

INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO PARA EVALUAR SU FERTILIDAD

SOIL QUALITY INDICATORS TO EVALUATE SOIL FERTILITY

I. Rayo Estrada-Herrera, Claudia Hidalgo-Moreno*, Remigio Guzmán-Plazola,
J. José Almaraz Suárez, Hermilio Navarro-Garza, Jorge D. Etchevers-Barra

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (hidalgo@colpos.mx).

RESUMEN

La Mixteca Alta Oaxaqueña, México (MAO), presenta niveles moderados a graves de degradación de suelo. La erosión hídrica y eólica son las principales causas de esa degradación, con pérdidas de suelo entre 50 y 200 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y en algunas zonas puede ser mayor. Los indicadores de calidad (ICS) son herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad del suelo y su degradación. El objetivo de este estudio fue generar indicadores de calidad (univariados) cuyos valores, comprendidos dentro de una escala única, permitan evaluar la fertilidad de suelos de la MAO y situarlos en un mapa temático de degradación. Las hipótesis fueron: 1) los atributos evaluados en este estudio funcionan como ICS y 2) los valores de los ICS que varían dentro de una escala única permiten comparar los estados de estos atributos. El valor de los indicadores permitirá proponer acciones correctivas del manejo agronómico de los suelos y evitar su degradación. Esta propuesta es de ejecución fácil, costo bajo, generación rápida, que usa información disponible en la literatura y puede apoyar políticas públicas regionales. Los atributos químicos y fisicoquímicos evaluados fueron: pH, materia orgánica (MO), P extraíble (P_{ex}), bases de intercambio (Ca, Mg y K), capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE); además, uno biológico, el carbono en biomasa microbiana (C_{BM}). Con estos atributos se definieron los indicadores de calidad, los valores de éstos y las clases de calidad de suelo en sitios agrícolas y degradados de cinco localidades de la MAO: Tonaltepec, Gavillera, Cerro Prieto, Nduayaco y Pericón, donde hubo apoyo de la comunidad. El muestreo fue completamente aleatorio. Los sitios de donde se obtuvieron las muestras para generar los ICS se georeferenciaron y ubicaron en un mapa temático de tipos de degradación. Los valores de los indicadores y las clases de calidad generados evidenciaron el precario estado de fertilidad

ABSTRACT

The Mixteca Alta Oaxaqueña, Mexico (MAO), presents moderate to severe levels of soil degradation. Water and wind erosion are the main causes of this degradation, with soil losses between 50 and 200 Mg ha⁻¹ year⁻¹ and in some areas may be higher. Soil quality indicators (SQI) are useful tools for assessing the status of soil fertility and its degradation. The objective of this study was to generate (univariate) quality indicators whose values, included within a single scale, allow to evaluate the soil fertility of the MAO and place them on a thematic map of degradation. The hypotheses were: 1) the attributes evaluated in this study function as SQI, and 2) the SQI values that vary within a single scale allow to compare the states that these attributes maintain. The value of the indicators will allow to propose corrective actions of the agronomic management of the soils and avoid their degradation. This proposal is easy to implement, of low cost, fast generation, can use information available in the literature and support regional public policies. The chemical and physicochemical attributes evaluated were: pH, organic matter (OM), extractable P (P_{ex}), exchange bases (Ca, Mg and K), effective cation exchange capacity (ECEC); plus a biological one, the carbon in microbial biomass (C_{BM}). With these attributes, quality indicators, soil quality and soil quality classes were defined in agricultural and degraded sites in five localities of the MAO: Tonaltepec, Gavillera, Cerro Prieto, Nduayaco and Pericón, where there was support from the community. Sampling was completely randomized. The sites from where the samples were obtained to generate the SQI were georeferenced and located on a thematic map of degradation types. The values of the indicators and the quality classes generated evidenced the precarious state of fertility of the MAO soils. Its use will allow to propose corrective measures to improve the current fertility of soils and avoid further degradation. **Keywords:** soil quality indicators, degraded soils, soil fertility, Mixteca Alta Oaxaqueña.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2016. Aprobado: mayo, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 813-831. 2017.

de los suelos de la MAO. Su uso permitirá proponer medidas correctivas para mejorar la fertilidad actual de los suelos y evitar una mayor degradación.

Palabras clave: indicadores de calidad de suelo, suelos degradados, fertilidad suelos, Mixteca Alta Oaxaqueña.

INTRODUCCIÓN

La Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) es una de las regiones de México con alto grado de marginación, cuya población vive en condiciones precarias (Ramales *et al.*, 2014). Los estudios allí realizados abarcan temas como deforestación, sobrepastoreo, erosión del suelo, variabilidad del clima, pobreza y migración. El Centro de Desarrollo Integral Campesino de La Mixteca (CEDICAM), entre otros, coordina iniciativas de trabajo comunitario en la región que se han centrado en el combate a la desertificación y la mejoría de la calidad del ambiente, en especial en disponibilidad de agua y desarrollo de una agricultura amigable a las condiciones de la región. Sin embargo, estudios realizados para evaluar la fertilidad y estado de degradación de los suelos, a nivel de sitio específico, son escasos. Lo anterior es grave porque el suelo y el agua son la base fundamental para la producción de alimentos (Torres *et al.*, 2003). Los suelos de la MAO presentan erosión severa y una acentuada heterogeneidad en sus características fisicoquímicas. Son suelos pobres en nutrientes, especialmente en nitrógeno y fósforo. Tienen un contenido alto de calcio y de carbonatos, pH alcalino, deficiencia en materia orgánica y texturas de pesadas a medias (SARH, 1984; Bravo *et al.*, 1993; Plan Municipal de Desarrollo. San Juan Yucuita, Nochixtlán, Oaxaca, 2010.) y estas condiciones limitan la producción agrícola (Alfaro, 2004). Según Bravo *et al.* (1993), el aumento en la fertilidad del suelo crean beneficios en el plazo largo. Sin embargo, todavía no hay una mejoría a esta situación.

Bradomín (1992) reportó que 70 % de los suelos de la MAO presentaba algún tipo de degradación. La deforestación, la expansión agrícola y el sobrepastoreo trashumante de ovejas y cabras son las principales causas del deterioro de los suelos (SEMARNAT-CP, 2002). La compleja topografía de la región y la predominancia de suelos someros, complica la instrumentalización integral de las políticas para conservar el recurso suelo.

