

NIVELES DE CARBONO ORGÁNICO Y pH EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LAS REGIONES PAMPEANA Y EXTRAPAMPEANA ARGENTINA

HERNÁN RENÉ SAINZ ROZAS^{1,2*}; HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA¹ & HERNÁN PABLO ANGELINI¹

1 Unidad Integrada Balcarce: EEA INTA - FCA UNMP, C.C. 276, (7620) Balcarce, Argentina

2 Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

* Autor para correspondencia: fertibalc@balcarce.inta.gov.ar

Recibido: 29-05-09

Aceptado: 11-02-11

RESUMEN

El carbono orgánico (CO) y el pH de los suelos son indicadores clave de la salud del suelo. El objetivo de este trabajo fue relevar el contenido de CO y pH actual (0-20 cm) de los suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de la Argentina y realizar mapas con ambas variables, utilizando la mediana de cada partido. Otro objetivo fue comparar la eficiencia de predicción (EP) de dos métodos de interpolación: 1) el método inversa de la distancia ponderada (IDP) y 2) el método Kriging ordinario (KO). El número de muestras utilizados para CO y pH fue de 31.619 y 31.398, respectivamente, las que fueron tomadas en lotes de producción en 2005 y 2006. Ambos métodos produjeron mapas similares de CO y pH, pero la EP fue ligeramente mayor para el KO (65 a 80%) comparado al IDP (63 a 79%). Los valores de CO variaron de 5,5 a 38,0 g kg⁻¹, determinándose los contenidos más bajos al oeste y norte, y los más elevados al sudeste (SE) de la región. Los suelos de la mayor parte del área relevada presentaron valores de pH de 6 a 7,5, salvo algunos del norte de Buenos Aires, centro-sur de Santa Fe y este de Córdoba que mostraron valores de pH de 5,5-6. El contenido de CO manifiesta una tendencia declinante e indica la necesidad de aplicar prácticas de manejo de suelo tendientes a revertir este proceso degradativo. El pH de los suelos no sería limitante para la producción de cultivos en la mayor parte del área, pero se pueden presentar potenciales problemas de acidez en determinadas zonas.

Palabras clave. Indicadores de calidad de suelo, degradación de suelos, propiedades químicas y biológicas.

ORGANIC CARBON AND PH LEVELS IN AGRICULTURAL SOILS OF THE PAMPA AND EXTRA-PAMPEAN REGIONS OF ARGENTINA

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) and pH are considered key indicators of soil health. The objective of this study was to determine SOC and soil pH of agricultural soils (0-20 cm) in the pampeana and extrapampeana regions of Argentina and to elaborate maps with both variables, using the median of each county. Soil samples were taken from fields that were sampled in 2005 and 2006 at a 20 cm-soil depth and totalled 31,619 and 31,398 for SOM and pH, respectively. The second objective was to compare the prediction efficiency (EP) of two interpolation methods: 1) inverse distance weighting (IDW) and 2) ordinary Kriging method (KO). Both methods produced similar maps of SOM and pH, but the EP was slightly greater for the KO (65 to 80%) compared to IDP (63 to 79%). Soil organic matter values ranged from 5.5 to 38.0 g kg⁻¹, with values declining westward and northward and increasing to the southeast of the region. Soils of most of the area presented pH values that ranged from 6 to 7.5, except for some cases in northern Buenos Aires, center-southern Santa Fe and eastern Cordoba, where soil pH values ranged from 5.5 to 6. Soil organic matter showed a declining tendency which indicated the need to apply management practices to revert this degradation process. The soil pH should not be limiting for crop production, but potential problems of acidity could appear in some areas.

Key words. Soil quality indicators, soils degradation, chemical and biological properties.

INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (CO) es considerado un indicador de la salud del mismo y su efecto positivo sobre la sostenibilidad del sistema productivo ha sido ampliamente documentado. Para un determinado ambiente, los niveles de CO más elevados se encuentran en pastizales naturales, y cuando estos sistemas son cultivados, se produce una rápida caída del CO seguida por una declinación más lenta hasta un nuevo estado estable (Monreal & Janzen, 1993). El nivel de CO en dicho estado va a depender del clima, del tipo de suelo y del manejo del mis-

mo, esto es, labranzas, rotaciones, secuencias de cultivos agrícolas y fertilización (Studdert & Echeverría, 2000; Steinbach & Álvarez, 2005).

La intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas ha producido un deterioro de los niveles de CO, los que en algunos casos, dependiendo del tipo de suelo y textura, presentan sólo el 50% de su nivel original (Álvarez, 2001; Lavado, 2006), lo que explica la respuesta generalizada al agregado de N (Echeverría & Sainz Rozas, 2005), en menor medida a azufre (Reussi Calvo *et al.*, 2008) y el desencadenamiento de

problemas ambientales como la erosión de los suelos (Lavado, 2006). Casas (1998) reportó que aproximadamente 1,6 millones de hectáreas del norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba se encuentran con algún grado de erosión. Similar situación se ha producido en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, en donde la intensificación de la actividad agrícola y el uso de labranzas de tipo convencional han provocado erosión hídrica en suelos con pendientes (Studdert & Echeverría, 2000). Estos autores reportaron además que el contenido de CO del suelo se relacionó positivamente con el aporte anual de residuos, y por lo tanto, los menores niveles de CO se determinaron en las secuencias que incluyeron mayor frecuencia del cultivo de soja.

