en noviembre, en términos generales, presentaron valores



**Figura 1.** Carbono Orgánico (CO) en las parcelas bajo cultivo y en el Suelo de Referencia (R), para cada fecha de muestreo. Letras distintas dentro de cada fecha de muestreo indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ). Las barras indican el error estándar de las medias.

superiores de CBM respecto a lo observado en mayo. Posiblemente, condiciones de temperaturas más elevadas en esta época del año produjeron un estímulo de la población microbiana. Por otro lado, el tratamiento SDCC presentó mayor actividad microbiana con respecto

a LC y SD debido a la incorporación de material carbonado extra proveniente del cultivo de cobertura que fue implantado durante los meses de invierno de 2006 y 2007, y posteriormente secado previo a la implantación de los cultivos de verano (soja y maíz, respectivamente).



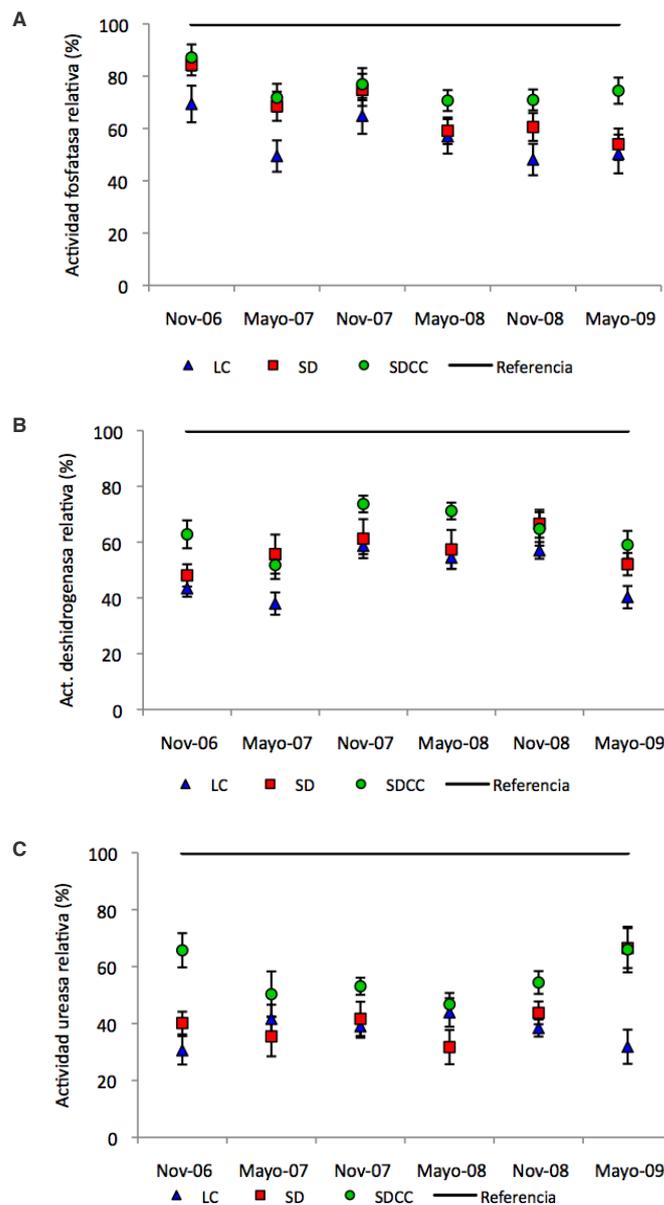
**Figura 2.** Carbono de la biomasa microbiana (CBM) relativo para cada fecha de muestreo. Las barras indican el error estándar de las medias.

La **Figura 3** muestra los resultados obtenidos en la actividad de las enzimas fosfatasa ácida, deshidrogenasa y ureasa en los distintos tratamientos a lo largo del tiempo. Al igual que para CBM, el Suelo de Referencia mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) en

todos los muestreos llevados a cabo, con respecto a las parcelas bajo cultivo para las tres enzimas estudiadas. Para la actividad fosfatasa ácida, LC presentó valores significativamente menores con respecto a SDCC en todos los muestreos, excepto Nov-07 (**Figura 3A**). La

actividad deshidrogenasa fue significativamente mayor en SDCC ( $p < 0,05$ ) con respecto a LC en todas las fechas de muestreo, a excepción de Nov-8 (Figura 3B). Los resultados de la actividad ureasa solo fueron significativamente diferentes entre LC y SDCC en Nov-06, Nov-07, Nov-08 y

My-09 (Figura 3C). El tratamiento SD manifestó en términos generales un comportamiento con ciertas fluctuaciones, presentando en algunas fechas de muestreo valores intermedios, similares a SDCC o a LC para las diferentes actividades enzimáticas (Figura 3).



