



EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE CULTIVO

Ferreras L.A.^{1*}; Ferrari M.C.^{2,3}; Magra, G.C.^{1,3}; Solá Brignone, F.E.¹; Rivoltella; L.A.²

¹ Facultad Ciencias Agrarias (UNR); ² EEA-INTA Pergamino; ³ UNNOBA

* ferrerasla@gmail.com; Campo J.F Villarino s/n, Zavalla - Santa Fe. 0341-4970080

INTRODUCCIÓN

Evaluar la calidad de los suelos constituye un gran desafío debido a la compleja interacción que existe entre el suelo y las condiciones ambientales, la que a su vez se modifica como resultado de las prácticas de manejo. La calidad del suelo no se puede medir directamente pero es factible su evaluación a partir de cambios en los atributos edáficos. Las definiciones más recientes se basan en la multifuncionalidad del suelo y no sólo en un uso específico de este recurso (Karlen *et al.*, 2006; Bhardwaj *et al.*, 2011). El suelo debe propiciar un ambiente que permita mantener alta productividad biológica, mantener la calidad ambiental, y promover la salud de plantas y animales. En este marco, para evaluar su funcionamiento se deben integrar aspectos relacionados al ciclado y almacenamiento de nutrientes; a la capacidad de recibir, almacenar y ceder el agua; como así también considerar un ambiente físico adecuado para promover el crecimiento de raíces y desarrollo microbiano. Asimismo, es importante que el suelo presente capacidad de resiliencia, manteniendo esas cualidades en el tiempo (Doran & Zeiss, 2000). Las diferentes prácticas de manejo afectan a una gran cantidad de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo; por lo tanto, para evaluar la calidad de suelos agrícolas se debería involucrar a un elevado número de propiedades. Con este enfoque surge el inconveniente respecto a la decisión de qué variables y cuántas seleccionar. Por tal motivo, el desarrollo de una variable resumen que tenga en cuenta las funciones principales del suelo, podría ser aplicable para cuantificar los cambios en su calidad (Masto *et al.*, 2008). El objetivo del trabajo fue evaluar cambios en la calidad del suelo como consecuencia de prácticas de manejo en un Argiudol típico utilizando un índice simple integrando atributos físicos, químicos y biológicos involucrados en las principales funciones del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las mediciones se llevaron a cabo en un experimento de larga duración de sistemas de cultivo en siembra directa en suelos degradados por uso agrícola ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Pergamino: (33° 58' S; 60° 34' O). El ensayo se inició en el año 1997 sobre un Argiudol típico serie Pergamino (INTA, 1972), con una historia previa de más de 20 años de agricultura continua con laboreo. El diseño experimental fue en parcelas divididas con tres repeticiones. En la parcela principal se dispuso el factor labranza profunda: escarificado al inicio del ensayo (1997) únicamente (Lab. Prof. Inicial), escarificado al inicio del ensayo (1997) y luego periódicamente, cada 2, 4 y 6 años (Lab. Prof. Inicial + periódica); y sin uso de labranza profunda (Sin Lab. Prof.). En la subparcela se implementaron las siguientes secuencias de cultivo en siembra directa: Trigo/Sorgo 2da–Maíz (T/Sgo-M); Cultivo de cobertura de Avena+Vicia/Soja 1ra (Av+V/S); y Trigo/Soja 2da–Maíz (T/S-M). Por otro lado, en el año 1998 se sembró una pastura permanente de festuca alta y trébol blanco en un sector adyacente al ensayo. Dicho sitio ha permanecido inalterado hasta la fecha y fue considerado como Suelo de Referencia para las

evaluaciones realizadas en el presente estudio. Se llevaron a cabo seis muestreos en las siguientes fechas: Noviembre 2010, Agosto y Noviembre 2011, Mayo y Noviembre 2012 y Mayo 2013. Se extrajeron muestras de suelo compuestas por 30 submuestras a los 0-7,5 cm de profundidad (una muestra compuesta por unidad experimental) y se determinaron los siguientes parámetros:

- Actividad enzimática: La actividad de las enzimas fosfatasa ácida (FOSF) y ureasa (URE) se determinó según Tabatabai (1982). La estimación de FOSF se basó en la determinación del p-nitrofenol liberado por la actividad de la enzima en suelo incubado con una solución de p-nitrofenil fosfato disódico (pH 6,5). La URE se estimó mediante la cuantificación del NH_4^+ liberado a partir del suelo incubado con una solución de urea. La concentración de los productos se determinó por colorimetría, expresando los resultados como μg de producto $\text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de suelo en base seca.
- Carbono de la biomasa microbiana (CBM): Método de Fumigación-Extracción (Vance *et al.*, 1987). El suelo se fumigó con cloroformo como biocida y luego se extrajo el carbono (C) con una solución de K_2SO_4 . En una alícuota del filtrado se realizó la digestión con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y H_2SO_4 a 140°C , para determinar luego el contenido de C por espectrofotometría. Controles no fumigados (NF) se trataron bajo las mismas condiciones. El CBM se calculó mediante la diferencia entre las muestras fumigadas y NF. Los resultados se expresaron como $\mu\text{g C g}^{-1}$ de suelo en base seca.
- Carbono orgánico (CO): Se realizó la oxidación del CO con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en H_2SO_4 concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson & Sommers, 1982). Los resultados se expresaron en $\text{g CO } 100 \text{ g}^{-1}$ suelo seco.
- Agregados estables al agua (AEA): Se obtuvo el porcentaje de AEA según Hénin *et al.* (1972). Se cuantificó la fracción de agregados que permanece en el tamiz de 0,25 mm luego de sumergir las muestras en agua. Se calculó la estabilidad relativa (ER) mediante la relación entre el porcentaje de AEA de cada tratamiento y el del Suelo de Referencia, expresando el resultado en porcentaje (de Orellana & Pilatti, 1994).

Las variables biológicas se evaluaron en ambos muestreos de cada año, mientras que CO y AEA se determinaron únicamente en los muestreos de Noviembre.

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) 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. Además, se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA) y la separación de medias fue obtenida por el test de Tukey ($p < 0,05$). Se usó el software estadístico InfoStat 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección de las variables se realizó teniendo en cuenta su participación en las funciones principales que debe cumplir el suelo. Por tal motivo se evaluó el CO puesto que tiene un rol fundamental en la provisión de nutrientes y en la formación de la estructura (Rotenberg *et al.*, 2007, Lal, 2008). Los microorganismos del suelo constituyen el componente activo del pool orgánico controlando la descomposición de la materia orgánica y por lo tanto la liberación de nutrientes, de tal manera que a través del CBM se determinó la fracción compuesta por células microbianas vivas (Bastida *et al.*, 2006). Las actividades enzimáticas se seleccionaron porque juegan un rol clave en el mantenimiento y dinámica de los nutrientes a través del ciclado de la materia orgánica (Nannipieri, 1994). Finalmente, la estabilidad estructural es un atributo edáfico de gran importancia debido a que tiene en cuenta aspectos relacionados con propiedades físicas vinculadas a la retención de agua y movimiento de fluidos (sistema poroso), con el contenido de CO y con la actividad biológica (Dexter, 2004).

El ACP se realizó con la información obtenida durante los seis muestreos. Se utilizó esta herramienta del análisis multivariado a los fines de determinar las variables que tuvieron mayor incidencia en diferenciar los tratamientos. Se realizó la estandarización de las variables y, por lo tanto, se trabajó sobre la matriz de correlaciones. El empleo de la matriz de correlación significa que se le otorgó igual importancia a todas las variables, independientemente de los valores relativos de sus varianzas. La Tabla 1 señala las relaciones positivas entre variables.

Tabla 1: Matriz de correlación/coeficientes.

	FOSF	URE	ER	CBM	CO
FOSF	1,00				
URE	0,36*	1,00			
ER	0,64*	0,63*	1,00		
CBM	0,77*	0,18	0,42*	1,00	
CO	0,72*	0,68*	0,87*	0,53 *	1,00

(*) Indica correlaciones significativas ($p < 0,05$).

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 87 % de la variancia total de los datos, correspondiendo a la CP1 el 67 % y a la CP2 el 20 %:

$$CP1 = 0,47 FOSF + 0,38 URE + 0,48 ER + 0,38 CBM + 0,51 CO$$

$$CP2 = 0,39 FOSF - 0,60 URE - 0,24 ER + 0,64 CBM - 0,16 CO$$

El valor de los coeficientes (autovectores) expresa la contribución relativa de cada variable en las dos CP. Para la CP1 las componentes de las cinco variables estudiadas presentaron valores elevados (de signo positivo), lo cual significa que han tenido mucho peso en su definición. A esta nueva variable le corresponderán valores altos (positivos) cuando los parámetros analizados presenten valores elevados. Dado que la CP1 explicó el 67% de la variabilidad total de los datos y se asoció positivamente con todas las variables incluidas en el análisis, podría interpretarse como un índice simple de calidad del suelo. En el caso de la CP2, solo FOSF y CBM presentaron componentes elevados y de signo positivo, mientras que URE presentó un componente elevado con signo negativo. La CP2 presentará valores positivos cuando las variables FOSF y CBM presenten valores altos y URE tenga valores bajos. Los componentes correspondientes a CO y ER expresaron que estas dos variables tuvieron poca incidencia en determinar la CP2.