El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. La aplicación frecuente de fertilizantes disminuye el pH del suelo (Liebig *et al.*, 2002), dependiendo dicho efecto de la capacidad tampón del mismo. El uso de fertilizantes fosfatados y nitrogenados se ha incrementado desde mediados de los 90 (Lavado, 2006), y en la actualidad, el consumo de fertilizantes (fosfatados mas nitrogenados) se ubica alrededor de 120 kg ha⁻¹ (Melgar, 2005). En suelos de Balcarce con trigo continuo se han determinado caídas de pH de 0,3 unidades en situaciones con aportes de N y P durante siete años (Fabrizzi *et al.*, 1998).

La interpolación de variables edáficas ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos. La precisión o calidad del mapa generado depende de la estructura espacial de los datos, dado que la misma aumenta cuando se incrementa la correlación espacial de los datos (Villatoro *et al.*, 2008). Además, la precisión de los mapas depende también de los métodos de interpolación utilizados. Los métodos de interpolación generalmente utilizados son el de la «Inversa de la distancia ponderada» (IDP) y el Kriging ordinario (KO). La ventaja de este último es que no solo determina las predicciones sino también su probabilidad asociada (Villatoro *et al.*, 2008). El método IDP es mas rápido pero tiende a mostrar patrones poco reales conocidos como «ojo de buey», los que no están asociados a las propiedades estadísticas de los datos. El IDP funciona mejor cuando la base de datos es pequeña o cuando la distancia de los puntos es muy grande (Villatoro *et al.*, 2008). Sin embargo, ambos métodos no han sido evaluados para describir el patrón de CO y pH a nivel de región pampeana y extrapampeana.

Si bien el CO y el pH del suelo son indicadores de la capacidad productiva del mismo, no se cuenta con información actualizada del estado de estas propiedades en

suelos de las regiones pampeana y extra-pampeana. Esta información es necesaria a los fines de evaluar el estado de deterioro de los mismos, con el objeto de implementar acciones correctivas tendientes a mejorar la capacidad productiva del sistema suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron:

- 1.- Comparar la eficiencia de predicción (EP) del IDP y KO para la interpolación de MO y pH.
- 2.- Releva los contenidos actuales de CO y el pH y mapear dichas variables en suelos de aptitud agrícola de las regiones pampeana y extrapampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para confeccionar los mapas de CO y pH se recopiló información de los laboratorios que trabajan bajo normas IRAM. Las muestras estaban compuestas por más de quince submuestras correspondientes al estrato superficial de 0-20 cm y fueron extraídas durante las campañas 2005 y 2006. El C orgánico oxidable se determinó siguiendo la norma IRAM-SAGPyA 29571-2 la que se basa en la metodología propuesta por Walkley & Black (1934). La determinación de pH en todos los laboratorios que contribuyeron con datos se realizó siguiendo el mismo protocolo: se agregó agua a muestras de suelo secas al aire o a 30 °C y tamizadas por 2 mm en una relación suelo:agua de 1:2,5 (v:v), se mezcló y se dejó equilibrar por 1 hora. Transcurrido este tiempo, la suspensión se agitó nuevamente y se midió el pH con el electrodo en posición vertical. Esta metodología está actualmente en revisión por IRAM. El mayor número de muestras provino de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba (Tablas 1 y 2). Las muestras con valores de pH superiores a 7,5 fueron eliminadas dado que estos suelos no son considerados apropiados para la mayoría de los cultivos agrícolas realizados en la zona.

Los datos se agruparon por provincia y partido o departamento y se determinó el promedio, mediana, desvío estándar, valor mínimo, máximo y los percentiles. La normalidad de la distribución de los datos de CO y pH fue testeada utilizando la rutina Proc. Univariate del programa Statistical Analysis System (SAS, 1985). Según el resultado de este análisis se utilizó el valor promedio o el de la mediana de CO y pH de cada partido o departamento para la realización de los mapas. Para ello los rangos de valores de CO seleccionados fueron de 5,5 a 11,3, 11,4 a 17,1, 17,2 a 22,9, 23,0 a 28,7 y entre 28,8 y 38,0 g kg⁻¹. Los rangos de valores de pH utilizados fueron de 5,5 a 5,9, 6 a 6,4 y de 6,5 a 7,5. Para generar los mapas, se utilizó el programa ESRI ArcMap (2009) con cartografía base correspondiente a la división política del país. Se generó un punto, latitud y longitud correspondiente al centro de cada partido o departamento, el cual se relacionó con el valor del estadístico utilizado. Los métodos de interpolación utilizados para realizar los mapas de CO y pH fueron el IDP y el KO, los cuales permiten caracterizar la variabilidad espacial y mapear propiedades edáficas en escalas que varían de cm a km (Warrick *et al.*, 1986; White *et al.*, 1997). El IDP estima el valor en el área no muestreada a partir de la combinación lineal de los datos según la ecuación (1) (Schloeder *et al.*, 2001):

Tabla 1. Número de muestras y estadísticos descriptivos del contenido de carbono orgánico del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de la región pampeana y extrapampeana.

Table 1. Number of samples and descriptive statistics of organic carbon content of the soil superficial horizon (0-20 cm) in the provinces of pampeana and extrapampeana region.

