

Evaluación del impacto del cambio de uso y manejo de la tierra mediante indicadores de calidad de suelo, Córdoba, Argentina

Evaluation of the impact of land use and management change by means of soil quality indicators, Córdoba, Argentina

CANTÚ, M. P.¹, BECKER, A. R. ¹, BEDANO, J. C. ¹, SCHIAVO, H. F. ¹ AND PARRA B. J.¹

(1) Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta 36 Km 601(X5804ZAB) Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Recibido: 17/9/2008

Revisado: 20/11/2008

Aceptado: 20/12/2008

Abstract

The objective of this work was to assess the impact of the land use and management change on soil quality, by means of resource state indicators in the southwest region of Córdoba province, Argentina. Sampling sites are representative of most common land uses and management in the region. Also reference sites, close to the natural condition, were analysed. Soil properties selected as indicators were Organic carbon (CO), pH, bulk density, mechanical resistance, infiltration rate, water stable aggregates and A layer depth. A soil quality index resulting from the average of the normalized variables was used to assess the impact. Maximum and minimum values for each variable were established in the bases of theoretical criteria and considering the values of the variables in the reference sites. Organic carbon, infiltration rate, water stable aggregates and A layer depth were the more significant indicators. Organic carbon showed an 80% lost respect to the reference conditions and was the indicator with more aggregation degree. Infiltration rate and water stable aggregates, both depending on organic carbon, showed a diminution near to 70% respect to the reference condition.

Key words: indicators, indices, use change, management change, soil quality

INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas generan impactos de diversa jerarquía y gravedad sobre los recursos naturales. Las actividades agropecuarias si bien no son totalmente excluyentes de otras actividades han provocado cambios sustanciales en los recursos naturales (biota, suelo, agua, atmósfera, paisaje) en algunos casos irreversibles e incompatibles con otras acciones humanas. Estas actividades tienen diferente presión sobre los recursos dependiendo de la forma de tenencia de la tierra, la densidad de unidades económicas y las tecnologías de uso y manejo. En los últimos años se han expandido tecnologías que comprenden importantes paquetes tecnológicos que incluyen semillas genéticamente mejoradas, transgénicos, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas y maquinaria agrícola de variado grado de sofisticación. Todo esto genera fuertes impactos sobre los recursos naturales limitando su uso, transformando las propiedades de los mismos, disminuyendo su calidad y a la larga su capacidad de producir.

En la región pampeana subhúmeda de Argentina los cambios de uso de la tierra se vienen produciendo, con distintos grados de intensidad, prácticamente desde la época de la colonización. Aunque desde fines del siglo XIX se aceleraron debido al desarrollo de grandes colonias agrícolas a medida que los ferrocarriles se expandían por toda la región. Esto marca un hito importante ya que de productores con grandes extensiones y producción eminentemente ganadera se pasa a producciones agroganaderas más pequeñas donde la agricultura paulatinamente ha ido ganando posiciones. Este cambio en la tenencia de la tierra es el primer cambio importante del siglo XX. A partir de la dé-

cada de 1950 con la agro-industrialización, que promueve el uso del tractor y de maquinarias agrícolas cada vez más tecnificadas (primer gran cambio tecnológico), sumada a una profundización de los cambios de tenencia de la tierra, la expansión de la agricultura ha sido cada vez más espectacular de manera tal que casi han desaparecido las áreas prístinas, quedando muy escasos relictos de vegetación natural.

Por otra parte, en la misma época se produce un cambio de los cultivos invernales (trigo y lino) a los cultivos de verano (maíz, girasol, sorgo, al que se suma posteriormente el maní). Los mejoramientos genéticos, el impulso al uso de fertilizantes y plaguicidas y por último el cambio al paquete tecnológico de la siembra directa y la soja transgénica han llevado al mayor grado de presión sobre los recursos naturales de la región, muy en especial el suelo, causando un impacto sobre éste y otros recursos como el agua, no teniéndose todavía una idea cabal del nivel del mismo. En los últimos años los elevados precios internacionales de la soja junto con el paquete tecnológico de menor costo han conducido a un proceso de monocultivo donde ya se registran potreros con más de 10 años de soja continuada a lo que se suma una reversión del proceso de tenencia de la tierra con un aumento de la concentración, disminuyendo el número de pequeños productores y aumentando considerablemente los medianos y grandes con un sistema de producción “sin agricultores”.

