

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS MEDIANTE EL USO DE INDICADORES E ÍNDICES

MARIO PABLO CANTÚ; ANALÍA BECKER; JOSÉ CAMILO BEDANO
& HUGO FRANCISCO SCHIAVO

Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 km 601, (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba.
mcantu@exa.unrc.edu.ar

Recibido: 15/03/07

Aceptado: 10/07/07

RESUMEN

El avance de la agricultura en áreas con cierto grado de fragilidad hace necesario realizar evaluaciones del estado del sistema suelo mediante indicadores. El objetivo del trabajo fue desarrollar y aplicar un set mínimo de indicadores del estado del recurso suelo para evaluar la calidad del suelo en agroecosistemas con Molisoles de bajo a moderado desarrollo. La metodología se probó en una unidad ambiental homogénea, con Hapludoles típicos, bajo diferentes sistemas de uso y manejo, en una cuenca pedemontana del SO de la provincia de Córdoba. A las propiedades medidas (carbono orgánico, pH, saturación de bases, agregados estables en agua, velocidad de infiltración, densidad aparente y el espesor horizonte A) se le establecieron rangos de calidad a partir de los cuales se normalizaron los indicadores. Los indicadores seleccionados son un número mínimo de variables con alto grado de agregación, fáciles de medir y repetibles, representando las condiciones locales. Estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales ya que fueron elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio.

Palabras clave. Propiedades físicas, químicas y físicoquímicas; set mínimo; degradación.

SOIL QUALITY EVALUATION USING INDICATORS AND INDICES

ABSTRACT

The expansion of agriculture in areas with a certain degree of fragility, make it necessary to evaluate the state of soil system by means of indicators. The aim of this paper was to develop and apply a minimum set of indicators of the state of the resource to assess soil quality in agroecosystems with low to moderate development Mollisols. The methodology was tested in a homogeneous environmental unit (with Typic Hapludolls) under different uses and management systems in a piedmont basin in SW Córdoba province. Quality ranges were established for the measured properties (organic carbon, pH, base saturation, water stable aggregates, infiltration rate, bulk density, A horizon depth) to normalize the indicators. Selected indicators constitute a minimum number of variables with a high aggregation degree, easy to measure and repeatable, representing the local conditions. These soil resource state indicators are not universal since they were selected in function of the environment and soil type in the studied region.

Key words. Physical, chemical and physicochemical properties, minimum set, degradation.

INTRODUCCIÓN

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo - Río '92 (UNCED) marcó un hito muy especial al establecer la necesidad de desarrollar y aplicar diferentes metodologías para determinar el estado del ambiente y monitorear los cambios ocurridos a nivel local, nacional, regional y global. La determinación de estos cambios podría ayudar a realizar una mejor evaluación de las dimensiones de los diferentes problemas ambientales, identificar y evaluar los resultados de la apli-

cación de las convenciones internacionales y los programas de acción, como así también, orientar las políticas nacionales. La aplicación del Capítulo 40 de la Agenda 21 condujo al desarrollo de diversas metodologías que determinaron el uso generalizado de indicadores e índices para la evaluación de la calidad ambiental, calidad de suelos, sustentabilidad, desarrollo sustentable, riesgo, vulnerabilidad, planificación territorial, entre otros. El antecedente más importante surgió de la Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD,

1991) cuando publicó un set preliminar de indicadores ambientales. Posteriormente, otras organizaciones han desarrollado programas donde se establecieron listas de indicadores para evaluar la calidad ambiental, tales como, FAO, Banco Mundial, UN Development Program, UN Environmental Program. En la ciencia del suelo, Blum & Santelises (1994) describieron el concepto de sustentabilidad y resiliencia del suelo basado en seis funciones ecológicas y humanas: el suelo como productor de biomasa; el suelo como reactor con filtros; el suelo como buffer y como transformador de materia para proteger el ambiente, el agua subterránea y la cadena de alimentos de la contaminación; el suelo como hábitat biológico y reserva genética; el suelo como medio físico y el suelo como fuente de recursos y de herencia cultural. Estos conceptos y los sugeridos por Warkentin (1996) fueron las bases a partir de las cuales la Soil Science Society of America estableció el concepto de calidad del suelo (Karlen *et al.*, 1996). Doran & Parkin (1994, 1996) y Doran *et al.* (1996) establecieron indicadores cuantitativos de calidad del suelo a partir de estos conceptos.

Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras.

Los indicadores deben ser:

- limitados en número y manejables por diversos tipos de usuarios;
- sencillos, fáciles de medir y tener un alto grado de agregación, es decir, deben ser propiedades que resuman otras cualidades o propiedades;
- interdisciplinarios; en lo posible deberán contemplar la mayor diversidad de situaciones por lo tanto incluir todo tipo de propiedades de los suelos (químicas, físicas, biológicas, etc.);
- tener una variación en el tiempo tal que sea posible realizar un seguimiento de las mismas, asimismo, no deberán poseer una sensibilidad alta a los cambios

climáticos y/o ambientales pero la suficiente como para detectar los cambios producidos por el uso y manejo de los recursos (Gallopín, 1995; Doran & Parkin, 1996; Doran & Zeiss, 2000).

Segnestam (2002) a partir de la experiencia realizada por el Banco Mundial señaló la importancia de establecer: la línea de base (baseline) o de inicio de una actividad que puede impactar positiva o negativamente sobre el ambiente; umbrales (thresholds) para controlar o hacer el seguimiento de impactos negativos que no deben exceder un predeterminado umbral y además objetivos o metas (targets) que permitan evaluar si el impacto positivo de una respuesta es suficientemente largo.

Se han desarrollado listas de indicadores de uso "universal" pensando en todas las situaciones posibles y todos los suelos posibles (Doran & Parkin, 1994, 1996). Por otra parte, se han presentado listas pensadas para situaciones regionales o locales (Brejda *et al.*, 2000; Cantú *et al.*, 2002; Lilburne *et al.*, 2004). Segnestam (2002) señaló la conveniencia de utilizar indicadores locales para evaluar a nivel de escala mayor (regiones, provincias, municipios).

En el sur oeste de la provincia de Córdoba se desarrolló y aplicó un Índice de Calidad Ambiental mediante la agregación de indicadores utilizando el modelo PSR, Presión, Estado y Respuesta (Cantú *et al.*, 2003). Además, se evaluaron parámetros del suelo como potenciales indicadores de calidad aplicando el modelo PSR e incorporando un modelo que contempla las funciones del suelo (fuente de recursos y sumidero de residuos) (Cantú *et al.*, 2001; Cantú *et al.*, 2002). De lo anteriormente expuesto se desprende la necesidad de contar con un set mínimo de indicadores de calidad de suelos, de simple medición y con validez local, que pueda ser utilizado por agencias gubernamentales y responsables del manejo del suelo en la evaluación y seguimiento en el tiempo de la calidad de este recurso.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar y aplicar un set mínimo de indicadores del estado del recurso suelo para evaluar su calidad en agroecosistemas con Molisoles de bajo a moderado desarrollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la cuenca del arroyo La Colacha (64°39' y 64°50' O y 32°54' 20" y 33°03' 15" S) con una superficie de 19.500 ha. El clima es mesotermal húmedo con

estación seca marcada (TMA: 16,5 °C; PMA: 948 mm, ETP: 823 mm y ETR: 764 mm) y las precipitaciones están concentradas en primavera-verano (80%).

Dentro de la cuenca se seleccionó la unidad ambiental "Alto Estructural Rodeo Viejo-La Morocha" definida en base a características geomorfológicas, de suelos, agua superficial y subterránea y uso del suelo (Cantú, 1998). Para la evaluación de la calidad del suelo se escogió la subunidad Pendientes. El relieve es de fuertemente a moderadamente ondulado y el sector analizado presenta pendientes largas a muy largas (1.200 a 1.800 m) y complejas con gradientes del 2 al 7%. Los sedimentos aflorantes son loess arenosos del Holoceno. Los procesos de modelado son dominados por la erosión hídrica y eólica. El suelo es un Hapludoll típico, térmico, limoso grueso, mixto; Capacidad de Uso: Clases II y III. La actividad principal fue históricamente agrícola-ganadera y a partir del año 2000 se produjo una profundización de la agriculturización en desmedro de la ganadería. En este contexto, se incrementó la utilización de la siembra directa (SD) con respecto al resto de los sistemas de labranza. En la mayoría de los casos se pasó de la labranza convencional (LC) directamente a la siembra directa (SD). Al momento del muestreo la proporción de área bajo SD en la subunidad seleccionada fue de un 50%, labranza reducida (LR) 10% y labranza convencional (LC) 40%.