Provincia	N° de muestras	Prom	Desvío estándar	Percentil				
				Mín	Máx	0,25	0,50	0,75
g kg ⁻¹								
Buenos Aires	19.842	27,1	11,5	0,7	83,4	19,0	25,4	32,4
La Pampa	1.122	16,4	6,1	5,3	52,2	12,2	14,9	19,1
Santa Fe	4.439	26,9	6,1	4,6	65,0	23,3	27,0	30,4
Córdoba	3.895	20,4	7,2	2,9	55,3	15,2	20,6	25,2
Stgo del Estero	220	24,7	3,8	16,4	50,5	22,4	24,2	26,3
Entre Ríos	1.087	34,1	9,4	10,2	76,6	27,9	33,2	39,5
Salta	373	24,2	5,3	9,7	58,0	20,9	23,4	26,1
Tucumán	641	26,4	5,4	4,4	58,6	22,8	25,9	29,2

Prom= promedio; Mín= valor mínimo; Max= valor máximo.

Prom= average; Min= minimum value; Max= maximum value.

Fuente: laboratorio Tecnoagro, laboratorio Suelofertil de ACA Pergamino, laboratorio ISETA de Nueve de Julio, laboratorio Tecnosuelo NOA, laboratorio EEA INTA Oliveros, laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, laboratorio EEA INTA Balcarce y laboratorio EEA INTA Anguil.

Tabla 2. Número de muestras y estadísticos descriptivos del pH del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) en provincias de la región pampeana y extrapampeana.

Table 2. Number of samples and statistical descriptive of soil pH of the superficial horizon (0-20 cm) in the provinces of pampeana and extrapampeana region.

Provincia	N° de muestras	Prom	Desvío estándar	Percentil				
				Mín	Máx	0,25	0,50	0,75
Buenos Aires	19.094	6,2	0,4	4,4	7,5	5,9	6,2	6,5
La Pampa	1.007	6,5	0,5	5,3	7,5	6,2	6,5	6,8
Santa Fe	4.802	6,0	0,4	5,0	7,5	5,8	6,0	6,2
Córdoba	3.960	6,2	0,4	5,1	7,5	5,9	6,2	6,4
Stgo. del Estero	231	6,8	0,4	5,8	7,5	6,5	6,8	7,1
Entre Ríos	1.191	6,3	0,5	4,2	7,5	5,9	6,3	6,7
Salta	439	6,7	0,5	5,0	7,5	6,3	6,8	7,1
Tucumán	674	6,4	0,6	5,0	7,5	5,9	6,4	6,8

Prom= promedio; Mín= valor mínimo; Max= valor máximo.

Prom= average; Min= minimum value; Max= maximum value.

Fuente: laboratorio Tecnoagro, laboratorio Suelofertil de ACA Pergamino, laboratorio ISETA de Nueve de Julio, laboratorio Tecnosuelo NOA, laboratorio EEA INTA Oliveros, laboratorio EEA INTA Marcos Juárez, laboratorio EEA INTA Balcarce y laboratorio EEA INTA Anguil.

$$\hat{Y}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(S_i) \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

En donde $\hat{Y}(S_0)$ es el valor estimado en el punto interpolado, n es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y λ es el peso dado al valor observado $Y(S_i)$ en las cercanías del valor S_0 . El λ_i es calculado según la ecuación (2) (Schloeder *et al.*, 2001):

$$\lambda_i = [d(si, so)]^{-p} / \sum_{i=1}^n [d(si, so)]^{-p} \quad i=1, \dots, n. \quad (2)$$

A mayor p mayor es el valor dado a los puntos mas cercanos y por consiguiente se obtienen superficies más suaves y el valor

predicho tiende hacia el promedio de la muestra (Schloeder *et al.*, 2001). Los valores p usualmente varían de 1 a 3, utilizándose para ambas variables un valor de 3.

El KO obtiene los pesos o influencia ($Y(S_i)$) a partir de la ecuación (3) (Schloeder *et al.*, 2001):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Y[d(si, sj)] + m = Y[d(so, si)], \quad i=1, \dots, n; \quad n; \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

Donde n es el número de observaciones, m es el multiplicador de Lagrange utilizado para la eliminación de las restricciones, λ es el peso dado a cada una de las observaciones y la suma de todos los λ es igual a uno. Los subíndices i y j denotan los puntos

muestreados, el subíndice *o* es el punto en estimación, *s* representa la medición efectuada (variable medida) y *d* (*s_o*, *s_i*) es la distancia entre dos puntos a partir del semivariograma mostrado en la ecuación (4):

$$Y [d(s_i, s_j)] = (1/2) \text{Var}[s(i) - s(j + h)] \quad (4)$$

Donde Var es la varianza y *h* es la distancia entre los dos puntos. La semivarianza aumenta con el incremento de la distancia hasta adquirir un valor máximo, equivalente a la varianza de la población. Para ambas variables, el rango de correlación o distancia lag en el cual se observó el máximo valor de semivarianza fue de 70 km. Por otra parte, se consideró el efecto de la anisotropía para CO y pH dado que se determinó que la correlación espacial varió tanto con la distancia como con la dirección.

La comparación de las predicciones de ambos métodos de interpolación se realizó mediante el análisis de los valores observados versus predichos, los que se obtuvieron por validación cruzada. Este método consiste en retirar o remover un valor observado o medido, estimarlo a través de la interpolación de los valores más cercanos, para luego comparar el estimado con el valor removido u observado (Villatoro *et al.*, 2008). También los métodos de interpolación fueron comparados utilizando la eficiencia de predicción (EP) la que estima que tan efectiva fue la misma, respecto del uso del promedio general de los datos (Schloeder *et al.*, 2001). Un valor de 100 indica predicción perfecta y valores bajos o valores negativos indican que la estructura espacial es pobre y que no es viable realizar un muestreo intensivo para realizar un mapa sino trabajar con la media general de los datos (Kravchenko, 2003). La EP fue calculada según la ecuación (5):

$$EP = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z_{pred.}]^2}{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z_{prom.}]^2}) \times 100 \quad (5)$$

Donde *n* es el número de observaciones, *z_{xi}* es cada observación, *z_{pred}* la observación predicha por el modelo y *z_{prom}* es el promedio general de los datos. Adicionalmente, para el método KO se realizó un mapa del error estándar del predicho (error de estimación) con el objetivo de identificar las zonas en donde el modelo produjo las peores estimaciones.