INTRODUCTION

The Mixteca Alta Oaxaqueña (MAO) is one of the regions of Mexico with a high level of marginalization, whose population lives in precarious conditions (Ramales *et al.*, 2014). The studies carried out cover topics such as deforestation, overgrazing, soil erosion, climate variability, poverty and migration. The Centro de Desarrollo Integral Campesino de la Mixteca (Center for Integral Rural Development of La Mixteca (CEDICAM) coordinates, among others, community work initiatives in the region that focused on combating desertification and improving the quality of the environment, especially in the availability of water and development of an agriculture friendly to the conditions of the region. However, studies to evaluate the fertility and degradation status of soils at the specific site level are scarce. The scarcity of studies is serious because soil and water are the fundamental basis for food production (Ortiz *et al.*, 1994; Torres *et al.*, 2003). The MAO soils show severe erosion and a marked heterogeneity in their physicochemical characteristics. They are nutrient-poor soils, especially nitrogen and phosphorus. They have a high content of calcium and carbonates, alkaline pH, organic matter deficiency and textures from heavy to medium (SARH, 1984; Bravo *et al.*, 1993; Plan Municipal de Desarrollo. San Juan Yucuita, Nochixtlán, Oaxaca, 2010) and these conditions limit agricultural production (Alfaro, 2004).

According to Bravo *et al.* (1993), the increase in soil fertility creates benefits over the long term. However, there is still no improvement in this situation.

Bradomín (1992) reported that 70 % of the MAO soils presented some type of degradation. Deforestation, agricultural expansion and transhumant overgrazing of sheep and goats are the main causes of soil deterioration (SEMARNAT-CP, 2002). The complex topography of the region and the predominance of shallow soils complicate the comprehensive implementation of policies to conserve the soil resource.

The state of soils degradation prevents them from providing goods and services in the expected way, including food production and conservation of other natural resources such as water, flora and fauna. A criterion that helps to determine the

El estado de degradación de los suelos impide que proporcionen bienes y servicios de la manera esperada, entre ellos la producción de alimentos y la conservación de otros recursos naturales como el agua, flora y fauna. Un criterio que ayuda a determinar el grado de degradación del suelo es la valoración de su calidad (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997). El Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America define la calidad del suelo como su capacidad para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, lo cual implica: 1) sostener la productividad de plantas y animales, 2) mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, 3) sostener la salud humana y el hábitat (Karlen *et al.*, 1997; Acevedo *et al.*, 2005), 4) sostener la actividad biológica, la biodiversidad y la productividad, (5) filtrar, amortiguar, degradar e inmovilizar contaminantes, 6) almacenar y reciclar nutrientes y, 7) soportar estructuras socioeconómicas asociadas con el hábitat humano (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista y Etchevers, 2014).

El concepto de calidad es funcional, incluye variables que sirven para evaluar la condición del suelo, o de los indicadores de calidad de suelo (ICS). Los ICS son herramientas de medición que ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo (Bremer and Ellert, 2004). Estos ICS son atributos medibles que revelan la respuesta de la productividad o funcionalidad del suelo al ambiente, e indican si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Ghaemi *et al.*, 2014). Dan información sobre el efecto del cambio en el uso del suelo y el impacto que tienen las prácticas agrícolas sobre la degradación o su funcionamiento (Astier *et al.*, 2002). No hay ICS que sean adecuados para todos los propósitos y contextos (Cantú *et al.*, 2009). Los ICS pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo o procesos que ocurren en él (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; NRCS, 1996; Seybold *et al.*, 1997). La mayoría de los investigadores usan ICS predefinidos y sugeridos por Gómez *et al.* (1996), Shukla *et al.* (2004), Singh y Khera (2009), por citar algunos de los más usados. Otros conjugan una gran cantidad de ICS en índices y generan un conjunto total de datos (TDS, por su nombre en inglés) (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1998). Una opción es usar pocos indicadores pero representativos, por ello se ha propuesto usar un conjunto mínimo de datos (MDS por su nombre en

degree of degradation of the soil is the evaluation of its quality (Doran and Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997). The Soil Science Society of America's Soil Health Committee defines soil quality as its ability to function within the boundaries of a natural or managed ecosystem, which implies: 1) sustaining the productivity of plants and animals, 2) maintaining or improving air and water quality, (3) maintaining human health and habitat (Karlen *et al.* 1997; Acevedo *et al.*, 2005), 4) sustaining biological activity, biodiversity and productivity, (5) filtering, buffering, degrading and immobilizing contaminants, 6) storing and recycling nutrients and, 7) supporting socio-economic structures associated with the human habitat (Doran and Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista and Etchevers, 2014).

The concept of quality is functional; includes variables which serve to evaluate the condition of the soil, or soil quality indicators. The SQI are measurement tools that provide information about the properties, processes and characteristics of the soil (Bremer and Ellert, 2004). These SQI are measurable attributes that reveal the response of the productivity or functionality of the soil to the environment, and indicate whether the quality of the soil improves, remains constant or decreases over time (Ghaemi *et al.*, 2014). They give information on the effect of change in the use of the soil and the impact of agricultural practices on its degradation or functioning (Astier *et al.*, 2002).

No SQI is appropriate for all the purposes and contexts (Cantú *et al.*, 2007). The SQI can be the physical, chemical and biological properties of the soil or processes occurring in it (Larson and Pierce, 1991; Doran and Parkin, 1994; NRCS, 1996; Seybold *et al.*, 1997). Most researchers use predefined SQI as suggested by Gómez *et al.* (1996), Shukla *et al.* (2004), Singh and Khera (2009), to name just a few authors. Others combine a large amount of SQI into indices and generate a total data set (TDS) (Doran and Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1998). One option is to use few indicators, but they must be representative, so the use of a minimum data set (MDS) was proposed (Govaerts *et al.*, 2006).

The MDS contains a selection of parameters representing the TDS, which enables to save time and money (Govaerts *et al.*, 2006; Qi *et al.*, 2009). To identify the most sensitive SQI or those having the greatest impact on the soil quality the Principal

inglés) (Govaerts *et al.*, 2006). El MDS contiene una selección de parámetros que representan al TDS, con lo cual se ahorra tiempo y dinero (Govaerts *et al.*, 2006; Qi *et al.*, 2009). Para identificar los ICS más sensibles o aquellos que tienen mayor impacto sobre la calidad del suelo se usa el análisis de componentes principales (PCA). Para ello se evalúan propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, las cuales varían en número de acuerdo con los autores: Bautista *et al.*, 2011 en México (11), Qi *et al.* (2009) (22), Bi *et al.* (2013) (19) y Liu *et al.* (2013) (26). En México los recursos económicos para proyectos de investigación y desarrollo son escasos, se considera que el enfoque MDS sería el más conveniente porque permite seleccionar los parámetros que mejor representan la calidad del suelo.