**Figura 3.** Actividad enzimática relativa para fosfatasa ácida (A), deshidrogenasa (B) y ureasa (C) para cada fecha de muestreo. Las barras indican el error estándar de las medias.

El comportamiento estacional de las actividades enzimáticas siguió un patrón similar al de la actividad microbiana, con picos de mayor actividad en los muestreos de noviembre.

La relación entre respiración microbiana por unidad de CBM fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) en el Suelo de Referencia respecto

a las parcelas bajo cultivo, por el contrario el  $qCO_2$  estimado en las parcelas LC presentó los valores más altos (Tabla 1). Una mayor actividad respiratoria en relación al tamaño de la población microbiana es un indicador de mayor energía destinada al mantenimiento de los microorganismos y puede evidenciar una menor eficiencia metabólica.

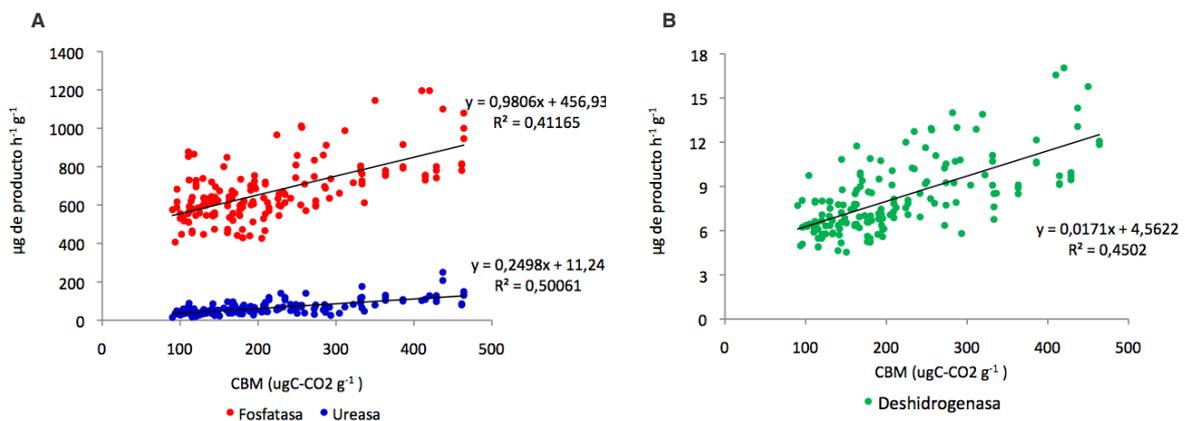
**Tabla 1.** Cociente metabólico ( $qCO_2$ ) en los diferentes muestreos. Suelo Ref.: Suelo de Referencia; SDCC: siembra directa con cultivo de cobertura; SD: siembra directa; LC: labranza combinada

Tratamientos	$qCO_2$ ( $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM d}^{-1}$ )					
	Nov-06	Mayo-07	Nov-07	Mayo-08	Nov-08	Mayo-09
LC	0,39 c	0,35 bc	0,32 c	0,35 c	0,28 c	0,34 bc
SD	0,33b	0,30 b	0,25 b	0,20 b	0,20 b	0,29 b
SDCC	0,26 ab	0,25 b	0,22 ab	0,22 ab	0,18 b	0,26 b
Suelo Ref.	0,23 a	0,17 a	0,19 a	0,18 a	0,14 a	0,19 a

Letras distintas en cada fecha de muestreo indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ).