RESULTADOS Y DISCUSION

Materia orgánica

El análisis de la distribución de los datos (*n* = 31619) indica una ligera desviación de la normalidad (*P* < 0,07), lo que produjo que los valores promedio fueran ligeramente mayores a la mediana (Tabla 1). Por lo tanto, los mapas resultantes de interpolar con ambos estadísticos fueron similares (datos no mostrados). La Figura 1 muestra los mapas generados por el método del IDP y por el KO para la mediana de CO. Ambos métodos de interpolación

produjeron mapas con similar distribución de contenidos de CO. No obstante, el KO produjo variaciones menos bruscas o superficies más suaves que el IDP (Fig. 1), comportamiento que ha sido reportado por otros autores (Villatoro *et al.*, 2008). La relación entre valores predichos y observados fue significativa (*P* < 0,05) y se determinó un coeficiente de determinación ligeramente mayor para el KO que para el IDP (Fig. 2). Para ambos métodos de interpolación, la ordenada al origen y la pendiente no difirieron (*P* > 0,05) de 0 y 1, respectivamente. Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en la zona norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (Fig. 3), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de departamentos relevados en dichas zonas. No obstante, la EP calculada para el IDP y el KO fue de 79 y 80%, respectivamente, valores considerados aceptables para la aplicación de métodos de interpolación (Villatoro *et al.*, 2008).

Los valores de mediana de CO variaron de 5,5 a 38,0 g kg⁻¹ según zonas, determinándose los valores más bajos al oeste de Buenos Aires, este de la Pampa y sur-suroeste de Córdoba y los más elevados al sudeste de la provincia de Buenos Aires (Fig. 1), provincia que presentó la mayor variación en los niveles de CO (Tabla 1). A nivel regional los niveles de CO de suelos prístinos están regulados por el clima, dado que el mismo incide en el balance de C al afectar el ingreso del mismo al suelo y su salida por respiración microbiana (Álvarez & Steinbach, 2006). Por lo tanto, la caída de los niveles de CO hacia el oeste de la región se asocia a la disminución de la precipitación media anual, mientras que la disminución de los niveles de CO hacia el norte de la región se relaciona con el aumento de la temperatura media (Álvarez & Steinbach, 2006). Además, el CO también se incrementa al aumentar la proporción de partículas finas, al aumentar la protección contra el ataque microbiano (Six *et al.*, 2002) y la capacidad de almacenamiento de agua útil. Por lo tanto, la variación de textura del horizonte superficial contribuiría también a explicar la disminución de CO este-oeste. Los contenidos de CO de los suelos del este de La Pampa oscilaron de 5,4 a 11,3 g kg⁻¹ (Fig. 1) y son similares a los reportados por Romano & Roberto (2007) para dicha área en un relevamiento realizado durante el período 2004-06.

Como se mencionó, los niveles de CO de suelos prístinos están regulados por el clima y la textura del suelo (Álvarez & Steinbach, 2006). Para el sudeste de Buenos Aires, se han reportado valores de CO en suelos prístinos de 32,2 a 64,1 g kg⁻¹ (Urquieta, 2008), de 13,4 a 38,0 g kg⁻¹ para el norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sur-sudeste de Córdoba (Vázquez *et al.*, 1990; Cantú *et al.*, 2007; Ferreras *et al.*, 2007) y de 12,0 a 24,5 g kg⁻¹ para el oeste de Buenos Aires y este de La Pampa (López *et*