Los indicadores químicos más usados para generar ICS son: capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos, pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico total y lábil, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nitrógeno total y mineralizado, capacidad de adsorción de fosfatos y disponibilidad de micronutrientes (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994; NRCS, 1996; Bautista *et al.*, 2004; Bautista *et al.*, 2011; Bautista y Etchevers, 2014). Dado que ninguna propiedad es permanente, para evaluar la calidad de suelo se deben considerar dimensiones espaciales y temporales (Doran y Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista y Etchevers, 2014). En la dimensión espacial las áreas de estudio pueden ser una parcela o una región (Bautista y Etchevers, 2014), y la dimensión temporal se refiere a un intervalo de tiempo en el cual el indicador cambia. Por ello la metodología de indicadores tiene como condición esencial el apoyarse en una base cartográfica para que desde ella sea factible el análisis en el espacio y en el tiempo (Cantú *et al.* 2007). Los indicadores no son universales y representan una visión del momento (Doran y Saffley, 1997), por lo que es necesario validarlos a largo del tiempo para registrar sus cambios (Cantú *et al.*, 2007). La evaluación de la calidad del suelo permite un monitoreo constante de un área, identificar cambios en sus características y proponer prácticas adecuadas de manejo (Doran y Parkin, 1994).

Component Analysis (PCA) is used. To this end, physical, chemical and biological properties of the soil are evaluated, which vary in number according to the authors: Bautista *et al.*, 2011 in Mexico (11), Qi *et al.* (2009) (22), Bi *et al.* (2013) (19) and Liu *et al.* (2013) (26). In Mexico the economic resources for research and development projects are scarce; the MDS approach is considered to be the most appropriate because it allows to select the parameters that better represent the quality of the soil.

The most commonly used chemical indicators to generate SQI are: soil buffer capacity, availability of nutrients for plants and microorganisms, pH, electrical conductivity, total and labile organic carbon, organic matter, cation exchange capacity, total and mineralized nitrogen, phosphate adsorption capacity and availability of micronutrients (Larson and Pierce, 1991; Doran and Parkin, 1994; NRCS, 1996; Bautista *et al.* 2004; Bautista *et al.*, 2011; Bautista and Etchevers, 2014).

Since no property is permanent, to evaluate soil quality spatial and temporal dimensions must be considered (Doran and Parkin, 1996; Karlen *et al.*, 1997; Bautista and Etchevers, 2014). In the spatial dimension, the study areas can be a plot or a region (Bautista and Etchevers, 2014), and the temporal dimension refers to a time interval in which the indicator changes. Therefore, the methodology of indicators should be based on a cartographic base so that the analysis in space and time be feasible (Cantú *et al.*, 2007). The indicators are not universal and represent a vision of the moment (Doran and Saffley, 1997), so it is necessary to validate them over time to record their changes (Cantú *et al.*, 2007). Soil quality assessment allows the constant monitoring of an area, to identify changes in its characteristics and propose appropriate management practices (Doran and Parkin, 1994). The objective of this study was to generate indicators of quality (univariate) whose values, within a single scale, allow the evaluation of the fertility of the MAO soils and place them on a thematic map of degradation. The hypotheses were: 1) the attributes evaluated in this study function as SQI, and 2) the SQI values that vary within a single scale allow to compare the states that these attributes.

El objetivo de este estudio fue generar indicadores de calidad (univariados) cuyos valores, dentro de una escala única, permitan evaluar la fertilidad de suelos de la MAO y situarlos en un mapa temático de degradación. Las hipótesis fueron: 1) los atributos evaluados en este estudio funcionan como ICS y 2) los valores de los ICS que varían dentro de una escala única permiten comparar los estados de estos atributos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en un área (32, 919 ha) ubicada en la parte noreste de la MAO (17° 30' y 17° 42' N y 97° 00' y 97° 25' O) (Figura 1) que forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y las subprovincias fisiográficas Sierras Centrales de Oaxaca y Mixteca Alta. Su clima es templado sub-húmedo y la sierra es la topoforma predominante. La geología de la zona es muy variada, pero predominan las calizas (36 %), las rocas ígneas extrusivas básicas (18 %) y la asociación caliza-lutita (8%), además de otras rocas de menor importancia en superficie como las areniscas (Rivas, 2008)¹. Los suelos representativos en la zona son Leptosoles, Pheozem y Regosoles (INEGI, 2007; IUSS Working Group WRB, 2014). Los Leptosoles son suelos delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo, se asocian a sitios de compleja orografía, son comunes en áreas montañosas y en regiones altamente erosionadas, mientras que su potencial agrícola está limitado por su escasa profundidad y abundante pedregosidad. Los Pheozem son oscuros y ricos en materia orgánica, presentan limitantes agrícolas ya que son susceptibles a erosión eólica e hídrica y a sequías periódicas. Los Regosoles se forman sobre materiales no consolidados y se encuentran dentro de los suelos más fértiles por lo que su principal uso es agrícola.

La vegetación del área, de acuerdo con INEGI (2007), en su mayoría es pastizal inducido (25.9 %), áreas boscosas de encino, pino y asociación pino-encino (32 %). Los cultivos predominantes son los tradicionales de subsistencia: maíz asociado con frijol o como monocultivos; en menor escala se siembra trigo, alpiste y cebada de temporal; maíz *cajete* (estructura construida para conservar el agua de las lluvias de verano) y trigo invernal de humedad residual, maíz y trigo de riego; además se ha reportado triticale, avena, alfalfa y sorgo. Ambos milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) y los pastos ayudan a la retención del suelo y a evitar su pérdida (Plan Municipal de Desarrollo. San Juan Yucuita, Nochixtlán, Oaxaca. 2010).

MATERIALS AND METHODS

Study area

The research was conducted in an area (32, 919 ha) located in the northeast of MAO (17° 30' and 17° 42' N and 97° 00' and 97° 25' W) (Figure 1) forming part of the physiographic province of the Sierra Madre del Sur (Southern Sierra Madre) and the physiographic subprovinces Sierras Centrales of Oaxaca and Mixteca Alta. Its climate is temperate sub-humid and the sierra is the predominant topoform. The geology of the area is highly varied, though limestones (36 %) prevail, as well as basic extrusive igneous rocks (18 %) and limestone-shale association (8 %), in addition to other minor rocks on the surface such as sandstones (Rivas, 2008)¹.

