

Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores

Soil quality evaluation: generation and interpretation of indicators

Ximena Castillo-Valdez¹ , J. D. Etchevers^{1‡} ,
Claudia Ma. I. Hidalgo-Moreno¹  y Arturo Aguirre-Gómez² 

¹ Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡]Autor para correspondencia (jetchv@colpos.mx)

² Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM. A Teoloyucan km 2.5, San Sebastian Xhala. 54714 Cuautitlán Izcalli, México.

RESUMEN

Las prácticas de manejo del suelo alteran sus propiedades, especialmente cuando las entradas de energía al sistema suelo-planta son menores que las salidas, o su resiliencia es incapaz de regresarlo al estado previo a la intervención. Cuando las alteraciones se acercan a los límites de tolerancia del sistema suelo aparecen factores que limitan la producción. Los cambios se pueden establecer mediante indicadores e índices de calidad. Éstos muestran la dirección del cambio con el tiempo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad de suelo actual en cuatro ejidos agrícolas de Tepeaca, Puebla, México, que tienen siglos de dedicación a la producción agrícola. Se investigó su historia, los patrones de cultivo más comunes y las clases de tierra dominantes, definidas con la participación de los productores locales. Se analizaron propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos sometidos a diferentes manejos y se definieron los indicadores de calidad. Los criterios de selección para los sitios de muestreo, fueron los patrones de cultivo más frecuentes: (i) flor de corte, (ii) hortalizas continuas, y (iii) hortalizas con descanso durante temporada de ausencia de lluvias. Como referencia se tuvo los mismos suelos, pero sin manejo. Las propiedades seleccionadas como indicadores fueron pH, conductividad eléctrica materia orgánica del suelo, estabilidad de agregados en húmedo, fósforo extraíble Olsen, hierro extraíble con DTPA, densidad de lombrices. Las cuatro primeras fueron sensibles

para diferenciar entre suelos sin alterar (no cultivados) y los suelos cultivados. Las cuatro últimas fueron escogidas por mostrar tasas de cambio en función de los patrones de cultivo, lo que indica la necesidad de promover estrategias de manejo agronómico. Con ellas se construyó un índice de calidad de suelo que permite establecer la dirección del cambio que experimentará la calidad del suelo al modificar uno o más indicadores.

Palabras clave: *análisis de componentes principales, conjunto de datos mínimos, manejo de agroecosistemas.*

SUMMARY

Soil management practices alter its properties, especially when the energy inputs to the soil-plant system are less than the outputs, or its resilience is unable to return it to the state prior to the intervention. When the disturbances approach the tolerance limits of the soil system, factors that limit production appear. Changes can be established using quality indicators and indices. These show the direction of change over time. The objective of this work was to evaluate the current soil quality in four agricultural ejidos of Tepeaca, Puebla, Mexico, which have centuries of dedication to agricultural production. The history, the most common cropping patterns and the dominant land classes, defined with the participation of local producers, were investigated. Physical, chemical and biological properties of soils subjected to different management were analyzed and quality indicators were defined.

Cita recomendada:

Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. Ma. I. y Aguirre-Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. e698. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>

Recibido: 29 de noviembre de 2019. Aceptado: 11 de agosto de 2020.
Artículo. Volumen 39, enero de 2021.

The selection criteria for the sampling sites were the most frequent cultivation patterns as follows: (i) cut flower, (ii) continuous vegetables, and (iii) vegetables with resting period during the season with no rain. The same soils were used without management as reference. The properties selected as indicators were the following: pH, electrical conductivity, soil organic matter, wet aggregate stability, Olsen extractable phosphorus, DTPA extractable iron, and earthworm density. The first four were sensitive to differentiate between undisturbed (uncultivated) soils from cultivated soils. The last four were selected by showing rates of change according to cropping patterns, which indicates the need to promote agronomic management strategies. With these properties, a soil quality index was built that allows to establish the direction of change that soil quality will experience when modifying one or more indicators.

Index words: *principal component analysis, minimum data set, agroecosystem management.*

INTRODUCCIÓN

En las zonas agrícola de Tepeaca, Puebla, México, se producen diversas especies de hortalizas y ornamentales con riego. Estos sitios de cultivo están constituidos por unidades de producción menores a 5 ha, que se caracterizan por una producción de hortalizas y ornamentales con rendimientos menores a los promedios nacionales, por recibir escasa asistencia técnica, escasez de créditos e ingresos pluriactivos, que complementan los ingresos por la producción, según lo muestran los trabajos y encuestas realizados por los autores, en las comunidades de interés para este estudio. Las prácticas de manejo que realizan los productores a sus parcelas pueden alterar las propiedades del suelo, sobre todo si las energías asociadas a las entradas (labranza, riego, fertilización química, etc.) y las salidas de ésta en forma de productos, no son equilibradas. Cuando los cambios se acercan a los límites de tolerancia del sistema suelo (pérdida de la estructura física, materia orgánica, nutrientes y cualquiera otra salida no compensada) se convertirán en un factor limitante para la producción y otras funciones del suelo (Arshad y Coen, 1992; Astier *et al.*, 2002; Bautista *et al.*, 2004).

Para analizar el efecto de las prácticas de manejo del suelo en un sistema de producción, se puede valorar

cómo éstas alteran la funcionalidad del mismo. En los últimos años se han desarrollado diferentes ideas y métodos para la evaluar integralmente a los suelos, siendo los indicadores de calidad los usados con mayor frecuencia. La calidad de suelo incluye tanto su multifuncionalidad como las interacciones con los seres humanos y su sostenibilidad (Carter *et al.*, 1997). Estos autores definen la calidad del suelo como: la capacidad para funcionar. Una versión ampliada de este concepto propuesta por Karlen *et al.* (1997) señala que calidad es “la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o gestionados, para mantener la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, y respaldar la salud humana y el hábitat”. Más recientemente se propuso el término multifuncionalidad del suelo, que no sólo abarca las relaciones de producción, sino otras funciones que cumple el sistema suelo, tales como la regulación del ciclo hidrológico, contribución a la captura de carbono, mantenimiento de la biodiversidad, entre otras (Baveye *et al.*, 2016). Como consecuencia de la multifuncionalidad, los indicadores tienen que relacionarse con la función principal que desempeña, en nuestro caso con el sistema de producción de cultivos.

Existe gran variedad de propiedades del suelo que se han utilizado como indicadores. Así Larson y Pierce (1991; 1994) propusieron un conjunto mínimo de propiedades de éste (MDS por sus siglas en inglés Minimum Data Set) para usarse como indicadores. Dichos indicadores permiten evaluar los cambios que ocurren en el suelo, conforme transcurre el tiempo. Estos últimos autores consideraron variables edáficas que experimentan cambios como consecuencia de la actividad agrícola.

