



206

MEDIOAMBIENTE EN IBEROAMERICA
Visión desde la Física y la Química en los albores
del Siglo XXI

Juan F. GALLARDO LANCHO
Editor y coordinador

DIPUTACIÓN  DE BADAJOZ

Badajoz (España)
2006

CALIDAD DEL SUELO EN UNA TOPOSECUENCIA AFECTADA POR DEFORESTACIÓN EN ATÉCUARO (MICHOACÁN, MÉXICO)

Sara Covalada¹, Juan F. Gallardo¹, C. Prat² y Jorge D. Etchevers³

¹Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Aptado. 257, Salamanca 37071 (España). <jgallard@usal.es.>

²I.R.D./CENAPROS, Morelia 58090 (Michoacán, Mexico).

³Colegio de Postgraduado de Montecillo, Texcoco 56230 (Mexico). <jetchev@colpos.mx.>

Soil quality along a toposequence affected by deforestation in Atécuaro (Michoacán, México)

Abstract

Illegal pine-timber extraction provokes a progressive loss of vegetal cover and an increment of the risk of erosion; the consequence is a devaluation of soil quality. Along a forest topo-sequence over volcanic soils, several soil indicators related with the limitant factors of the system and soil functions were evaluated. COS, CEC, PSB, macroscopic organic matter, bulk density and soil hardness showed worse values in the more degraded points. Other properties, however (C/N, phosphate retention, NaF pH) were constant in all cases.

Key words: Forest soils, Deforestation, Soil functions, Soil-quality indicators, Mexico.

Palabras clave: Suelos forestales, Deforestación, Funciones del suelo, Indicadores de calidad del suelo, México.

Introducción.

El ser humano ha modificado la condición natural de los suelos para obtener productos más apreciados y en mayor cantidad; adicionalmente prácticas de manejo inadecuadas heredadas de generación en generación han contribuido a su degradación. La microcuenca de Atécuaro (Michoacán) es un ejemplo típico de lo anterior; el abandono de tierras de cultivo y la creciente extracción clandestina de madera han provocado una disminución de la cobertura vegetal y un aumento de la superficie del suelo afectada por fenómenos erosivos.

La «calidad del suelo» ha sido definida como «la capacidad que tiene éste para funcionar adecuadamente dentro de un ecosistema», es decir, proporcionar ciertos servicios a las plantas, los animales y el ambiente, de acuerdo a su uso específico o multifuncional (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Cada función del suelo es el resultado de la interacción de las propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales son susceptibles de ser empleadas como indicadores de calidad siempre que se puedan medir cualitativa o cuantitativamente y sean capaces de darnos una idea

sobre que tan adecuadamente funciona el suelo (S.Q.I., 1996). Doran *et al.* (1996) propusieron algunas condiciones que deben cumplir los indicadores de calidad de suelos; éstos deben describir los procesos de los ecosistemas, integrar propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del suelo ser accesibles a diferentes usuarios y aplicables en condiciones de campo variadas, ser sensibles a cambios de manejo y clima y, cuando sea posible, provenir de bases de datos existentes. En cuanto a las funciones del suelo se han identificado las siguientes (Singer y Ewing, 2000): 1) productividad y biodiversidad; 2) regulación de flujos de agua; 3) filtración y amortiguamiento; 4) ciclo de nutrientes; y 5) soporte estructural y resistencia a la degradación. El *Soil Quality Institute (USA)* clasifica los indicadores de calidad edáfica como (S.Q.I., 1996): a) visuales, b) físicos, c) químicos y d) biológicos. Para evaluar la calidad edáfica de una forma holística conviene emplear indicadores de todos los tipos.

Por otra parte, en los últimos años se han propuesto varios marcos metodológicos para evaluar la sostenibilidad de los ecosistemas. Masera *et al.* (1999) generaron el marco MESMIS (Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad), en el que se define un conjunto de atributos generales empleando una perspectiva sistémica. La novedad de este marco es que no se trabaja con una lista predeterminada de indicadores, sino que propone que aquellos seleccionados (incluyendo los edáficos) deben dar información tanto sobre los atributos de sostenibilidad como de los puntos críticos del sistema. Esto es, los indicadores se derivan de cada estudio en concreto y para cada sistema en particular, lo cual es una innovación importante respecto al enfoque tradicional.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad edáfica a lo largo de una toposecuencia sobre una zona forestal sometida a continua extracción de madera en la microcuenca de Atécuaro (Michoacán, México); con ese fin se estudiarán una serie de indicadores capaces de conjugar en su conjunto las dos visiones expuestas, es decir, los puntos críticos identificados en el sistema y la salud de las funciones del suelo.