Muestreo

En la subunidad se seleccionaron 12 sitios de muestreo representativos de los tres sistemas de manejo agrícola utilizados (siembra directa, labranza reducida y labranza convencional), con las variantes con y sin fertilización y con y sin pastoreo. Adicionalmente, se eligieron dos sitios de referencia que representan la situación más próxima a un suelo natural o prístino, no alterado desde hace 50 años, con una pastura de *Eragrostis curvula* (pasto llorón). El muestreo se efectuó en el año 2000. En cada sitio se describieron los suelos (Soil Survey Staff, 1993), se evaluaron las

propiedades físicas a campo (tres repeticiones distribuidas al azar) y se tomaron tres muestras por sitio (compuestas por cinco submuestras cada una) del horizonte superficial para evaluar las propiedades químicas en el laboratorio.

Análisis

El contenido de carbono orgánico se determinó por el método de Walkley & Black (Jackson, 1976); el pH por potenciometría (relación suelo-agua 1:2,5); la saturación de bases por el método del acetato de amonio (Personal Laboratorio de Salinidad, 1982); el porcentaje de agregados estables en agua (>0,5 mm) según Pla Sentis (1983); la velocidad de infiltración usando el método del doble anillo (ASTM D 3385-88) y la densidad aparente por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). El espesor horizonte A fue valorado a campo (Soil Survey Staff, 1993).

La metodología de indicadores tiene como condición esencial el apoyarse en una base cartográfica para que a partir de ella sea factible el análisis en el espacio y en el tiempo. En este caso la cartografía de base fue un mapa de Unidades Ambientales Integradas obtenidas mediante la metodología de la Universidad de Cantabria (Cendrero & Díaz de Terán, 1987) utilizando la combinación de diversos tipos de mapas (geomorfológico, hidrológico, suelos y uso del suelo).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la calidad de los suelos, teniendo en cuenta que el número de indicadores debe ser mínimo, se eligieron las propiedades que para la cuenca y el tipo de suelo cumplieron con los criterios que se consideran más relevantes (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de calidad de suelos, unidades de medida, valores máximos y mínimos definidos para la subunidad Pendientes, Unidad Alto Estructural Rodeo Viejo - La Morocha, Cuenca La Colacha, Córdoba.

Table 1. Soil quality indicators, measurement units, maximum and minimum values defined for the Pendientes subunit, Alto Estructural Rodeo Viejo - La Morocha unit, La Colacha basin, Córdoba.

Indicador	Unidad de medida	I max	I min
		Valor máximo	Valor mínimo
C orgánico	%	2,5	0,6
pH		7	5,5
Saturación de bases	%	100	50
Agregados estables en agua	%	94	20
Velocidad de infiltración	cm/hora	4	1
Densidad aparente	Mg m ⁻³	1,50	1,15
Espesor horizonte A	cm	45	0

Para la obtención de un valor único de cada parámetro para la subunidad se realizó un promedio ponderado de acuerdo a la proporción que representa cada manejo en el área total. Luego los indicadores fueron normalizados utilizando una escala 0-1 que representan, respectivamente, la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad, independientemente de los valores absolutos medidos para cada indicador. Existen dos situaciones posibles: la primera es cuando el valor máximo del indicador (I_{max}) corresponde a la mejor situación de calidad de suelo (Valor normalizado del indicador: $V_n = 1$) y el cálculo es $V_n = I_m - I_{min} / I_{max} - I_{min}$. La otra situación es cuando el valor I_{max} corresponde a la peor situación de calidad de suelo ($V_n = 0$) y se calcula como: $V_n = 1 - (I_m - I_{min} / I_{max} - I_{min})$. Donde V_n = valor normalizado, I_m = medida del indicador, I_{max} = valor máximo del indicador, I_{min} = valor mínimo del indicador.