La Figura 1 muestra que el Suelo de Referencia presentó valores elevados de las cinco variables (a la derecha del cero de CP1). Asimismo, algunas muestras provenientes de las parcelas cultivadas se ubicaron en este cuadrante (con mayor presencia de casos pertenecientes a la secuencia Av+V/S). El resto se ubicó mayormente a la izquierda del cero, indicando que en general presentaron valores bajos de las variables observadas. Para la CP2, los puntos presentes por encima del cero manifestaron valores elevados de CBM y FOSF. El Suelo de Referencia constituye la situación mejor conservada, con elevada fertilidad física, química y biológica. La distribución presentada en la Figura 1 sugiere que la secuencia Av+V/S fue la que más se aproximó al Suelo de Referencia. Esta secuencia, que incluye el cultivo de cobertura (CC), incorpora al suelo una mayor proporción de residuos fácilmente degradables con un aporte extra de nitrógeno fijado a través de la vicia. Por otro lado, el suelo con CC se encuentra la mayor parte del año habitado por raíces vivas, situación que no ocurre en las otras dos secuencias de cultivo evaluadas en el ensayo, en las cuales los períodos de barbecho son más extensos. El aporte de C lábil (parte aérea y raíces) constituye el sustrato inicial para la descomposición microbiana, por lo tanto se estimula la actividad de los microorganismos con un incremento en la población y en la producción de enzimas (Acosta-Martínez *et al.*, 2007, Zibilske & Makus, 2009).

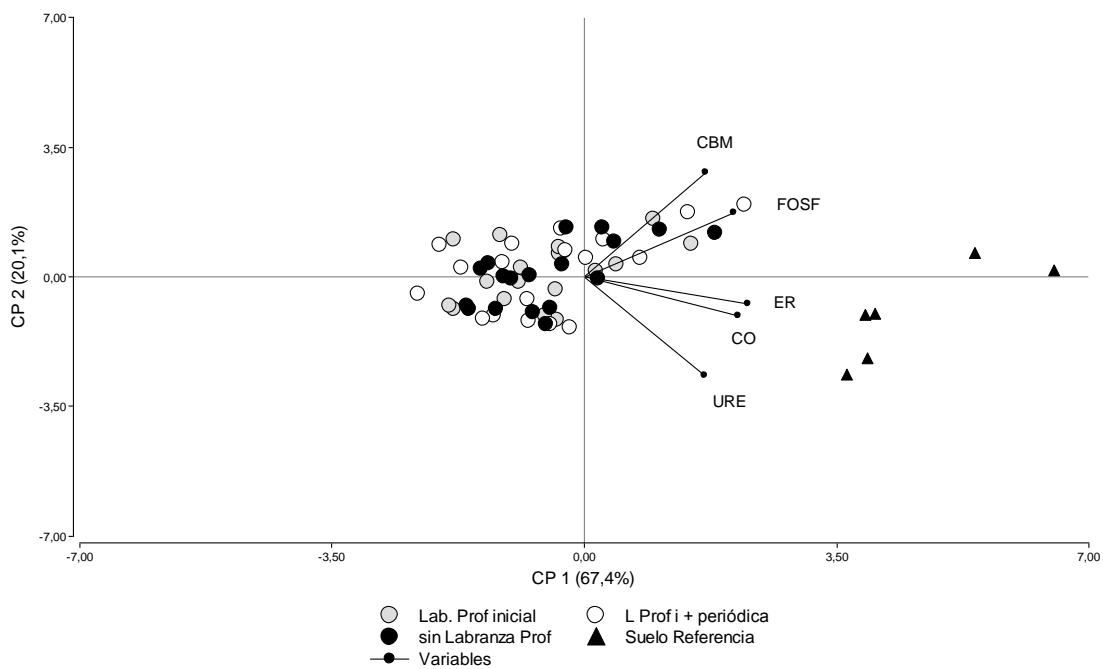
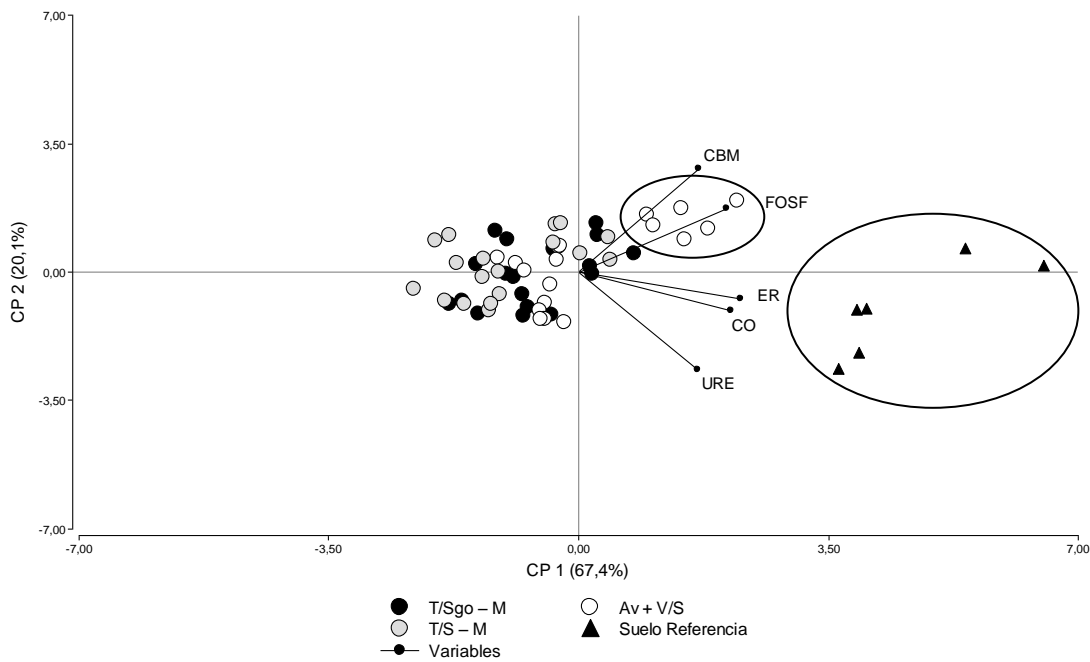