Materiales y métodos.

Área de estudio.

La microcuenca de Atécuaro se sitúa al Sur de la cuenca de Cuitzeo, en el Estado de Michoacán (19°33'05" y 19°37'08" N y 101°09'00" y 101°15'07" W). Concretamente se seleccionaron siete puntos a lo largo de una toposecuencia en la parte SE de la microcuenca, que es la más degradada como consecuencia de la extracción de madera clandestina. La temperatura media anual es de 16,5 °C y la precipitación media anual es de 834 mm a⁻¹, concentrándose entre Junio y Septiembre. Los suelos que predominan en la microcuenca son los *Andosoles húmicos* y *Acrisoles órticos*.

Selección de indicadores de calidad edáfica.

Puntos críticos del sistema.- De acuerdo al proceso de selección de indicadores propuesto por Masera *et al.* (1999) éstos deben estar relacionados con un conjunto básico de atributos de sostenibilidad. Los atributos que están estrechamente relacionados con la calidad edáfica serían la productividad, estabilidad y resiliencia. En el caso de la toposecuencia muestreada en la microcuenca de Atécuaro los puntos críticos que podrían afectar al sistema se muestran en la Tabla 1.

Punto crítico	Indicador	Método de medida
Productividad		
Extracción de madera	Nivel de deforestación	Visual <i>in situ</i> ^a Densidad del arbolado en cada punto
Baja disponibilidad de P del suelo	pH NaF, pH H ₂ O, pH KCl, retención de fosfatos	Métodos descritos por van Réewijk (1999)
Estabilidad y residencia		
Riesgo de erosión por pérdida de cobertura vegetal	Presencia de áreas deforestadas, vías de saca, zonas de erosión.	Visual <i>in situ</i> ^b
a) 1: Nula o escasa (algunos tocones, sin ramas en el suelo); 2: Media (tocones y ramas en el suelo, algunas áreas taladas); y 3: Alta (tocones y ramas en el suelo, troncos partidos, muchas áreas taladas y pérdida del aspecto natural del bosque)		
b) 1: Deforestación nula o escasa, ausencia de vías de saca o zonas con signos de erosión; 2: Deforestación media, presencia de vías de saca y/o zonas de erosión de forma escasa; y 3: Deforestación alta, presencia de vías de saca y/o áreas erosionadas abundantes		

Tabla 1.- Indicadores de calidad del suelo en función de los atributos de sostenibilidad del sistema

Funciones del suelo.- Con el fin de conseguir información acerca de la salud de todas las funciones del suelo se seleccionaron una serie de indicadores propuestos previamente por otros autores, como Larson y Pierce (1994), Doran *et al.* (1996), Karlen *et al.* (2001); Astier *et al.* (2002) y Moffat (2003). Además, aunque no hayan sido empleados de forma común como indicadores de calidad se estudiará la saturación de bases (PSB) y la materia orgánica macroscópica (MOM) por su estrecha relación con las funciones del suelo. Estos indicadores permiten complementar la visión propuesta por Masera *et al.* (1999). La lista de indicadores seleccionados se presenta en la Tabla 2.

Muestreo de suelos y datos de campo.

Siguiendo un camino habitual de saca de madera se establecieron parcelas circulares de 20 m de diámetro a lo largo de una toposecuencia y distanciadas entre sí aproximadamente 1 km (Tabla 3). En cada parcela se tomaron dos muestras compuestas de suelo (de cinco submuestras) a la profundidad de 0-10 cm. Además, se determinó la densidad aparente (Da), la profundidad de la hojarasca (horizonte O), la resistencia a la penetración y la pendiente. Se anotó el número de árboles del género *Pinus* y especies latifoliadas (encinos). El nivel de deforestación y el riesgo de erosión se estimaron visualmente. Por último se ubicó geográficamente cada parcela y se anotó su altitud con un GPS.

ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.

