

## INDICADORES BIOLÓGICOS: SELECCIÓN, DETERMINACIÓN DE NIVELES DE REFERENCIA Y UTILIZACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES

SILVIA MERCEDES BENINTENDE<sup>\*†</sup>; MARÍA CRISTINA BENINTENDE<sup>1-(†)</sup>; MARÍA ALEJANDRA STERREN;  
MARIANO FABIO SALUZZIO<sup>1</sup> & PEDRO ANIBAL BARBAGELTA<sup>1</sup>

Recibido: 26-04-16

Recibido con revisiones: 04-11-16

Aceptado: 04-11-16

### RESUMEN

En este trabajo pretendemos a) analizar la utilidad de variables biológicas y bioquímicas para separar suelos degradados por el uso y manejo en relación con suelos poco disturbados pertenecientes a los órdenes Molisol y Vertisol y seleccionar aquellas más adecuadas como indicadoras de calidad; b) generar información para establecer niveles de referencia de estas variables y c) utilizarlas en la construcción de un índice que permita clasificar suelos con diferentes manejos, según su calidad biológica y bioquímica. Tomamos muestras de suelos pertenecientes a los órdenes Molisol y Vertisol de la provincia de Entre Ríos en tres subgrupos de suelos. Muestreamos áreas poco disturbadas (PD), suelo degradado (D) y área con un grado intermedio de degradación con aplicación de prácticas conservacionistas (I). Las variables medidas fueron: C y N de la biomasa microbiana (CBM y NBM), potencial de mineralización de N (PMN-IA), C orgánico (Corg) y N total (Ntot). Analizamos la separación de las zonas PD, D e I mediante análisis discriminante aplicado por orden de suelos y construimos un índice con cuatro indicadores seleccionados a partir de una matriz de priorización (CBM, PMN-IA, Corg y Ntot). Probamos la aplicación de este índice en muestras de suelo cuya calidad conocíamos "a priori". En Molisoles, la tasa de error total de clasificación del análisis discriminante fue de 11,1%, mientras que en Vertisoles fue de 12,8%; las que consideramos aceptables, dada la variabilidad de rasgos de las series de suelos que hemos agrupado para este análisis. El PMN-IA fue la variable que se modificó en mayor medida como resultado del manejo en los dos órdenes de suelos y en las áreas de máxima degradación sufrió una disminución cercana al 60%, mientras que el CBM disminuyó entre 30 y 35%. El índice de calidad biológica permitió clasificar adecuadamente suelos Argiudoles acucos y un Hapluderte típico.

**Palabras clave.** Calidad de suelos, selección de indicadores, índice calidad biológica.

## BIOLOGICAL INDICATORS: SELECTION, LEVELS, DETERMINATION AND THEIR USE IN INDEX CONSTRUCTION

### ABSTRACT

In this paper, our objectives were a) to test the utility of biological and biochemical variables to separate degraded areas from soils with minimal human disturbance of Mollisol and Vertisol soil orders and to select the most suitable ones to use as soil quality indicators; b) to generate information to establish reference levels of these variables, and c) to use them in the construction of an index to classify soils with different management history, according to their biological and biochemical quality. We took samples from Mollisol and Vertisol soils from Entre Ríos, corresponding to three soil subgroups. Samples were taken from areas with minimal human disturbance (PD), degraded areas (D), and areas with an intermediate degradation degree (I). Measured variables were: C and N in the microbial biomass (CBM and NBM), potential N mineralization (PMN-IA), organic carbon (Corg) and total N (Ntot). We analyzed the PD, D, and I zone separation by using discriminant analysis applied per soil order independently. Afterwards we built an index with four indicators selected with a prioritization matrix (CBM, PMN-IA, Corg and Ntot). We tested this index on soil samples whose quality we knew in advance. In Mollisols, the total misclassification rate was of 11.1%, while in Vertisols it was of 12.8%. We consider that these results show acceptable errors as the grouped soil series show a high variability. The PMN-IA was the most sensitive variable, reflecting the management effect on both soils. In degraded areas PMN-IA decreased by 60%, while CBM decreased between 30 and 35%. The biological quality index properly classified Aquic Argiudolls and a Typic Hapludert.

**Key words.** Soil health, indicators selection, biological health index.

1. Universidad Nacional de Entre Ríos

(†) Fallecida

\* Autor de contacto: silviab@fca.uner.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

El mantenimiento o la mejora de la calidad del suelo son cruciales para preservar la productividad agrícola y la seguridad ambiental para las generaciones futuras. El manejo del suelo puede influir en la calidad, ya sea de manera positiva o negativa, sin embargo, su evaluación no es fácil. En programas de monitoreo de calidad se seleccionan propiedades que reflejan el estado del suelo y su seguimiento permite analizar si el recurso se está degradando, se mantiene o se recupera. Entre estas propiedades se incluyen variables físicas, químicas y biológicas. Estas últimas se destacan por su sensibilidad y rapidez para reflejar los cambios (Caravaca *et al.*, 2002; Marinari *et al.*, 2006; Benintende *et al.*, 2008; Kaschuk *et al.*, 2010; Kaschuk *et al.*, 2011). Una de las principales dificultades para incluir propiedades biológicas en estos programas es que, generalmente, no se cuenta con valores de referencia (Carvalho Mendes & Bueno dos Reis-Junior, 2004).

Las variables que pueden usarse para estos fines, en general, son específicas de cada sitio y dependen del propósito de uso de la tierra (Gonzalez-Quñones, 2006). Autores como Cantu *et al.* (2007) destacan la necesidad de contar con un conjunto mínimo de indicadores de calidad de suelos, de simple medición y con validez local, que pueda ser utilizado por agencias gubernamentales y responsables del manejo del suelo para la evaluación y seguimiento en el tiempo de la calidad de este recurso. Para ello, es necesario generar un conjunto mínimo de datos para ser usados a nivel regional y que permita discriminar entre distintas historias de manejos de una misma clase de suelo.

Las variables biológicas que más frecuentemente integran el Set Mínimo de Datos de indicadores microbianos en Programas de Monitoreo Europeos son la biomasa microbiana seguida de la respiración (Nielsen & Winding, 2002). En un trabajo anterior de nuestro grupo, analizamos la capacidad de algunas variables biológicas para discriminar suelos poco alterados por el uso, por su calidad intrínseca. Determinamos que, en la provincia de Entre Ríos, las variables biomasa microbiana y potencial de mineralización de N por incubaciones anaeróbicas, fueron las más adecuadas para este fin (Benintende *et al.*, 2015).

Para avanzar en la definición de variables biológicas útiles a nivel regional, es indispensable determinar los niveles de referencia, contra los que se deben contrastar los valores medidos en cada lote, cuya calidad se quiere evaluar.