Los valores máximos y mínimos fueron establecidos de diferentes formas para cada indicador. Para algunos atributos, especialmente para las condiciones óptimas, se tuvieron en cuenta umbrales calculados a partir de los valores de los suelos de referencia mientras que en otros se utilizaron criterios teóricos. Para el C orgánico se consideró como mínimo el requerimiento para cumplir con la condición de mólico (Soil Survey Staff, 2006) y como máximo el promedio de los valores medidos en los suelos de referencia. El valor mínimo de pH fue establecido considerando el punto de toxicidad para el desarrollo de la mayoría de los cultivos de la zona y el máximo de calidad correspondió al pH neutro (Whittaker *et al.*, 1959; Soil Survey Staff, 1993). Para la saturación de bases se tomaron el valor mínimo (50%) y el máximo (100%) requeridos para cumplir con la condición de mólico (Soil Survey Staff, 2006). Para el indicador agregados estables en agua, el valor máximo se obtuvo promediando los valores medidos en los suelos de referencia. El mínimo correspondió a los valores mínimos medidos en la región (Becker, 2006). En el caso de la velocidad de infiltración, se tomó como mínimo la velocidad a la cual se han documentado problemas de infiltración en la región (Becker, 2006) y como máximo los valores de infiltración esperados de acuerdo a las características del suelo (Soil Survey Staff, 1993). La densidad aparente mínima corresponde al promedio de los valores medidos en los suelos de referencia y la máxima a los valores máximos medidos en la región (Becker *et al.*, 2002). En el caso del indicador espesor del horizonte A, el máximo espesor corresponde al medido en promedio en los suelos de referencia, mientras que el mínimo se estableció como cero. Finalmente, se estableció un índice de calidad de suelos (ICS) promediando los valores de todos los indicadores. Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de calidad de suelos.

Table 2. Soil quality classes.

Índice de calidad de suelos	Escala	Clases
Muy alta calidad	0,80 - 1,00	1
Alta calidad	0,60 - 0,79	2
Moderada calidad	0,40 - 0,59	3
Baja calidad	0,20 - 0,39	4
Muy baja calidad	0,00 - 0,19	5

En la Tabla 3 se presentan los valores normalizados de los indicadores calculados y el índice de calidad del suelo resultante. El indicador que presentó el menor valor fue el C orgánico, mientras que el mayor correspondió a la saturación de bases. El pH y la densidad aparente presentaron valores intermedios, y los restantes indicadores valores cercanos a 0,3.

El valor del indicador C orgánico evidencia una disminución en la calidad de un 82% respecto de los suelos tomados como referencia. La marcada disminución de la materia orgánica ha sido observada en diversas investigaciones en la región (Becker, 2006; Musso *et al.*, 2006). El indicador pH presenta un valor de calidad cercano a

Tabla 3. Indicadores e índice de calidad del suelo para la subunidad Pendientes, Unidad Alto Estructural Rodeo Viejo - La Morocha, Cuenca La Colacha, Córdoba.

Table 3. Soil quality indicators and indices for the Pendientes subunit, Alto Estructural Rodeo Viejo - La Morocha unit, La Colacha basin, Córdoba.

Indicador	Valor indicador
C orgánico	0,18
pH	0,57
Saturación de bases	0,98
Agregados estables en agua	0,32
Velocidad de infiltración	0,33
Densidad aparente	0,56
Espesor horizonte A	0,32
Índice de Calidad del Suelo	0,47

0,6. En la mayoría de los suelos de la subunidad existe una disminución del pH en el horizonte superficial respecto a los suelos de referencia. Esta situación también ha sido reportada por otros investigadores (Musso *et al.*, 2006). Sin embargo, los valores medidos aún distan considerablemente del punto de toxicidad establecido para la mayoría de los cultivos de la zona. El valor del indicador saturación de bases es muy cercano al máximo de calidad. En este caso también el indicador refleja en gran medida la situación de los suelos locales. Los materiales loésicos sobre los que se desarrollan los suelos son ricos en calcio y por lo tanto, la saturación de bases es muy alta, a pesar del uso de los suelos. El indicador agregados estables en agua presenta un valor de calidad de 0,32. La importante disminución del porcentaje de macroagregados en la subunidad respecto de los suelos de referencia, refleja la influencia negativa del manejo en esta propiedad como fuera señalado por numerosos autores a nivel local (Moreno, 2000; Becker, 2006) e internacional (USDA-NRCS, 1999). El valor de 0,33 del indicador velocidad de infiltración señala que esta propiedad en la subunidad evaluada dista en casi un 70% de los valores de infiltración esperados de acuerdo a las características del suelo (Soil Survey Staff, 1993). En investigaciones realizadas en el área de estudio, se ha señalado que la disminución de la velocidad de infiltración estaría asociada a la compactación del horizonte superficial y subsuperficial (Becker, 2006). El indicador densidad aparente revela que los suelos tienen un nivel medio de compactación, dado que el valor promedio ponderado de la subunidad se encuentra entre los valores mínimos de los sitios de referencia y los máximos medidos en la región. Este valor no sería restrictivo para el crecimiento de raíces en este tipo de suelos (Vepraskas, 1994; USDA-NRCS, 1999). El valor bajo del indicador espesor del horizonte A muestra la marcada disminución respecto de los suelos de referencia, que alcanza casi un 70%. Esto se debe principalmente a procesos de erosión hídrica que han sido estimados en la zona por la aplicación de modelos (Becker *et al.*, 2006) y por mediciones directas a campo (Becker, 2006).