La selección de un MDS puede hacerse a juicio de expertos o mediante el uso de técnicas multivariadas como el análisis de componentes principales (ACP) (Bünemann *et al.*, 2018). Los indicadores pueden variar, en disponibilidad y funcionalidad, o entre localidades, dependiendo del tipo y uso del suelo o en función y factores de su formación (Arshad y Coen, 1992). También pueden hacerlo con el objetivo de evaluación. El uso de un MDS permite obtener información a menor costo y tiempo, en contraste con el análisis de grandes bases de datos, no siempre disponibles.

Doran y Parkin (1994) señalan que los indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones:

(a) describir los procesos del ecosistema; (b) integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; (c) reflejar los atributos de sostenibilidad; (d) ser sensitivos a variaciones de clima y manejo; (e) ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo; (f) ser reproducibles; (g) ser fáciles de entender; (h) ser sensitivos a los cambios de uso del suelo por acción antropogénica; y cuando sea posible, ser componentes de una base de datos ya existente.

Para evaluar la calidad del suelo se requiere tener esquemas de interpretación claros según Bünemann *et al.* (2018). Por ejemplo, para generar índices que resultaran apropiados para definir el estado de la fertilidad de los suelos de la Mixteca Alta de Oaxaca, México y evidenciar su degradación, después de muchos años de haber desforestado un bosque y sometido el suelo a intensa explotación agrícola, Estrada *et al.* (2017) emplearon el porcentaje de materia orgánica, P-Olsen, K y Mg intercambiables, para ese propósito. Así mismo, bajo este concepto de calidad de suelo se han realizado en México diferentes estudios (Astier *et al.*, 2002; Bautista *et al.*, 2004; Vergara, 2003¹) que en algunos casos han integrado apreciaciones cualitativas de los productores (color, olor, facilidad de trabajo, etc.) para generar índices de calidad de suelo y desarrollar estrategias locales para la conservación de este recurso. Un ejemplo de ello es la implementación de sistemas de terraza para el establecimiento de cultivos de frutales asociados con cultivos anuales y la conservación del suelo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad de suelo en cuatro ejidos agrícolas de Tepeaca, Puebla, México, mediante el uso de indicadores físicos, químicos, y biológicos en sistemas de producción de ciertos patrones de cultivo y clases de tierra campesina, definidos por los propios productores, para gestionar el recurso suelo de una manera sostenible. La generación y posterior monitoreo de los indicadores e índices de calidad de suelo en una escala simplificada, como la que se propone en el presente trabajo, facilitará a los campesinos y tomadores de decisiones, la evaluación del estado actual de los suelos y su tendencia al cambio. Dichos indicadores pueden ayudar a generar estrategias que mejoren la gestión del suelo a partir del monitoreo en los cambios de la calidad de éste.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en cuatro ejidos contiguos ubicados al sur del municipio de Tepeaca, Puebla, México: Candelaria Purificación, San Nicolás Zotapetlayoca, San Hipólito Xochiltlenango y Santa María Oxtotipan (de aquí en adelante Candelaria, San Nicolás, San Hipólito y Santa María).

Los ejidos se ubican en torno a las coordenadas 18° 56' 28.92" N y 97° 52' 03.23" O en un radio aproximado de 3.4 km, con límites que no se ajustan a coordenadas precisas, y altitud promedio de 2150 m. El clima de la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media Cw, con temperatura media anual de 15.5 °C y precipitación media anual de 747 mm (INEGI, 2000). De acuerdo con el INEGI (2011), en su versión más reciente serie II de suelos, las unidades que dominan en esta zona son Chernozem y Calcisol.

En el área de estudio se siembran más de 30 cultivos, principalmente flores [alstromelia (*Alstromelia* sp.), cenpasuchil (*Tagetes erecta* L.)] y hortalizas [lechuga (*Lactuca sativa*), brócoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*), col (*Brassica oleracea* var. *Capitata*), rábano (*Rafanus sativus*)], que presentan demandas de insumos y agua particulares. La mayoría son cultivos de riego, pero en ciertas épocas del año se manejan como cultivos de temporal. Los cultivos son producidos de manera familiar, en pequeñas unidades de producción pluriactivas menores a 5 hectáreas. Las encuestas aplicadas indican que los campesinos trabajan sin créditos y sin asistencia técnica, que poseen 16 pozos para riego; sin embargo, son insuficientes para cubrir la demanda de agua. Por ello en el ejido de Candelaria, complementan el riego con las aguas residuales urbanas provenientes de Tepeaca Puebla, desde hace aproximadamente 20 años. En los ejidos de San Hipólito y San Nicolás ocasionalmente ocupan aguas provenientes de la Barranca del Águila en temporada de seca.

Con base en las diferentes formas en que los productores trabajan la diversidad de cultivos hortícolas y florícolas se han distinguido tres patrones: (i) flor de corte (FC), (ii) hortalizas de ciclos continuos, (HC) y (iii) hortalizas con descanso en temporada de secas (HDTs). La descripción de las especies, superficie

¹ Vergara-Sánchez, Miguel Ángel. 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad de suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis de Doctorado, Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de México, México.

promedio, época de cultivo y tecnologías empleadas se describe en Castillo-Valdez (2019²). Las clases de tierras en estos ejidos, definidas por los propios productores, son: (1) Oscuros, (2) Nextlales y (3) Arenosos-Fuertes. La agrupación y clasificación de tierras campesinas de estos ejidos se describe en detalle en Castillo-Valdez (2019²). La clasificación de tierras campesinas se hizo con la metodología descrita por Ortiz *et al.* (1990) y la definición de patrones de cultivos se realizó en talleres participativos con la comunidad de productores.

La clasificación de tierras campesinas y los patrones de cultivo fue la base del muestreo de suelo. Se seleccionaron 74 parcelas distribuidas en los cuatro ejidos de estudio. El número de muestras por patrón de cultivo fue: 36 parcelas FC, 29 parcelas HC y 9 parcelas HDTS. El número de observaciones fue proporcional a la presencia relativa de los diferentes patrones de cultivo. Adicionalmente se tomaron tres muestras de suelo en áreas aledañas que correspondían a zonas sin explotación (divisiones de terreno) ni uso agrícola (SnA), que se usaron como referencias.

Se realizaron dos muestreos: el primero del 27 de julio al 18 de agosto del 2018, para medir propiedades químicas y, el segundo, del 5 al 8 de febrero de 2019 para el estudio de propiedades físicas.

