

EFFECTO ANTRÓPICO SOBRE LA FERTILIDAD QUÍMICA DE UN SUELO EN EL SUDOESTE BONAERENSE

MARÍA DE LAS MERCEDES RON; MARÍA ESTER MANDOLESI; CECILIA FACCHINETTI & ROBERTO JÜRGEN KIESSLING

Recibido: 09-03-11

Recibido con revisiones: 24-06-11

Aceptado: 25-06-11

ANTHROPOGENIC EFFECT ON SOIL CHEMICAL FERTILITY OF A FIELD IN SOUTHWESTERN BUENOSAIRES

ABSTRACT

Soil cultivation produces negative soil fertility gradients from under the fence towards the center of a field, impacting distinctly the first cm of the arable layer. The objectives of this work are to quantify these gradients, in an establishment of Tornquist (province of Buenos Aires) and to evaluate the sensitivity of different soil quality indices. Three positions were selected in a field: 1) below the wire fence («alambre»); 2) 3-4 m from the fence («borde») and 3) 15 m from the fence («interior»). In each position, three composite samples were extracted, at two depths 0-6 and 0-12 cm. Soil samples were tested for pH; extractable phosphorus (P_{BK}) and boron (B_{ext}), total organic nitrogen (N_{ot}), exchangeable potassium (K_{int}), calcium (Ca_{int}) and magnesium (Mg_{int}). Determinations of organic carbon (CO) included total CO (COT) by dry combustion and oxidizable carbon (COX) by Walkley and Black (W-B). Fractions of CO of increasing oxidability were calculated from determinations using different concentrations of sulfuric acid. P_{BK} was the most variable soil test. The analyzed depths had a smaller impact on the variables than the positions, even after four years under no-till. pH, Ca_{int} and Mg_{int} did not decrease with agricultural use, confirming their stability in mixed systems of southwestern Buenos Aires. Some of the most sensitive indices (P_{BK} , easily oxidizable CO) were positively associated. Losses of 43 and 490 kg ha⁻¹ of P_{BK} and K_{int} were estimated for the depth of 0-12 cm, representing 84% and 71% in the first six cm, respectively. COT diminished in one third in «interior». The rate of CO oxidation was significantly greater for «alambre» at 0-6 cm. The oxidation factor for W-B was of 0.82 «for interior» and 0.90 for «alambre» and «borde».

Key words. Soil degradation, horizontal and vertical variability, extractable nutrients, organic carbon fractions.

RESUMEN

El uso agrícola establece gradientes negativos de fertilidad edáfica desde el alambre al interior de un lote, con impacto diferente en los primeros cm de la capa arable. Los objetivos de este trabajo son cuantificar esos gradientes, en un establecimiento de Tornquist (provincia de Buenos Aires) y evaluar la sensibilidad de distintos índices de calidad edáfica. En un sector plano se seleccionaron tres posiciones: 1) bajo el alambrado («alambre»); 2) a 3-4 m del alambrado («borde») y 3) a 15 m del perímetro («interior»). En cada una se extrajeron tres muestras compuestas, a dos profundidades 0-6 y 0-12 cm. Se efectuaron los siguientes análisis: pH; fósforo extraíble (P_{BK}); boro extraíble (B_{ext}), nitrógeno orgánico total (N_{ot}), potasio (K_{int}), calcio (Ca_{int}) y magnesio intercambiables (Mg_{int}). Se determinó carbono orgánico (CO), oxidable con distintas concentraciones de ácido sulfúrico y CO total (COT), por combustión seca. Se calcularon fracciones de CO de oxidabilidad creciente. El P_{BK} fue la determinación química más variable. Las profundidades analizadas tuvieron menor impacto sobre las determinaciones que las posiciones, aún con cuatro años previos bajo siembra directa. El pH, Ca_{int} y Mg_{int} no disminuyeron por uso agrícola, confirmando su estabilidad en los sistemas mixtos del SO bonaerense. Algunos de los índices más sensibles a los efectos estudiados (P_{BK} , CO fácilmente oxidable) estuvieron asociados positivamente. Se registraron pérdidas de 43 y 490 kg ha⁻¹ de P_{BK} y de K_{int} en la profundidad de 0-12 cm, correspondiendo, el 84% y el 71% a los primeros seis cm. El COT disminuyó en un tercio en «interior». La tasa de oxidación del CO fue significativamente mayor para «alambre» a 0-6 cm. El factor de oxidación para el método Walkley y Black estándar fue de 0,82 para «interior» y 0,90 para «alambre» y «borde».

Palabras clave. Degradación del suelo, variabilidad horizontal y vertical, nutrientes extraíbles, fracciones de carbono orgánico.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad en las propiedades edáficas, dentro o entre lotes productivos, reconoce distintas causales, tanto de origen natural (taxonómico o genético) como antrópicas (uso y manejo de las tierras). Estas últimas pueden alterar el equilibrio dinámico que surge de la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Lal & Stewart, 1992). Son numerosas las investigaciones realizadas en la Región Pampeana, que permiten evaluar los efectos del uso agrícola sobre la fertilidad de los suelos (Pilatti *et al.*, 1988; Loewy & López, 1994; Benintende *et al.*, 1995; Buschiazzo *et al.*, 1995; Díaz Zorita, 1999; Krüger, 1996; Urricarriet & Lavado, 1999; Ferreras *et al.*, 2007).

La valoración de la sustentabilidad física de un sistema implica la evaluación comparativa a través de dos vías posibles: evaluaciones prospectivas o comparación retrospectiva. Para esta última se emplean situaciones de referencia que se asimilen a las condiciones prístinas. Dentro de un lote, el sector bajo el alambrado (sin actividad productiva) puede considerarse, en ausencia de efectos importantes de erosión eólica o hídrica, como un sitio no alterado por la agricultura (Sarrantonio *et al.*, 1996; Vázquez *et al.*, 2001).