Una amplia gama de metodologías se están utilizando para evaluar el impacto de la actividad agropecuaria sobre los recursos naturales y muy especialmente el cambio de uso y manejo de la tierra y sus recursos. En Europa una de las problemáticas más importante del cambio de uso es el abandono

de tierras de cultivo debido a las políticas distributivas dentro de la comunidad. Por lo general esto conduce al avance de vegetación de baja calidad, la desprotección del recurso y el aumento de los riesgos de erosión hídrica e incendios o a la conversión de tierras de cultivo a pastizales (KOSMAS et al., 2000; ARCHER et al., 2002; BREUER et al., 2006). Actualmente el trabajo en la UE se orienta al análisis de distintos escenarios futuros realizando evaluaciones a través de indicadores indirectos, no asociados al recurso natural, como sociales, económicos o de políticas, o bien evaluaciones del impacto a partir de cambios globales en el ambiente como las emisiones de gases invernadero. Para ello se utilizan varios modelos casi todos basados en indicadores del estado de los recursos, indicadores de impacto e indicadores de presión de uso para evaluar el impacto del uso de la tierra y del cambio del uso (KLIJN et al., 2005; METZGER et al., 2006; WESTHOEK et al., 2006, entre otros). En el otro extremo tenemos evaluaciones de una o dos propiedades del suelo como el CO o alguna propiedad física frente al cambio de uso y manejo de la tierra (SCHNEIDER, 2007; HATI et al., 2007). Por otra parte, en distintas partes del mundo se han realizado trabajos que aplican la lista de atributos del suelo propuesta por DORAN & PARKIN (1994, 1996) para evaluar calidad de suelos como herramienta para investigar los cambios por el uso y manejo del mismo (LANCARE INSTITUTE, 2000; LIBURNE et al., 2004; SPARLING et al., 2004; MASTO et al., 2007) o que sólo aplican algún grupo de indicadores para evaluar el impacto del cambio de uso (ISMAN & WEIL, 2000; SZILASSI, et al., 2006; YEMEFACK et al., 2006). En la República China el cambio del uso de la tierra hacia distintos tipos de pro-

ducciones, en especial los cultivos de granos, han provocado efectos de degradación que generalmente han sido evaluados utilizando metodologías apoyadas en sistemas de información geográfica (GENXU et al., 2004; ZHAO et al., 2005; GUO et al., 2005), incluso realizando estudios de variabilidad espacial y temporal (SUN *et al.*, 2003).

La metodología de indicadores se desarrolló a partir de las propuestas de Río 92 teniendo como antecedente el set de indicadores ambientales desarrollado por la OECD (1991). Varios organismos internacionales han desarrollado programas donde se establecen listas de indicadores para evaluar la calidad ambiental, tales como, FAO, Banco Mundial, UNDP (UN Development Program), UNEP (UN Environmental Program). En la ciencia del suelo, BLUM & SANTELISES (1994) describen el concepto de sustentabilidad y resiliencia del suelo basado en las seis funciones ecológicas y humanas. Estos conceptos y los sugeridos por WARKETIN (1996) fueron las bases a partir de las cuales la SSSA (Soil Science Society of America) estableció el concepto de calidad del suelo (KARLEN et al., 1996) y DORAN & PARKIN (1994, 1996) y DORAN et al. (1996) establecieron las primeras listas de indicadores cuantitativos de calidad del suelo.

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) señala 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 usado por agencias gubernamentales y responsables del manejo de las tierras. Esto permitiría la evaluación y seguimiento en el tiempo del impacto del cambio de uso y manejo de la tierra y por la tendencia al monocultivo de soja.

El objetivo general de este trabajo fue evaluar el grado de impacto que los cambios del uso y manejo de la tierra, el proceso de agriculturización y los cambios en la tenencia de la tierra han provocado sobre el recurso suelo en el suroeste de la provincia de Córdoba aplicando una metodología de rápido diagnóstico, fácil repetición y sencilla comunicación basada en la utilización de indicadores locales.

MATERIAL 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 Ro-

deo 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 (1200 a 1800 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 muy joven y de bajo desarrollo con un solum de apenas 0,40 m (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 manejos agrícolas utilizados, 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 en cada sitio se efectuó en el año 2000. Se describieron los suelos

(SOIL SURVEY STAFF, 1993) y se tomaron muestras del horizonte superficial para evaluar las propiedades seleccionadas.

Análisis

Se evaluó el contenido de C orgánico 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, 1993) y la densidad aparente por el método del cilindro (BLAKE & HARTGE, 1986). El espesor del horizonte A fue valorado a campo (SOIL SURVEY STAFF, 1993).

Metodología de evaluación de calidad de suelos

La metodología desarrollada en este trabajo tiene su punto de apoyo en los conceptos desarrollados por GALLOPIN (1997); DORAN & PARKIN (1996); SEGNESTAM (2002), entre otros. Para ellos, 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.