En el primero de ellos se recolectaron muestras compuestas de aproximadamente 20 muestras simples por parcela en el incremento de profundidad de 0 a 20 cm, con una barrena de fertilidad de 2.5 cm de diámetro. El muestreo en cada parcela fue totalmente al azar. Las muestras compuestas se homogeneizaron en botes de plástico y una submuestra de aproximadamente 500 g se envió al laboratorio para análisis. El suelo se secó al aire a temperatura ambiente y se tamizó con malla de 2 mm. En la segunda fecha indicada se recolectaron muestras (de 0 a 20 cm) en cuatro puntos de cada parcela y se colocaron en pequeñas cajas individuales para evitar que los agregados se alteraran durante el transporte. Los sitios de muestreo en ambos casos fueron georreferenciados.

Para seleccionar las propiedades que pudieran servir como indicadores de calidad, se tomó en cuenta su relevancia para las funciones y procesos que ocurren en el suelo de interés, la practicidad y simplicidad para ser medidas y la facilidad de interpretación con base en la disponibilidad de datos de referencia. Se midieron

trece propiedades del suelo: 10 químicas, dos físicas y una biológica adicional.

Las propiedades químicas evaluadas fueron: (i) pH, medido con un potenciómetro, en una relación suelo:agua 1:2; (ii) conductividad eléctrica ($CE_{1:5}$), determinada en una relación suelo:agua 1:5 (la CE equivalente a la que se obtendría en el extracto de saturación (CE_{es}), se estimó multiplicando la $CE_{1:5}$ por 6 y 8 veces la $CE_{1:5}$) (J. D. Etchevers. Comunicación personal, 2019); (iii) materia orgánica del suelo (MOS) que se obtuvo con el método de digestión húmeda propuesto por Walkley y Black (Jackson, 1976); (iv) nitrógeno Kjeldahl empleando una técnica semimicro; con los datos de las dos determinaciones previas se calculó la relación carbono:nitrógeno (C:N); (v) fósforo extractable Olsen (Olsen y Sommers, 1982); (vi) hierro, (vii) cobre, (viii) manganeso y (ix) zinc, que se solubilizaron con DTPA (Lindsay y Norvell, 1978). Por último, se midió el porcentaje de carbonatos con el método de neutralización ácida (Richards, 1954) como una propiedad inherente del suelo que ayude a entender las limitaciones en la variación de otras propiedades como pH y microelementos. Las propiedades físicas evaluadas fueron: (i) densidad aparente por el método del terrón con parafina (SEMARNAT, 2002) y (ii) estabilidad de agregados en húmedo (Beare, 1993). La única propiedad biológica evaluada fue la densidad de lombrices por metro cuadrado en muestras de tres áreas elegidas al azar en cada parcela (cuadro muestreador de 30 × 30 cm). Se vertió en la superficie del suelo una solución de 10 g de mostaza por litro de agua y se contabilizó el número de lombrices (USDA, 2001).

El total de datos se redujo a un conjunto mínimo de datos (MDS). El procedimiento empleado para seleccionar el MDS, fue similar al descrito por Andrews y Carroll (2001). Se empleó un análisis de componentes principales (ACP), con base en la función "prcomp" de R statistic (R core team, 2019). Se asumió que los componentes principales que reciben eigenvalores altos y variables con altas cargas de factor, representan mejor los atributos del sistema, por lo que se examinó solo los componentes principales que tenían un eigenvalor ≥ 1 (Brejda *et al.*, 2000). Dentro de cada componente principal (CP) solo se consideró para el MDS las variables altamente ponderadas, es decir, que su contribución al componente fuese mayor

² Castillo-Valdez, X. 2019. Indicadores de calidad de suelo en sistemas agrícolas de Tepeaca, Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.

a la esperada y la contribución esperada fue $1/(\text{número de variables})$, esto es $1/12 = 0.083$. El porcentaje de carbonatos no se consideró para este análisis debido a que es una propiedad inherente y no dinámica. Así mismo, para reducir la redundancia y descartar agrupaciones espurias entre las variables altamente ponderadas de cada CP, se utilizaron los coeficientes de correlación, calculados con la función “cor” de R statistic (R Core Team, 2019). Las variables con coeficiente de correlación (>0.70), se consideraron redundantes y candidatas para su eliminación del MDS. También se decidió mantener en el MDS, al menos una propiedad física y una biológica.

Una vez elegidas las variables que se incluyeron en el MDS, se transformó o estandarizó cada una de ellas a un valor entre 0 y 1 mediante funciones de puntuación, esto es similar al método recomendado por Seybold *et al.* (1998), el cual se plasma con una función de puntuación no lineal para cada variable. El eje “y” varía de 0 a 1, donde $y = 1$ es el estado óptimo, y el eje “x” representa un rango de puntajes dependientes del sitio para esa variable. La forma de la función depende del indicador. Puede ser una curva con una asíntota superior, una asíntota inferior o variar en forma de campana. Por ejemplo: al P- Olsen del suelo se le asignó intervalos con una función de curva de campana (Moebius *et al.*, 2016), debido a que se

consideran dos valores críticos para este indicador en el eje “x”. De tal forma que el estado de los índices se puede simplificar al definir valores óptimos específicos para cada indicador, con base en valores de referencia, y así establecer intervalos óptimos específicos para el área de estudio. Esta asignación de valores óptimos supone juicios de valor, se busca que los valores óptimos considerados, sean similares con los valores críticos para el desarrollo de los cultivos de la zona, así como valores críticos considerados dañinos para el medio ambiente (Andrews y Carroll, 2001). Una vez transformadas las variables del MDS en puntajes para cada observación, se integraron en un indicador de calidad de suelo (ICS) acumulativo donde los puntajes más altos significan una mayor calidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Químicas, Físicas y Biológicas

Los valores medios y las desviaciones estándar de las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos estudiados, por patrón de cultivo y tipo de suelo se presentan en los Cuadros 1 y 2.

El pH de los suelos se ubicó en el intervalo 7.3 y 9; 46% se clasificaron como medianamente alcalinos (pH 7.4 a 8.4) y 54% altamente alcalinos (pH > 8.5)

Cuadro 1. Los valores promedios y desviaciones estándar de las propiedades químicas de los suelos analizadas, por patrón de cultivo y tipo de suelo.

Table 1. The average values and standard deviations of the chemical properties of the analyzed soils by crop pattern and soil type.