El índice de calidad del suelo (ICS: 0,47) obtenido mediante este set mínimo de indicadores (Tabla 3) se ubica en la clase de moderada calidad de suelos (Tabla 2). El valor del ICS está fuertemente influenciado por el indicador C orgánico, que fue la propiedad más afectada por el manejo en esta subunidad. El C orgánico es considerado un atributo clave dada su marcada influencia sobre la mayoría de las propiedades del suelo (Gregorich *et al.*, 1994). La disminución del C orgánico sería la causa principal de los valores bajos del indicador estabilidad de agregados e infiltración y medio del indicador densidad aparente. Estos cambios en las propiedades físicas afec-

tan la condición superficial del suelo provocando un incremento de los procesos de erosión, con la consiguiente pérdida de espesor del horizonte superficial, reflejada por el indicador correspondiente.

El set de indicadores utilizados para evaluar la calidad del suelo cumple con los criterios más importantes requeridos para su uso como indicadores. Se trata de un número mínimo de variables o atributos del suelo que integran información de otras variables asociadas, incorpora indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y en su mayoría son de fácil medición. Lo expuesto evidencia la aptitud de los indicadores seleccionados para reflejar, en términos de calidad, los cambios en cada una de las propiedades. En la construcción del set se consideraron las principales propiedades de los suelos del área para que los indicadores representen las condiciones locales. Se descartaron indicadores que, si bien forman parte de listas muy usadas en otras partes del mundo (*e.g.* Doran & Safley, 1997), no tienen validez local. Por ello, es importante señalar que estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio. Estos resultados representan una instantánea para la situación del año 2000. Para darle el sentido temporal será necesario realizar mediciones secuenciales en lapsos de tiempo tales que permitan registrar cambios en los atributos utilizados vinculados a las condiciones de uso y manejo de los suelos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Río Cuarto (subsidio 018/C146), por la Agencia Córdoba Ciencia (Res. 129/2001) y ANPCYT (PICTR N° 439/03).

BIBLIOGRAFÍA

- Annual Book of ASTM Standards. 1993. ASTM D 3385 - 88. Section 4 Construction. Volume 04.08: Soil and Rock, Dimension Stone; Geosynthetics. Pp. 452-458.
- Becker, AR; JI Ossana; MP Cantú & TB Musso. 2002. Erosión hídrica laminar en relación a la degradación de los suelos en el Suroeste de la provincia de Córdoba. Acta XVIII Cong. Arg. Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.
- Becker, AR. 2006. Evaluación del proceso de degradación de suelos por erosión hídrica en una subcuenca representativa de la región pedemontana del suroeste de la provincia de Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.