Figura 2: Análisis de componentes principales sobre las variables Fosfatasa ácida (FOSF), Ureasa (URE), Carbono de la Biomasa Microbiana (CBM), Carbono orgánico (CO), y Estabilidad Relativa de Agregados (ER) para cada tratamiento en las seis fechas de muestreo. Se identificaron los tratamientos de labranza profunda y el Suelo de Referencia.

No se observó un agrupamiento definido en cuanto al efecto de la labor profunda (Figura 2). En este caso no se detectó ningún patrón, muy probablemente debido a que el efecto de la labor profunda se manifestaría en mayor grado entre los 15 y 35 cm de profundidad (la profundidad del escarificado osciló entre los 28 y 38 cm, según el año en que fue realizado) y las muestras de suelo fueron extraídas del espesor 0-7,5 cm. Por lo tanto, no se evidenció un impacto de la labranza en superficie.

Luego del análisis exploratorio a través del ACP se realizó un ANOVA. Los valores promedio para los tratamientos se detallan en la Tabla 2. Además, fuera del análisis estadístico, se incluyeron en la Tabla 2 los resultados obtenidos en el Suelo de Referencia. Las interacciones fueron no

significativas (NS) y, por lo tanto, se presenta cada factor por separado. Los promedios a lo largo de los seis muestreos respaldan lo observado en los Biplots (Figuras 1 y 2).

Tabla 2: Valores medios de las variables analizadas en los seis muestreos, agrupados según secuencias de cultivo y uso de labranza profunda.

Tratamiento	FOSFATASA ($\mu\text{g PNP h}^{-1} \text{g}^{-1}$)	UREASA ($\mu\text{g NH}_4^+ \text{h}^{-1} \text{g}^{-1}$)	CBM ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{g}^{-1}$)	CO (%)	ER (%)
T/Sgo – M	813,6 a	61,3 ab	168,8 a	2,40 b	38,3 a
Av + V/S	974,5 b	72,4 b	242,0 b	2,53 c	32,7 a
T/S – M	808,9 a	57,5 a	168,5 a	2,28 a	34,8 a
Lab. Prof. Inicial	857,6 a	62,4 a	190,7 a	2,41 a	34,4 a
Lab. Prof. Inicial+periódica	876,4 a	65,4 a	204,4 a	2,37 a	34,9 a
Sin Lab. Prof.	863,0 a	62,2 a	184,2 a	2,44 a	36,5 a
Suelo de Referencia	1316,2	116,8	328,3	3,20	100,0