Según Ashad & Martin (2002), para observar los cambios y determinar las tendencias de mejoría o deterioro de la calidad del suelo para distintas zonas, es necesaria la selección de indicadores clave y la determinación de sus límites críticos, entre los cuales los indicadores deben mantenerse durante el funcionamiento normal del suelo. Una vez cumplido con este paso, los indicadores seleccionados pueden integrarse en índices de calidad con los que se pretende resumir, en un único valor numérico, un conjunto de propiedades representativas de las funciones del suelo. Éste es una fracción del valor obtenido para un suelo sin limitaciones para el crecimiento.

Para realizar esta unificación se han empleado diversas metodologías. Algunos autores relativizan los valores de las variables a valores de sitios de referencia (Burges & Kelting, 1999; Caravaca *et al.*, 2002; Kuwano *et al.*, 2014). Cantú *et al.* (2007) utilizan valores máximos y mínimos definidos para cada uno de los indicadores seleccionados en cada tipo de suelo. Con ellos calculan el valor normalizado de cada indicador, como la distancia entre el valor que toma la variable del valor mínimo, dividido por la amplitud entre los valores máximos y mínimos. El índice se calcula como el promedio de los valores normalizados de cada uno de los indicadores.

Sin embargo, la creación de un índice de calidad del suelo basado en sólo uno o un pequeño conjunto de indicadores puede no ser fiable. Por esa razón, se necesita un conjunto mínimo de indicadores que representen la complejidad y funcionalidad de suelo para evaluar su calidad (Cardoso *et al.*, 2013).

A partir de nuestro trabajo pretendemos aportar niveles de referencia para variables biológicas que sean adecuadas como indicadores de calidad de los suelos para ser utilizados a nivel regional para las principales áreas de producción agrícola de la provincia de Entre Ríos. A su vez ensayaremos un índice biológico con los indicadores seleccionados.

La provincia de Entre Ríos presenta una amplia gama de suelos cuyas características varían en distancias cortas. En la región de mayor uso agrícola de la provincia los dos órdenes de suelos que predominan son: Vertisol y Molisol. Ambos sumados ocupan una superficie de 4.250.000 ha y ésta representa el 68,5% de la superficie provincial, excluyendo el área correspondiente al Delta (INTA, 2011), por lo cual, en ellos focalizaremos nuestro estudio.

En este trabajo pretendemos a) analizar la utilidad de variables biológicas y bioquímicas para separar suelos

degradados por el uso y manejo en relación con suelos poco disturbados pertenecientes a los órdenes Molisol y Vertisol, y seleccionar las más adecuadas como indicadores de calidad; b) generar información para establecer niveles de referencia de estas variables y c) utilizarlas en la construcción de un índice que permita clasificar suelos con diferentes manejos, según su calidad biológica y bioquímica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Entre Ríos, Argentina (31,7°S y 58,5°W). La temperatura promedio anual es de 16,6 °C (24,9 °C en enero y 12,0 °C en julio) y la precipitación media anual es de 1000 mm (Tasi, 2009).

Tomamos muestras de suelos pertenecientes a los órdenes Molisol y Vertisol de la provincia de Entre Ríos en tres subgrupos de suelos. Las series muestreadas pertenecientes al orden Molisol fueron de los subgrupos: Arguidol ácuico (Series: Tezanos Pinto y Costa Grande), Arguidol vértico (Series: Crespo y Aranguren). Las series pertenecientes al orden Vertisol correspondieron al subgrupo Hapludert típico (Series: Centella, Estancia Potreros, Urdinarain y El Triángulo) (Plan Mapa de suelos 1998, 2001 y 2003; Soil Survey Staff, 2010).

### Muestreo de suelos

En cada serie muestreamos áreas de suelo poco disturbadas (PD), suelo degradado (D) y área con un grado intermedio de degradación con aplicación de prácticas conservacionistas (I). Los suelos denominados PD pertenecen a zonas de bajo alambrados, zonas de clausura y áreas bajo monte nativo con explotación ganadera extensiva. Las zonas en las que se muestrearon suelos que preclasificamos como D e I correspondieron a lotes bajo producción agrícola en los que se había cosechado soja recientemente. Las diferencias en el manejo de los lotes fue lo que determinó que fueran clasificadas como zonas D o I. Los diferentes manejos consistieron en el empleo de monocultivo de soja por largos períodos en contraste con la utilización de rotaciones de cultivos, la aplicación o no de las herramientas destinadas a minimizar las pérdidas por erosión hídrica (mantenimiento de cobertura vegetal que protege al suelo del efecto destructivo del impacto de la lluvia en suelo desnudo, utilización de terrazas que disminuyen el escurrimiento, etc.). En general, en los sitios I se aplicaban manejos tendientes a evitar la caída en los niveles de materia orgánica del suelo, a diferencia de lo que ocurre en los sitios D.

Realizamos el muestreo de cada área con 3 repeticiones compuestas de 20 sub-muestras a una profundidad de 0-15 cm. La forma de muestreo, el manipuleo y el almacenamiento siguió la guía general para tratamiento de muestras de suelo para evaluaciones biológicas de calidad de suelos (ISO 10381-

6, 1993). En el orden Molisol tomamos 18 muestras en áreas PD, 12 en áreas I y 15 en áreas D. En Vertisoles tomamos 15 muestras en áreas PD, 12 en áreas I y 12 en áreas D.

### Determinaciones de laboratorio

Biomasa Microbiana: C de biomasa microbiana (CBM) y N de biomasa microbiana (NBM) por la técnica de fumigación – extracción (Brookes *et al.*, 1985; Vance *et al.*, 1987; ISO 14240-2, 1997). Ambas determinaciones incluyen una fumigación de las muestras con cloroformo y una posterior extracción con sulfato de potasio. Se determina el C presente mediante oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico, y el N por digestión Kjeldahl. Se utilizaron kc de 0,35 y kn de 0,45 de acuerdo a Voroney *et al.* (2008).

Capacidad de aporte de N del suelo: N mineralizado en incubaciones anaeróbicas (Waring & Bremner, 1964) (PMN-IA). La determinación consiste en una incubación en condiciones anaeróbicas durante 7 días y posterior determinación del N mineralizado por destilación utilizando óxido de Mg.

C orgánico y N total: C orgánico (Corg) del suelo por el método de Walkley-Black y N total (Ntot) por el método de Kjeldahl (Jackson, 1982).

### Análisis de la variación ocasionada por el manejo

De acuerdo a lo propuesto por Morón (2005) se realizó un gráfico de barras de los valores relativos porcentuales que las variables toman en las áreas I y D respecto de PD en los dos órdenes de suelos por separado (Molisol y Vertisol). Al valor encontrado en PD se le asignó 100, lo que permite graficar el porcentaje que alcanzaron las variables en I y D en relación a aquel que tomó en PD.

### Análisis estadístico, selección de indicadores y determinación de niveles máximos y mínimos

Realizamos un análisis discriminante con las variables CBM, NBM, PMN-IA, Corg y Ntot, determinando la separación lograda de las tres áreas de muestreo, (Di Renzo *et al.*, 2013). Inicialmente, trabajamos utilizando los datos provenientes de todos los suelos en conjunto y luego, separando los muestreos de acuerdo al orden de suelo al que pertenecen.