Tipo de suelo y patrón de cultivo [‡]	pH 1:2	CE 1:5 dS m ⁻¹	MO - - - - % - - - -	N-Total	P Olsen	Fe	Cu	Zn	Mn
							mg kg ⁻¹		
Nextl-SnA	8.43±0.5	0.1±0.03	2.33±1.8	0.13±0.09	4.00±1.73	4.26±2.9	0.55±0.4	0.37±0.04	4.19±3.3
Aren-FC	8.46±0.3	0.31±0.06	2.11±0.6	0.11±0.04	68.66±49	3.92±1.4	1.26±0.4	2.67±2	2.44±0.8
Aren-HDTS	8.56±0.2	0.27±0.06	1.76±0.3	0.09±0.03	26.03±27	3.43±0.8	1.05±0.3	1.76±0.8	2.54±0.3
Aren-HC	8.37±0.5	0.3±0.05	1.77±0.3	0.15±0.2	36.75±21	2.99±0.6	1.06±0.2	1.20±0.6	2.83±0.8
Obs-FC	8.24±0.3	0.32±0.04	1.73±0.2	0.10±0.01	25.49±24	3.35±0.6	1.33±0.3	1.23±0.7	3.27±0.9
Obs-HC	8.39±0.2	0.29±0.03	1.73±0.3	0.10±0.01	37.85±28	2.90±0.5	1.79±0.5	1.33±0.6	3.20±0.6
General	8.43±0.3	0.29±0.07	1.93±0.6	0.12±0.09	46.91±40	3.50±1.2	1.26±0.5	1.87±1.6	2.78±1

[‡] Nextl-SnA = suelo tipo nextlale y sin uso agrícola; Aren-FC = suelo tipo arena y flor de corte; Aren-HDTS = suelo tipo arena y hortalizas con descanso en temporada de secas; Aren-HC = suelo tipo arena y hortalizas continuas; Obs-FC = suelo tipo oscuro y flor de corte; Obs-HC = suelo tipo oscuro y hortalizas continuas.

[‡] Nextl-SnA = nextlale type soil and soil without agricultural use; Aren-FC = sand type soil and cut flower; Aren-HDTS = sand type soil and vegetables with resting period in dry season; Aren-HC = sand type soil and continuous vegetables; Obs-FC = dark type soil and cut flower; Obs-HC = dark type soil and continuous vegetables.

Cuadro 2. Valores medio y desviaciones estándar de las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos analizadas, por patrón de cultivo y tipo de suelo.**Table 2. The mean values and standard deviations of the chemical, physical and biological properties of the analyzed soils by cultivation pattern and soil type.**

Tipo de suelo y patrón de cultivo [‡]	CaCO ₃	C/N	CE _{es} estimada	Estabilidad de agregados en húmedo	Densidad aparente (Dap)	Densidad de lombrices	Uso de agua residual
	%		dS m ⁻¹	DMP (cm)	g cm ⁻³	no. lom·m ⁻²	%
Nextl-SnA	5.08±0.6	9.75±1.1	0.59±0.15	3.28±0.7	1.28±0.05	2.78±0	0
Aren-FC	8.77±5	12.28±7.7	1.87±0.3	0.94±0.3	1.37±0.08	32.2±37	34.2±29.2
Aren-HDTS	5.12±1.8	11.47±3.4	1.61±0.3	1.02±0.3	1.36±0.09	10.1±10.4	10.0±15.8
Aren-HC	7.82±5.6	11.35±6.2	1.81±0.3	0.97±0.3	1.38±0.07	35.25±42.3	8.6±14.6
Obs-FC	4.20±0.8	9.75±1.8	1.9±0.2	0.89±0.1	1.43±0.02	42.59±48.9	0
Obs-HC	4.24±0.7	10.15±0.9	1.71±0.1	1.00±0.2	1.44±0.1	16.90±15.4	0
General	6.95±4.5	11.38±5.8	1.75±0.4	1.08±0.6	1.38±0.08	26.47±33.6	16.89±25.2

[‡] Nextl-SnA = suelo tipo nextlale y sin uso agrícola; Aren-FC = suelo tipo arena y flor de corte; Aren-HDTS = suelo tipo arena y hortalizas con descanso en temporada de secas; Aren-HC = suelo tipo arena y hortalizas continuas; Obs-FC = suelo tipo oscuro y flor de corte; Obs-HC = suelo tipo oscuro y hortalizas continuas.

[‡] Nextl-SnA = nextlale type soil and soil without agricultural use; Aren-FC = sand type soil and cut flower; Aren-HDTS = sand type soil and vegetables with resting period in dry season; Aren-HC = sand type soil and continuous vegetables; Obs-FC = dark type soil and cut flower; Obs-HC = dark type soil and continuous vegetables.

(SEMARNAT, 2002). Lo anterior coincide con síntomas visibles de clorosis intervenal en los cultivos hortícolas y florícolas estudiados. El pH mostró una asociación moderada y negativa con: Fe ($r = -0.34$), Zn ($r = -0.39$), P-Olsen ($r = -0.32$) y MOS ($r = -0.36$). Según Lindsay y Norvell (1978) la disponibilidad Fe extraíble con DTPA disminuye mil veces por cada aumento unitario del pH del suelo en el rango de 4 a 9, mientras que la de Mn, Cu y Zn lo hace en 100 veces. El porcentaje de MOS varió entre 1.1 a 4.4% y el promedio general fue 1.93%. El 21.6% de las parcelas se pueden clasificar como bajas en MOS (de 1.1 a 1.5%), 75.7% como medias (de 1.6 a 3.5%) y el 2.7% altas, con porcentajes mayores a 3.5% (SEMARNAT, 2002). La MOS se correlacionó positivamente con P-Olsen ($r = 0.54$), Fe ($r = 0.74$), Zn ($r = 0.52$) y uso de agua residual ($r = 0.44$), una indicación de que la adición de materia orgánica y el uso de agua residual favorece la disponibilidad de esos tres elementos. A diferencia de los suelos sin alterar (Nextl-SnA), el resto de los sitios estudiados ha sido constantemente cultivado, lo que ha causado una destrucción progresiva de su estructura y de la agregación, que causa la liberación del carbono asociado a ellas. La labranza intensiva que experimentan estos suelos para establecer dos o tres cultivos por año, disminuye la proporción de

macroagregados ricos en carbono e incrementa los microagregados como lo explica Six *et al.* (2000).

Las parcelas presentaron CE_{es} (CE del extracto de saturación estimada) con valores en un intervalo de 1.1 a 2.8 dS m⁻¹. El 77% de los sitios se clasificó como ligeramente salinos y 23% como moderadamente salinos (SEMARNAT, 2002), mientras que los suelos de referencia presentaron valores < 1 dS m⁻¹, lo cual corresponde a suelos no salinos. El uso de agua de baja calidad para riego (RAS entre 6.0 y 12.6) sería responsable de la creciente salinización de las tierras agrícolas, principalmente en áreas áridas o semiáridas (Singh, 2009). El uso de aguas residuales y de fertilizantes químicos también pudo contribuir a la salinización del suelo agrícola (Endo *et al.*, 2011). La salinización del suelo es un factor que contribuye a la baja productividad de los cultivos, ya que se desvía energía necesaria para los procesos fisiológicos normales, hacia procesos involucrados en la adquisición de agua cuando se presenta un estrés osmótico (Sposito, 2008).