En el monitoreo de la calidad edáfica se utilizan frecuentemente indicadores derivados de determinaciones químicas y físicas (Arshad & Martin, 2002). La materia orgánica (MO) define la fertilidad y la estructura, como así también la retención de pesticidas y del agua. El pH y las bases intercambiables son seleccionados por su relación, no sólo con la disponibilidad de nutrientes, sino también con la absorción y movilidad de pesticidas. Por último, las determinaciones de fósforo y boro disponibles se asocian con la cantidad lábil inorgánica de estos nutrientes y aportan al conocimiento de su dinámica.

Para estudiar el efecto del uso agrícola sobre la MO se recurre frecuentemente a su fraccionamiento (Magdoff, 1996). Se considera que existen al menos dos fracciones: una fácilmente descomponible y otra biológicamente resistente. La primera puede ser altamente modificada por el manejo mientras que la segunda es más estable y se liga a las fracciones minerales más finas. En la Región Pampeana se ha difundido la separación de fracciones granulométricas por tamizado húmedo, con distintos rangos de tamaño, método que presenta ventajas en comparación con el fraccionamiento físico por densidad y el método químico tradicional (Galantini, 2005). En la búsqueda de determinaciones fácilmente adaptables a los análisis de rutina, nuestro equipo de investigación ha ensayado fracciones

basadas en el grado de oxidación de los compuestos orgánicos con dicromato y diferentes concentraciones de ácido sulfúrico (Chan *et al.*, 2001; Mandolesi *et al.*, 2006), enfoque no aplicado por otros investigadores en el país.

Los distintos indicadores pueden variar en el espacio, en dirección horizontal y vertical. En un lote, la condición cuasi prístina bajo el alambre se diferencia del interior, con posibilidad de encontrar situaciones intermedias en el borde. A su vez, con escasa o nula remoción del suelo se potencia la variabilidad vertical dentro del estrato superior (James & Wells, 1990).

En el sudoeste bonaerense no abundan antecedentes sobre el impacto, a largo plazo, del uso del suelo sobre su fertilidad. La mayoría de los trabajos informan resultados, de mediana o larga duración, bajo diferentes secuencias de cultivos (Miglierina *et al.*, 2000; Minoldo, 2010). No se registran estudios sobre efectos antropogénicos, que comprometen el capital natural, en términos de la referencia a su potencialidad prístina.

Por lo expuesto, se plantea la hipótesis que existen, en lotes productivos, gradientes de fertilidad horizontal (alambrado-borde-interior) y vertical (dentro del horizonte superficial). El objetivo de este trabajo es cuantificar esas variaciones, en un establecimiento del partido de Tornquist (provincia de Buenos Aires). Como objetivo adicional, se evalúa la sensibilidad de distintos índices para el monitoreo de la calidad edáfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio y muestreo

Este trabajo se realizó en un lote agrícola del partido de Tornquist, sudoeste de la provincia de Buenos Aires, situado a 38°00' LS, 62°09' LW, con altitud de 345 ms.n.m. y una ligera pendiente (0,5%). El edafoclima es údico-térmico y el suelo fue clasificado como un Paleudol Petrocálcico, de acuerdo al sistema Soil Survey Staff (USDA, 2006). Se trata de un terreno bien drenado y profundo, cuyo material parental es loess eólico de textura media (franca a franco limosa), con incrementos de la fracción arena en el horizonte Ap.

El lote registra una historia agrícola de alrededor de 50 años. Los cultivos predominantes fueron trigo, girasol y verdes invernales para forraje, con labranza convencional hasta 1999. A partir de ese año se adoptó el sistema de siembra directa (SD) y la secuencia de cultivos anuales fue: verdeo de avena, girasol, trigo y cebada cervicera.

En abril de 2003 se realizó un muestreo de suelos. En un sector plano se seleccionaron tres posiciones: 1) bajo el alambrado (alambre); 2) a 3-4 m del alambrado (borde) y 3) a 15 m del alambre, en el interior del lote (interior). Se delimitaron áreas aproximadas de 1 m² en alambre y de 3 m x 3 m en las restantes posiciones, de donde se extrajeron muestras compuestas por 10 submuestras, a dos profundidades: 0-6 y 0-12 cm.

Determinaciones químicas

En el laboratorio las muestras se secaron al aire y tamizaron por 2 mm. Se determinaron: pH potenciométrico en suspensión suelo-agua relación 1:2,5; calcio intercambiable (Ca_{int}), magnesio intercambiable (Mg_{int}) y potasio intercambiable (K_{int}), mediante extracción con acetato de amonio 1 N pH 7 (Thomas, 1982); fósforo extraíble (P_{BK}) por Bray & Kurtz (Bray & Kurtz, 1945 modificado según AACS, 1991) y boro extraíble (B_{ext}) con acetato de amonio 1 N, pH 4,8 (Gupta & Stewart, 1975),

Previo a los análisis para carbono orgánico (CO) y nitrógeno orgánico las muestras se tamizaron por 500 μ m. Se determinaron el CO total (COT) por combustión seca en un equipo analizador LECO CR-12, con un detector infrarrojo y el nitrógeno orgánico total (N_{ot}) por el método de Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Se estimó la relación C:N como el cociente entre COT y N_{ot} . Se empleó el método de Walkley & Black estándar (W-B) para la determinación del CO fácilmente oxidable por combustión húmeda (Carreira, 2005). Se repitieron las determinaciones variando el volumen del ácido para obtener concentraciones de H_2SO_4 en el digesto de 12 y 18 N, además del 24 N que corresponde al W-B (Chan *et al.*, 2001). Esto permitió comparar el CO oxidable (COX) bajo condiciones de oxidación creciente. Las notaciones empleadas para las determinaciones descriptas se resumen en la Tabla 1, junto con las fracciones de CO, calculadas según Chan *et al.* (2001).