Esta metodología 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). Para evaluar la calidad de los suelos, teniendo en cuenta que el número de indicadores debe ser mínimo, se eligieron las variables que para la cuenca y el tipo de suelo (Typic Hapludoll) cumplieron con los criterios que se consideran más relevantes: Carbono orgánico, pH, saturación en bases, agregados estables en agua, velocidad de infiltración, densidad aparente, espesor horizonte A.

Para ello se contó con la experiencia y conocimiento regional de los autores respecto a los suelos y a la utilización de indicadores (CANTÚ, 1998; CANTÚ *et al.*, 2001, 2002, 2003; BECKER, 2006).

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 cuan-

do 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. 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 1).

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

Tabla 1. Clases de calidad de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores máximos y mínimos para normalizar los indicadores fueron obtenidos con diferentes criterios. En 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 ve-

locidad 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 correspondió 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 correspondió al medido en promedio en los suelos de referencia, mientras que el mínimo se estableció como cero. En la Tabla 2 se presentan los indicadores con las unidades de medida y límites establecidos.

Indicador	Unidad de medida	I max Valor máximo	I min 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

Tabla 2. 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.

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 co-

respondió a la saturación de bases. El pH y la densidad aparente presentaron valores intermedios, y los restantes indicadores valores cercanos a 0,3.

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

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

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 del colóide orgánico 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 0,6. En la mayoría de los suelos de la subunidad existe una disminución de pH en el horizonte superficial respecto de 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 el indicador refleja que a pesar del uso del suelo y de los pH ligeramente ácidos al tratarse de suelos muy jóvenes, con baja evolución, desarrollados en materiales loésicos ricos en carbonatos de calcio se mantiene la saturación de bases muy alta. 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). La disminución 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). Lo expuesto evidencia la aptitud de los indicadores seleccionados para reflejar, en términos de calidad, los cambios en cada una de las propiedades.

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 afectan 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 utilizado para evaluar la calidad del suelo cumple con los crite-

rios más importantes requeridos para su uso como indicadores. Se trata de un número mínimo de variables, que integran información de otras variables asociadas, incorpora indicadores físicos, químicos y fisicoquímicos, y que en su mayoría son de fácil medición. En la construcción del set se consideraron las principales propiedades de los suelos del área para que los indicadores representen las condiciones locales. Es importante señalar que estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales sino que han sido elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio. Estos resultados representan una instantánea para la si-

tuación 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), la Agencia Córdoba Ciencia (Res. 129/2001) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (PICTR 03/439) de Argentina.

REFERENCIAS

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. (1993). ASTM D 3385 - 88. Section 4 Construction. 04.08: Soil and Rock, Dimension Stone; Geosynthetics. pp. 452-458.
- ARCHER, N., HESS, T. and QUINTON, J. (2002). The water balance of two semi-arid shrubs on abandoned land in South-Eastern Spain after cold season rainfall. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(5): 913-926.
- BECKER, A. R., OSSANA, J. I., CANTÚ, M. P. and MUSSO, T. B. (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, A. R. (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. 800 pp.
- BECKER, A. R., DÍAZ, E., CANTÚ, M. P., MEYERS, C. and CHOLAKY, C. (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, G. R. and HARTGE K. H. (1986). Bulk density. In: Klute A. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1*. Agronomy Monograph N° 9. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin, E.E.U.U. pp. 363-375.
- BLUM, W. E. H. and SANTELISES, A. A. (1994). A concept of sustainability and resilience based on soil functions. In: DJ Greenland and I Szboles (ed.). *Soil Resilience and Sustainable Land use*. CAB Int., Wallingford, Oxon, UK. pp. 535-542.
- BREJDA, J. J., MOORMAN, T. B., KARLEN, D. L. and DAO T. H. (2000). Identification of regional Soil Quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of American Journal*, 64:2115-2124.
- BREUER, L., HUISMAN, J. A., KELLER, T. and FREDE, H. G. (2006). Impact of