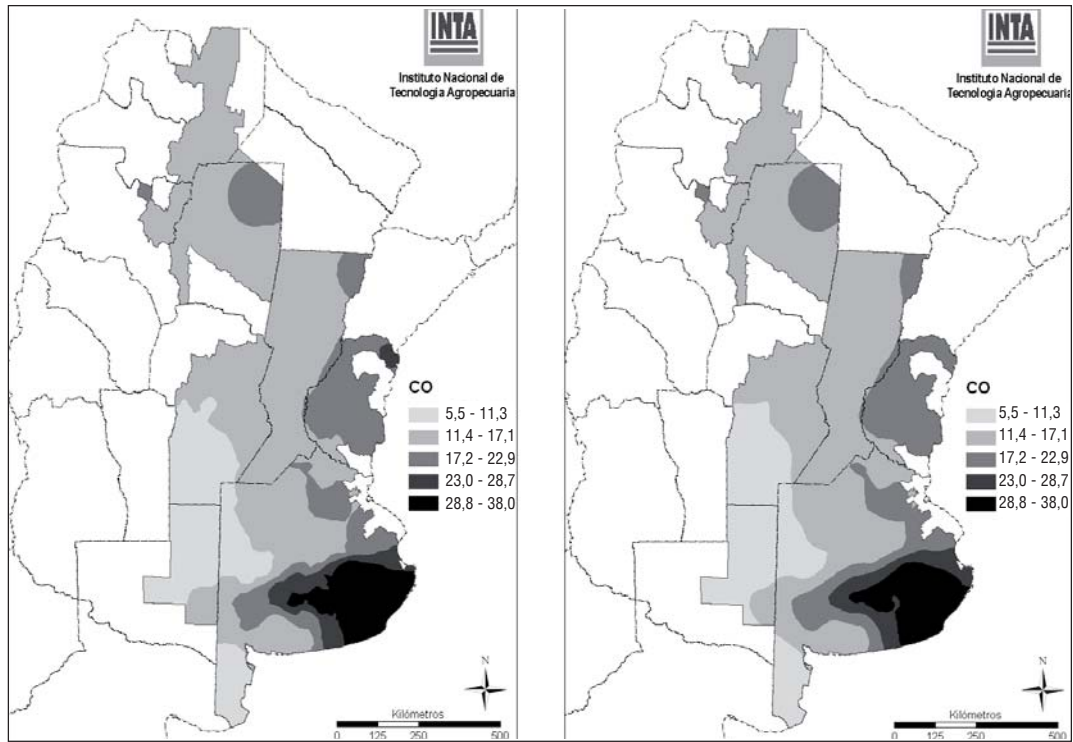


Figura 1. Rangos de valores de mediana del contenido de carbono orgánico (CO) (g kg^{-1}) del horizonte superficial (0-20 cm) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método de la inversa de la distancia ponderada y con el Kriging ordinario (a y b).

Figure 1. Ranges of values medium of soil organic carbon content of superficial horizon (0-20 cm) of agricultural soils of the pampeana and extrapampeana region. Interpolation with of inverse distance-squared weighted and with the ordinary Kriging method (a y b).

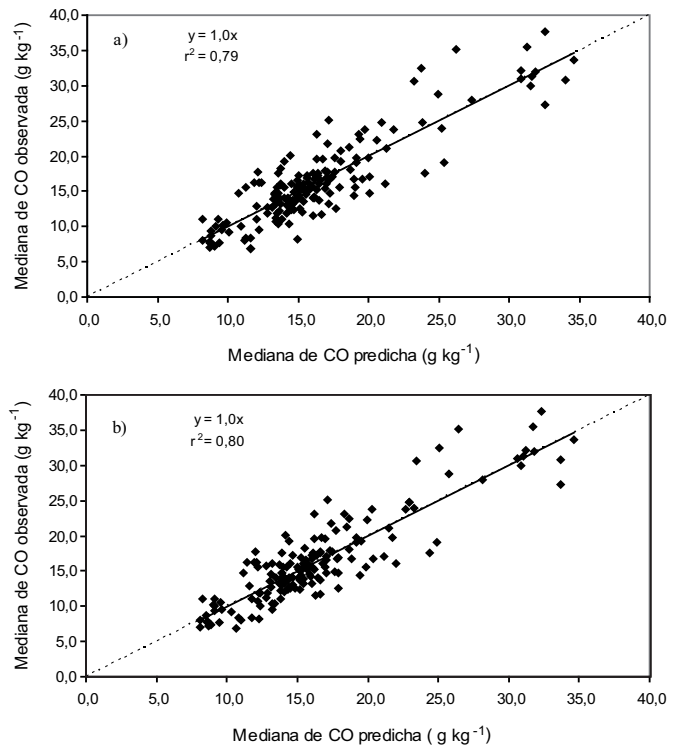


Figura 2. Relación entre los valores predichos y observados de mediana de carbono orgánico (CO) del suelo. Interpolación por el método de la inversa de la distancia ponderada por el Kriging ordinario (a y b). La línea punteada representa la relación 1:1.

Figure 2. Relationship between predicted and observed values of soil organic matter. Interpolation with of inverse distance-squared weighted with ordinary Kriging method (a y b). The dotted line represents the relationship 1:1.

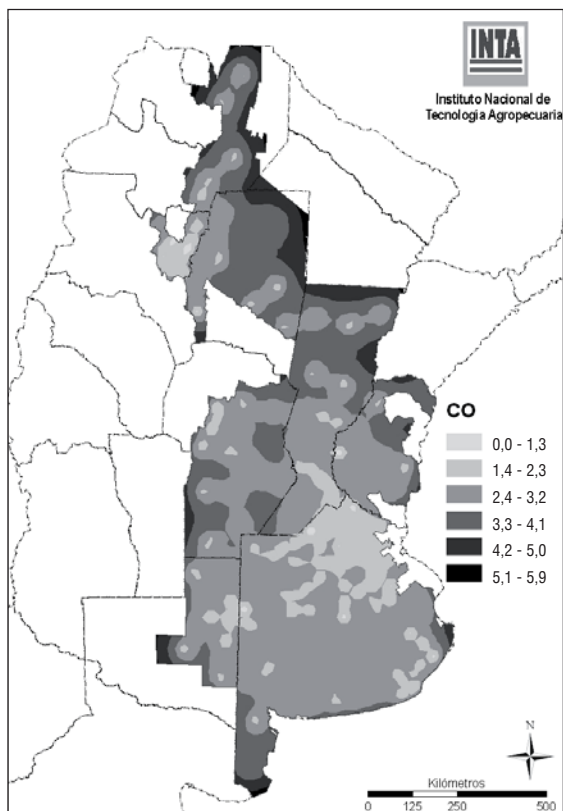


Figura 3. Mapa de error de predicción del valor estimado de carbono orgánico (CO) por el método Kriging para suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana.