Para expresar algunos resultados en $kg\ ha^{-1}$ se asumió una densidad aparente constante de 1,33 $g\ cm^{-3}$.

Análisis estadístico

Se aplicaron los procedimientos aceptados por la Comisión Europea para el monitoreo de cambios en el suelo (Kobza, 2010):

- estadística descriptiva para las características básicas de cada variable (rango, media y coeficiente de variación);
- prueba de hipótesis estadística t para medias apareadas, para el efecto de la profundidad en cada posición y del uso del suelo (alambre vs interior) en cada profundidad. Se aplicó una prueba de una cola porque sólo nos interesaba comprobar, estadísticamente, disminuciones en las variables estudiadas;
- regresiones para describir los índices químicos en función de los factores estudiados (posición, profundidad). Estos últimos se

representaron con variables categóricas. Para cada uno de los índices descriptos en la Tabla 1 se ajustó una ecuación del tipo

$$y = a + b\ prof2 + c\ borde + d\ interior \quad (Ec. 1)$$

donde y es la determinación química, prof2 (0-12 cm), borde e interior son variables categóricas (0: no corresponde y 1: corresponde); a, b, c y d coeficientes. La Ec. 1 utiliza como referencia los promedios de las determinaciones en la posición de alambre a la profundidad de 0-6 cm. Esta combinación de factores está representada por el coeficiente a, cuando se asigna 0 a todas las variables categóricas. Para la estimación de los índices en la profundidad de 0-12 cm (prof2=1) se aplica el coeficiente b, que corresponde a la diferencia entre las profundidades de 0-12 y 0-6 cm. En forma análoga, se incluyen los efectos de las otras dos posiciones mediante la adición de los coeficientes c (borde=1, interior=0) o d (borde=0, interior=1), que representan la diferencia de las posiciones borde e interior con la de referencia, en ese orden. De este modo se resumen los promedios de las distintas posiciones y profundidades en un solo modelo.

A partir de la Ec. 1 se seleccionaron, mediante stepwise (SW), las variables categóricas que más aportaron a la explicación de la variación de los índices químicos. Para ingresar o retener variables se utilizó $P < 0,15$, valor medio entre $P = 0,05$ utilizado para rechazar la hipótesis nula y $P = 0,25$, para aceptarla. Para detectar posibles casos influyentes se realizó el análisis de residuales,

- regresiones para estimar la tasa de oxidación del CO. Se ajustaron ecuaciones lineales del COX para cada profundidad y posición, en función de la normalidad del H_2SO_4 . Dentro de cada profundidad se compararon los coeficientes angulares de las ecuaciones de regresión para las distintas posiciones,
- regresión del COX_{24} en función del COT, para estimar el factor de recuperación del W-B,
- correlación entre variables.

Para los análisis estadísticos se empleó el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2008).

RESULTADOS

Estadística descriptiva

Las características de los índices químicos estudiados se resumen en la Tabla 1. El pH fue la variable más estable, manteniéndose en un nivel ligeramente ácido a neutro. El P_{BK} fue la determinación química más variable. Las fracciones de CO calculadas (F_2 , F_3 y F_4) presentaron mayor variabilidad que F_1 .

Tabla 1. Estadística descriptiva para las variables de suelo (n=18).

Table 1. Descriptive statistics for soil variables (n=18).

Variable	Notación	Unidad	Media	Mínimo	Máximo	CV%
Reacción del suelo	pH		6,65	6,30	6,84	1,9
Ca intercambiable	Ca _{int}	mg kg ⁻¹	1.602	1.362	1.917	9,1
Mg intercambiable	Mg _{int}	mg kg ⁻¹	267	242	305	7,5
K intercambiable	K _{int}	mg kg ⁻¹	810	560	1.092	23,3
P extraíble	P _{BK}	mg kg ⁻¹	30	6	70	59,5
Boro extraíble	B _{ext}	mg kg ⁻¹	0,41	0,17	0,63	35,2
C orgánico total	COT	g kg ⁻¹	20	15,5	30,6	18,8
C oxidable ácido 24 N	COX ₂₄	g kg ⁻¹	17,3	12,3	27,1	21,9
C oxidable ácido 18 N	COX ₁₈	g kg ⁻¹	15,1	7,9	24,0	28,7
C oxidable ácido 12 N	F ₁	g kg ⁻¹	9,3	5,2	13,6	23,0
F ₂ = COX ₁₈ - F ₁	F ₂	g kg ⁻¹	5,7	2,1	10,4	41,2
F ₃ = COX ₂₄ - COX ₁₈	F ₃	g kg ⁻¹	2,3	0,2	5,2	62,1
F ₄ = COT - COX ₂₄	F ₄	g kg ⁻¹	2,4	0,8	3,6	38,1
N orgánico total	N _{ot}	g kg ⁻¹	1,9	1,4	2,4	15,8
Relación carbono nitrógeno	C:N		10,4	9,3	12,7	10,0

CV%: coeficiente de variación.