Los análisis efectuados a las muestras de suelo fueron: C orgánico (COS) por combustión seca (TOCA); N total (Nt) semi-micro Kjeldahl; P extraíble Bray 1; CIC y bases intercambiables por el método del acetato de amonio 1 N pH 7,0 y la respiración del suelo según Isermeyer (1952) en Alef (1995). Los análisis relacionados con la retención aniónica fueron (van Reewijk, 1999): pH en H₂O (1:2,5), en KCl (1:2,5) y en NaF (1:50) y retención de fosfatos.

Análisis estadístico.

Se llevó a cabo un análisis de componentes principales (ACP) con el fin de conocer los puntos que presentan características más próximas entre sí.

Funciones del suelo	Indicadores		
	Químicos	Físicos	Biológicos
Biodiversidad y productividad	COS, C/N, pH en H ₂ O, P Bray y PSB ^a	Da.	MOM, profundidad del horizonte O.
Regulación de flujos de agua			COS
Filtración y amortiguamiento	pH, COS, C/N, P Bray, PSB y CIC ²		Profundidad del horizonte O, respiración del suelo.
Ciclo de nutrimentos			
Soporte estructural y resistencia a la degradación	COS	Da, resistencia a la penetración.	Profundidad del horizonte O.

COS: C orgánico del suelo; PSB: Porcentaje de saturación de bases; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; Da: Densidad aparente.

Tabla 2.- Indicadores de calidad del suelo en relación a las funciones del suelo y tipo de indicador

Puntos	Pendiente (%)	Altitud (m)	Vegetación		Tipo de suelo (WRB)	Actividad Antropozoogena
			Pináceas (%)	Encinos (%)		
P1	90	2603	8	92	Andosol	Punto más alejado de Atécuaro
P2	33	2570	14	86	Andosol	Actividad antropozoógena moderada
P3	41	2543	45	95	Andosol	Proximidad a una vaguada
P4	16	2496	20	80	Andosol	Actividad antropozoógena moderada
P5	14	2411	31	69	Andosol	Intensa actividad antropozoogena
P6	29	2370	3	97	Andosol	Zona que sufrió un incendio en 2001
P7	12	2320	13	87	Andosol	Zona cercana al pueblo de Atécuaro

Tabla 3.- Características de las parcelas muestreadas

Resultados y discusión.

Los resultados se muestran en la Tabla 4. Varios de los indicadores estudiados (COS, PSB y CIC) siguen una tendencia similar a lo largo de la toposecuencia, aumentando desde el P1 hasta el P3 o P4 donde encuentran los máximos, para luego caer a continuación. En P5 toman valores muy bajos (o mínimos) pero se recuperan en los puntos siguientes. La MOM tiene valores más altos en los cuatro primeros puntos, lo cual contrasta con los datos de los puntos finales (del P5 al P7). La relación C/N es bastante similar en todos los puntos, como también la retención de fosfatos (salvo en P4 donde baja un poco), el P asimilable y el pH en NaF (baja sólo en P3). Estos parámetros, relacionados con la presencia de Al y Fe activos (Gallardo y González, 1983), señalan la existencia de una limitación para la vegetación, debido al escaso P disponible para las plantas. La resistencia a la penetración y Da son más favorables en la primera parte de la toposecuencia, observándose el mínimo en el P4; pero a partir del P5 adquieren valores más altos, salvo en el P6, tal vez por el hecho de que, tras el incendio, la zona fue vallada y quedó restringido el acceso disminuyendo la compactación provocada por la actividad antropozógena.

El ACP efectuado (Figura 1) muestra que, en relación a las variables consideradas P1, P2 y P4, están próximos entre sí, al igual que P6 y P7. El P5, que presenta las peores características edáficas, está alejado del resto ocupando él solo un cuadrante. El P3 ocupa el cuadrante restante, sin que se pueda encontrar la causa en este avance.

Puntos críticos del sistema.

Extracción de madera. - Las densidades de arbolado encontradas van desde los 2101 pies ha⁻¹ de P4 a los 800 pies ha⁻¹ en P1. En relación con el uso actual del suelo de la microcuenca de Atécuaro (S.D.F.A., 1994), los puntos P2, P3 y P5 se localizan en una zona de bosque de pino-encino. Sin embargo, actualmente las densidades de especies del género *Pinus* son 6,2, 20,4 y 2,3 veces menores, respectivamente, que la densidad de encinos en estos puntos, lo que apunta una tendencia hacia un bosque de encino-pino, como consecuencia de la extracción de pináceas para el comercio local de madera. El grado de deforestación estimado visualmente indica que el punto más alejado (P1) es el que ha sufrido menos la extracción clandestina de madera. A partir del P2 los signos de esta actividad son evidentes a lo largo de la toposecuencia.