Figure 3. Prediction error map of estimated organic carbon value (CO) by Kriging method for agricultural soils of the pampeana and extrapampeana region.

et al., 2007), valores notablemente mayores (aproximadamente entre 30 y 52%) a los que muestran dichas regiones en la actualidad (Fig. 1). Es válido destacar que las fracciones de CO que se reducen en mayor medida son las más lábiles (Studdert *et al.*, 1997), las que son muy importantes para promover la estabilidad de los agregados (Studdert *et al.*, 1997; Angers 1998) y proveer N a través de la mineralización (Six *et al.*, 2002). Para el horizonte superficial de un suelo franco la disminución de un 1% de materia orgánica (aproximadamente 5,8 g kg⁻¹ de CO) implica la pérdida de 1.000 a 1.400 kg de N ha⁻¹ y de 80 a 120 kg de P y S ha⁻¹ (García *et al.*, 2005; Echeverría, 2005), lo que pone de manifiesto la incidencia de la pérdida de CO sobre las reservas de nutrientes en el suelo.

Reacción del suelo

El análisis de la distribución de los datos (n= 31398) no indicó desviación de la normalidad (P > 0,10). Por lo tanto, los valores promedio fueron iguales o muy simi-

lares a la mediana en la mayoría de las provincias relevadas (Tabla 2) y a nivel de partido (datos no mostrados). No obstante, se optó por este último estadístico para la realización del mapa de pH. Ambos métodos de interpolación produjeron mapas con similar distribución de valores de pH, aunque el IDP mostró mayor tendencia a formar islas (noroeste de Buenos Aires) que el KO (Fig. 4), comportamiento que ha sido reportado por otros autores (Villatoro *et al.*, 2008). El coeficiente de determinación del IDP fue escasamente inferior al del KO (Fig. 5), mostrando este último una EP algo mayor (63 y 65% para IDP y KO, respectivamente). La ordenada al origen y la pendiente no difirieron (P > 0,05) de 0 y 1, respectivamente. Los mayores errores de predicción del KO se determinaron en zonas como el norte de la provincia de Santa Fe, norte de Santiago del Estero y en algunas zonas de Salta (Fig. 6), lo que puede ser atribuido a la baja cantidad de departamentos relevados en dichas zonas.

Los suelos de la mayor parte de los partidos o departamentos relevados en las provincias de Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos, Santiago del Estero, Salta y Tucumán presentaron valores de pH dentro del rango de 6 a 7,5 (Fig. 4), los cuales son considerados óptimos para el crecimiento de los principales cultivos de la región. Sólo algunos partidos del norte de Buenos Aires (Baradero, Ramallo, San Nicolás, Mercedes, Chacabuco, Pergamino, Colón, Junín), y centro, centro-sur de Santa Fe (San Martín, San Jerónimo, Belgrano, Iriondo, San Lorenzo, Caseros, Rosario y Constitución) y este de Córdoba mostraron valores de pH en el rango de 5,5-6 (Fig. 4). Estos resultados coinciden con los reportados para esta zona por Santos Sbuscio *et al.* (2009), quienes detectaron suelos con pH de 5,1 a 5,8, concentraciones de Al intercambiable de 0,34 a 1,12 mg kg⁻¹ y baja a media saturación cálcica. Estos bajos valores de pH podrían ser explicados por la mayor exportación de bases de esta área respecto de otras regiones agrícolas (Cruzate & Casas, 2003), lo que estaría asociado a la elevada frecuencia del cultivo de soja en la rotación, especie que presenta mayores exportaciones de bases que maíz o trigo (Vázquez, 2005). Es probable también que la mayor acidez de los suelos de esta zona se asocie a una prolongada historia de aplicación de fertilizantes nitrogenados. Para el sudeste de Buenos Aires, Fabrizzi *et al.* (1998) reportaron descensos de hasta 0,3 unidades de pH para aplicaciones anuales de 120 kg N ha⁻¹. Los valores de pH determinados en el este de la provincia de La Pampa son similares a aquellos reportados por Romano & Roberto (2007) en un relevamiento realizado durante el período 2004-06.