Determinamos los intervalos de confianza para la estimación paramétrica de medias con un nivel de significación de 0,05 en áreas PD, I y D para los órdenes Molisol y Vertisol por separado.

Para realizar la selección de las variables a usar en la construcción de un índice, utilizamos una matriz de priorización según algunos criterios que estas variables deben reunir para que sean consideradas buenas indicadoras de calidad, como señalan diversos autores (Doran & Zeiss, 2000; Cantu *et al.*, 2007; Morón, 2005; Sarandon, 2002). Los criterios de selección fueron: **consistencia**

en la dirección del cambio, esto es, que siempre que exista la perturbación, la variable tienda a cambiar en el mismo sentido; **alta sensibilidad** a la aplicación de las prácticas de manejo y capacidad de reflejar diferentes niveles de degradación; **baja sensibilidad** a las variaciones climáticas de corto plazo, como las que se dan por el cambio estacional; **sencillez metodológica**, es decir, que sean fáciles de medir y que su metodología esté lo suficientemente probada y sea accesible a gran cantidad de laboratorios de análisis, ya que esto hace que sean adoptables por mayor cantidad de usuarios y ser de **bajo costo**.

A los tres primeros criterios se les asignó un valor de ponderación de 1, mientras que al cuarto y quinto de 0,7 y 0,5 respectivamente, ya que la sencillez metodológica y el bajo costo para su realización, son condiciones deseables aunque no indispensables.

Valoramos cada variable con una escala de 1 a 5, siendo 5 el más parecido al ideal, y lo multiplicamos por el valor de ponderación. Luego, sumamos los puntajes ponderados asignados a cada criterio por cada una de las variables y realizamos la priorización a partir del mayor puntaje alcanzado.

Los intervalos de confianza y la priorización de las variables sirvieron de base para establecer los niveles de referencia (valores máximos y mínimos) que permiten la aplicación de la metodología de Cantú *et al.* (2007) para construir un índice biológico de calidad. El valor máximo lo establecimos en el límite superior del intervalo de confianza para la estimación de medias de los suelos con la menor intervención antrópica (suelos PD). Entanto el valor mínimo lo calculamos considerando que la condición de suelo degradado (D) corresponde a un suelo de baja calidad. A partir de este supuesto, calculamos el valor que corresponde al mínimo (*I min*), obtenido a partir de la fórmula de normalización (Ecuación 1).

### Índice biológico de calidad de suelos

Construimos un índice siguiendo la metodología propuesta por Cantú *et al.* (2007) con cuatro variables (CBM, PMN-IA, Corg y Ntot), las cuales seleccionamos a partir de la matriz de priorización descripta anteriormente.

Para realizar la integración de las variables a un índice utilizamos funciones lineales para su normalización, de manera similar a lo propuesto por Gonzalez-Quiñones (2006). Las cuatro variables con las que trabajamos se ajustan a una función puntuadora del tipo "más es mejor" (Wienhold *et al.*, 2004), por lo que el cálculo del valor normalizado (*Vn*) de cada indicador se realizó según la ecuación 1 (Cantú *et al.*, 2007):

$$Vn = (Im - Imin) / (Imax - Imin) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde *Im* es el valor medido del indicador en el lote a evaluar, en tanto *Imin* e *Imax* son los valores mínimos y máximos que puede tomar esa variable según los valores de referencia.

El índice de calidad de suelos se estableció promediando los valores de todos los indicadores. Para su interpretación, se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo propuesta por Cantú *et al.* (2007), la cual se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases de calidad de suelos.

Table 1. Soil quality classes.

Clases de calidad de suelos	Escala
Muy alta calidad	0,80 – 1,00
Alta calidad	0,60 – 0,79
Moderada calidad	0,40 – 0,59
Baja calidad	0,20 – 0,39
Muy baja calidad	0,00 – 0,19

Para probar el índice biológico propuesto se trabajó con muestras de suelos Molisoles y Vertisoles provenientes de lotes cuya calidad de suelos se conocía "a priori" y que no fueron incorporadas en el cálculo de los valores máximos y mínimos de cada variable utilizada en la construcción del índice. En Molisoles se trabajó con suelos Argiudoles ácuicos. En este suelo se tomaron muestras de un área de alta calidad y otra de un nivel medio a bajo. En Vertisoles se trabajó con una muestra de un Hapluderte típico en el que se analizó un área que se considera de buena calidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis discriminante e intervalos de confianza

Inicialmente aplicamos el análisis discriminante para todos los suelos en conjunto, pero la separación de las tres áreas muestreadas (PD, I, y D) fue incompleta (Fig. 1). La tasa de error de clasificación de las muestras de áreas PD fue de 18,8%, las de I del 50% y las de D del 30%, con un error total de clasificación del 31,4%.

La elevada tasa de error de clasificación indica que no deben analizarse las muestras provenientes de todos los suelos en forma conjunta. Entre los suelos que entraron en este análisis existen diferencias intrínsecas no vinculadas al uso y manejo. Además, existen diferencias en la historia de uso agrícola en ambos órdenes. Los Molisoles y Vertisoles, tienen características que se traducen en capacidades productivas diferentes. Los Molisoles tienen un epipedón mólico de estructura granular, con una mayor aptitud para la producción agrícola, y con una larga historia agrícola que ha ocasionado una degradación marcada en los suelos. Mientras que las características particulares de los Vertisoles están íntimamente ligadas al