Efecto de la posición en el lote y profundidad de muestreo

A excepción de pH, Ca_{int}, Mg_{int}, F₃ y F₄ las variables estudiadas fueron mayores bajo el alambrado que en el interior. La significación de esta superioridad—probablemente comprometida en el menor espesor, por mayor error de muestreo— se manifestó por lo menos en una de las dos profundidades (Tabla 2 y Fig. 1). Las posiciones tuvieron mayor impacto sobre las determinaciones que las profundidades analizadas. En interior P_{BK}, el COT, COX₂₄, COX₁₈, F₁ y F₂ fueron significativamente superiores en las muestras más superficiales, al igual que K_{int} bajo el alambrado. La tendencia opuesta con la profundidad se verificó para el Ca_{int} en alambrado y borde y para F₃ en interior.

Para todas las variables excepto pH y C:N, se obtuvieron regresiones significativas que explicaron entre el 26 y 81% de las variaciones encontradas (Tabla 3). Del análisis de residuales se detectaron cuatro valores erráticos, que fueron descartados para las regresiones y correlaciones. En las ecuaciones simplificadas por el método de SW el coeficiente independiente es análogo al promedio de los grupos no representados por las variables categóricas retenidas. La variable de profundidad fue seleccionada solamente para los cationes intercambiables, con coeficiente negativo para K_{int} y positivo para Ca_{int} y Mg_{int}. Esto indica que, para los otros índices estudiados, la variabilidad vertical tuvo escasa relevancia. La variabilidad horizontal se reflejó en la selección

de las variables categóricas borde e interior en 9 y 11 regresiones, respectivamente. Para estas dos posiciones se obtuvieron coeficientes negativos en P_{BK}, COT, COX₂₄, COX₁₈, F₁, F₂ y N_{ot}. Los mismos fueron mayores en valor absoluto para interior, lo que confirma un gradiente de fertilidad desde el alambrado (representado por el valor de la constante) al interior del lote, en promedio de las dos profundidades de muestreo. En Mg_{int} y K_{int} la constante es el promedio de la fertilidad en dos posiciones ya que sólo una fue seleccionada, mientras que la variabilidad del Ca_{int} sólo quedó expresada en función de la profundidad de muestreo.

Del análisis de la Tabla 4 se destacan algunos resultados. El N_{ot} y CO determinado por distintos métodos, F₂, P_{BK} y K_{int} se asociaron positivamente entre sí. B_{ext} se relacionó con menos variables que P_{BK}, sobresaliendo su relación negativa con F₃ y F₄. A su vez, entre las fracciones calculadas se encontraron correlaciones positivas (F₃ y F₄) y negativas (F₂ y F₃). El pH, C:N y Ca_{int} no se relacionaron con ningún índice.

Tasa y factores de oxidación

Las regresiones de COX, en función de la concentración del ácido, fueron todas altamente significativas (Tabla 5). La tasa de oxidación fue significativamente mayor para la posición bajo el alambrado en la profundidad de 0–6 cm. Las pendientes a 0–12 cm no llegaron a diferenciarse estadísticamente entre posiciones.

Tabla 2. Medias para siete variables (n = 3) según profundidad de muestreo y posición en el lote. Notación y unidades ver Tabla 1.

Table 2. Means for seven variables (n=3) as related to sampling depth and position in the field. For abbreviations see Table 1.

Variable	Profundidad cm	Posición			Comparación (+) Alambre-Interior
		Alambre	Borde	Interior	
pH	0-6	6,56	6,64	6,70	ns
	0-12	6,67	6,78	6,55	ns
Ca _{int}	0-6	1.493	1.419	1.636	ns
	0-12	1.705	1.704	1.653	ns
Mg _{ext}	0-6	246	278	254	ns
	0-12	255	288	279	ns
K _{int}	0-6	1.048	951	609	**
	0-12	909	739	603	***
P _{BK}	0-6	60	31	15	*
	0-12	39	24	12	*
B _{ext}	0-6	0,45	0,57	0,25	*
	0-12	0,39	0,51	0,29	ns
C:N	0-6	11,2	10,6	10,4	*
	0-12	10,1	10,5	9,9	ns

(+) de. Prueba medias apareadas de una cola: *, ** y *** significativo a P < 0,05; 0,01 y 0,001, respectivamente; ns: no significativo.