Representative soils in the area are Leptosols, Pheozem and Regosoles (INEGI, 2007; IUSS Working Group WRB, 2014).

Leptosols are thin, stony and poorly developed soils, which may contain a large amount of calcareous material. They are associated with sites of complex orography, are common in mountainous areas and in heavily eroded regions, while their agricultural potential is limited because of their shallow depth and abundant stoniness. The Pheozem are dark and rich in organic matter, they present limitations for agricultural activity as they are susceptible to wind and water erosion and periodic droughts. Regosols are formed on unconsolidated materials and are located within the most fertile soils; their main use is agricultural.¹

The vegetation of the area, according to the INEGI (2007), is mostly induced pasture (25.9 %), wooded areas of oak, pine and pine-oak association (32 %).

The predominant crops are traditional subsistence ones: maize associated with beans or as monocultures; on a smaller scale, wheat, canary seed and barley are planted; maize in *cajete* (structure built to preserve water from summer rains) and winter wheat grown on residual moisture, irrigated maize and wheat; also, triticale, oats, alfalfa and sorghum. Both *milpa* intercropped with fruit trees (MIAF) and pastures help to retain the soil and prevent its loss (Plan Municipal de Desarrollo (Municipal Development Plan), San Juan Yucuita, Nochixtlán, Oaxaca, 2010).

Soil sampling

Fifty seven sampling sites were selected (42 agricultural, 12 degraded and 3 forest sites) distributed in five communities of five municipalities of the zone: Tonaltepec (Santo Domingo

¹Rivas Guevara María. 2008. Caracterización del manejo de suelo y uso del agua de lluvia en la Mixteca Alta: jollas y maíces de cajete. Tesis Doctorado. Postgrado en Socioeconomía, estadística e informática. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 245 p.

Muestreo de suelos

Para el estudio se seleccionaron 57 sitios de muestreo (42 agrícolas, 12 degradados y 3 bosque) distribuidos en cinco localidades de cinco municipios de la zona: Tonaltepec (Santo Domingo Tonaltepec), Gavillera, (San Bartolo Soyaltepec), Cerro Prieto (San Miguel Chicahua), Nduayaco (Santiago Apoala) y Pericón (Santa María Apazco). Los sitios muestreados fueron: 1) diez sitios agrícolas, cuatro degradados en Tonaltepec; 2) diez sitios agrícolas, un degradado en Gavillera; 3) siete sitios agrícolas, tres degradados y un bosque en Pericón; 4) nueve sitios agrícolas, dos degradados en Nduayaco; 5) seis sitios agrícolas, dos degradados en Cerro Prieto. Además se colectó suelo en tres sitios de bosque. Las comunidades de cada municipio se eligieron con base en tres criterios: 1) que pertenecieran a la misma cuenca (Papaloapan), 2) que fueran de alta y muy alta marginación de acuerdo al Consejo Nacional de Población 2010 y, 3) que los productores estuviesen dispuestos a cooperar. La selección no obedeció a un modelo estadístico determinado, sino a criterio del investigador y se decidió que la distribución de las localidades fuese dirigida en función de los tres criterios arriba señalados. En cada sitio se obtuvo una muestra compuesta de suelo formada por seis submuestras recolectadas del incremento de profundidad 0 a 30 cm, con una barrena muestreadora de fertilidad. La muestra fue reducida a 2 kg mediante cuarteo. El suelo se secó a la sombra y a temperatura ambiente, luego se molió y tamizó a través de una malla de 2 mm, para realizar los análisis químicos en laboratorio. Los sitios de los cuales se obtuvieron las muestras fueron georreferenciados y las coordenadas ubicadas en un mapa temático de degradación. Los suelos de bosques se recolectaron y analizaron para tener una referencia de las condiciones actuales de los mismos.

Análisis químicos

En las muestras de suelo se determinó: pH por potenciometría (relación suelo-agua 1:2), materia orgánica (MO) por combustión húmeda por el método Walkley y Black (Jackson, 1976) y P extraíble Olsen (P_{ext}) (CSTPA, 1980). La extracción de K y Na intercambiables se realizó con acetato de amonio 1N pH7 y con acetato de sodio 1N pH 8.2 para Ca y Mg para evitar la solubilización de los carbonatos de Ca libres, presentes en los suelos del área (Cano *et al.*, 1984; Castellanos *et al.*, 2000). Las bases intercambiables se determinaron mediante espectroscopía de absorción atómica. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se estimó mediante la suma de las bases de intercambio (Cottenie, 1980). El C en la biomasa microbiana (C_{BM}) se determinó por fumigación y extracción con cloroformo (Joergensen

Tonaltepec), Gavillera, (San Bartolo Soyaltepec), Cerro Prieto (San Miguel Chicahua), Nduayaco (Santiago Apoala) and Pericón (Santa María Apazco). The sites sampled were: 1) ten agricultural sites, four degraded in Tonaltepec; 2) ten agricultural sites, one degraded in Gavillera; 3) seven agricultural sites, three degraded and a forest in Pericón; 4) nine agricultural sites, two degraded in Nduayaco; 5) six agricultural sites, two degraded in Cerro Prieto. In addition, soil in three forest sites were also collected. The communities of each municipality were chosen based on three criteria: 1) belonging to the same basin (Papaloapan), 2) being of high and very high marginalization according to the National Council of Population 2010, and 3) having producers willing to cooperate. The selection did not follow a statistical model, but was rather decided by the researcher experience and the distribution of localities was decided to be directed according to the three criteria above indicated.

In each site we obtained a composite soil sample from a mix of six subsamples collected from the 0 to 30 cm depth, with a fertility sampling auger. The sample was reduced to approximately 2 kg by quartering. The soil was dried in the shade and at room temperature, then ground and sifted through a 2 mm mesh, to perform the chemical analyses in the laboratory. The sites from where we obtained the samples were georeferenced and the coordinates located on a thematic map of degradation. The forest soils were collected and analyzed to have a reference of the current conditions of them.