Indicadores	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Media	Ds
pH (1:2.5) H ₂ O	5,9	5,7	6,1	5,6	5,4	5,6	6,2	5,8	0,3
pH (1:2.5) KCl	5,0	4,8	5,2	4,9	4,6	4,8	5,2	4,9	0,2
pH (1:50) NaF	10,8	11,1	9,8	10,9	11,0	11,0	11,0	10,8	0,4
COS (mg/g)	92,9	133,8	155,0	160,0	64,3	72,2	95,1	110	39
Profundidad Horizonte O (cm)	5,0	5,5	2,5	5,0	5,5	1,0	3,8	4,0	1,7
C/N	21,4	22,5	22,0	24,6	25,7	22,6	20,8	23	1,7
CIC (cmol/kg)	40,3	46,8	63,6	52,9	23,9	30,0	37,1	42,1	14
PSB (%)	46,5	38,5	85,4	52,3	18,3	30,5	54,7	46,6	21
P Bray (mg/kg)	t	t	t	t	t	t	t	t	*
Densidad aparente (g/cm ³)	0,78	0,75	0,78	0,48	1,08	0,86	1,48	0,9	0,32
Respiración (mgCO ₂ /gsuelo y día)	0,40	0,62	0,53	0,55	0,43	0,22	0,20	0,37	0,2
Resistencia a la penetración (KPa)	528	822	616	530	1479	757	1301	862	381
Retención de fosfatos (%)	98,5	99,0	94,6	76,8	94,2	92,2	98,7	93,4	7,8
MOM (Mg/ha)	64,8	93,8	114	53,8	17,9	26,2	16,1	55,2	38
Densidad arbolado (pies/ha)	800	923	1369	2101	828	987	1432	1206	468
Densidad encinos (pies/ha)	700	796	1305	1687	573	955	1241	1037	394
Densidad pinos (pies/ha)	64	127	64	414	255	32	191	164	136
Grado de deforestación	1	2	2	2	3	2	3	2,3	0,7
Riesgo de erosión	1	2	2	2	3	3	3	2,4	0,7

Tabla 4.- Medias de los parámetros seleccionados a lo largo de la toposecuencia

Riesgo de erosión.- El riesgo de erosión está muy relacionado con el mantenimiento de la cobertura vegetal. Las zonas de bosque denso presentan una erosión mínima, mientras que las zonas de cultivo y pastizales concentran las mayores áreas erosionadas. La extracción clandestina de madera disminuye paulatinamente la cobertura vegetal y provoca la apertura de trochas de manera no controlada y constituye, por tanto, un fuerte impacto ambiental. El área menos degradada es, de nuevo, la más alejada de las zonas habitadas aunque la presencia de áreas deforestadas y consecuente apertura de vías de saca, señalan el riesgo de erosión presente en toda la zona.

Baja disponibilidad de P del suelo.- El rango de pH en H₂O va de 5,4 a 6,2. El pH en KCl, por su parte, varía entre 4,4 y 5,2. Estos valores indican que se trata de suelos con presencia de alofanos y ricos en humus en su mayoría, según Nanzzyo *et al.* (1993a). La capacidad de absorción aniónica se refleja en los resultados de pH en NaF, que presenta un mínimo de 9,8 en P3; en el resto de los puntos los valores están entorno a 11,0. La retención de fosfatos se eleva hasta el 99 % en P1 y P2; tan sólo baja del 90 % en P4, lo que significa que la disponibilidad de P está muy limitada para las plantas (trazas de P asimilable). La responsable de estos valores es la acumulación de Al y Fe activos que es una de las características más importantes de los suelos ándicos.

Funciones del suelo.