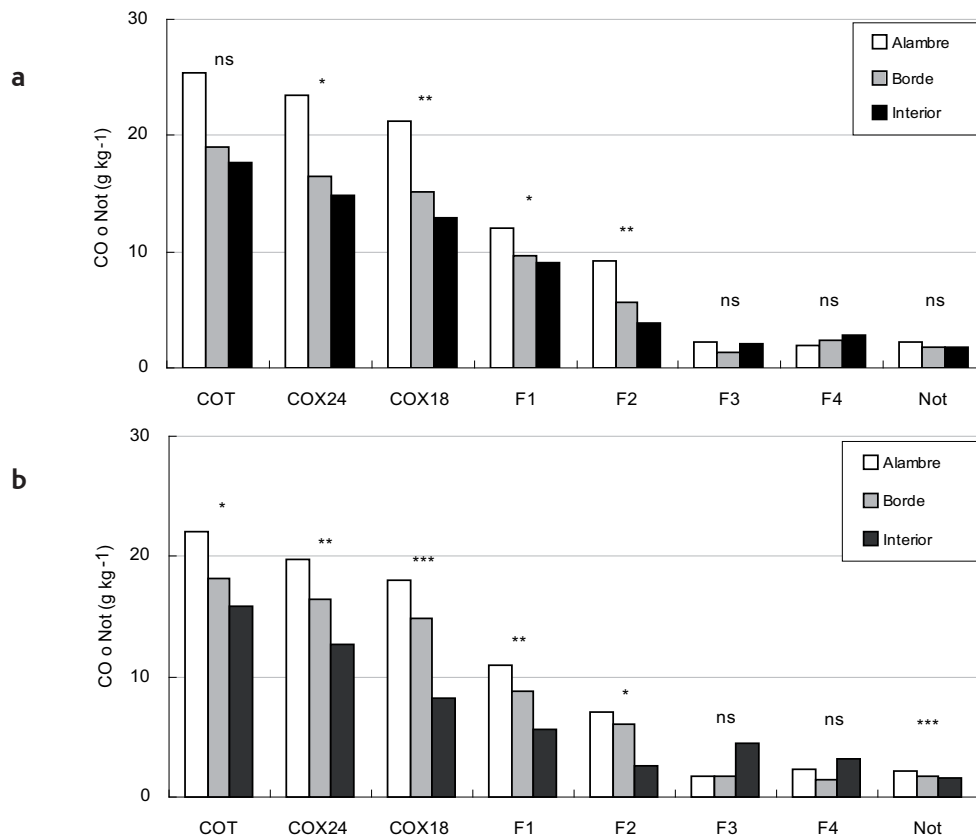


Figura 1 a y b Medias para siete variables (n = 3) según profundidad de muestreo y posición en el lote. a) 0-6 cm b) 0-12 cm. *, ** y *** significativo a P < 0,05; 0,01 y 0,001; ns: no significativo. Variables ver Tabla 1.

Figure 1 a y b Means for seven variables (n=3) as related to sampling depth and position a) 0-6 cm b) 0-12 cm. *, ** and *** significant at P < 0,05; 0,01 y 0,001; ns: non significant. For variable descriptions see Table 1.

Tabla 3. Ecuaciones seleccionadas para describir la variabilidad de distintos índices químicos.
Table 3. Selected equations to describe the variability of the soil chemical indexes.

Ecuación	R ²	Índices	n
$Ca_{int} = 1466 + 222 \text{ prof2}$	0,81	***	17
$Mg_{int} = 250 + 10 \text{ prof2} + 28 \text{ borde}$	0,68	***	17
$K_{int} = 971 - 119 \text{ prof2} - 306 \text{ interior}$	0,73	***	18
$P_{BK} = 50 - 22 \text{ borde} - 36 \text{ interior}$	0,73	***	18
$B_{ext} = 0,42 + 0,09 \text{ borde} - 0,15 \text{ interior}$	0,53	**	16
$COT = 23,7 - 5,16 \text{ borde} - 6,92 \text{ interior}$	0,66	***	18
$COX_{24} = 21,6 - 5,00 \text{ borde} - 7,78 \text{ interior}$	0,76	***	18
$COX_{18} = 19,6 - 4,55 \text{ borde} - 9,08 \text{ interior}$	0,78	***	18
$F_1 = 11,5 - 2,28 \text{ borde} - 4,22 \text{ interior}$	0,68	***	18
$F_2 = 8,1 - 2,27 \text{ borde} - 4,87 \text{ interior}$	0,75	***	18
$F_3 = 1,74 + 1,53 \text{ interior}$	0,28	*	18
$F_4 = 2,06 + 0,95 \text{ interior}$	0,26	*	18
$N_{ot} = 2,22 - 0,44 \text{ borde} - 0,54 \text{ interior}$	0,66	***	18

Variables dependientes descritas en Tabla 1; borde, interior y prof2 variables categóricas en Ec. 1 para las posiciones en el lote y profundidad de muestreo de 0-12 cm (0: no corresponde, 1: corresponde).

*, ** y *** significativo a $P < 0,05$; $0,01$ y $0,001$, respectivamente.

Tabla 4. Correlación entre los índices químicos.
Table 4. Correlation between soil chemical indexes.

	pH	Ca _{int}	Mg _{int}	K _{int}	P _{BK}	B _{ext}	COT	COX ₂₄	COX ₁₈	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	N _{ot}
pH	1													
Ca _{int}	0,25	1												
Mg _{int}	0,08	0,16	1											
K _{int}	-0,20	-0,31	-0,22	1										
P _{BK}	-0,19	-0,31	-0,35	0,76	1									
B _{ext}	0,30	-0,16	0,18	<i>0,53</i>	0,33	1								
COT	-0,19	-0,20	-0,41	0,73	0,88	0,14	1							
COX ₂₄	-0,13	-0,17	-0,39	0,80	0,89	0,29	0,97	1						
COX ₁₈	-0,01	-0,19	-0,32	0,82	0,87	0,42	0,88	0,95	1					
F ₁	0,03	-0,27	-0,39	0,77	0,80	0,29	0,88	0,92	0,95	1				
F ₂	-0,04	-0,13	-0,25	0,81	0,85	<i>0,50</i>	0,82	0,90	0,96	0,83	1			
F ₃	-0,34	-0,14	-0,08	-0,37	-0,25	<i>-0,53</i>	-0,09	-0,21	-0,51	-0,44	<i>-0,53</i>	1		
F ₄	-0,20	-0,10	-0,06	-0,38	-0,15	<i>-0,68</i>	0,02	-0,22	-0,36	-0,27	-0,42	<i>0,52</i>	1	
N _{ot}	0,06	-0,19	<i>-0,51</i>	<u>0,61</u>	0,79	0,28	0,83	0,84	0,77	0,79	<u>0,68</u>	-0,10	-0,09	1
C:N	-0,43	-0,07	0,14	0,38	0,31	-0,17	0,44	0,40	0,39	0,35	0,40	-0,12	0,09	-0,13

Cursiva, subrayado y negrita significativo a $P < 0,05$; $0,01$ y $0,001$, respectivamente. Variables descritas en Tabla 1.