- a conversion from cropland to grassland on C and N storage and related soil properties: Analysis of a 60 year chronosequence. *Geoderma*, 133:6-18.
- CANTÚ, M. P. (1998). *Estudio Geocientífico para la Evaluación Ambiental y Ordenación Territorial de una Cuenca Pedemontana. Caso: Cuenca del Arroyo La Colacha, Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina. 376 pp.
- CANTÚ, M. P., BECKER, A. R., BEDANO, J. C. and SCHIAVO, H. F. (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, M. P., BECKER, A. R., BEDANO, J. C., MUSSO, T. B. and SCHIAVO, H.F. (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, M. P., BECKER, A. R. and BEDANO, J. C. (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. and DÍAZ DE TERÁN, J. R. (1987). The environmental map system of the University of Cantabria, Spain. In: Arndt, P. and Lüttig, G. (eds.). Mineral resources extraction, environmental protection and land-use planning in the industrial and developing countries. Ed. Schweizerbart Verlag, Stuttgart. pp: 149-181.
- DORAN, J. W. AND PARKIN, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In: JW Doran; DC Coleman; DF Bezdicek and BA Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Wisconsin, USA SSSA Special Publication 35: 3-21.
- DORAN, J. W. and PARKIN, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil Quality: a minimum data set. In: *Methods for assessing Soil Quality*, Wisconsin, USA. SSSA Special Publication 49: 25-37.
- DORAN, J. W., SARRANTONIO, M. and LIEBIG, M. A. (1996). Soil Health and sustainability. In: Sparks, L. D. (ed.). *Advances in Agronomy*, Academic Press Inc. San Diego CA. 56: 1-54.
- GALLOPIN, G. (1997). Indicators and their use: information for decision making. Part 1. Introduction. In: Moldan, B. and Billharz, S. (eds.). *Sustainability indicators*. Wiley, Chichester-N. York. 1-13.
- GENXU, W., HAIYAN, M., JU, Q. and JUAN, C. (2004). Impact of land use change on soil carbon, nitrogen and phosphorus and water pollution in arid region of northwest China. *Soil Use and Management* 20: 32-39.
- GREGORICH, E. G., CARTER, M. R., ANGERS, D. A., MONREAL, C. M. and ELLERT, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 74:367-385.
- GUO, X., WANG, J., XIE, J., HE, T., LIAN, G. and LV, C. (2005). Land degradation analysis based on the land use changes and land degradation evaluation in the Huan Beijing area. In: Ehlers M and Ulrich M, (eds) Proceedings of SPIE - Volume 5983 Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V, 6 pp.

- HATI, K. M., SWARUP, A., DWIVEDI, A. K., MISRA, A.K. and BANDYOPADHYAY, K.K. (2007). Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119 (1-2): 127-134.
- ISLAM, K.R. and WEIL, R.R. (2000). Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79:9-16.
- JACKSON, M.L. (1976). *Análisis Químico de Suelos*. Ed. Omega, Barcelona. 662 pp.
- KARLEN, D.L., MAUSBACH, M. J., DORAN, J. W., CLINE, R. C., HARRIS, R. F. and SCHUMAN, G. E. (1996). Soil Quality; concept, rationale and Research Needs. *Soil Science Society of America*, Committee.
- KLIJN, J. A., VULLINGS, L. A. E., VAN DEN BERG, M., VAN MEIJL, H., VAN LAMMEREN, R., VAN RHEENEN, T., VELDKAMP, A., VERBURG, P.H., WESTHOEK, H. and EICKHOUT, B. (2005). The EURURALIS study: Technical document. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1196, 215 pp. <http://www.eururalis.nl/background.htm>.
- LILBURNE, L., SPARLING, G. and SCHIPPER, L. (2004). Soil quality monitoring in New Zealand development of an interpretative framework. *Agric. Ecosyst. Environ.* 104:533-544.
- MORENO, I. S. (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. 150 pp.
- MUSSO, T. B., CANTÚ, M. P. and BECKER, A. R. (2006). Indicadores químicos de calidad de suelos. Un set mínimo para Hapludoles de la cuenca de 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, México. 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*, World Bank, Washington DC. Paper 89: 61 pp.
- SZILASSI, P., JORDAN, G., VON ROMPAEY, A. and CSILLAG, G. (2006). Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *Catena*. 68(2-3):96-108.
- 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, M. J. (1994). Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.E. (ed.). *Plant-environment interactions*. Dekker Publ. Co., New York. pp 263-287.

- WARKENTIN, B. P. (1996). Overview of soil quality indicators. In: Cohen, G. M. and Vanderpluym, H. S. (eds.). *Proc. Soil Quality Assessment for the Prairies*, Agric. Canada, Edmonton. 1-13 pp.
- WESTHOEK, H. J., VAN DEN BERG, M. and BAKKES, J. A. (2006). Scenario development to explore the future of Europe's rural areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114: 7–20.
- WHITTAKER, C. W., ANDERSON, M. S. and REITEMEIER, R. F. (1959). Liming soils: An aid to better farming. USDA *Farmers Bull.* 2124. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- YEMEFACK, M., JETTEN, V. G. and ROSSITER, D. G. (2006). Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil & Tillage Research*, 86:84-98.
- ZHAO, W. Z., XIAO, H. L., LIU, Z. M. and LI, J. (2005). Soil degradation and restoration as affected by land use change in the semiarid Bashang area northern China. *Catena*, 59:173-186.