Biodiversidad y productividad.- El pH en H₂O presenta valores ácidos, aunque sólo en P5 (5,4) baja de 5,5. En P5 se obtiene el mínimo valor de PSB (18,3 %). La

relación C/N media es bastante alta (23), lo que indica una mineralización lenta de la MOS, tal como pone de manifiesto la presencia de un horizonte O en todos los puntos, con una profundidad de alrededor de 4 cm, salvo en el P6 (zona quemada en el año 2001) que tiene tan sólo 1 cm. La MOM alcanza valores altos principalmente en P1 (64,8 Mg ha⁻¹), P2 (93,8 Mg ha⁻¹), P3 (114 Mg ha⁻¹) y P4 (53,8 Mg ha⁻¹). Los más altos contenidos de COS encontrados fueron P2 (134 mg g⁻¹), P3 (155 mg g⁻¹) y P4 (160 mg g⁻¹) lo que hace pensar que existe en ellos un adecuado suministro de energía y nutrientes a la microbiología y a las plantas.

Regulación de flujos de agua.- La Da fue inferior a 0,9 g cm⁻³ (denota las características ándicas de los suelos) en la mayoría de los puntos, salvo en P5 (1,08 g cm⁻³) y P7 (1,48 g cm⁻³); el dato más bajo encontrado fue en P4 (0,48 g cm⁻³). La Da informa sobre la compactación edáfica y sobre la circulación del agua, en el sentido que valores bajos ocasionan propiedades edáficas más favorables. La MOS es también capaz de retener humedad per se y, de igual forma, a mayor cantidad de MOS más eficiente será la retención de humedad.

Filtración y poder de amortiguación.- La emisión de CO₂ del suelo (respiración) dio un valor medio de 0,37 mg CO₂ g⁻¹ suelo d⁻¹, siendo P2 y P7 (0,62 y 0,20 mg CO₂ g⁻¹ suelo d⁻¹) el punto con mayor y con menor actividad. La presencia de horizonte O indica que la velocidad de mineralización se encuentra ralentizada. A la vez, el horizonte Q frena el impacto de la lluvia, pudiendo favorecer la entrada de agua gradualmente al horizonte húmico y disminuyendo las pérdidas por escorrentía.

Ciclo de nutrientes.- La CIC media fue 42,1 cmol kg⁻¹, disminuyendo a 23,9 cmol kg⁻¹ en P5, tal vez por la mayor actividad deforestadora en el área. La apertura de vías de saca de forma indiscriminada provoca compactación y remoción del horizonte O, lo cual impide la incorporación de nutrientes al suelo, incidiendo negativamente ambas causas sobre el ciclo nutricional. El PSB sólo superó el 50 % en P3 (85,4 %), P4 (52,3 %) y P7 (54,7 %) y el P extraíble Bray, como ya se ha indicado, se encuentra a niveles de trazas en todos los casos. Los aportes al compartimento de MOS proceden del material residual (no mineralizado) del horizonte O más los residuos de raíces (vía subterránea) de las plantas. Posteriormente, los nutrientes se liberan lentamente (dada la alta razón C/N) por los microorganismos edáficos responsables de la transformación de las formas orgánicas a formas minerales (asimilables para las plantas).

Soporte estructural y resistencia a la degradación física.- En toda el área de estudio, el suelo se encuentra protegido contra la degradación erosiva por la capa continua de hojarasca y por los relativos altos contenidos de MOS que contribuyen a la formación y estructuración de agregados. La resistencia a la penetración, relacionada con la facilidad de enraizamiento y el grado de compactación, tuvo un valor medio de 884 kPa, siendo P5 el punto más compactado y, por ello, más resistente a la penetración (1479 kPa); también el P7 (1301 kPa) presentó una alta resistencia. Considerando que, según Collazo (2004), el umbral de 2000 kPa supone una restricción severa para desarrollo radicular, se observa que en ningún caso se alcanza dicho umbral.