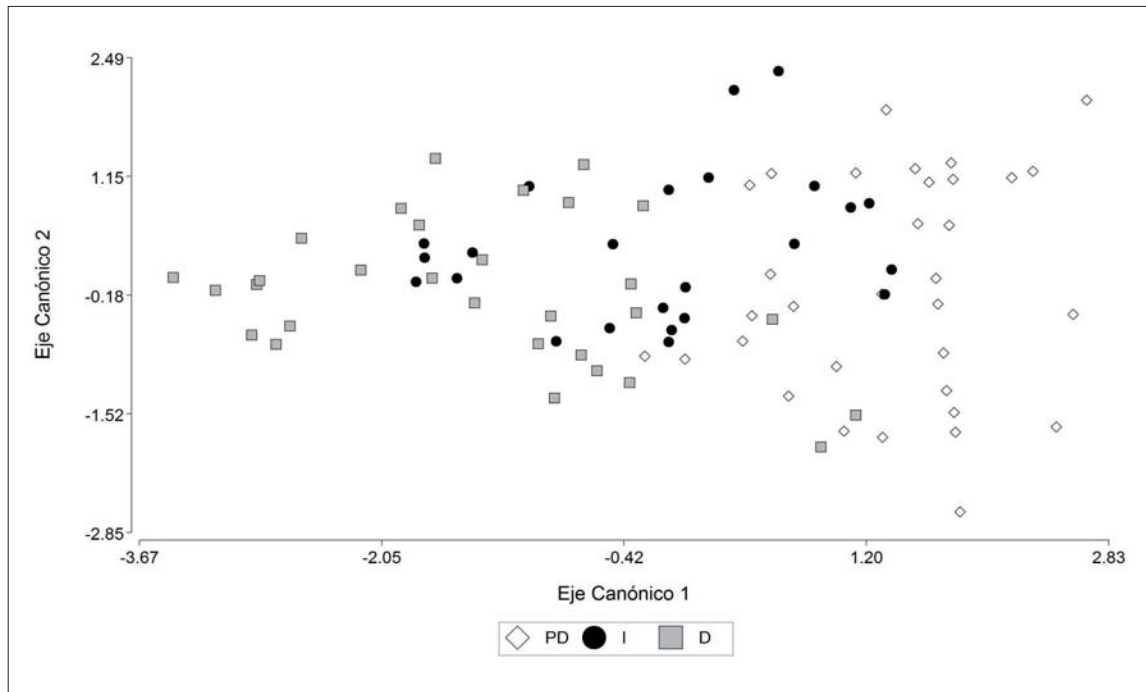


Figura 1. Observaciones multivariadas en los grupos poco degradados (PD), intermedio (I) y degradado (D) para el conjunto de todos los suelos en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2.

Figure 1. Multivariate observations in the "a priori" defined groups: areas with minimal human disturbance (PD), areas with an intermediate management (I), and degraded areas (D); for all soils evaluated together in the discriminant space formed by the canonical axes 1 and 2.

contenido y tipo de arcilla de elevada actividad físico química que forma complejos arcillo húmicos. Las características físicas de este tipo de suelos han limitado su uso agrícola hasta la incorporación de la siembra directa, por lo que su historia agrícola es generalmente más reciente (Tasi, 2009). Benintende *et al.* (2015), trabajando en suelos poco alterados por el uso, encontraron que la biomasa microbiana medida en suelos Vertisoles superó en aproximadamente 35% a la de Molisoles, mientras que el potencial de mineralización de N fue un 25% menor. Estas diferencias entre los suelos del área explican los elevados errores señalados anteriormente a partir de la aplicación del análisis discriminante sobre el conjunto de todos los suelos.

Benintende *et al.* (2013), en un trabajo realizado sobre muestras de áreas PD, I y D, evaluaron la separación que se obtiene con indicadores biológicos y químicos, al analizar por separado cada subgrupo de suelos. Reportaron clasificaciones sin errores trabajando con los subgrupos Argiudol ácuico y Peludert árgico (actualmente clasificado Hapludert típico), y un error de 5,56% cuando compararon los subgrupos Argiudol vértico y Peludert argiudólico

(actualmente clasificado Hapludert típico). La separación alcanzada en el análisis realizado por Benintende *et al.* (2013) es muy satisfactoria. Sin embargo, para facilitar la aplicación de este tipo de herramientas para la evaluación de calidad por parte de agencias gubernamentales, en la ejecución de programas de monitoreo, consideramos conveniente trabajar a nivel de orden, por lo que separamos suelos Molisoles de Vertisoles.

Los resultados obtenidos de este tercer análisis se presentan en forma separada para las muestras de suelo provenientes del orden Molisol (Fig. 2a) y Vertisol (Fig. 2b).

En la Figura 2 (a) el eje canónico 1 explicó el 99,2% de la variación entre los grupos. La función discriminante estandarizada sobre este eje fue:

$$F = 0,45 (\text{CBM}) + 0,41 (\text{NBM}) + 0,54 (\text{PMN-IA}) - 0,30 (\text{Corg}) + 0,81 (\text{Ntot})$$

Los coeficientes de la función discriminante indican que la variable que presentó el mayor peso en la discriminación

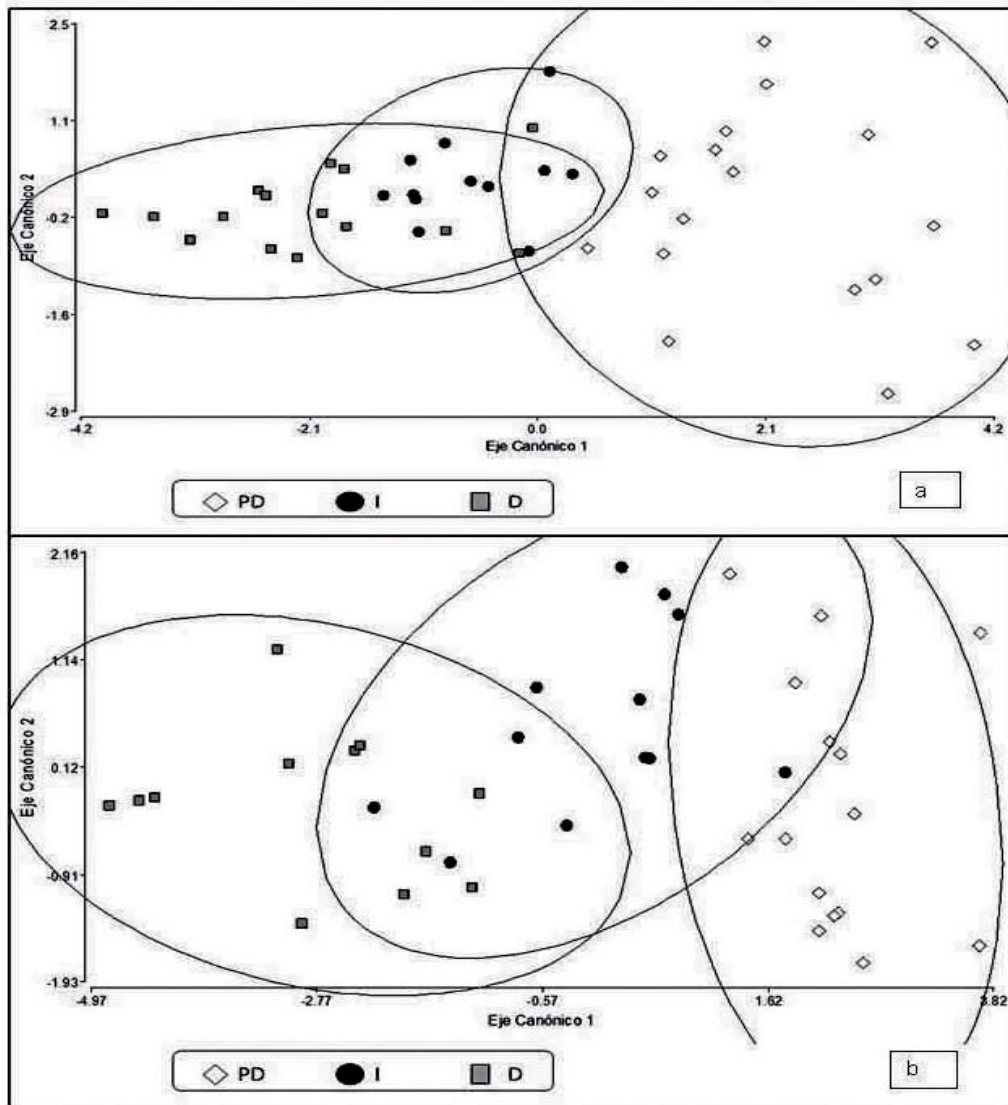


Figura 2. Observaciones multivariadas en los grupos definidos "a priori" poco disturbados (PD), intermedio (I) y degradado (D) para muestras de suelo provenientes de suelos Molisoles (a) y Vertisoles (b) en el espacio discriminante conformado por los ejes canónicos 1 y 2.