Tabla 5. Regresiones lineales ajustadas para la estimación de tasas de oxidación del CO, según posición y profundidad de muestreo.

Table 5. Fitted linear regressions to estimate oxidation rates of organic carbon, as related to sampling depth and position in the field.

Prof.	0-6 cm		0-12 cm	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
Alambre	$COX = 1,67 + 0,96 \text{ eq L}^{-1}$	0,77 **	$COX = 3,22 + 0,73 \text{ eq L}^{-1}$	0,85 ***
Borde	$COX = 3,45 + 0,58 \text{ eq L}^{-1}$	0,85 **	$COX = 1,69 + 0,65 \text{ eq L}^{-1}$	0,83 ***
Interior	$COX = 3,31 + 0,50 \text{ eq L}^{-1}$	0,93 **	$COX = -1,78 + 0,59 \text{ eq L}^{-1}$	0,96 ***

COX: carbono orgánico oxidable. ** y *** significativo a $P < 0,01$ y $0,001$, respectivamente.

En alambre y borde la recuperación del CO mediante W-B fue del 90% del COT, mientras que para interior se estimó un factor de oxidación de 0,82, sin diferencias por profundidad de muestreo (Fig. 2).

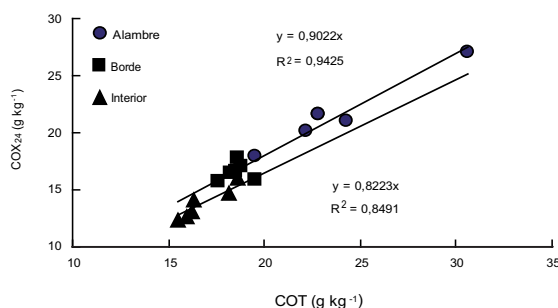


Figura 2. Diagrama de dispersión y regresiones para la estimación del factor de oxidación para Walkley y Black. COX₂₄ y COT ver Tabla 1
Figure 2. Scatter plot and fitted regressions to estimate the oxidation factor for Walkley and Black. COX₂₄ and COT, see Table 1.

DISCUSIÓN

Características y variabilidad de los índices químicos estudiados

Las diferencias entre las posiciones se deben a una combinación de efectos antrópicos. Los cuatro años de SD no fueron suficientes para atenuar estas diferencias o potenciar el efecto profundidad. Esto reafirma el impacto y la «memoria» agronómica del sistema de labranza, ejercido en el largo plazo, destacándose el método unidireccional de remoción del suelo.

La génesis de los suelos de la Región Pampeana, les ha asignado una buena provisión de bases intercambiables (Conti, 2000). Varios sitios, en distintos partidos del sudoeste bonaerense confirman la vigencia de tal condición. Esta es una de las fortalezas del panorama nutricional en suelos de la zona (Ron & Loewy, 2004). Aun después de 50 años de uso agrícola ganadero el pH, Ca_{int} y Mg_{int} no disminuyeron en el horizonte superficial del lote estudiado. Esta situación contrasta con el escenario de acidificación actual y potencial en otros ambientes de la Región Pampeana (Vázquez, 2005). Las limitaciones climáticas a la producción en el SO bonaerense implican menor remoción de nutrientes por las cosechas. Este hecho se combina con el uso de dosis más conservadoras de fertilizante nitrogenado, responsable de disminuciones de pH (Mi-

glierina *et al.*, 2000). Por otra parte, los periodos de sequía han traído aparejado menor lavado de nitratos, con lo que tiende a mitigarse la acidificación por fertilización (Smith & Doran, 1996).

La estabilidad del Ca_{int} puede atribuirse a los bajos niveles exportados por los cultivos y al elevado contenido del elemento en el subsuelo, que determinaría su reciclado en el perfil (Urricariet & Lavado, 1999). El panorama para el Mg_{int} podría ser diferente, en el mediano plazo, dado que los niveles exportados por las cosechas triplican al de Ca. De las bases intercambiables, la disminución de fertilidad en el interior del lote sólo se verificó para K_{int}. Dado el bajo índice de cosecha del elemento en los cultivos de grano esta pérdida—relativamente elevada—puede explicarse por la alta frecuencia en la producción y consumo de forraje.

La amplia variabilidad del P_{BK}—de bien provisto a deficiente—es una situación frecuente aun en áreas homogéneas (Giuffré *et al.*, 1994). La abrumadora caída en la fertilidad del lote con respecto a la condición prístina coincide con lo reportado en muchos sectores de la Región Pampeana (García, 2001). En este estudio la sensibilidad al uso del suelo y profundidad del muestreo equipara este índice con los de CO. Esto abre la posibilidad de utilizarlo como indicador de calidad en lotes con niveles originales de P_{BK} moderados a altos y bajo aporte de fertilizantes fosfóricos. Análogamente, se registró importante disminución del B_{ext} en el interior del lote, con niveles por debajo del crítico (Gupta & Stewart, 1975). La disponibilidad de este microelemento ha sido asociada con la MO (Ratto de Míguez *et al.*, 1999; Ron *et al.*, 1999). Esto se ha verificado en el presente trabajo, dada la asociación positiva del B_{ext} con F₂ y negativa con F₃ y F₄.

Para todas las variables, a excepción de Mg_{int} y B_{ext}, los valores en el perímetro tendieron a superar los del borde (Tablas 2 y 3). La mayor fertilidad en el borde con respecto al interior para el 60% de las variables estudiadas es atribuible a la translocación de material, resultante de repetidas labranzas, hendiendo sistemáticamente el suelo (Van Muysen *et al.*, 2006). En cuanto a las determinaciones relacionadas con la MO, se verificó un gradiente de fertilidad desde el alambre al interior del lote (Fig. 1). Esto reitera la validez de estos análisis como indicadores de calidad.