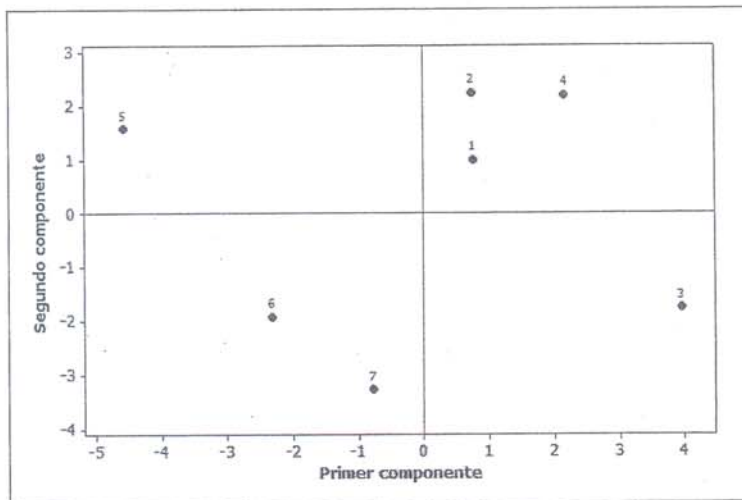


Figura 1.- Agrupación de los puntos de la toposecuencia mediante ACP

Conclusiones.

Algunos de los indicadores estudiados (COS, PSB, CIC, MOM, Da y resistencia a la penetración) establecieron diferencias a lo largo de la toposecuencia. Sin embargo, otras propiedades (C/N, retención de fosfatos, P extraíble Bray y pH en NaF) mantuvieron valores más o menos constantes en todos los puntos, lo que indica la existencia de características inherentes comunes a los suelos del área.

Los primeros puntos de la toposecuencia y, a su vez, los más alejados del pueblo de Atécuaro, son los que presentan un suelo con mejor salud siendo su nivel de deforestación poco acusado todavía. En los puntos más bajos, la extracción selectiva de madera hacia el género *Pinus* es más acusada lo que ha provocado una devaluación de las características edáficas evaluadas. Estos resultados son confirmados por el análisis de ACP efectuado.

Agradecimientos.

Los autores agradecen a la UE la financiación de esta investigación que se deriva del Proyecto *REVOLSO*/(Programa INCO ICA4-CT-2001-10052); de igual forma se agradece al señor Felix, Lenin y Miguel de CENAPROS-CONACYT su colaboración en los muestreos y trabajo de campo.

Bibliografía:

- Astier, M., M. Maass, J.D. Etchevers. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sostenible. *Agrociencia*, 36:605-620.
- Collazo, J. 2004. La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En: R.R. Filgueira y F.G. Micucci (eds.). *Métodos físicos para la investigación del suelo: Penetrometría e infiltrometría*. Ed. Universidad de La Plata, Buenos Aires. pp: 43-53.
- Doran, J. W. y T. B. Parkin. 1994. Defining and Assesing Soil Quality. En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B. A. Stewart (eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Spec. Pub. N° 35. ASA y SSSA, Madison, USA.
- Doran, J.W., M. Sarrantonio, M.A. Liebig. 1996. Soil Health and Sustainability. *Advances in Agronomy*, 56:1-54.
- Gallardo, J.F. y M.I. González. 1983. Suelos forestales de El Rebollar (Salamanca): y III. Nuevas aportaciones. *Anu. Cent. Edafol. Biol. Apl. Salamanca*. 9: 223-232.
- Isermeyer, 1952. En: Alef, K. Y P. Nannipieri. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. Londres. pp: 214-270
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am.* 61:4-10.
- Karlen, D.L., S.S. Andrews y J.W. Doran. 2001. Soil Quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, 74:1-40.
- Larson, W.E. y J.F. Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. En: *Defining soil quality for a sustainable environment*; Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (eds.), *Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 35*, Madison, USA. pp: 37-51.
- Masera, O., M. Astier y S. López. 1999. *Sostenibilidad y Manejo de Recursos Naturales, El marco de Evaluación Mesmis*. Mundi-Prensa, México D.F.
- Moffat, A.J. 2003. Indicators of soil quality for UK forestry. *Forestry*, 76: 547-568.
- Nanzyo, M., R. Dahlgren y S. Shoji. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. En: Shoji, S., M. Nanzyo, R. Dahlgren (eds.). *Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization*. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam. pp: 145-187.
- S.D.F.A.. 1994. Carta de uso actual del suelo E14A23. Escala 1:50000. INEGI, México.

Singer, M. J., y S. Ewin. 2000. Soil Quality. En: Sumner (ed.). Handbook of Soil Science. CRC Press. Boca Raton, Florida. pp: G271-G298.

S.Q.I. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute. Agricultural Research Service. Washinton D.C., *USA*.

Van Reewijk, L.P. (ed). 1999. Procedures for soil analysis. Technical paper n° 9. International Soil Reference and Information Center. Wageningen, Holanda.