Chemical analysis

In the soil samples we determined: pH by potentiometry (soil-water ratio 1:2), organic matter (OM) by wet combustion with the Walkley and Black method (Jackson, 1976) and extractable P Olsen (P_{ext}) (CSTPA, 1980). The extraction of exchangeable K and Na was carried out with 1N pH7 ammonium acetate and 1N pH 8.2 sodium acetate for Ca and Mg to avoid the solubilization of free Ca carbonates, present in the soils of the area (Cano *et al.*, 1984, Castellanos *et al.*, 2000). Exchangeable bases were determined by atomic absorption spectroscopy. The effective cation exchange capacity (ECEC) was estimated by adding the exchangeable bases (Cottenie, 1980). The carbono (C) in the microbial biomass (C_{BM}) was determined by fumigation and extraction with chloroform (Joergensen and Brookes, 1990). From here on these soil characteristics will be called attributes in order to maintain a terminology consistent with the soil quality articles in which this term is preferred. For each condition of the soil and attribute measured, we obtained the mean value of the repetitions. The mean comparison was made with the Tukey test ($p \leq 0.05$).

y Brookes, 1990). En lo sucesivo estas características evaluadas se denominarán atributos, para mantener una terminología consecuente con los artículos de calidad del suelo en los cuales se prefiere este término. Para cada condición del suelo y atributo medido se obtuvo el valor medio de las repeticiones. La comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Indicadores de calidad del suelo

La fertilidad del suelo integra atributos físicos, químicos y biológicos del suelo (Pieri, 1989). En este estudio sólo se usaron atributos químicos, fisicoquímicos y un biológico para definir los indicadores y clases de calidad. Los atributos seleccionados fueron: pH en agua (1:2), MO, P_{ext} Olsen, K, Ca y Mg intercambiables (K_{int} , Mg_{int} , Ca_{int}), CICE y C en la biomasa microbiana. Estas variables se seleccionaron porque se usan con frecuencia para definir la fertilidad del suelo. Para definir los ICS y los valores asociados se usó la metodología propuesta por Cantú *et al.* (2007), para lo cual se requiere definir los límites máximo (I_{max}) y mínimo (I_{min}) de los atributos seleccionados. Como no existe una única forma para establecer estos límites, los suelos agrícolas y degradados se definieron con los siguientes criterios: conceptos teóricos, tipo de suelo, condiciones de suelo ideales para los cultivos potenciales en la zona de estudio, disponibilidad de nutrientes, presencia de carbonatos, rendimientos máximos de acuerdo con las condiciones actuales del suelo, condiciones climáticas y la experiencia de investigadores que han investigado en la zona de estudio (Cuadro 1).

Los valores de los indicadores fueron normalizados utilizando una escala de 0 a 1. Para los ICS estos valores representan la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad, respectivamente (Cantú *et al.*, 2007). En los suelos agrícolas y degradados, el valor máximo del indicador I_{max} (valor normalizado $V_n = 1$) representa el valor ideal al que se aspira llegar o la mejor situación de calidad del suelo (Cantú *et al.*, 2007). El valor mínimo del mismo I_{min} (valor normalizado $V_n = 0$) representa el mínimo deseable o la calidad mínima aceptable. Para los suelos de bosque no se calcularon los indicadores de calidad porque estos sólo se usaron como referencia de suelos sin perturbación.

El cálculo del valor normalizado de los indicadores se realizó de la siguiente manera:

$$V_n = (I_m - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})$$

donde, V_n : valor normalizado del indicador; I_m : medida experimental del atributo considerado como indicador; I_{min} : valor mínimo del atributo considerado como indicador; I_{max} : valor máximo del atributo considerado como indicador.

Indicators of soil quality

Soil fertility integrates physical, chemical and biological soil attributes (Pieri, 1989). In this study, only chemical, physicochemical and biological attributes were used to define indicators and quality classes. The selected attributes were: pH in water (1:2), OM, P_{ext} Olsen, K, Ca and Mg exchangeable (K_{int} , Mg_{int} , Ca_{int}), ECEC and C in the microbial biomass. We selected these variables because they are frequently used to define soil fertility. To define the SQI and the associated values, we used the methodology proposed by Cantú *et al.* (2007), for which it is necessary to define the maximum (I_{max}) and minimum (I_{min}) limits of the selected attributes. As there is no single way to establish these limits, agricultural and degraded soils were defined with the following criteria: theoretical concepts, type of soil, ideal soil conditions for potential crops in the study area, availability of nutrients, presence of carbonates, maximum yields according to current soil conditions, climatic conditions and the experience of researchers who have studied the area (Table 1).

The values of the indicators were normalized using a 0 to 1 scale. For the SQI these two values represent the worst and best condition from the point of view of quality, respectively (Cantú *et al.*, 2007). In agricultural and degraded soils, the maximum value of the I_{max} indicator (normalized value $V_n = 1$) represents

Cuadro 1. Atributos usados como indicadores de calidad de suelos agrícolas y degradados de la Mixteca Alta Oaxaqueña y valores límites.

Table 1. Attributes used as quality indicators of agricultural and degraded soils of the Mixteca Alta Oaxaqueña and limit values.

Indicador	Valor máximo (I_{max}) [†]	Valor mínimo (I_{min}) [‡]
pH (H ₂ O) (1:2)	7.5	5.0
Materia orgánica (MO) (%)	6.0	2.0
[§] P _{ext} (Olsen) (ppm)	20.0	8.0
[¶] Ca _{int} (cmol kg ⁻¹)	35.0	8.0
[¶] Mg _{int} (cmol kg ⁻¹)	5.0	2.0
^{††} K _{int} (cmol kg ⁻¹)	1.0	0.2
^{¶¶} CICE (cmol kg ⁻¹)	40.0	15.0
^{§§} C _{BM} (mg kg ⁻¹)	400.0	10.0

[†] I_{min} : valor mínimo del atributo; [‡] I_{max} : valor máximo del atributo; [§]P_{ext}: fósforo extractable; [¶]Ca_{int}: calcio intercambiable; [¶]Mg_{int}: magnesio intercambiable; ^{††}K_{int}: potasio intercambiable; ^{¶¶}CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; ^{§§}C_{BM}: carbono de la biomasa microbiana. [†] I_{min} : minimum value of the attribute; [‡] I_{max} : maximum value of the attribute; [§]P_{ext}: extractable phosphorus; [¶]Ca_{int}: exchangeable calcium; [¶]Mg_{int}: exchangeable magnesium; ^{††}K_{int}: exchangeable potassium; ^{¶¶}ECEC: effective cation exchange capacity; ^{§§}C_{BM}: carbon from microbial biomass.

Para la interpretación de los indicadores de calidad generados para los suelos de los cinco municipios de la MAO se plantea una modificación de la escala propuesta por Cantú *et al.* (2007), la que tiene cinco clases de calidad. Nuestra propuesta considera siete clases de calidad para cada indicador (Cuadro 2), una clase mayor a uno y otra menor de cero, debido al amplio rango de valores que presentaron los indicadores generados para la MAO.