A través de regresiones lineales se pudo observar la relación existente entre las variables biológicas evaluadas en esta experiencia (Figura 4). Las funciones de regresión muestran

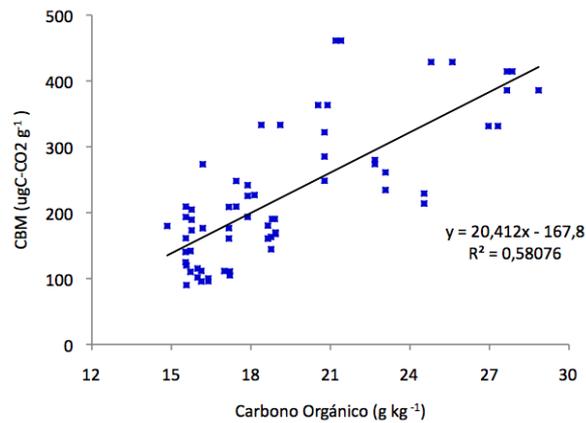
una correlación positiva y significativa entre CBM con fosfatasa ácida ( $r^2 = 0,41$ ), ureasa ( $r^2 = 0,50$ ) y deshidrogenasa ( $r^2 = 0,45$ ), respectivamente.



**Figura 4.** Relación entre carbono de la biomasa microbiana (CBM) y actividad fosfatasa ácida y ureasa (A); y CBM y deshidrogenasa (B).

De igual manera, se halló una relación lineal positiva ( $r^2 = 0,58$ ) entre el carbono orgánico

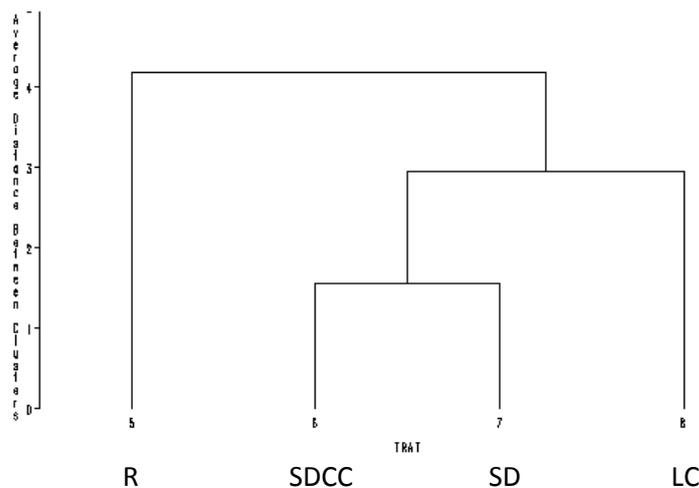
del suelo y la actividad microbiana evaluada a través del CBM (Figura 5).



**Figura 5.** Relación entre carbono de la biomasa microbiana (CBM) y carbono orgánico (CO).

Se realizó un Análisis de Clusters teniendo en cuenta la totalidad de las variables estudiadas en las seis fechas de muestreo. Los resultados obtenidos muestran que se conformaron cuatro grupos bien diferenciados, indicando que las observaciones pertenecientes a un grupo fueron muy similares entre sí y muy disímiles del resto. En la **Figura 6** se observa el análisis de conglomerados que muestra el agrupamiento de las situaciones de estudio. Los tratamientos dentro de un mismo grupo comparten el mayor número permisible de características, y tienden a ser distintos a los contenidos en otros grupos. En un primer nivel, que corresponde a la distancia 4,18, se separan los tratamientos

de labranza (LC, SD y SDCC) del suelo de referencia (R). Esta comparación estadística evidencia que el cultivo del suelo produjo cambios importantes en las variables edáficas estudiadas. Los tratamientos correspondientes a las parcelas en las cuales se realizó LC y las parcelas bajo siembra directa (SD y SDCC) se segregaron en dos subgrupos, dentro de un segundo nivel, correspondiente a una distancia aproximada de 2,94. Esta separación, indica que la incorporación de la labranza combinada generó cambios apreciables sobre las variables. Finalmente, se conformó un tercer nivel en el cual se segregaron las parcelas bajo SD y SDCC (distancia euclídea 1,55).



**Figura 6.** Dendrograma del análisis de cluster diferenciando los cuatro grupos conformados. R: Suelo de Referencia; SDCC: siembra directa con cultivo de cobertura; SD: siembra directa; LC: labranza combinada.