- Becker, AR; E Díaz; MP Cantú; C Meyers & C Cholaky. 2006. Aplicación del modelo WEPP en la predicción de erosión hídrica en el Suroeste de Córdoba, Argentina. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo CD 5 pp.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. Pp. 363-375. *In: A Klute (ed.)*. Methods of Soil Analysis. Part 1. Agronomy Monograph N° 9. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Blum, WEH & AA Santelises. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil functions. Pp. 535-542. *In: DJ Greenland & I Szboles (ed.)*. Soil Resilience and Sustainable Land use CAB Int., Wallingford, Oxon, UK.
- Brejda, JJ; TB Moorman; DL Karlen & TH Dao. 2000. Identification of regional Soil Quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124.
- Cantú, MP. 1998. Estudio Geocientífico para la Evaluación Ambiental y Ordenación Territorial de una Cuenca Pedomontana. Caso: Cuenca del Arroyo La Colacha, Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
- Cantú, MP; AR Becker; JC Bedano & HF Schiavo. 2001. Indicadores e Índices de degradación de suelos en la región central templada húmeda a subhúmeda de la República Argentina. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. CD. Trabajo VII-15, 4 pp.
- Cantú, MP; AR Becker; JC Bedano; TB Musso & HF Schiavo. 2002. Evaluación de la calidad ambiental y calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. CD. 6 pp.
- Cantú, MP; AR Becker & JC Bedano. 2003. Aplicación del modelo Presión Estado y Respuesta (PSR) para evaluar la calidad ambiental en la región central de Argentina. Medio Ambiente Siglo XXI (MAS XXI) CD. Editorial Feijóo. 8 pp.
- Cendrero, A & JR Díaz de Terán. 1987. The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. Pp. 149-181. *In: P Arndt & G Lüttig (eds.)*. Mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries. Ed. Schweizerbart Verlag, Stuttgart.
- Doran, JW & TB Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicsek & BA Stewart (eds.)*. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication N° 35. Wisconsin, USA.
- Doran, JW & TB Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. Pp. 25-37. *In: Methods for assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication N° 49, Wisconsin, USA.
- Doran, JW; M Sarrantonio & MA Liebig. 1996. Soil Health and sustainability. Pp.1-54. *In: LD Sparks (ed.)*. Advances in Agronomy, Vol 56. Academic Press Inc. San Diego CA.
- Doran, JW & M Safley. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. Pp. 1-28. *In: C Pankhurst; BM Doube & VVSR Gupta (eds.)*. Biological indicators of soil health. CAB International, Wallingford.
- Doran, JW & MR Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3-11.
- Gallopin, G. 1997. Indicators and their use :information for decision making. Part 1 Introduction. *In: B Moldan & S Billharz (eds.)*. Sustainability indicators. Wiley, Chichester-N. York.
- Gregorich, EG; MR Carter; DA Angers; CM Monreal & B Hellert. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soil. *Can. J. Soil Sci.* 74: 367-385.
- Jackson, ML. 1976. Análisis Químico de Suelos. Ed. Omega, Barcelona. 662 pp.
- Karlen, DL; MJ Mausbach; JW Doran; RC Cline; RF Harris & GE Schuman. 1996. Soil Quality; concept, rationale and Research Needs. *Soil Science Society of America*, Committee.
- Lilburne, I; G Sapling & L Schipper. 2004. Soil quality monitoring en New Zealand development of an interpretative framework. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104: 533-544.
- Moreno, IS. 2000. La materia orgánica y el uso de los suelos. Su impacto sobre propiedades físicas. Tesis Maestría en Ciencia del Suelo. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.
- Musso, TB; MP Cantú & AR Becker. 2006. Indicadores químicos de calidad de suelos. Un set mínimo para Haplodos de la cuenca del A° La Colacha. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo CD 5 pp.
- OECD. 1991. Environmental Indicators: A preliminary Set, OCDE, Paris.
- Personal Laboratorio Salinidad. 1982. Suelos Salinos y Sódicos. Ed. Limusa, Mexico. 172 pp.
- Pla Sentis, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Alcance. Revista Universidad Central de Venezuela. Maracay. 32 pp.
- Segnestam, L. 2002. Indicators of Environmental and Sustainable Development. Theories and Practical Experience, *Environmental Economic Series*, Paper N° 89, 61 pp. World Bank, Washington DC.
- Soil Survey Staff. 1993. Soil Survey Manual. Handbook 18. USDA. Washington DC. 437 pp.
- Soil Survey Staff. 2006. Key to Soil Taxonomy. USDA Tenth Edition. Washington DC. 341 pp.
- USDA-NRCS. 1999. Soil Quality Test Kit. SECTION II: Background & Interpretive Guide for Individual Tests. Washington DC: Soil Quality Institute.
- Vepraskas, MJ. 1994. Plant response mechanisms to soil compaction. Pp 263-287. *In: RE Wilkinson (ed.)*. Plant-environment interactions. Dekker Publ. Co., New York.
- Warkentin, BP. 1996. Overview of soil quality indicators. Pp. 1-13. *In: GM Cohen & HS Vanderpluym (eds.)*. Proc. Soil Quality Assessment for the Prairies, Agric. Canada, Edmonton.
- Whittaker, CW; MS Anderson & RF Reitemeier. 1959. Liming soils: An aid to better farming. USDA Farmers Bull. 2124. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.