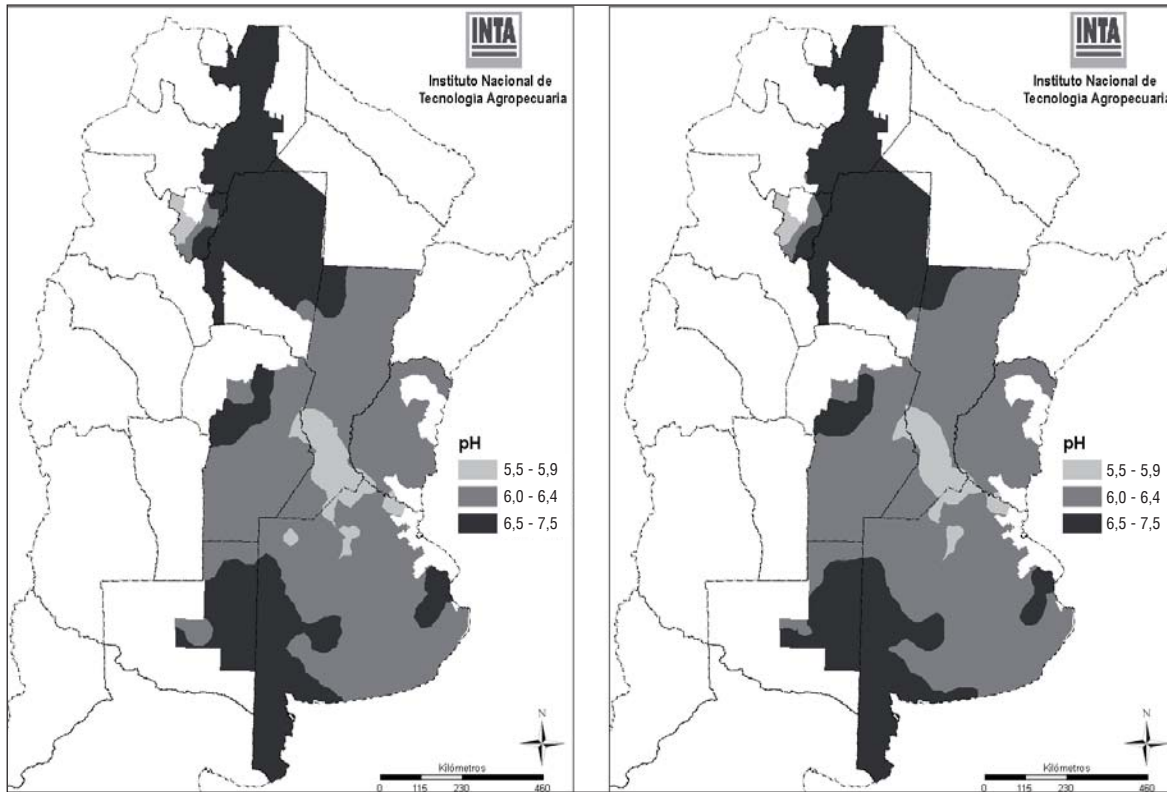


Figura 4. Rangos de valores de mediana de pH del horizonte superficial (0-20 cm de profundidad) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. a) interpolación realizada con el método de la inversa de la distancia ponderada y b) interpolación realizada con el método Kriging ordinario.

Figure 4. Ranges of values medium of soil pH values of surface horizon (0-20 cm) of the pampeana and extrapampeana region. a) interpolation with of inverse distance-squared weighted method and with the ordinary Kriging method b).

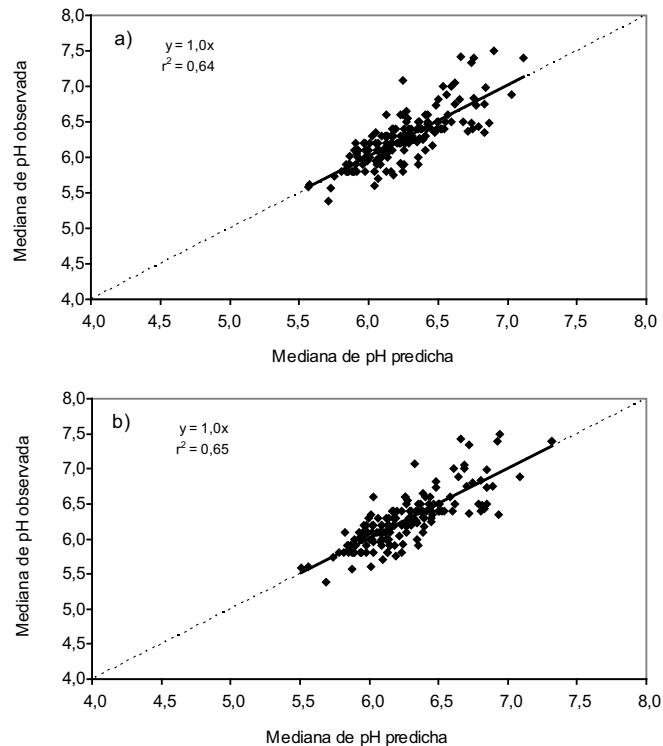


Figura 5. Relación entre los valores observados y predichos de pH en suelo. a) interpolación por el método de la inversa de la distancia ponderada y b) por el método Kriging ordinario. La línea punteada representa la relación 1:1.

Figure 5. Relationship between observed and predicted values of soil pH. a) interpolation with of inverse distance-squared weighted method and b) interpolation with ordinary Kriging method. The dotted line represents the relationship 1:1.

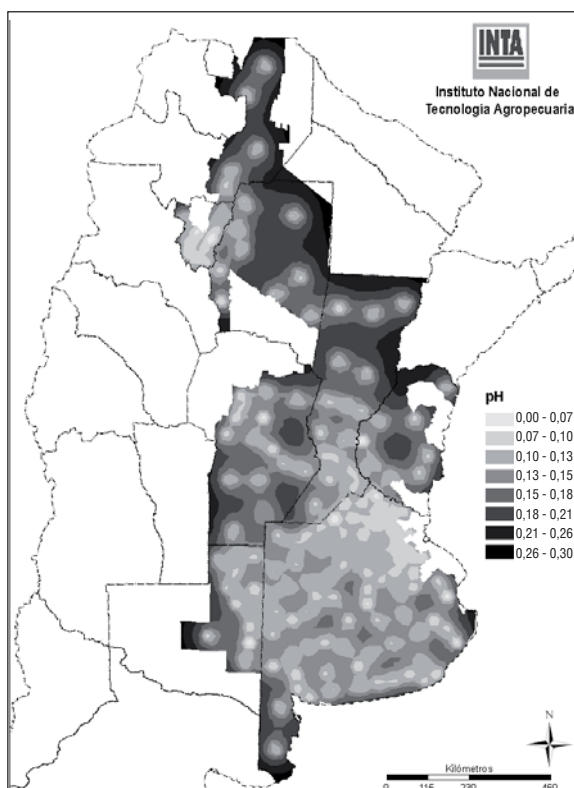


Figura 6. Mapa de error de predicción del valor estimado de pH por el método Kriging (error de predicción) para suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana.