Con el objetivo de reducir la dimensión de los datos a los fines de facilitar su interpretación manteniendo la mayor información, se realizó un Análisis de Componentes Principales con la totalidad de las variables en estudio durante los seis muestreos en forma simultánea. Se retuvieron las dos nuevas variables o factores denominadas componentes principales (CP1 y CP2, respectivamente), producto de la combinación lineal de las variables observadas, afectadas por el coeficiente que le corresponde para cada una de ellas. Entre ambas CP explicaron el 89% de la varianza total de los datos, correspondiendo a la CP1 el 82% y a la CP2 el 7%:

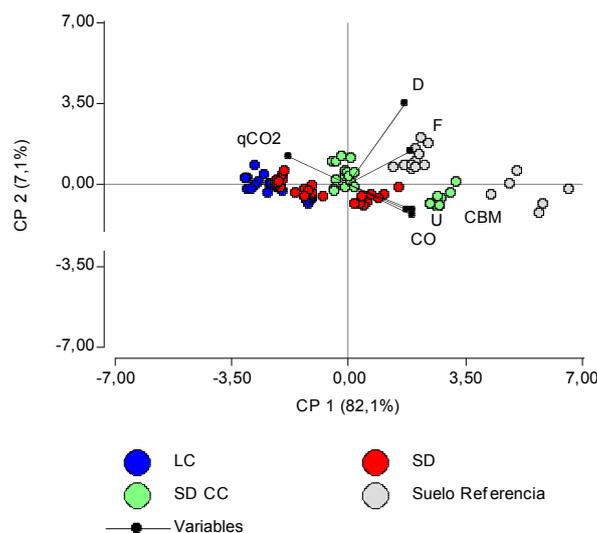
$$CP1 = 0,42 F + 0,38 D + 0,40 U + 0,43 CBM + 0,43 CO - 0,40 qCO_2$$

$$CP2 = 0,33 F + 0,79 D - 0,24 U - 0,29 CBM - 0,25 CO + 0,27 qCO_2$$

donde: F = fosfatasa, D = deshidrogenasa, U = ureasa, CBM = carbono biomasa microbiana, CO = carbono orgánico,  $qCO_2$  = cociente metabólico.

El valor de los coeficientes (autovectores) expresa la contribución relativa de cada variable

en las dos CP. Para la CP1 las componentes de las seis variables estudiadas presentaron valores elevados (coeficiente > 0,38), lo cual significa que han tenido mucho peso en su definición. Por otro lado, todos los coeficientes presentaron signo positivo, a excepción del correspondiente a  $qCO_2$ , indicando que a la nueva variable CP1 le corresponderán valores altos cuando los parámetros analizados fosfatasa, deshidrogenasa, ureasa, CBM y CO presenten valores elevados, asociados a valores de cociente metabólico de menor valor. Dado que la CP1 explicó el 82% de la variabilidad total de los datos, podría interpretarse como un índice simple de calidad del suelo. La distribución presentada en la **Figura 7** muestra que el Suelo de Referencia presentó valores elevados de las cinco variables estudiadas a excepción del coeficiente metabólico que fue menor (a la derecha del cero de CP1). Asimismo, algunas muestras provenientes de las parcelas cultivadas SD y SDCC se ubicaron en este cuadrante. Por el contrario, la totalidad de las muestras pertenecientes al tratamiento LC se ubicaron a la izquierda del cero, indicando que en general presentaron valores bajos de las variables fosfatasa, deshidrogenasa, ureasa, CBM y CO; y un cociente metabólico mayor.



**Figura 7.** Análisis de componentes principales sobre las variables fosfatasa (F), deshidrogenasa (D), ureasa (U), carbono de la biomasa microbiana (CBM), carbono orgánico (CO) y cociente metabólico ( $qCO_2$ ) para cada tratamiento en las seis fechas de muestreo.

## 4. Discusión

La capacidad productiva de un suelo está directamente relacionada con sus atributos de calidad. El carbono es el principal elemento que forma parte de la MOS, es de vital importancia puesto que proporciona la energía y es el sustrato de los organismos vivos heterótrofos para sostener las diversas funciones, por lo tanto toda práctica de manejo de suelo que contribuya a incrementar la MOS redundará en un aumento de la calidad del suelo (Lal 2008; Vezzani y Mielniczuk 2009).

Está ampliamente documentado que, a largo plazo, la reducción de la labranza y la implementación de la siembra directa producen un aumento de la MOS. Algunos autores sostienen que los beneficios de la siembra directa no están tan relacionados con la cantidad y calidad de los residuos, sino que pueden estar más relacionados con una menor tasa de descomposición debido a la disminución de la superficie de contacto con los microorganismos. Además, se producen cambios en el movimiento del agua y los efectos sobre la temperatura del suelo que modifican el comportamiento microbiano, factores que contribuyen a proteger e incrementar la MOS (Franchini et al. 2007).