La concentración de P-Olsen determinada en los suelos de la zona de estudio se ubicó en un intervalo de 3 a 202 mg kg⁻¹ de, con valor promedio de 49 mg P kg⁻¹. Esta variable se encuentra moderadamente correlacionada con el uso de agua residual ($r = 0.68$)

y MOS ($r = 0.54$). Los valores críticos de P-Olsen del suelo difieren según el tipo de cultivo, debido a que los requerimientos de P no son los mismos para todos, así como tampoco la eficiencia de absorción de P (Sandaña y Pinochet, 2016). Colomb *et al.* (2007) señalaron que el valor crítico agronómico de P-Olsen varía de 3.9 a 15 mg kg⁻¹ para el maíz, pero el valor crítico agronómico para hortalizas de hoja y de fruto, con producción a campo abierto, se encuentra en el intervalo de 46.0 a 58.0 mg kg⁻¹ de P-Olsen (Yan *et al.*, 2013). Los valores críticos para un cultivo cualquiera deben ser establecidos en función de la biomasa esperada y del desarrollo radical. Por lo que la extrapolación de la información anterior ha llevado a que se cometan errores, ya sea por déficit o exceso de adición de este elemento al suelo. El 48% de las muestras de suelo analizadas en las parcelas cultivadas con hortalizas y flores presentaron concentraciones de 46 mg kg⁻¹ de P-Olsen, valor cercano al reportado por Yan *et al.* (2013) como crítico para hortalizas.

Los contenidos más altos de Fe-DTPA se encontraron en los suelos sin manejo agrícola (Nextl-SnA) con un promedio de 4.26 mg kg⁻¹ de Fe. En general solo 10% de los suelos superó el umbral superior del rango crítico de 5 mg kg⁻¹ de Fe propuesto por Sims y Johnson (1991), similar al formulado por Lindsay y Norvell (1978) de 4.5 mg kg⁻¹ de Fe. Ambos valores se establecieron para cultivos anuales de granos en suelos con presencia de carbonatos. Según Sposito (2008) las bajas concentraciones de Fe y Zn, son comunes en suelos calcáreos, como los de la zona estudiada. La baja disponibilidad de Zn en suelos calcáreos de pH alto (> 8.4) se debe principalmente a la adsorción de Zn en arcillas o CaCO₃, y en menor medida a la formación de especies poco solubles como Zn(OH)₂ o ZnCO₃ (Trehan y Sekhon, 1977).

La estabilidad de los agregados en húmedo, expresada como diámetro medio ponderado (DMP), fue mayor en suelos sin alterar (DMP = 3.28) que en suelos cultivados, independientemente del patrón de cultivo. La estabilidad de agregados en húmedo y la MOS disminuyen a la par, particularmente cuando el suelo es sometido a labranza una o más veces al año (Peng *et al.*, 2015).

La densidad de lombrices (Dlom) promedio fue de 25 por cada m². Densidades de lombrices de 100 individuos por metro cuadrado en suelos agrícolas son consideradas aceptables (Edwards, 1983; Plaas *et al.*, 2019; Demetrio *et al.*, 2019). En el presente

estudio, se contabilizó esa cantidad considerada como adecuada en solo en 6.8% de las parcelas, en 23% la población se puede considerar como media (entre 40 y 90 lombrices m⁻²) y el 70.3% con una población baja (menos de 40 lombrices m⁻²). Estos resultados se atribuyen al uso excesivo de pesticidas y fertilizantes inorgánicos.

Generación de los Indicadores e Índice de Calidad de Suelo

En el Cuadro 3 se muestran los primeros cuatro componentes principales (CP's) del ACP que explican 70% de la varianza y tienen un valor propio ≥ 1 . El primer componente principal fue definido por las variables altamente ponderadas: P-Olsen, Fe, MOS y pH. El segundo componente lo definieron las variables: DMP, Fe, MOS, Mn y CE_{es}. En el componente tres y cuatro sobresalen las variables pH, C:N, Dap y Cu. Para la conformación del MDS se seleccionaron las variables pH, MOS, P-Olsen y Fe-DTPA debido a su alta ponderación en el primer CP. También se optó por incluir las variables CE_{es} y DMP, las cuales tuvieron valores ponderados altos en el segundo CP. Las variables seleccionadas para el MDS muestran diferencias entre el estado de los suelos sin alterar y los suelos con uso agrícola (Cuadro 1 y 2). Se decidió incluir la variable densidad de lombrices (Dlom) para tener una variable biológica en el MDS. Se descartaron las variables Cu, Mn, C:N y Dap, debido a que el valor ponderado que mostraron fue menor a las demás propiedades del suelo. Por último Zn se descartó por estar fuertemente correlacionado con P-Olsen ($r = 0.98$) y medianamente con Fe ($r = 0.66$), ya que se consideró redundante.

Para formular el índice de calidad de suelo se ajustó una función cuadrática para cada indicador del MDS (Cuadro 4).

Los criterios para definir los valores óptimos (donde $y = 1$) fueron los siguientes:

(a) Para los indicadores pH y CE_{es} se escogió una función tipo "menos es mejor". Se consideró como pH óptimo el mínimo obtenido en las muestras analizadas (pH = 7.4) ya que no se pueden presentar valores menores debido a la presencia de carbonatos. Este valor óptimo no concuerda con valores de referencia establecidos en la bibliografía, por lo que esta función es exclusiva para el área de estudio. El valor óptimo para CE_{es} fue la media obtenida de las muestras de los suelos sin alterar (0.6 dS m⁻²).

Cuadro 3. Resultados del análisis de componentes principales.
Table 3. Results of the principal component analysis.

Estadístico o variable	CP1	CP2	CP3	CP4
Valor propio	3.679	2.124	1.454	1.151
% de varianza explicada	0.306	0.177	0.121	0.096
% acumulado	0.306	0.483	0.605	0.701
Vectores propios †				
pH	<u>0.286</u>	-0.116	<u>0.441</u>	-0.134
CE _{es}	-0.261	<u>-0.337</u>	-0.049	0.002
MOS	<u>-0.341</u>	<u>0.394</u>	0.007	-0.072
P-Olsen	<u>-0.464</u>	-0.042	0.137	0.132
C:N	0.01	0.071	<u>0.595</u>	<u>-0.494</u>
Fe‡	<u>-0.345</u>	<u>0.408</u>	0.03	-0.055
Cu‡	-0.208	-0.114	-0.208	<u>-0.604</u>
Zn‡	-0.474	0.024	0.069	0.204
Mn‡	0.189	<u>0.354</u>	-0.318	-0.389
Densidad lombrices	-0.262	-0.097	0.256	-0.244
DMP	0.114	<u>0.570</u>	-0.049	0.064
Dap	-0.116	-0.267	<u>-0.461</u>	-0.302

† Los eigen vectores subrayados corresponden a variables altamente ponderadas, cuya contribución es mayor a la esperada dentro del componente principal. ‡ Fe, Cu, Mn y Zn extractado por el método de DTPA-TEA (Lindsay y Norvell, 1978). MOS = materia orgánica del suelo; DMP = diámetro medio ponderado; Dap = densidad aparente.