El CO total (estimado por W-B) es un indicador muy difundido de acuerdo con una encuesta nacional. La misma justifica su preponderancia en la simplicidad para la interpretación de los resultados y la facilidad para el muestreo y la repetición de mediciones (Casas *et al.*, 2008).

Esta variable es usada tradicionalmente para monitorear el stock de carbono edáfico y estimar las emisiones de CO_2 . En el lote de Tornquist la pérdida de CO en la profundidad de 0-12 cm fue similar –en porcentaje del CO total– a la asumida por Sauerbeck (2001) en su análisis a escala global. En los 50 años de uso agrícola ganadero se emitió, en promedio, alrededor de 0,7 t de CO_2 $\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. La variabilidad del N_{ot} se asimiló a la del COT resultando en una relación C:N comparativamente estable, que indicó mayor grado de humificación en el interior del lote a la profundidad de 0-6 cm (Tan, 2003).

Oxidabilidad del carbono y fracciones

La oxidabilidad del CO (Tabla 5) señaló una proporción mayor de formas lábiles bajo el alambrado, en la profundidad de 0-6 cm. Esto es coherente con la mayor recuperación de CO para el método W-B (Fig. 2) en esa posición. En interior el factor de oxidación para W-B coincidió con el informado por Mandolesi *et al.* (1998) para suelos de la zona.

Las variaciones en oxidabilidad se cuantifican, además, en las fracciones calculadas. Los resultados obtenidos son consistentes con la caracterización de relativa labilidad para F_1 y F_2 y recalcitrancia para F_3 y F_4 , representando esta última el CO no recuperado por W-B. Por otra parte, se confirma la sensibilidad al uso del suelo y correlación con otros indicadores de calidad edáfica de las fracciones F_1 y F_2 (Chan *et al.*, 2001; Mandolesi *et al.*, 2006; Loss *et al.*, 2009). La determinación de F_1 podría incorporarse a los análisis de rutina, constituyendo una simplificación con respecto a otros métodos de fraccionamiento de la MO.

CONCLUSIONES

El pH, Ca_{int} y Mg_{int} no disminuyeron por uso agrícola, confirmando la estabilidad de estas variables en los sistemas mixtos del SO bonaerense, con escaso nivel de fertilización.

Las profundidades analizadas tuvieron menor impacto sobre las determinaciones que las posiciones, aún con los últimos cuatro años bajo siembra directa. Algunos de los índices más sensibles a los efectos estudiados (P_{BK} , COX_{24} , COX_{18} , F_1 y F_2) estuvieron asociados positivamente.

Por el uso agrícola se registraron pérdidas de 43 y 490 kg ha^{-1} de P_{BK} y de K_{int} , respectivamente, en la profundidad de 0-12 cm. De éstas, el 84 y el 71% corresponden a los primeros seis cm, para P_{BK} y K_{int} , en ese orden.

La cantidad de MO total disminuyó en un tercio en el interior del lote. Además, varió su calidad, efecto que puede resumirse en una declinación de las fracciones más lábiles, del 75 al 62% del COT.

La tasa de oxidación del CO fue significativamente mayor para la posición «alambre» a la profundidad de 0-6 cm, superando a las otras dos posiciones en un 78%.

El factor de oxidación para el método W-B fue de 0,90 para «alambre» y «borde» y de 0,82 para «interior», ratificando la mayor degradación por uso del suelo.

La separación de fracciones con distinto grado de oxidabilidad aportaría a nuevos indicadores de calidad. Los resultados requieren ser confirmados en un espectro de suelos y condiciones.

El caso estudiado cuantifica, en un ejemplo, la degradación a la que se encuentran expuestos los suelos en los sistemas productivos del SO bonaerense. En las últimas décadas el modelo de producción se caracterizó –entre otros– por la tecnología de labranza convencional y la baja o nula reposición de nutrientes.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo fue financiado por la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

- AACS. 1991. II Jornada Nacional del Fósforo del Suelo. Comité de Química de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo PROMAR (Programa de Métodos Analíticos de Referencia), 27 pp.
- Arshad, M & S Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 88: 153-160.
- Benintende, M; O Borgetto & S Benintende. 1995. Mineralización de nitrógeno y contenido de biomasa microbiana en diferentes sistemas de laboreo. *Ciencia del Suelo* 13: 98-100.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, JM & CS Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. Pp. 595-624 *In: AL Page (ed.) Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*, Amer. Soc. Agron., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Buschiazzo, DE; SB Aimar & K Stahr. 1995. Factores que afectan la estabilidad estructural de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (Argentina). *Ciencia del Suelo* 13: 66-69.
- Carreira, D. 2005. Carbono oxidable: Una forma de medir la materia orgánica del suelo. Pp.91-98. *En: Marbán, L y SE Ratto (eds.) Tecnologías en análisis de suelos. Alcance a Laboratorios Agropecuarios*, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 215 pp.