La reducción del CO en las parcelas cultivadas respecto a las situaciones más conservadas (Suelo de Referencia) se atribuye a la perturbación provocada por el cultivo y prácticas de manejo en general, que promueven la mineralización de la MOS, como así también al menor aporte de residuos orgánicos al suelo que contribuyen a la reducción de las fracciones carbonosas (Ferrerás et al. 2007, 2009; Sainz Rozas et al. 2011). Los organismos vivos y el carbono orgánico lábil constituyen la fracción orgánica activa del suelo. Ambos componentes resultan ser muy dinámicos y sensibles a los cambios en las condiciones del medio (Gregorich y Carter 1997). Si bien el CO hallado en las parcelas bajo cultivo fue significativamente menor en comparación a los valores obtenidos en el Suelo de Referencia, no se detectaron diferencias entre los sistemas de labranza (Figura 1). En esta experiencia, el CO permitió separar tratamientos bajo cultivo en comparación con situaciones sin actividad

agrícola prolongada, sin embargo no resultó ser un indicador sensible para evaluar el impacto entre los sistemas de manejo. Posiblemente, una separación de las fracciones orgánicas (activa y estable, o lábil y humificada) hubiera respondido con mayor sensibilidad que el carbono orgánico total.

Contrariamente, los parámetros biológicos evaluados en este ensayo permitieron detectar de manera sensible los cambios en el suelo provocados por las prácticas de manejo. Los resultados obtenidos manifiestan, en términos generales, que el Suelo de Referencia y el tratamiento SDCC presentaron valores más elevados de CBM y actividades enzimáticas, en comparación con LC (Figuras 2 y 3). Estos resultados están en concordancia con lo expresado por otros autores, quienes hallaron una mayor actividad microbiana en suelos con manejos conservacionistas en comparación con suelos labrados convencionalmente (Acosta-Martínez et al. 2007; Franchini et al. 2007; Madejón et al. 2007).

Los microorganismos son los responsables de la descomposición de la MOS y, por lo tanto, están a cargo de la liberación de nutrientes y su disponibilidad para otros organismos. Una estimación del tamaño de la microbiota edáfica puede realizarse a través del CBM, variable que se incrementa en la medida que existe mayor disponibilidad de carbono fácilmente oxidable en el suelo. Por su elevada tasa de renovación, el CBM puede responder de manera sensible a los cambios según diferentes prácticas de manejo (Doran y Parkin 1994; Balota et al. 2004). La microbiota edáfica influye sobre la estabilidad y fertilidad de los ecosistemas y está ampliamente aceptado que un buen nivel de actividad microbiana es esencial para mantener la calidad del suelo. Algunos autores consideran a las propiedades relacionadas con los ciclos de los elementos y las transformaciones de la MOS como variables adecuadas para la estimación de la calidad de los suelos, ya sea variables relacionadas directamente con la actividad microbiana como así también las que incluyen las actividades de las enzimas hidrolíticas exocelulares (Doran y Parkin 1994;

Ruzek et al. 2004; Trasar Cepeda et al. 2008). Los suelos nativos o bajo pastizales presentan vegetación permanente que realiza un continuo aporte de residuos orgánicos. Además, debido a las diferentes especies vegetales, se desarrolla en el suelo una abundante masa de raíces que promueve la secreción de sustancias estimulantes para la microbiota. La mayor proporción de CO y los exudados rizosféricos podrían haber generado en el Suelo de Referencia un ambiente que incrementó la población microbiana y la actividad enzimática en comparación con el suelo del ensayo sometido a la actividad agrícola. Por otro lado, el tratamiento que incluyó el cultivo de cobertura (SDCC) se encuentra la mayor parte del año habitado por raíces vivas, situación que no ocurre en los otros dos tratamientos evaluados en el ensayo, en los cuales los períodos de barbecho son más extensos. En este sentido, Irizar et al. (2013), al evaluar diferentes opciones de rotaciones de cultivos, concluyen que la implementación de un adecuado manejo de rastrojos a través de las rotaciones tiene el potencial de mejorar la calidad del suelo e incrementar la productividad en el largo plazo. El cultivo de cobertura aportó carbono fácilmente degradable (parte aérea y raíces) en SDCC, en comparación con los otros tratamientos. Este material rico en carbono puede constituirse en el sustrato inicial para la descomposición microbiana, por lo que podría haber generado un estímulo de la actividad de los microorganismos con un incremento en la población y en la producción de enzimas. Similares resultados fueron obtenidos por otros autores quienes fundamentan el incremento de la actividad microbiana como resultado de un aumento de la fracción de carbono fácilmente oxidable (Acosta-Martínez et al. 2007; Zibilske y Makus 2009). Las relaciones positivas entre CBM y actividades enzimáticas (Figura 4) refuerzan la hipótesis que un ambiente que incrementa la actividad de la población microbiana genera una mayor producción de enzimas vinculadas a la degradación de sustratos y su consecuente liberación de nutrientes. Las deshidrogenasas se localizan principalmente en las membranas plasmáticas de las bacterias o en las membranas mitocondriales de hongos y reflejan la actividad oxidativa total de la biomasa microbiana, con lo