Mapa temático

Una de las principales funciones de los indicadores es evaluar condiciones o tendencias en el tiempo y realizar un seguimiento de ellas (Cantú *et al.*, 2007), para lo cual los sitios se georeferenciaron en un mapa temático con los tipos de degradación para dar seguimiento en el espacio y en el tiempo. Con ello se cumple una de las condiciones requeridas para los indicadores de calidad del suelo (Cantú *et al.*, 2007). El uso de un mapa de degradación se debió a que este proceso tiene un nexo íntimo con la pérdida de la capacidad de suelo para la producción y otros servicios. Para generar este mapa se usó la información vectorial disponible en la capa Evaluación de la Degradación del Suelo Causada por el Hombre en la República Mexicana (SEMARNAT-CP, 2002), escala 1:250,000, y el documento complementario denominado Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT, 2012). A partir de una capa de demarcaciones municipales escala 1:250,000 generada por la CONABIO (2012), se extrajeron los municipios correspondientes al área de estudio. Con base en este mapa nuevo y mediante el comando Extract de ArcGis, versión 10.1 (ESRI, 2013) se extrajeron los polígonos de tipos de degradación de suelo que ocurren en el área de estudio. A esta composición se le superpuso una capa vectorial con los puntos correspondientes a las coordenadas de los sitios de muestreo. El mapa temático de degradación generado indica el tipo y causas principales de degradación de las zonas donde se ubican los suelos seleccionados para el estudio. Para verificar si la

the ideal value which is expected to be reached or the best soil quality situation (Cantú *et al.*, 2007). The minimum value of the same I_{min} (normalized value $V_n = 0$) represents the minimum desirable or the minimum acceptable quality. For forest soils, quality indicators were not calculated because they were only used as reference for undisturbed soils.

The calculation of the normalized value of the indicators was made in the following way:

$$V_n = (I_m - I_{min}) / (I_{max} - I_{min})$$

where V_n : normalized value of the indicator; I_m : experimental measurement of the attribute considered as an indicator; I_{min} : minimum value of the attribute considered as an indicator; I_{max} : maximum value of the attribute considered as an indicator.

For the interpretation of the quality indicators generated for the soils of the five MAO municipalities, a modification of the scale recommended by Cantú *et al.* (2007) is proposed, which has only five quality classes. Our proposal considers seven quality classes for each indicator (Table 2), a class higher than one and another lower than zero, due to the wide range of values presented by the indicators generated for the MAO.

Thematic map

One of the main functions of the indicators is to evaluate conditions or trends over time (Cantú *et al.*, 2007), for which the sites were georeferenced in a thematic map with the types of degradation for follow up changes in space and time. This meets one of the conditions required for soil quality indicators (Cantú *et al.*, 2007). The use of a degradation map was due to the fact that this process has an intimate connection with the loss of soil capacity for production and other services. To generate this map, we used the vector information available in the layer Evaluation of Soil Degradation Caused by Man in the Mexican Republic (SEMARNAT-CP, 2002), scale 1:250 000, and the complementary document called Report on the Situation of the Environment in Mexico (SEMARNAT, 2012). From a layer of municipal demarcations scale 1: 250 000 generated by the CONABIO (2012), the municipalities corresponding to the study area were mined. Based on this new map and using the command Extract of ArcGis, version 10.1 (ESRI, 2013), we extracted the polygons from the types of soil degradation that occur in the study area. To this composition a vector layer was superimposed with the points corresponding to the coordinates of the sampling sites. The thematic map of degradation generated indicates the type and main causes of degradation of the areas where the soils selected for the study are located. To verify

Cuadro 2. Clases de calidad de suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña.

Table 2. Soil quality classes of the Mixteca Alta Oaxaqueña.

Clases de calidad	Escala
Exceso	1.00 - 1.30
Muy alta calidad	0.80 - 1.00
Alta calidad	0.60 - 0.79
Moderada calidad	0.40 - 0.59
Baja calidad	0.20 - 0.39
Muy baja calidad	0 - 0.19
Déficit	-1.0 - 0

información generada por éste correspondía con la de los sitios de estudio, se cotejó con fotografías y observaciones en campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis químico de los suelos

Para interpretar los atributos químicos evaluados se usó la información propuesta por Castellanos *et al.* (2000). Los suelos agrícolas de la MAO son de neutros a alcalinos (pH 6.8 a 8.2). En los suelos degradados de Tonaltepec, Pericón y Gavillera el pH se ubicó en el rango neutro a ligeramente ácido (pH 7.2 a 6.4) (Cuadro 3). En los suelos agrícolas de esta zona la MO varió de moderadamente baja a media (1.7 a 2.3 %) y en los degradados de moderadamente baja a baja (< 1.4 %). En contraste, en Tonaltepec la MO fue muy baja (< 0.7 % MO) y en los suelos agrícolas de Pericón alcanzó concentraciones > 4 %, lo cual se debe al aporte de material orgánico al suelo (residuos y composta). La concentración de P_{ext.} en los suelos degradados fue baja (< 10 ppm P_{ext.} Olsen), pero los

whether the information generated by this map corresponded with that of the study sites, we checked it with photographs and observations in the field.

RESULTS AND DISCUSSION

Chemical analysis of soils

To interpret the chemical attributes evaluated, we used the information proposed by Castellanos *et al.* (2000). The agricultural MAO soils are from neutral to alkaline (pH 6.8 to 8.2). In the degraded soils of Tonaltepec, Pericón and Gavillera the pH was located in the neutral to slightly acidic range (pH 7.2 to 6.4) (Table 3). In the agricultural soils of this zone the OM varied from moderately low to medium (1.7 to 2.3 %) and in those degraded from moderately low to low (<1.4 %). In contrast, in Tonaltepec the OM was very low (< 0.7 % OM) but reached concentrations >4 % in the agricultural soils of Pericón, which is due to the contribution of organic matter to the soil (added residues and compost). The

Cuadro 3. Atributos evaluados en los suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña.
Table 3. Attributes evaluated in the soils of the Mixteca Alta Oaxaqueña.