- Casas, R; D Ligier; AM Lupi; NA Mótola; A da Veiga *et al.* 2008. Primer Documento Base de Trabajo para El Taller: Indicadores de la Calidad Ambiental para el Manejo Sustentable de los Agroecosistemas. Instituto de Suelos. Programa Nacional Ecorregiones. Publicación especial INTA. 121 pp.
- Chan, K; A Bowman & A Oates. 2001. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys. *Soil Sci.* 66: 61-67.
- Conti, ME. 2000. Intercambio de iones. Pp 201-212. *En:* M. Conti (ed.) Principios de edafología. 430 pp.
- Díaz Zorita, M. 1999. Efectos de seis años de labranzas en un hapludol del Noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17: 31-36.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, U.N. de Córdoba, Argentina.
- Ferreras, L; G Magra; P Besson; E Kovalevski & FO García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.
- Galantini, JA. 2005. Separación y análisis de las fracciones orgánicas. Pp.103-114. *En:* Marbán, L y SE Ratto (eds.) Tecnologías en análisis de suelos. Alcance a Laboratorios Agropecuarios, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 215 pp.
- García, F. 2001. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. INPOFOS Cono Sur, Acaassuso, Buenos Aires, Argentina. 9: 1-3.
- Giuffré, L; J Sierra; C Fumagalli & SE Ratto. 1994. Variabilidad espacial de fósforo en suelo y planta en un Argiudol típico bajo cultivo de maíz. *Rev. Fac. Agron. UBA* 14: 1-8.
- Gupta, SK & JWB Stewart. 1975. The extraction and determination of plant-available boron in soils. *Schweiz. Landw. Forsch* 14: 153-169.
- James, DW & KL Wells. 1990: Soil sample collection and handling: technique based on source and degree of field variability. Pp. 25-44. *In:* R Westerman (ed.) Soil testing and plant analysis, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. 784 pp.
- Kobza, J. 2010. Some statistical aspects of monitoring of soil change in Slovakia. Pp.119-122. *In:* Gilkes RJ, & Prakongkep N (eds.) Quantitative monitoring of soil change. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science; Soil Solutions for a Changing World; Published on DVD; <http://www.iuss.org>; 2010 Aug 1-6. Brisbane, Australia.
- Krüger, HR. 1996. Compactación en Haplustoles del sudoeste bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 14: 104-106.
- Lal, R & BA Stewart. 1992. Need for Land Restoration. *Adv. Soil S.* 17: 1-11.
- Loewy, T & RL Lopez. 1994. Efecto de pradera mixta y cultivos anuales sobre las propiedades de un Haplustol Entico. *Ciencia del Suelo* 12: 7-10.
- Loss, A; MG Pereira; EP Ferreira; L Lopes dos Santos; SJ Beutler & ASD Ferraz. 2009. Oxidizable organic carbon fractions of an ultisol under an alley cropping system. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 33: 867-874.
- Magdoff, FR. 1996. Soil organic matter fractions and implications for interpreting organic matter tests. Pp 11-20. *In:* FR Magdoff, MA Tabatabai & EA Hanlon (eds.) Soil Organic Matter Analysis and Interpretation, Soil Science Society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA. 67 pp.
- Mandolesi, ME; S Gonzalez de Bussetti; EA Ferreiro & IM Natale. 1998. Determinación de los factores que estiman la materia orgánica de los suelos. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina. 4 al 11 de mayo. 87-88 pp.
- Mandolesi, ME; MM Ron; PE Vidal & HJ Forjan. 2006. Fracciones de carbono orgánico en un Argiudol Típico del centro sur bonaerense. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina. 19 al 22 de setiembre. 5 pp.
- Migliarina, AM; JO Iglesias; MR. Landriscini; JA Galantini & RA Rosell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till. Res.* 53: 129-135.
- Minoldo GV. 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivos del sudoeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelo y la productividad del trigo. Tesis de Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Pilatti, MA; JA De Orellana; LJ Priano; OM Felli & DA Grenon. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6: 19-29.
- Ratto de Miguez, S; C Diggs & C Ras. 1999. Effect of some soil properties on the extractable boron content in soils of the Argentine Pampas. *Commun. Soil Sci. Plan.* 30: 2083-2100.
- Ron, MM & T Loewy. 2004. Exploración de bases intercambiables y microelementos, a través del dosaje en suelos y granos. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina. 22 al 25 de junio. 10 pp.
- Ron, MM; SG de Bussetti & T Loewy. 1999. Boro extraíble en suelos del sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 17: 54-57.
- Sarrantonio, M; JW Doran; MA Liebig & JJ Halvorson. 1996. On-farm assessment of soil quality and health. Pp. 83-106. *In:* JW Doran & AJ Jones (eds.) Methods for assessing soil quality, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 410 pp.
- Sauerbeck, DR. 2001. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture—perspectives and limitations. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 60: 253-266.
- Smith, JL & JW Doran. 1996. Measurement and use of pH and electric conductivity for soil quality analysis. Pp. 169-185. *In:* JW Doran & AJ Jones (eds.) Methods for assessing soil quality, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 410 pp.
- Tan, KH. 2003. Chemical composition of humic matter. Pp. 87-116. *In:* Humic matter in soil and the environment: principles and controversies, Marcel Dekker Inc, New York, USA. 282 pp.
- Thomas, GW. 1982. Exchangeable cations. Pp. 159-165. *In:* AL Page (ed.) Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties, Amer. Soc. Agron., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Urricarriet, S & R Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17: 37-44.
- USDA Soil Survey Staff. 2006. Claves para la taxonomía de suelos. Décima Edición. 331 pp.
- Van Muysen, W; K Van Oost & G Govers. 2006. Soil translocation resulting from multiple passes of tillage under normal field operating conditions. *Soil Till. Res.* 87: 218-230.
- Vázquez, M; A Pellegrini; G Millan & A Deak. 2001. Cambios cuali y cuantitativos en la fertilidad fosforada de algunos suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Agrochimica XLV* (3-4): 120-123.
- Vázquez, M. 2005. Calcio y Magnesio. Acidez y alcalinidad de suelos. Pp. 161-188. *En:* HE Echeverría & FO García (eds.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INPOFOS. 525 pp.