cual podrían estar representando el tamaño y la actividad de la comunidad microbiana viable. Las fosfatasa y la ureasa son sintetizadas y secretadas extracelularmente por bacterias u hongos, formando parte de la matriz del suelo.

Por lo tanto, las actividades de estas enzimas exocelulares, pueden estar reguladas de manera directa a través de un aumento de la producción y secreción de microorganismos o indirectamente a través de condiciones físicoquímicas, ya que pueden ser estabilizadas por medio de la unión de las enzimas a los coloides del suelo (Aon et al. 2001). Las relaciones significativas entre CBM y cada una de las actividades enzimáticas presentaron valores elevados y positivos ( $r^2 > 0.41$ ), poniendo de manifiesto que tanto las enzimas exocelulares (fosfatasa y ureasa) como las endocelulares (deshidrogenasa) tienen relación directa con la población microbiana. Por otra parte, una mayor presencia de residuos orgánicos resultaron ser un estímulo para los microorganismos, situación que se evidencia en la Figura 5. Una mayor actividad microbiana, acompañada de una mayor producción/estabilización de las enzimas involucradas en los ciclos de los nutrientes denota una mayor diversidad funcional, expresada a través de la actividad fisiológica de la población microbiana, operando de una manera más eficiente dentro del ecosistema (Ricotta 2005).

El cociente metabólico puede contribuir al entendimiento de los cambios químicos y biológicos que ocurren bajo diferentes prácticas agrícolas, debido a que provee una medida específica de la actividad metabólica que varía en función de la composición y estado fisiológico de la comunidad microbiana, de la disponibilidad de sustratos y de diferentes factores abióticos. Una actividad respiratoria más elevada en relación al tamaño de la biomasa microbiana puede estar manifestando una menor eficiencia metabólica de los microorganismos, reflejada por una mayor energía de mantenimiento como respuesta a la baja disponibilidad de nutrientes o sustratos como el carbono orgánico. En la medida que el  $qCO_2$  sea menor indica que la población microbiana está en equilibrio, con menores pérdidas de  $CO_2$  por respiración, por

lo que mayor es la incorporación de carbono a la biomasa microbiana (Anderson y Domsch 1993; Ebhin Masto et al. 2006). A lo largo de los seis muestreos, el cociente metabólico promedio para el Suelo de Referencia fue un 47% menor con respecto al hallado en LC, poniendo en evidencia un mayor gasto energético para el mantenimiento metabólico en el suelo bajo cultivo. En función de los resultados obtenidos de esta experiencia, se determinó para el tratamiento LC la presencia de una población microbiana de menor tamaño que respiraba a una tasa mayor. Asimismo, el tratamiento SDCC presentó valores significativamente menores de  $qCO_2$  (en promedio 32%) con respecto a LC, destacando las diferencias en la energía de mantenimiento de los microorganismos en cada tratamiento. Según Anderson y Domsch (1993), coeficientes metabólicos comparativamente bajos constituyen una característica típica de comunidades microbianas diversas y muy relacionadas entre sí, por lo que se ha propuesto al cociente metabólico como un indicador que permite valorar la respuesta de los ecosistemas a factores externos.

Un consumo más eficiente de la energía almacenada en la MOS por parte de los microorganismos en SDCC podría resultar de una mayor eficiencia de mineralización, causada por cambios en la actividad enzimática, así como por cambios en la composición microbiana en la comunidad (Franchini et al. 2007).