† The underlined eigenvectors correspond to highly weighted variables, whose contribution is greater than the expected within the principal component. ‡ Fe, Cu, Mn and Zn extracted by the DTPA-TEA method (Lindsay and Norvell, 1978). SOM = soil organic matter; DMP = weighted mean diameter. Dap = apparent density.

Cuadro 4. Funciones de puntuación para cada indicador seleccionado para el MDS.

Table 4. Scoring functions for each indicator selected for the MDS.

Indicador	Función f(x) =	Consideraciones†
pH	$-0.355x^2 + 5.24x - 18.33$	Si $x > 9$, $y = 0$
CE _{es}	$0.1x^2 - 0.8x + 1.6$	Si $x > 4$, $y = 0$
MOS	$-0.07x^2 + 0.55x - 0.08$	Si $x > 4$, $y = 1$
P-Olsen	$(-0.0008x^2 + 0.1x)/3$	Si $46 \leq x \leq 58$, $y = 1$; Si $x > 80$, $y = 0.1$
Fe-DTPA	$-0.03x^2 + 0.35x$	Si $x > 5$, $y = 1$
Dlom	$(-0.003x^2 + 0.6x) / 30$	Si $x > 100$, $y = 1$
DMP	$-0.08x^2 + 0.6x - 0.11$	--

† Debido a que se buscó simplificar lo más posible las funciones, fue necesario establecer ciertas consideraciones para mantener los valores dentro de la transformación, así como para incluir valores mayores a los esperados. Para cada función se buscó que los valores óptimos escogidos coincidieran con $y \geq 0.9$, así como los valores deficientes con $y \leq 0.6$.

† Due to the fact that the functions were simplified as much as possible, it was necessary to establish certain considerations to keep the values within the transformation, as well as to include values greater than the expected. For each function it was sought that the optimal values chosen coincided with $y \geq 0.9$ and the deficient values with $y \leq 0.6$.

(b) A diferencia de lo señalado para pH y CE_{es}, para los indicadores MOS, Fe-DTPA y Dlom, se estableció una función del tipo “más es mejor”: En estos casos el valor óptimo se definió con base en valores de referencia, para MOS $\geq 3.6\%$, Fe-DTPA = 5 mg kg⁻¹ (Sims y Johnson, 1991) y Dlom ≥ 100 lombrices m⁻² (Edwards, 1983). Igualmente, el indicador DMP se escaló con una función del mismo tipo, pero como valor óptimo se escogió el valor medio de los suelos sin alterar (DMP = 3.28).

(c) Por último, para el indicador P-Olsen se determinó una función “tipo campana”, donde el valor crítico agronómico reportado para hortalizas, se ubica en el intervalo de 46 a 58 mg kg⁻¹ de P-Olsen (Yan *et al.*, 2013), después descende en relación al valor crítico ambiental 78 mg kg⁻¹ de P-Olsen estimado por Fang *et al.* (2002). Es posible que este último valor deba ser revisado a la luz de mayores experiencias; por ejemplo, el P-Olsen en suelos dedicados a la producción de tomates en invernadero puede alcanzar cerca de 200 mg kg⁻¹. En nuestro caso se consideró que si el valor de P-Olsen era mayor a 80 mg kg⁻¹

su puntuación sería de 0.1 debido a que el riesgo de pérdida de P del suelo hacia otros terrenos era mayor.

Finalmente, el Índice de Calidad de Suelo (ICS) quedó definido por la sumatoria de los indicadores escalados, siendo el valor máximo igual a 7, de acuerdo a la siguiente Ecuación 1:

$$\text{ICS} = \text{InpH} + \text{InCE}_{\text{es}} + \text{InMOS} + \text{InP-Olsen} + \text{InFe-DTPA} + \text{InDlom} + \text{InDMP} \quad (1)$$

El índice de calidad de suelo (ICS) por patrón de cultivo se muestra en la Figura 1. En general los valores del ICS se ubicaron en el intervalo de 2.6 a 5.4, con un promedio de 3.8. Si se considera lo anterior, 19% de las parcelas muestreadas tuvo un ICS mayor a 4.2, 44% se ubicó entre 3.6 y 4.2, 32% entre 3 y 3.6 y en solo 4% fue menor a 3.

Los suelos de referencia sin manejo agrícola (Nextl-SnA) presentaron el mayor ICS promedio (4.06), debido a que sus valores medios se escogieron como óptimos para generar los indicadores pH, CE_{es} y DMP. Adicionalmente, estos suelos de referencia mostraron los mayores valores de Fe-DTPA y MOS.

El ICS en las parcelas con patrón de cultivo FC y suelos tipo Arenas-Fuerte (Aren-FC) y en suelos

oscuros (Obs-FC) fue 3.83 y 3.74, respectivamente; pero en el patrón HC, en los mismos dos tipos de suelo (Aren-HC y Obs-HC), fue ligeramente menor (3.93 y 3.86).

El menor ICS promedio (3) se obtuvo en el patrón de cultivo de hortalizas con descanso en temporada de secas (Aren-HDTS).

Recomendaciones para el Mejoramiento de la Calidad de Suelo

Los indicadores que mostraron las menores ponderaciones fueron CE_{es} , Dlom y DMP (promedios 0.50, 0.35 y 0.39 respectivamente). En cuanto a la mejora del indicador CE_{es} , el método más simple para remediar la acumulación de sal en el suelo es mediante el lavado. La técnica consiste en aplicar grandes cantidades de agua dulce al suelo para eliminar las sales solubles (Ravindran *et al.*, 2007), sin embargo, el agua en estos ejidos no siempre está disponible. Por otra parte, las compostas y el biochar, que es el residuo carbonoso sólido producido en condiciones libres o limitadas de oxígeno a temperaturas entre 300 y 1000 °C, también se utilizan para recuperar el suelo afectado por la salinidad (Saifullah *et al.*, 2018).