Letras distintas en cada columna y para cada grupo de tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

La secuencia Av+V/S se diferenció estadísticamente de T/S-M en cuatro de las cinco variables evaluadas, mientras que para la labor profunda las diferencias fueron NS (Tabla 2). La secuencia T/Sgo-M, que incluye la mayor proporción de gramíneas con respecto a las otras dos, mostró contenidos de CO significativamente superiores a los obtenidos con T/S-M. Además, la rotación que incluye sorgo presentó los valores más elevados de ER y una leve tendencia a presentar valores mayores en FOSF y URE con respecto a T/S-M, aunque las diferencias fueron NS. En el Suelo de Referencia se produce un adecuado balance de C, debido al aporte continuo de residuos. La disponibilidad de C contribuye a activar la flora microbiana que genera compuestos involucrados en la formación de agregados, además de liberar enzimas relacionadas con los ciclos de los nutrientes (Melero *et al.*, 2006; Acosta-Martínez *et al.*, 2007), situación que determinó valores superiores en las cinco variables estudiadas con respecto a las parcelas bajo cultivo.

CONCLUSIÓN

A través del Análisis de Componentes Principales se pudo resumir la información aportada por las cinco variables evaluadas a lo largo de los seis muestreos. La CP1 puede considerarse una variable resumen o índice, puesto que los autovectores que la determinaron fueron todos positivos y con similar peso en su definición. Cuanto más elevado sea el valor de CP1, indicará que las condiciones del suelo se asemejan en mayor medida al Suelo de Referencia (situación de mayor calidad edáfica). La secuencia Av+V/S fue la que más se aproximó al Suelo de Referencia, sugiriendo que para las condiciones del ensayo habría sido el sistema agrícola más sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con fondos de los Proyectos Específicos PNCER 2341 y PNCER-022411 de INTA, y del Proyecto de Investigación AGR179 (SeCyT – UNR).

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Martínez, V; MM Mikhan & MF Vigil. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow for the Central Great Plains. *App. Soil Ecol.* 37: 41-52.
- Bastida, F; JF Moreno; T Hernández & C García. 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biol. Biochem.* 38: 3463-3473.
- Bhardwaj, AK; P Jasrotia; SK Hamilton & GP Robertson. 2011. Ecological management of intensively cropped agroecosystems improves soil quality with sustained productivity. *Agric. Ecosys. Environ.* 140: 419-429.
- De Orellana, JA & MA Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.

- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. Infostat, versión 2011. Grupo Infostat. FCA, UNC, Córdoba, Argentina.
- Doran, JW & M Zeiss. 2000. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *App. Soil Ecol.* 15: 3-11.
- Hénin, S; R Gras & G Monnier. 1972. El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi Prensa. Madrid, pp 342.
- INTA. 1972. Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3360-32 Pergamino. Buenos Aires, 106 p.
- Karlen, DL; EG Hurley; SS Andrews; CA Cambardella; DW Meek; MD Duffy & AP Mallarino. 2006. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. *Agron. J.* 98: 484–495.
- Lal, R. 2008. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28:57-64.
- Masto, RE; PK Chhonkar; D Singh & AK Patra. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environ. Monit. Assess.* 136, 419–435.
- Melero, S; JC Ruiz Porras; JF Herencia & E Madejon. 2006. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil Till. Res.* 90: 162–170.
- Nannipieri, P. 1994. The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. In: Pankhurst, CE.; BM Doube; VVSR Gupta & PR Grace (Eds.). *Soil Biota: Management in Sustainable Farming Systems*. CSIRO, Australia, pp. 238–244.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Page, AL; RH Miller & DR Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy Madison, WI, USA, pp. 1159.
- Rotenberg, D; A Jiménez Wells; EJ Chapman; AE Whitfield; RM Goodman & LR Cooperband. 2007. Soil properties associated with organic matter-mediated suppression of bean root rot in field soil amended with fresh and composted paper mill residuals. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2936-2948.
- Tabatabai, M. 1982. Soil Enzymes. *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Page et al (Eds.). Am. Soc. Agron. Madison, USA. pp.1159.
- Vance, ED; PC. Brookes & DS Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- Zibilske, LM & DJ Makus. 2009. Black oat cover crop management effects on soil temperature and biological properties on a Mollisol in Texas, USA. *Geoderma* 149: 379–385.