A través del Análisis de Clusters, que frecuentemente es usado como método exploratorio de datos con la finalidad de obtener mayor conocimiento sobre la estructura de las observaciones en estudio, se pudo dividir a los tratamientos en grupos que manifestaron cohesión interna entre sí tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo (Figura 6). Si bien el CO no permitió segregar tratamientos de labranza y/o presencia de cultivo de cobertura, el peso de las variables biológicas a lo largo de los seis muestreos realizados permitió la formación de los cuatro grupos bien definidos. Asimismo, el Análisis de Componentes Principales pudo resumir la información aportada por las seis variables

evaluadas a lo largo de la totalidad de los muestreos llevados a cabo. La CP1 puede considerarse una variable resumen o índice simple de calidad de suelo. En el caso de fosfatasa, deshidrogenasa, ureasa, CBM y CO los autovectores fueron todos positivos, es decir, que en la medida que las variables presenten valores elevados, el valor de CP1 será mayor. Por el contrario, para el coeficiente metabólico el autovector fue negativo pero asociado en forma inversa, es decir, que en la medida que el  $qCO_2$  sea menor implica mayor eficiencia metabólica, incidiendo de igual manera que las otras variables evaluadas sobre la CP1. Cuanto más elevado sea el valor de CP1 indicará que las condiciones del suelo se asemejan en mayor medida al Suelo de Referencia. En nuestra experiencia, este tratamiento constituye la situación mejor conservada, con máxima fertilidad, en la cual los valores de las variables fosfatasa, deshidrogenasa, ureasa, CBM y CO son elevados, y el cociente metabólico es bajo. La distribución presentada en el Biplot (Figura 7) manifiesta que SDCC fue el tratamiento que más se aproximó al Suelo de Referencia. Esto es lógico e interesante puesto que esta secuencia de cultivos se plantea como alternativa sustentable debido a que mantiene por un período más prolongado al suelo cubierto con cultivos (presencia de raíces y parte aérea) e incorpora una mayor proporción de residuos vegetales.

Como resultado de la información obtenida en esta experiencia se puede inferir que el empleo de variables biológicas permitió detectar cambios en la calidad del suelo en función de las prácticas de manejo, en coincidencia con resultados obtenidos por otros autores (Doran y Parkin 1994; Balota et al. 2004; Acosta-Martínez et al. 2007; Trasar-Cepeda et al. 2008).

## 5. Conclusiones

La actividad agrícola con cultivos anuales produjo modificaciones en el comportamiento bioquímico del suelo, en comparación con el mismo tipo de suelo con vegetación de pastizales. La presencia de mayor proporción de restos vegetales (raíces y parte aérea) actuaría como estímulo para la actividad microbiana provocando una mayor síntesis de enzimas relacionadas con las transformaciones de la MOS, situación que se ve reflejada en el Suelo de Referencia y en menor medida en el tratamiento donde se incluyó el cultivo de cobertura. Por otro lado, una mayor eficiencia en la transformación de sustratos carbonados reflejada a través de una menor tasa respiratoria por unidad de carbono microbiano, podría contribuir a la acumulación de MOS debido a que disminuye la velocidad de degradación.

Los parámetros biológicos seleccionados permitieron detectar de manera sensible cambios en el comportamiento bioquímico del suelo. En general, los resultados demostraron que la inclusión del cultivo de cobertura provocó un incremento en la biomasa microbiana evaluada a través del CBM, una mayor eficiencia metabólica, como así también de observó una mayor actividad enzimática del suelo, identificándose al sistema de SDCC como el más adecuado para la conservación biológica del suelo según los indicadores empleados.