Figure 2. Multivariate observations in the "a priori" defined groups: areas with minimal human disturbance (PD), areas with an intermediate management (I), and degraded areas (D); for Mollisols (a) and Vertisols (b) in the discriminant space formed by the canonical axes 1 and 2.

entre los grupos fue Ntot, seguido de PMN-IA. Las muestras fueron clasificadas en el grupo al que pertenecen, utilizando las funciones discriminantes obtenidas, a excepción de tres muestras que pertenecían a áreas D que fueron clasificadas como I, una muestra de área I que se clasificó como D y una de área PD que fue clasificada como I (Fig. 2a). La tasa de error total lograda fue de 11,1% la que consideramos aceptable, dada la variabilidad de rasgos de las series de suelos agrupadas en el orden Molisol. Cabe

destacar que ninguna muestra proveniente de áreas PD fue clasificada como D ni viceversa.

En la Figura 2 (b) el eje canónico 1 explicó el 97,2% de la variación entre los grupos. La función discriminante estandarizada para este eje 1 fue:

$$F = 0,54 (\text{CBM}) - 0,14 (\text{NBM}) + 0,66 (\text{PMN-IA}) + 0,60 (\text{Corg}) + 0,12 (\text{Ntot})$$

La variable que presentó un mayor peso en la discriminación entre los grupos, en base a los coeficientes de la función discriminante, fue PMN-IA, seguido de Corg y CBM. Las observaciones fueron clasificadas en el grupo al que pertenecen, a excepción de una muestra que pertenecía a D y que fue clasificada como I, dos muestras de áreas I que se clasificaron como D y una de I que se clasificó como PD y una muestra de PD fue clasificada como I (Fig. 2b). En este caso la tasa de error total fue de 12,8%, la que también consideramos aceptable considerando la variabilidad de series de suelos que analizamos dentro de este grupo. Al igual que para Molisoles, en Vertisoles no se presentaron muestras provenientes de áreas PD que fueran clasificadas como D, ni viceversa.

Para los dos órdenes de suelos, los intervalos de confianza calculados para las medias de las variables CBM, PMN-IA, Corg y Ntot (Figs. 3 y 4), muestran claras diferencias en las tres áreas muestreadas, lo que indica que cumplen con características deseables de los indicadores, como es tener consistencia en la dirección en la que se produce el cambio provocado por el manejo y, también, ser capaces de diferenciar distintos niveles de degradación (Doran & Zeiss 2000; Morón, 2005).

Además, se observa que tanto Corg como Ntot mostraron mejor las diferencias entre los tres manejos en el orden Molisol que en el Vertisol, lo que está asociado a la mayor historia agrícola de los Molisoles. En las muestras de Vertisoles puede verificarse la mayor sensibilidad de variables biológicas como el CBM y PMN-IA frente a las variables químicas Corg y Ntot, ya que, en suelos de una historia agrícola más reciente, las primeras muestran variaciones antes que las últimas (Caravaca *et al.*, 2002; Marinari *et al.*, 2006).

### **Análisis del efecto del manejo sobre las variables**

La reducción relativa en el valor de las variables provocada por el uso y manejo de los suelos, respecto al que la misma alcanza en suelos poco disturbados, da una idea de la sensibilidad que posee esa variable (Morón, 2005). En la Figura 5 se presenta este análisis de sensibilidad, representado como el porcentaje de variación respecto a PD provocado por la degradación en las variables CBM, NBM, PMN-IA, Corg y Ntot en suelos Molisoles (a) y Vertisoles (b). Se visualiza la mayor reducción en casi todas las variables en los Molisoles respecto de los Vertisoles, lo que puede asociarse a la historia agrícola más reciente

señalada en los suelos Vertisoles (Tasi, 2009) y que se verifica en las zonas muestreadas en este trabajo.

El PMN-IA fue la variable que se modificó en mayor medida como resultado del manejo en los dos órdenes de suelo. En las áreas de mayor degradación sufrió una disminución muy marcada, cercana al 60% (Fig. 5). En coincidencia con lo señalado por otros autores y otros trabajos de nuestro grupo de investigación (Morón, 2005; Benintende *et al.*, 2008), el PMN-IA se mostró como la variable más sensible a los cambios producidos por el uso y manejo, característica muy deseable para seleccionar variables a ser utilizadas como indicadores de calidad de suelos (Doran & Zeiss, 2000; Sarandon, 2002).

La variable CBM fue afectada de forma similar en los dos órdenes. La degradación del suelo produjo disminuciones que oscilaron entre un 30 y un 35% en las peores condiciones de degradación. Efectos similares fueron observados por Benintende *et al.* (2008).

La variable NBM tuvo una evolución más errática. Si bien en suelos Molisoles (Fig. 5a) tanto I como D presentaron diferencias con PD, no se observó una clara diferencia entre I y D. En tanto en suelos Vertisoles, si bien se registró una disminución en D respecto de PD (Fig. 5b), en promedio I presentó valores superiores a PD.

El Corg y el Ntot tuvieron igual respuesta en los dos órdenes de suelos. La disminución registrada en D fue menor en el Vertisol (16%) y mayor en el Molisol (45%) (Fig. 5b y 5a, respectivamente).

### **Selección de variables**

Basándonos en los resultados de los intervalos de confianza generados (Figs. 3 y 4) y el análisis de sensibilidad de las variables (Fig. 5), en la matriz de ponderación (Tabla 2) asignamos el mayor puntaje en los criterios consistencia y alta sensibilidad al manejo a las variables CBM y PMN-IA.

Respecto del criterio de baja variación estacional, asignamos los mayores puntajes a PMN-IA, Corg y Ntot, según resultados de Benintende *et al.* (2015). En el trabajo citado, nuestro grupo evaluó las variables CBM, NBM, PMN-IA, Corg, Ntot, respiración, cociente metabólico y las relaciones entre CBM/Corg, NBM/Ntot y PMN-IA/Ntot siguiendo la evolución anual durante 2 años y medio y encontramos que el PMN-IA, el Corg y el Ntot, fueron las variables que presentaron menores variaciones.