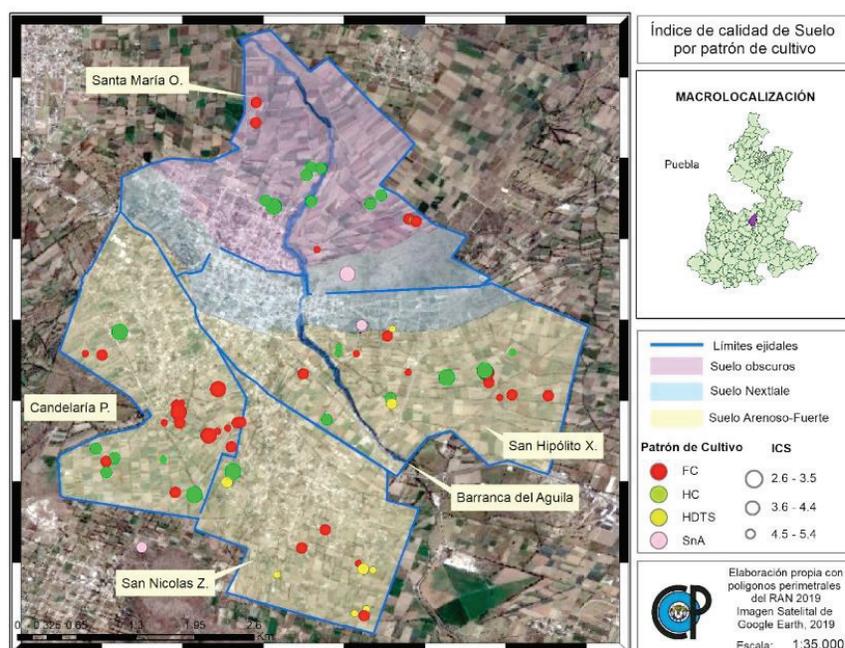


Figura 1. Mapa de los valores del indicador de calidad de suelo para los diferentes puntos de muestreo en los ejidos de la zona de estudio.

Figure 1. Map of the soil quality indicator values for the different sampling points in the ejidos of the study area.

En cuanto a la población de lombrices, uno de los factores que afecta su densidad en los suelos estudiados es el uso de pesticidas. Entre los compuestos tóxicos para las lombrices se señalan los insecticidas y fungicidas con base en carbamato, así como compuestos organofosforados y herbicidas con atrazina (Pelosi *et al.*, 2014). Los productores del área de estudio mencionaron en una encuesta, que los agroquímicos que usan con más frecuencia son los siguientes: carbofuran y methanomy, ambos insecticidas fabricados con base en carbamato, estos fueron mencionados por 90 y un 65% de los productores respectivamente, mientras que clorpirifos, insecticida organofosforado, fue citado por 55%.

Si se desea generar alta estabilidad de los agregados es necesario emplear menor labranza y menor intensidad de ésta. En el caso de las hortalizas, que por lo general requieren de una elevada intervención mecánica, la pérdida de la estabilidad de los agregados del suelo y la MOS asociada, debe ser compensada con aplicaciones de cantidades suficientes de estiércoles, enmiendas orgánicas, bioles y otros productos compostados, que puedan ser producidos en la misma unidad de producción.

Las aplicaciones de Fe y Zn deben hacerse de forma foliar, debido a la alcalinidad de los suelos. En el mercado existen quelatos sintéticos de Zn y Fe (EDTA y DTPA), sin embargo, su eficiencia para la aplicación foliar es relativamente baja, debido al gran tamaño molecular que exhiben en comparación con el tamaño de los poros de la pared celular y la cutícula (Marschner, 2012). También se han sintetizado complejos de estos elementos con aminoácidos para su aplicación foliar, para los cuales se ha evaluado una mayor eficiencia con respecto a los quelatos para hortalizas de hoja (Rafie *et al.*, 2017). El uso de sales minerales es otra opción para aplicaciones foliares. Un ejemplo de éstas son los sulfatos de Fe, Cu, Zn y Mn ampliamente usados en aplicaciones al suelo y foliares (Fernández y Ebert, 2005).

CONCLUSIONES

- Las siete propiedades seleccionadas como indicadores (pH, CE, MOS, P-Olsen, Fe-DTPA, Dlom y DMP) fueron eficaces para evaluar la calidad de los suelos en el área de estudio. Los suelos sin alterar, mostraron

diferencias con los suelos cultivados en sus valores de pH, CE, MOS y DMP, lo que guio la definición de los valores óptimos de estos indicadores.

- La evaluación de la calidad del suelo con relación a patrones de cultivo de la zona, permitió revelar cambios específicos, principalmente en los indicadores P-Olsen, Fe-DTPA y Dlom, y sugerir algunas estrategias de manejo agronómico.

- Los resultados de este trabajo sientan las bases técnicas para que se recomiende establecer normas que permitan a los campesinos y tomadores de decisiones mejorar la calidad de los suelos que se cultivan con los diferentes patrones horto-florícolas y prevenir un mayor deterioro de su calidad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

El manuscrito no reporta estudios que involucran humanos ni animales. Por lo que la consideración “no aplica” en la sección correspondiente.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

El manuscrito no contiene datos que pertenecen a otras personas. Por lo que la consideración “no aplica” en la sección correspondiente. La información presentada proviene de fuentes bibliográficas ya publicadas incluidas en la Literatura citada.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos originales se encuentran disponibles en la tesis de Maestría de la autora principal, depositada en el Centro de Documentación del Colegio de Postgraduados.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

FONDOS

Los fondos empleados para los trabajos experimentales de campo y laboratorio fueron proporcionados por el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El trabajo de campo y el análisis de los datos los realizó la autora principal X.C.V. El autor de correspondencia J.D.E. fue el generador de la idea principal del trabajo y coordinó el análisis y la redacción del trabajo. La Dra. C.H.M. asesoró coordinó los trabajos experimentales en el laboratorio. El Dr. A.A.G. colaboró con sus comentarios y revisión de la tesis de la autora principal.

AGRADECIMIENTOS

A las Comunidades donde se realizó el trabajo por su muy valiosa cooperación. Al CONACYT por el financiamiento de la Beca de estudios de Maestría de la autora principal.