Los indicadores, que según los resultados obtenidos, presentaron mayor sensibilidad para detectar cambios en el manejo y a su vez lograron integrar diversas funciones en el suelo fueron el CBM que presentó elevada correlación con la actividad enzimática y con el carbono orgánico del suelo; y el cociente metabólico que determina la eficiencia metabólica de la población microbiana a través de su actividad respiratoria por unidad de carbono microbiano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAPRESID: Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. 2012. Relevamiento de Superficie Agrícola Bajo Siembra Directa. Available online: <http://www.aapresid.org.ar/superficie/>.
- Acosta-Martínez V, Mikha MM, Vigil MF. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow for the Central Great Plains. *Appl Soil Ecol.* 37:41-52.
- Anderson TH, Domsch KH. 1993. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol Biochem.* 25:393-395.
- Aon MA, Cabello MN, Sarena DE, Colaneri AC, Franco MG, Burgos JL, Cortassa S. 2001. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol.* 18:239-254.
- Azqueta Oyarzun D. 2007. Introducción a la Economía Ambiental. 2da Edición. Madrid: Mc Graw Hill/ Interamericana de España S.A.U.
- Balota EL, Colozzi A, Andrade DS, Dick RP. 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Till Res.* 77:137-145.
- Cosentino D, Pecorari C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Cien Suelo* 20:9-16.
- Costa JL, Aparicio VC, Cerdà A. 2014. Soil physical quality changes under different management systems after 10 years in Argentinian Humid Pampa. *Solid Earth Discuss* 6:2615-2644.
- Cruzate GA, Casas R. 2009. Extracción de Nutrientes en la Agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas* 44:21-26.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. 2011. Infostat, versión 2011. Grupo Infostat. Córdoba, Argentina: FCA-UNC.
- Doran JW, Parkin TB, editors. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Sci Soc Am. Spec. Publ. No. 35.* Madison, WI: SSSA-ASA.
- Doran JW, Zeiss MR. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl Soil Ecol.* 15:3-11.
- Ebin Masto E, Chhonkar PK, Singh D, Patra AK. 2006. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical Inceptisol. *Soil Biol Biochem.* 38:1577-1582.

- Eiza MJ, Fioriti N, Studdert GA, Echeverría HE. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Cien Suelo* 23:59-68.
- Estación Meteorológica, INTA Marcos Juárez. 2010. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/MJUAREZ/info/meteor.htm>. Verificado 26/03/2010.
- Ferreras LA, Magra G, Besson P, Kovalevski E, García F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Cien Suelo* 25:159-172.
- Ferreras LA, Torresani S, Bonel B, Fernández E, Bacigaluppo S, Faggioli V, Beltrán C. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Cien Suelo* 27:103-114.
- Franchini JC, Crispino CC, Souza RA, Torres E, Hungría M. 2007. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Till Res.* 92:18-29.
- Frioni L. 1999. Procesos microbianos. Río Cuarto, Argentina: Editorial Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Gregorich EG, Carter MR. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Developments in Soil Science*, 25. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science BV.
- Irizar A, Andriulo A, Mary B. 2013. Long-term Impact of No Tillage in Two Intensified Crop Rotations on Different Soil Organic Matter Fractions in Argentine Rolling Pampa. *The Op Agric J.* 7:22-31.
- Jenkinson D, Powlson D. 1976. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol Biochem.* 8:209-213.
- Lal R. 2008. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev.* 28:57-64.
- Madejón E, Moreno F, Murillo JM, Pelegrín F. 2007. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. *Soil Till Res.* 94:346-352.
- Melero S, López-Garrido R, Murillo JM, Moreno F. 2009. Conservation tillage: Short and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil Till Res.* 104:292-298.
- Nelson D, Sommers L. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Madison, WI, USA: Am. Soc. Agron.
- Restovich S, Andriulo A, Amendola C. 2011. Introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Cien Suelo* 29:61-73.
- Reboratti C. 2010. Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Rev Geografía Norte Grande* 45:63-76.
- Ricotta C. 2005. Through the jungle of biological diversity. *Acta Biotheor.* 53:29-38.
- Ruzek L, Vorisek K, Strnadova S, Novakova M, Barabasz W. 2004. Microbial characteristics, carbon and nitrogen content in Cambisols and Luvisols. *Plant Soil Environ.* 50:196-204.
- Sainz Rozas H, Echeverría H, Angelini H. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y Extrapampeana. *Cien Suelo* 29:29-37.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy.* 12th Edition. Washington DC: USDA-Natural Resources Conservation Service.
- Tabatabai M. 1982. *Soil Enzymes. Methods of soil analysis, Chemical and Microbiological Properties, Part 2.* Madison, WI, USA: Am. Soc. Agron.
- Trasar-Cepeda C, Leiros MC, Seoane S, Gil-Sotres F. 2008. Biochemical properties of soils under crop rotation. *Appl Soil Ecol.* 39:133-143.
- Vezzani FM, Mielniczuk J. 2009. Uma visão sobre qualidade do solo. *Rev Bras Cien Solo* 33:743-755.
- Wingeyer AB, Amado TJC, Pérez-Bidegain M, Studdert GA, Perdomo Varela CH, García FO, Karlen DL. 2015. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. *Sustainability* 7:2213-2242.
- Zibilske LM, Makus DJ. 2009. Black oat cover crop management effects on soil temperature and biological properties on a Mollisol in Texas, USA. *Geoderma* 149:379-385.