Comunidad	pH	†MO %	‡P _{ext.} ppm	§Ca _{int.}	¶Mg _{int.} cmol kg ⁻¹	°K _{int.}	††CICE	‡‡C _{BM} mg kg ⁻¹
Suelos agrícolas								
Tonaltepec	8.2a	0.6b	8.6a	32.3a	5.1a	0.31b	41.4a	37.4b
Pericón	7.9a	4.0b	20.6a	33.4a	2.9a	0.50b	38.9a	416.9b
Nduayaco	7.3ba	2.3b	17.9a	20.8a	2.8a	0.19b	24.9a	194.5b
Gavillera	7.2ba	2.2b	9.3a	20.4a	1.3a	0.26b	22.6a	146.2b
Cerro Prieto	6.8a	1.7b	10.4a	6.6a	1.0	0.14b	7.9a	110.2b
Suelos degradados								
Tonaltepec	6.9ba	0.3b	9.3a	25.7a	5.00	0.29b	24.9a	14.9b
Pericón	6.9ba	1.4b	2.9a	16.6a	16.5a	0.20b	33.8a	141.6b
Nduayaco	6.5ba	0.5b	7.0a	13.2a	3.8a	0.18b	17.7a	17.4b
Gavillera	7.2ba	1.4b	12.8a	9.7a	2.5a	0.16b	12.9a	127.4b
Cerro Prieto	6.4ba	0.7b	1.6a	2.8a	1.2a	0.23b	4.5a	29.5b
Suelos de bosque								
Tonaltepec y Gavillera	6.8b	4.4a	2.2 ^a	7.0a	1.6a	0.26a	9.0a	313a
Cerro Prieto y Nduayaco	5.7b	6.0a	2.6 ^a	2.4a	0.8a	0.28a	3.6a	417a
Pericón	6.5b	18.5a	3.7 ^a	42.8a	2.8a	3.47a	49.5a	1980a
DMS	1.0	2.7	13.5	19.2	7.2	0.6	22.1	297

‡‡Medias con letra diferente son estadísticamente significativas (p<0.05); DMS: diferenciamínima significativa ♦‡‡Means with different letter are statistically significant (p<0.05); DMS: minimum significant difference.

†MO: materia orgánica; ‡P_{ext.}: fósforo extractable; §Ca_{int.}: calcio intercambiable; ¶Mg_{int.}: magnesio intercambiable; °K_{int.}: potasio intercambiable; ††CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; ‡‡C_{BM}: carbono de la biomasa microbiana ♦

†OM: organic matter; ‡P_{ext.}: extractable phosphorus; §Ca_{int.}: exchangeable calcium; ¶Mg_{int.}: exchangeable magnesium; °K_{int.}: interchangeable potassium; ††ECEC: effective cation exchange capacity; ‡‡C_{BM}: carbon of the microbial biomass.

suelos agrícolas de Pericón, Nduayaco y Cerro Prieto presentaron mayores concentraciones de P_{ext} Olsen (10.4 a 20.6 ppm) (Cuadro 3). Los contenidos de Ca_{int} fueron altos ($> 10 \text{ cmol kg}^{-1}$) tanto en los suelos agrícolas como en los degradados. La excepción fueron los suelos del municipio de Cerro Prieto cuyo contenido de este catión fue bajo ($< 5 \text{ cmol kg}^{-1}$).

La concentración de las otras bases de intercambio fueron de medias y bajas Mg_{int} (1 a 5 cmol kg^{-1}) y K_{int} ($< 0.6 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Cuadro 3). La excepción fue el suelo degradado de Pericón con 16.6 cmol kg^{-1} de Mg_{int} , posiblemente relacionado con la mineralogía de los suelos (Bautista *et al.*, 2011). Los valores de CICE fueron definidos principalmente por los contenidos de Ca y Mg intercambiables, los cuales fueron altos (25 a 41 cmol kg^{-1}) en Tonaltepec y Pericón, medios (13 a 25 cmol kg^{-1}) en Nduayaco y Gavillera y bajos (4 a 8 cmol kg^{-1}) en Cerro Prieto (para suelos agrícolas y degradados). La disminución importante del C_{BM} en los suelos degradados de Pericón, Nduayaco y Cerro Prieto (14.9 a 141.6 mg kg^{-1}) indica que en esos suelos se ha perdido la MO usada por los microorganismos como fuente de carbono (*cf.* Xu *et al.*, 2013), lo cual se explica por la erosión presente en la zona. El incremento del carbono orgánico en el suelo fue acompañado de un aumento en C_{BM} , como se observa en suelos de diferentes ecosistemas y cultivos agrícolas (Xu *et al.*, 2013). Pero no hubo suficientes datos experimentales para establecer una correlación.

Los suelos de los bosques presentaron valores de pH de moderadamente ácidos a neutros (5.7 a 6.8), contenidos muy altos de MO (4.4 a 18.5 %) y de C_{BM} (312 a 1980 mg kg^{-1}) y niveles de P_{ext} bajos (2.2 a 3.7 ppm), como se espera en suelos forestales. Las bases intercambiables (Ca, Mg y K) y la CICE fueron notablemente más bajas que en los sitios agrícolas y degradados, lo que se asocia a un complejo de intercambio compuesto de material orgánico en su mayoría, donde las bases de intercambio deben ser bajas. El contenido alto de Ca_{int} (42.8 cmol kg^{-1}) y por ende una CICE alta (49.5 cmol kg^{-1}) en el suelo del bosque de Pericón, denota presencia de material calcáreo más que por la alta CIC.

Indicadores de calidad del suelo

El indicador de pH presentó valores cercanos a uno en la mayoría de los suelos agrícolas y degradados; este valor se considera como el óptimo ($\text{pH} \approx I_{\text{max}}$) para el desarrollo de cultivos potenciales de la

concentración de P_{ext} en los degradados suelos was low ($< 10 \text{ ppm } P_{\text{ext}}$ Olsen), but the agricultural soils of Pericón, Nduayaco and Cerro Prieto showed higher presence of P_{ext} Olsen (10.4 to 20.6 ppm) (Table 3). The contents of Ca_{int} were high ($> 10 \text{ cmol kg}^{-1}$) in both agricultural and degraded soils. The soils of the municipality of Cerro Prieto were the exception as the content of this cation was low ($< 5 \text{ cmol kg}^{-1}$) in them.

The concentrations of the other exchange bases were medium and low Mg_{int} (1 to 5 cmol kg^{-1}) and K_{int} ($< 0.6 \text{ cmol kg}^{-1}$) (Table 3). The exception was the degraded soil of Pericón with 16.6 cmol kg^{-1} of Mg_{int} , possibly related to the mineralogy of soils (Bautista *et al.*, 2011).