El mayor puntaje por la sencillez de medición, fue asignado al Corg y Ntot, ya que la determinación de estas

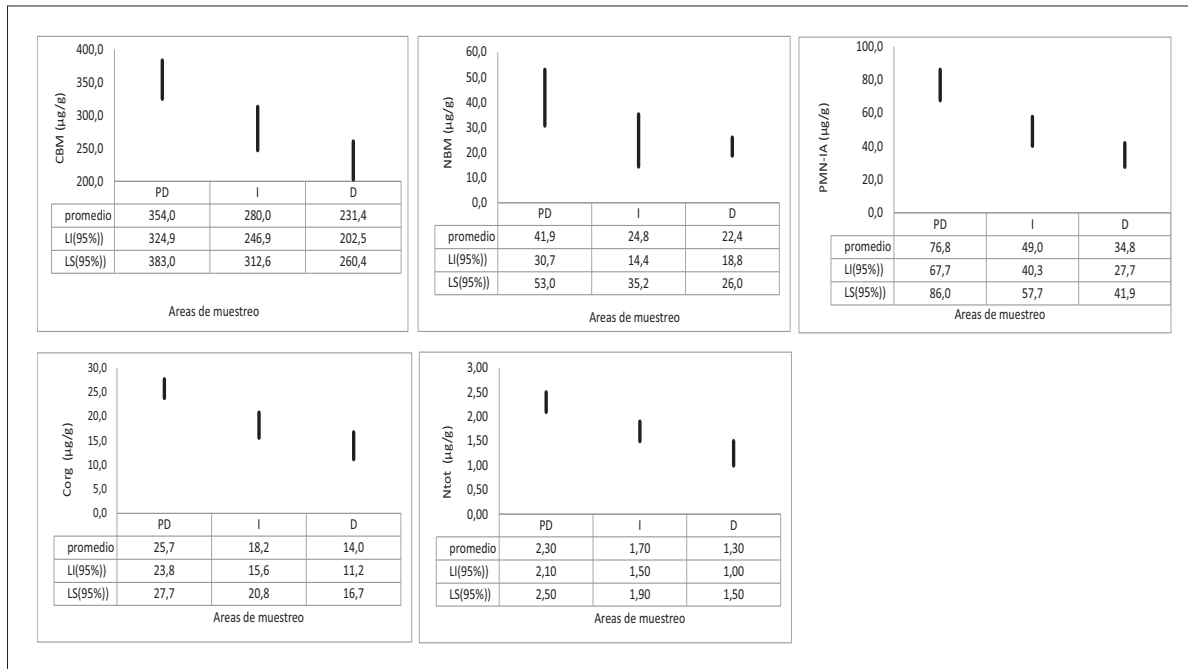


Figura 3. Intervalos de confianza para estimación de medias para las variables CBM, NBM, PMN-IA, Corg y Ntot en las tres áreas: poco disturbados (PD), intermedio (I) y degradado (D) de suelos Molisoles.

Figure 3. Confidence intervals for estimation of means for CBM, NBM, PMN-IA, Corg, and Ntot variables in the three areas: with minimal human disturbance (PD), areas with an intermediate management (I), and degraded areas (D); in Mollisols.

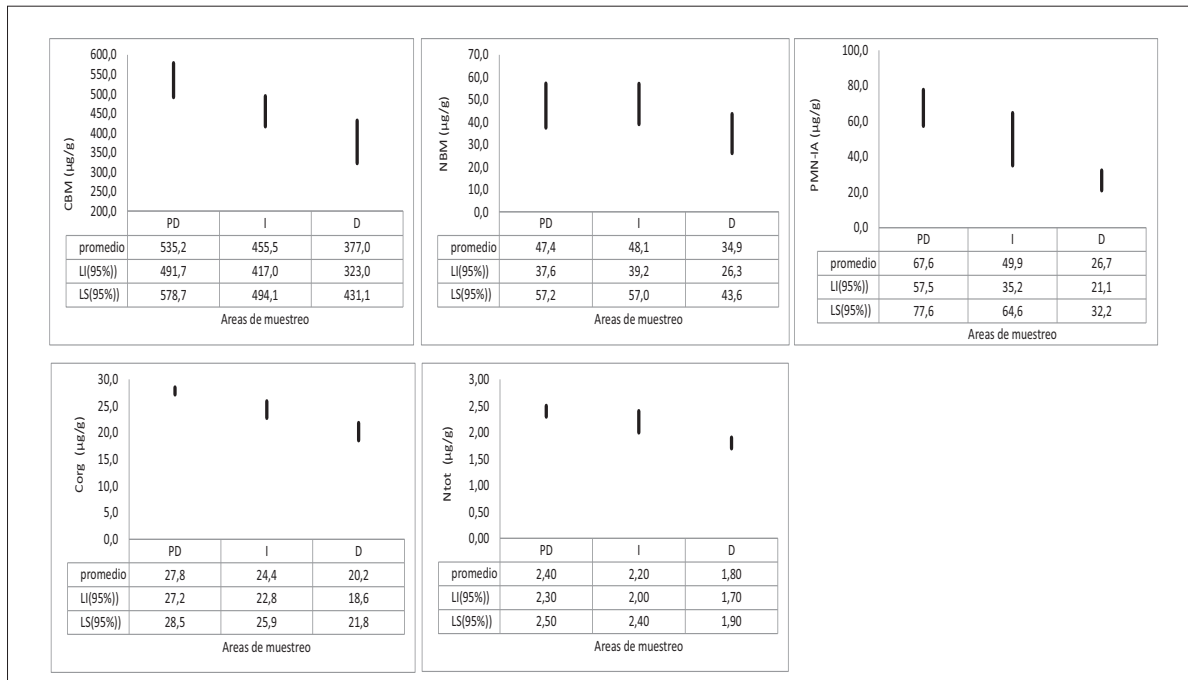


Figura 4. Intervalos de confianza para estimación de medias para las variables CBM, NBM, PMN-IA, Corg y Ntot en las tres áreas: poco disturbados (PD), intermedio (I) y degradado (D) de suelos Vertisoles.

Figure 4. Confidence intervals for estimation of means for CBM, NBM, PMN-IA, Corg, and Ntot variables in the three areas: with minimal human disturbance (PD), areas with an intermediate management (I), and degraded areas (D); in Vertisols.