Figure 6. Prediction error map of estimated soil pH by Kriging method (prediction error) for agricultural soils of the pampeana and extrapampeana region.

CONCLUSIONES

1.- Tanto el IDP como KO pueden ser utilizados para la confección de mapas de distribución de CO y pH a nivel regional, aunque este último mostró mayor EP y menor error de estimación.

2.- Los mayores valores de CO se determinaron en el sudeste de la Región Pampeana y los más bajos hacia el oeste y norte de dicha región, y las mayores reducciones respecto de suelos prístinos habrían ocurrido hacia el norte y oeste de la Región Pampeana. En general, el pH de los suelos no sería limitante para la producción de los cultivos en la mayor parte del área relevada, pero se pueden presentar potenciales problemas de acidez en áreas específicas.

AGRADECIMIENTOS

A los que aportaron información sobre los análisis de suelos: José Lamelas y Luis Berasategui (Tecnoagro), Roberto Rotondaro

(Suelofertil), Graciela Cordone (INTA Casilda), Carlos Galarza (INTA Marcos Juárez), Alfredo Bono (INTA Anguil), Juan Galantini (UNS), Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Sebastián Gambaudo (INTA Rafaela) y Laboratorio Tecnosuelo del NOA. A la responsable del Laboratorio de Geomática de INTA Balcarce Karina Zelaya.

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto INTA AERN 295561 y AGR 319/10 de la UNMP.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R & HS Steinbach. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. *En: Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos»* (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. p. 31-40.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use and Management* 17: 62-66.
- Angers, DA. 1998. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil Tillage Res.* 47: 91-96.
- Cantú, MP; A Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25: 173-178.
- Casas, RR. 1998. Causas y evidencia de la degradación de los suelos en la Región Pampeana. *En: Hacia esa agricultura productiva y sostenible en la pampa.* Harvard University; David Rockefeller Center for Latin American Studies; Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica. Orientación Gráfica Editora S.R.L. Buenos Aires.
- Cruzate, G & R Casas. 2003. Balance de nutrientes. *Fertilizar.* Año 8. Número especial «Sostenibilidad» diciembre 2003. pp 7-13.
- Domínguez, GF; A Andersen & GA Studdert. 2008. Cambios en la estabilidad de agregados en distintos sistemas de cultivo bajo siembra directa y labranza convencional. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina. Actas en CD.
- Echeverría, HE & H Sainz Rozas. 2005. Nitrógeno. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (ed. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 69-97.
- Echeverría, HE. 2005. Azufre. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (eds. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 139-160.
- ESRI ArcMap 9.2--Licencia 37142261_v9-delset ArcGIS Desktop.
- Fabrizzi, KP; L Picone; A Berardo & FO García. 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo* 16: 71-76.
- Ferreras, L; G Magra; P Besson & F García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.

- García, FO; LI Picone & A Berardo. 2005. Fósforo. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (eds. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 99-121.
- Hassink, J. 1997 The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*. 191: 77-87.
- Kravchenko, A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of American Journal* 67: 1564-1571.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: Historia, características y uso de sus suelos. *En: Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos»* (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. p. 1-12.
- Liebig, MA; GE Varvel; JW Doran & BJ Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western corn belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 596-601.
- López, MV; JM de Dios Herrero, GG Hevia, R Gracia & DE Buschiazzo. 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma* 139: 407-411.
- Melgar, R. 2005. El mercado de fertilizantes en la Argentina y su relación con el sector agropecuario. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (eds. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 489-502.
- Monreal, C & HH Janzen. 1993. Soil organic carbon dynamics alter 80 years of cropping a Dark Brown Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 73: 133-136.
- Reussi Calvo, NI; HE Echeverría & H Sainz Rozas. 2008. Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. *Journal of Plant Nutrition* 31: 1612-1623.
- Romano, N & M Roberto. 2007. Contenido de fósforo extractable, pH y materia orgánica en los suelos del este de la provincia de La Pampa. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 33: 1-6.
- SAS Institute, Inc. 1985. User's guide. Statistics. Version 5. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Santos Sbuscio, D; M Vázquez; A Termiello; M Garcia & G Millán. 2009. Determinación de la presencia de aluminio intercambiable en algunos suelos ácidos de la Región Pampeana con y sin enmiendas básicas. Simposio Fertilidad IPNI 2009, Rosario.
- Schloeder, CA; NE Zimmerman & MJ Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soils properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 470-479.
- Six, J; RT Conant; EA Paul & K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1466-1472.
- Steinbach, HS & R Álvarez, R. 2005. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in pampean agroecosystems. *J. Environ. Qual* 35: 3-13.
- Urquieta, JF. 2008. Nitrógeno potencialmente mineralizable anaeróbico en suelos del sudeste bonaerense y su relación con la respuesta a nitrógeno en trigo. Tesis ingeniero agrónomo, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina.
- Vázquez, ME. 2005. Calcio y Magnesio, acidez y alcalinidad del suelo. *En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (eds. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 161-188.
- Vázquez, ME; LA Berasategui; ER Chamorro; LA Tanquini & LA Barberis. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo* 8: 203-210.
- Villatoro, M; C Enríquez & F Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32: 95-105.
- Walkley, A & Y Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37.
- Warrick, AW; DE Meyers & DR Nielsen. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. p. 53-82. *In: A. Klute (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1.* 2nd. ed. Agron. CONogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- White, JG; RM Welch & WA Norvell. 1997. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 185-194.