LITERATURA CITADA

- Andrews, S. S. and C. R. Carroll. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecol. Applic.* 11: 1573-1585. doi: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1573:DASQAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2).
- Arshad, M. A. and G. M. Coen. 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *Am. J. Altern. Agric.* 25-31. doi: <https://doi.org/10.1017/S0889189300004410>.
- Astier Calderón, M., M. Maass-Moreno y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Bautista Cruz, M., J. Etchevers-Barra, R. F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13: 90-97.
- Baveye, P. C., J. Baveye, and J. Gowdy. 2016. Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. *Front. Environ. Sci.* 4: 1-49. doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>.
- Brejda, J. J., T. B. Moorman, D. L. Karlen, and T. H. Dao. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462115x>.
- Bünemann, E. K., G. Bongiorno, Z. Bai, R. E. Creamer, G. de Deyn, R. De Goede, L. Flesskens, V. Geissen, T. W. Kuyper, P. Mäder, M. Pulleman, W. Sukkel, J. W. Van Groenigen, and L. Brussaard. 2018. Soil Quality- A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120: 105-125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Carter, M. R., E. G. Gregorich, D. W. Anderson, J. W. Doran, H. H. Janzen, and F. J. Pierce. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Chapter 1. pp. 1-19. *In:* E. G. Gregorich and M. R. Carter (eds.). *Developments in soil science*. Elsevier. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1).
- Colomb, B., P. Debaeke, C. Jouany, and J. M. Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: Crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. *Eur. J. Agron.* 26:154-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.09.004>.
- Demetrio, W. C., J. A. Dionisio, and A. Maceda. 2019. Negative effects of earthworms on soil nematodes are dependent on earthworm density, ecological category and experimental conditions. *Pedobiologia* 76: 150568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2019.150568>.
- Doran, J. W. and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. Chapter 1. pp. 1-21. *In:* J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA. Madison, WI, USA. Online ISBN: 9780891189305.
- Edwards, C. A. 1983. Earthworm ecology in cultivated systems. pp. 123-137. *In:* J. E. Satchell (ed.). *Earthworm ecology*. Springer. Dordrecht, Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5965-1_10.
- Endo, T., S. Yamamoto, J. A. Larrinaga, H. Fujiyama, and T. Honna. 2011. Status and causes of soil salinization of irrigated agricultural lands in southern Baja California, Mexico. *Appl. Environ. Soil Sci.* Article ID 873625, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/873625>.
- Estrada-Herrera, R. I., C. Hidalgo M., R. Guzmán P., J. J. Almaraz, H. Navarro y J. D. Etchevers. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia* 58: 813-831.
- Fang, F., P. L. Brezonik, D. J. Mulla, and L. K. Hatch. 2002. Estimating runoff phosphorus losses from calcareous soils in the Minnesota River Basin. *J. Environ. Qual.* 31: 1918-1929. doi: <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1918>.
- Fernández, V. and G. Ebert. 2005. Foliar iron fertilization – A critical review. *J. Plant Nutr.* 28: 2113-2124. doi: <https://doi.org/10.1080/01904160500320954>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2000. Carta de clima. Escala 1:1,000,000. Serie I. Dirección General de Geografía, INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2011. Carta Edafológica. Serie II. E14-12. Escala 1:250,000. Dirección General de Geografía, INEGI. Aguascalientes, México.
- Jackson, M. L. 1976. *Análisis químico de suelos*. Omega. Barcelona, España.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Larson, W. E. and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality evaluation for sustainable land management in the developing world. pp. 175-203. *In:* J. Dumanski, H. Eswaran, and M. Latham (eds.). *International Board for Soil Research and Management (IBSRAM). Proceedings no. 12, Technical Papers*. Chiang Rai, Thailand.
- Larson, W. E. and F. J. Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. pp. 37-51. *In:* J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA. Madison, WI, USA. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3>.

- Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2: 421- 428. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
- Marschner, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. San Diego, CA, USA. ISBN-13: 978-0123849052.
- Moebius-Clune, B. N., D. J. Moebius-Clune, B. K. Gugino, O. J. Idowu, R. R. Schindelbeck, A. J. Ristow, H. M. van Es, J. E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, K. S. M. Kurtz, D. W. Wolfe, and G. S. Abawi. 2016. Comprehensive assessment of soil health. *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework*. Cornell University. Geneva, NY, USA. ISBN: 0-967-6507-6-3.
- Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus. pp 403-430. *In: A. L. Page (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Ortiz-Solorio, C. A., D. Pájaro-Huerta y V. M. Ordaz-Chaparro. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. ISBN: 968-839-114-X.
- Pelosi, C., S. Barot, Y. Capowicz, M. Hedde, and F. Vandenbulcke, F. 2014. Pesticides and earthworms. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 4: 199-228. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0151-z>.
- Peng, X., R. Horn, and P. Hallett. 2015. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter. *Soil and Tillage Res.* 146: 1-3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017>.
- Plaas, E., F. Meyer W., M. Banse, J. Bengtsson, H. Bergmann, J. Faber, M. Potthoff, T. Runge, S. Schrader, and A. Taylor. 2019. Towards valuation of biodiversity in agricultural soils: A case for earthworms. *Ecol. Econ.* 159: 291-300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.02.003>.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rafie, M. R., A. H. Khoshgoftarmansh, H. Shariatmadari, A. Darabi, and N. Dalir. 2017. Influence of foliar-applied zinc in the form of mineral and complexed with amino acids on yield and nutritional quality of onion under field conditions. *Sci. Hortic.* 216: 160-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.014>.
- Ravindran, K. C., K. Venkatesan, V. Balakrishnan, K. P. Chellappan, and T. Balasubramanian. 2007. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2661-2664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.005>.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook No. 60*. USDA. Washington, D. C. USA.
- Saifullah, D. S., A. Naeem, Z. Rengel, and R. Naidu. 2018. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Sci. Total Environ.* 625: 320-335. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.257>.
- Sandaña, P. and D. Pinochet. 2016. Phosphorus acquisition of wheat, pea and narrow-leafed lupin under different P supplies. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16: 537-549. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000044>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Seybold, C. A., M. J. Mausbach, D. L. Karlen, and H. H. Rogers. 1998. Quantification of soil quality. pp. 387-403. *In: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds.) Soil process and the carbon cycle*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. eBook ISBN: 9780203739273.
- Sims, J. T. and G. V. Johnson. 1991. Micronutrient soil tests. pp. 442-476. *In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman P. M. Giordano, W. E. Lindsay, and R. M. Welch (eds.) Micronutrients in agriculture*. SSSA Book Series. Madison, WI, USA. doi: <https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed.c12>.
- Singh, G. 2009. Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. *Land Degrad. Dev.* 20: 367-385. doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.933>.
- Six, J., K. Paustian, E. T. Elliott, and C. Combrink. 2000. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- Sposito, G. 2008. Soil salinity. pp. 296-299. *In: G. Sposito (ed.) The chemistry of soils*. Oxford University Press. New York, NY, USA. ISBN13: 9780198042785.
- Trehan, S. P. and G. S. Sekhon. 1977. Effect of clay, organic matter and CaCO₃ content of zinc adsorption by soils. *Plant Soil* 46: 329-336. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00010089>.
- USDA (United States Department of Agriculture) 2001. Soil quality test kit guide. Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Yan, Z., P. Liu, Y. Li, L. Ma, A. Alva, Z. Dou, Q. Chen, and F. Zhang. 2013. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Overfertilization, soil enrichment and environmental implications. *J. Environ. Qual.* 42: 982-989. doi: <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0463>.