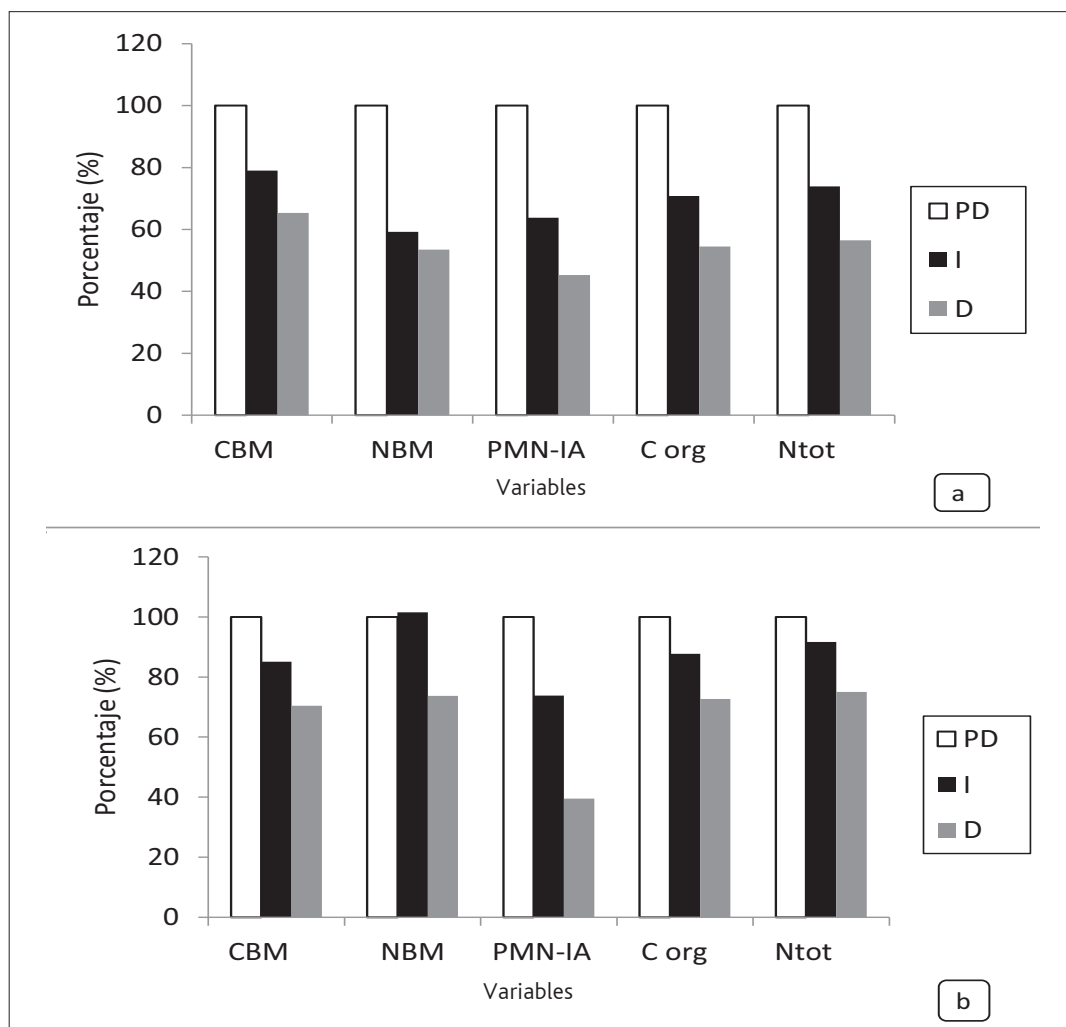


Figura 5. Porcentaje del valor que toman las variables: CBM, NBM, PMN-IA, Corg y Ntot en áreas de degradación intermedia (I) y degradado (D) en relación a los valores del suelo poco disturbado (PD), en los dos órdenes de suelos Molisol (a) y Vertisol (b).

Figure 5. Percentage of the values of CBM, NBM, PMN-IA, Corg, and Ntot in areas of intermediate degradation (I) and degraded (D), relative to the values of minimally disturbed soil (PD) in two soil orders Mollisols (a) and Vertisols (b)

Tabla 2. Matriz de priorización de variables biológicas y bioquímicas para su utilización como indicadores de calidad en programas de monitoreo y su inclusión en índices de calidad.

Table 2. Prioritization matrix of biological and biochemical variables for their use as soil quality indicators in monitoring programs and their inclusion in quality indices.

Criterios	Variables a priorizar				
	CBM	NBM	PMN-IA	Corg	Ntot
<i>Consistencia (P=1)</i>	5	4	5	4	4
<i>Alta sensibilidad a manejo (P=1)</i>	5	2	5	3	3
<i>Baja sensibilidad a variaciones estacionales (P=1)</i>	3	2	4	4	4
<i>Sencillez metodológica (P=0,7)</i>	3	2	4	5	5
<i>Bajo costo (P=0,5)</i>	4	2	4	5	3
<b>Puntaje total</b>	<b>17,8</b>	<b>10,4</b>	<b>18,8</b>	<b>17,0</b>	<b>16,0</b>
<b>Variables priorizadas</b>	<b>2°</b>	<b>5°</b>	<b>1°</b>	<b>3°</b>	<b>4°</b>

variables se realiza regularmente en los Laboratorios de Análisis de Suelos que integran el "Sistema de apoyo metodológico a laboratorios de análisis de suelo, aguas y enmiendas orgánicas" (SAMLA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. De acuerdo a la experiencia de nuestro grupo en mediciones biológicas y al trabajo en el seno de la Comisión de Biología de la Asociación Argentina de Ciencia del Suelo, se asignó los puntajes a las mediciones de PMN-IA, CBM y NBM.

Finalmente, según los costos de los servicios de análisis, se asignó los puntajes para el criterio bajo costo del análisis.

Del análisis de esta matriz se priorizaron, en este orden, las variables: PMN-IA, CBM, Corg, Ntot y NBM (Tabla 2).

### Índice de calidad biológica y bioquímica

En la Tabla 3 se presentan los indicadores seleccionados y los valores correspondientes a los niveles de máxima calidad y los de mínima para los Molisoles y Vertisoles para las variables: CBM, PMN-IA, Corg y Ntot. Con estos niveles de referencia se calculan el índice de calidad biológica en cada zona a evaluar. La metodología que hemos aplicado para determinar los niveles mínimos para los indicadores difiere de aquella utilizada por González-Quñones

(2006) ya que partimos del supuesto que, aún para suelos de calidad muy baja, los contenidos de estas variables no llegan a niveles de 0.

Estos niveles de referencia podrán asociarse con otros indicadores de calidad, especialmente físicos, para constituir un conjunto mínimo de indicadores de calidad para suelos Molisoles y Vertisoles de la provincia de Entre Ríos.

### Prueba del ajuste del índice con muestras de suelo no utilizadas en la generación de los niveles críticos

Los valores hallados y la condición del lote del que se extrajeron las muestras a fin de probar el ajuste y la utilidad de la escala generada se presentan en la Tabla 4.

En el Argiudol ácuico con buena condición, el valor del índice dio 0,72 y queda situado en la clase Alta Calidad. En el mismo suelo, pero con degradación marcada, el valor fue 0,2 lo cual lo ubica como un suelo de Baja Calidad. El Hapludert típico con buena calidad el índice fue 0,68, quedando así en la clase Alta Calidad (Tabla 1).

### CONCLUSIONES

Para los suelos analizados proponemos trabajar a nivel de orden, por lo que se generaron niveles de referencia para

Tabla 3. Indicadores de calidad de suelos: valores máximos y mínimos definidos para Molisoles y Vertisoles.

Table 3. Soil quality indicators: maximum and minimum values defined for Mollisols and Vertisols.

Indicador	Suelos			
	Molisol		Vertisol	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Corg ( $\mu\text{g/g}$ )	28	8	29	17
Ntot ( $\mu\text{g/g}$ )	2,5	0,8	2,5	1,5
CBM ( $\mu\text{g/g}$ )	383	166	579	291
PMN-IA ( $\mu\text{g/g}$ )	86	13	78	5

Tabla 4. Valores medidos de los indicadores CBM, PMN-IA, Corg y Ntot en suelos Molisoles en condiciones de calidad buena y degradada y en un Vertisol de buena calidad.

Table 4. Measured values for CBM, PMN-IA, Corg, and Ntot in Mollisols with good quality and degraded conditions, and a Vertisol soil with good quality.

Suelos	Condición	CBM	PMN-IA	Corg	Ntot
		$(\mu\text{g/g})$			
<i>Argiudol ácuico</i>	buena	303,3	70,5	21,3	2,12
	degradado	226,1	26,3	11,4	1,10
<i>Hapluderte típico</i>	buena	323,1	72,6	25,2	2,45

las variables que seleccionamos para Molisoles y Vertisoles separadamente. Las variables que resultaron más adecuadas para caracterizar manejos en estos suelos fueron PMN-IA, CBM, Corg y Ntot, de acuerdo a los criterios preestablecidos para indicadores de calidad de suelos.

El índice biológico desarrollado demostró una adecuada performance y consideramos que estas variables pueden tener potencialidad para integrar el set mínimo de indicadores que sean usados en evaluaciones de calidad de suelos en nuestra provincia.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Entre Ríos (PID 2127 y PID 2153). Deseamos agradecer a F. Retamar y S. Soñez por la colaboración con los análisis de laboratorio.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Arshad, MA & S Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agric. Ecosys. Environ.* 88: 153-160.
- Benintende, S; M Benintende; M Sterren & J De Battista. 2008. Soil microbial indicators of soil quality in four rice rotation systems. *Ecol. Indic.* 8: 704-708.
- Benintende, S; M Benintende; M Sterren; M Saluzzio & P Barbagelata. 2015. Biological variables as soil quality indicators: Effect of sampling time and ability to classify soils by their suitability. *Ecol. Indic.* 52: 147-152.
- Benintende, S; M Sterren; S Soñez; M Saluzzio & M Benintende. 2013. Indicadores biológicos y bioquímicos de calidad suelos en vertisoles y molisoles. *En: IX Reunión Nacional Científico-Técnica de Biología de Suelos. I Congreso Nacional de Biología Molecular de Suelos.* Santiago del Estero.
- Brookes, P; A Landman; G Pruden & D Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 17: 837-842.
- Burges J & D Kelting. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecol. Manag.* 122: 155-166.
- Cantú, M; A Becker; J Bedano & H Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices *CI. SUELO (ARGENTINA)* 25: 173-178.
- Caravaca, F; G Masciandaro & B Ceccanti. 2002. Land use in relation to soil Chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil Till. Res.* 68: 23-30.
- Cardoso, E; R Vasconcellos; D Bini; M Miyauchi; C Santos; P Alves; A Paula; A Nakatani; J Pereira & M Nogueira. 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Sci. Agric.* 70: 280-295.
- Carvalho Mendes, I & F Reis-Junior. 2004. Uso de parámetros microbiológicos como indicadores para avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade dos agroecosistemas. Documentos/Embrapa Cerrados Doc 112. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 34 p.
- Di Renzo, J; F Casanoves; M Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C Robledo. 2013. InfoStat version 2013. Argentina: FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>. [Abril de 2015].
- Doran, J & M Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl Soil Ecol.* 15: 3-11.
- González-Quiñones Ortas, V. 2006. Metodología, formulación y aplicación de un índice de calidad de suelos con fines agrícolas para Castilla-La Mancha. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid. [https://repositorio.uam.es/.../6585\\_gonzalez\\_quinones\\_vanesa.pdf](https://repositorio.uam.es/.../6585_gonzalez_quinones_vanesa.pdf). [Enero 2015].
- ISO 10381-6. 1993. Soil quality. Sampling. Part 6: Guidance on the collection, handling and storage of soil for the assessment of aerobic microbial processes in the laboratory.
- ISO 14240-2. 1997. Soil quality. Determination of soil microbial biomass Part 2: Fumigation-extraction method.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2011. Suelos y ambientes de Entre Ríos. <http://inta.gob.ar/imagenes/Entre%20Rios.jpg/view>. [Enero 2015].
- Jackson, M. 1976. Análisis químicos de suelo. Ediciones Omega, Barcelona. 662 p.
- Kaschuk, G; O Alberton & M Hungria. 2010. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biol. Biochem.* 42: 1-13.
- Kaschuk, G; O Alberton & M Hungria. 2011. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. *Plant Soil* 338: 467-481.
- Kuwano, B; A Knob; D Santos Lima Fagotti; N Melém Júnior; L Godoy; R Diehl; C Krawulski; G Andrade Filho; W Zangaro Filho; J Tavares-Filho & M Nogueira. 2014. Soil quality indicators in a Rhodic Kandudult under different uses in northern Parana, Brazil. *Bras. Ci. Solo* 38: 50-59.
- Marinari, S; R Mancinelli; E Campiglia & S Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indic.* 6: 701-711.
- Morón, A. 2005. Indicadores para el diagnóstico de la calidad de suelos en sistemas agrícolas. *En: Indicadores de Calidad de suelo. Seminario Internacional.* 20 al 22 de abril de 2005. Marcos Juárez. Argentina.
- Nielsen, M & A Winding. 2002. Microorganisms as Indicators of Soil Health. National Environmental Research Institute, Denmark. Technical Report No. 388. [http://www.neri.dk/1\\_viden/2\\_Publikationer/3\\_fagrapporter/rapporter/FR388.pdf](http://www.neri.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/FR388.pdf) [Enero 2015].
- Plan Mapa de Suelo .1991, 1998, 2001, 2003. Carta de Suelo República Argentina. Departamentos Diamante, Paraná, Nogoyá y Uruguay de la provincia de Entre Ríos. Acuerdo complementario Convenio INTA- Gob. Entre Ríos, EEA Paraná, Subsecretaría de Asuntos Agrarios.
- Sarandón, S. 2002. El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. *En: S. Sarandón (ed). Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable.* Pp 393-414. Ediciones Científicas Americanas.

- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11va ed. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, EUA. 346 p.
- Tasi, H. 2009. Aplicación de las cartas de suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar índices de productividad específicos para los principales cultivos agrícolas. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. [ruc.udc.es/bitstream/2183/5679/1/Tasi.Hugo.9005734-a4.pdf](http://ruc.udc.es/bitstream/2183/5679/1/Tasi.Hugo.9005734-a4.pdf). [Enero 2015].
- Tasi, H & D Bedendo. 2008. Aptitud Agrícola de las Tierras de la Provincia de Entre Ríos (2° edición). Proyecto Regional Agrícola. Ediciones INTA - Centro Regional Entre Ríos. INTA EEA Paraná. Serie Extensión N° 47.
- Vance, E; P Brookes & D Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- Voroney, R; P Brookes & R Beyaert. 2008. Soil microbial biomass C, N P and S. En: MR Carter (ed). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd Edition. Chapter 49. Pp : 40-53. (Lewis Publ.). CRC Press.
- Waring, S & J Bremner. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* (London) 201: 951-952.
- Wienhold, B; SS Andrews & DL Karlen. 2004. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environ. Geochem. Health* 26: 89-95.