The ECEC values were defined mainly by the exchangeable Ca and Mg contents, which were high (25 to 41 cmol kg^{-1}) in Tonaltepec and Pericón, medium (13 to 25 cmol kg^{-1}) in Nduayaco and Gavillera, and low (4 to 8 cmol kg^{-1}) in Cerro Prieto (for agricultural and degraded soils). The significant decrease of C_{BM} in the degraded soils of Pericón, Nduayaco and Cerro Prieto (14.9 to 141.6 mg kg^{-1}) indicates that the OM used by microorganisms as a C source has been lost in these soils (*cf.* Xu *et al.*, 2013), which is the result of the erosion present in the area. The increase of organic C in the soil was accompanied by an increase in C_{BM} , as observed in soils of different ecosystems and agricultural crops (Xu *et al.*, 2013). But there were not enough experimental data to establish a correlation.

The soils of the forests presented pH values from moderately acid to neutral (5.7 to 6.8), very high OM contents (4.4 to 18.5 %) and C_{BM} (312 to 1980 mg kg^{-1}) but low P_{ext} levels (2.2 at 3.7 ppm), as expected in forest soils. The exchangeable bases (Ca, Mg and K) and the ECEC were notably lower than in the agricultural and degraded sites, which is associated to an exchange complex composed of mostly organic matter, where the exchangeable bases must be low. The high content of Ca_{int} (42.8 cmol kg^{-1}) and therefore a high ECEC (49.5 cmol kg^{-1}) in the soil of Pericón forest denotes the presence of calcareous material more than a high cation exchange capacity.

Indicators of soil quality

The values of the indicator pH were close to 1 in most agricultural and degraded soils; this

zona (Cantú *et al.*, 2007). Este atributo químico no parece presentar un problema en el estado actual de la fertilidad del suelo. Sólo los sitios agrícolas de Tonaltepec y Pericón, con indicadores de calidad de pH mayores a la unidad (*i.e.* 1.28 y 1.16, respectivamente), requieren acciones correctivas de manejo para disminuir el pH del suelo y evitar problemas de disponibilidad de Fe, Zn, Mn y Cu (Figura 1A). Estos valores se atribuyen a la presencia de niveles altos de material calcáreo en esa zona. El indicador de calidad de pH también fue usado por Bi *et al.* (2013) en su estudio de tipos de suelo.

Los indicadores de MO y P_{ext} fueron negativos en los suelos degradados de las cinco comunidades (Figuras 1B y 1C). Según Cantú *et al.* (2007), valores menores a I_{min} (menores a cero) indican la peor situación de calidad y reportan valores muy bajos para el indicador de carbono orgánico del suelo (COS) (0.18) en suelos agrícolas de Argentina. Además, Gómez *et al.* (1996), Campos *et al.* (2007), Reynolds *et al.* (2009) y Bi *et al.* (2013) usaron el indicador de COS. Gregorich *et al.*, 1997; Lal *et al.*, 1999; Govaerts *et al.*, 2006 y Ghaemi *et al.*, 2014) también lo consideran clave para la calidad del suelo. Los valores negativos de estos indicadores indican que los niveles de MO y P_{ext} Olsen son menores a los mínimos requeridos para el desarrollo de cultivos de la zona, por lo cual deben ser corregidos. Ello podría lograrse parcialmente mediante la adición de estiércoles compostados disponibles en la zona y residuos de cosecha.

Las concentraciones bajas de P_{ext} pueden deberse a que no es usual fertilizar con fósforo y a las condiciones restrictivas generadas por la alta presencia de material calcáreo presente en estos suelos. Por lo tanto, para mejorar el aprovechamiento del fósforo se recomienda usar fertilizantes fosfatados con baja relación Ca/P.

El valor del indicador de C_{BM} fue positivo pero bajo ya que varió de 0.1 a 0.5 en los suelos agrícolas (Figura 1D). Estos valores se explican por la escasa concentración de MO en esos suelos, condición que no favorece el desarrollo de la biomasa microbiana. Campos *et al.* (2007), Bi *et al.* (2013) y Liu *et al.* (2013) también han usado C_{BM} como indicador de calidad de suelo. Una excepción fue el suelo agrícola de Pericón, donde los indicadores de MO, P_{ext} y C_{BM} fueron 0.5, 1.0 y 1.0. Los valores de uno son considerados como altos y se explican por la adición de composta al suelo para su fertilización, como se

value is considered as optimum ($\text{pH} \approx I_{\text{max}}$) for the development of potential crops in the area (Cantú *et al.*, 2007). This chemical attribute does not seem to present a problem in the current state of soil fertility. Only the agricultural sites of Tonaltepec and Pericón, with indicators of pH quality greater than 1 (*i.e.* 1.28 and 1.16, respectively), require corrective management actions to lower the soil pH and avoid problems of availability of Fe, Zn, Mn and Cu (Figure 1A). These values are attributed to the presence of high levels of exchangeable Ca, coming from the calcareous material in that area. The quality indicator pH was also used by Bi *et al.* (2013) in their study of soil types.

The OM and P_{ext} indicators were negative in the degraded soils of the five communities (Figures 1B and 1C). According to Cantú *et al.* (2007) values lower than I_{min} (less than zero) indicate the worst quality situation and report very low values for the soil organic carbon (SOC) indicator (0.18) in agricultural soils of Argentina. In addition, Gómez *et al.* (1996), Campos *et al.* (2007), Reynolds *et al.* (2009) and Bi *et al.* (2013) used the SOC indicator. Gregorich *et al.* 1997; Lal *et al.*, 1999; Govaerts *et al.*, 2006 and Ghaemi *et al.*, 2014) also considered it a key indicator for soil quality. The negative values of these indicators indicate that OM and P_{ext} Olsen levels are lower than the minimum required for the development of crops in the area, so they must be corrected. This could be partially achieved through the addition of composted manures available in the area and crop residues.

The low concentrations of P_{ext} can be due to the fact that it is not usual to fertilize with phosphorus and to the restrictions regarding the high presence of calcareous material present in these soils. Therefore, to improve the use of phosphorus, the use of phosphate fertilizers with a low Ca/P ratio is recommended.

The value of the C_{BM} indicator was positive but low since it varied from 0.1 to 0.5 in agricultural soils (Figure 1D). These values are explained by the low concentration of OM in these soils, a condition that does not favor the development of microbial biomass. Campos *et al.* (2007), Bi *et al.* (2013) and Liu *et al.* (2013) have also used C_{BM} as an indicator of soil quality. An exception was the agricultural land of Pericón, where the indicators of OM, P_{ext} and C_{BM} were 0.5, 1.0 and 1.0. The values of 1 are considered high and are the result of the addition of compost to

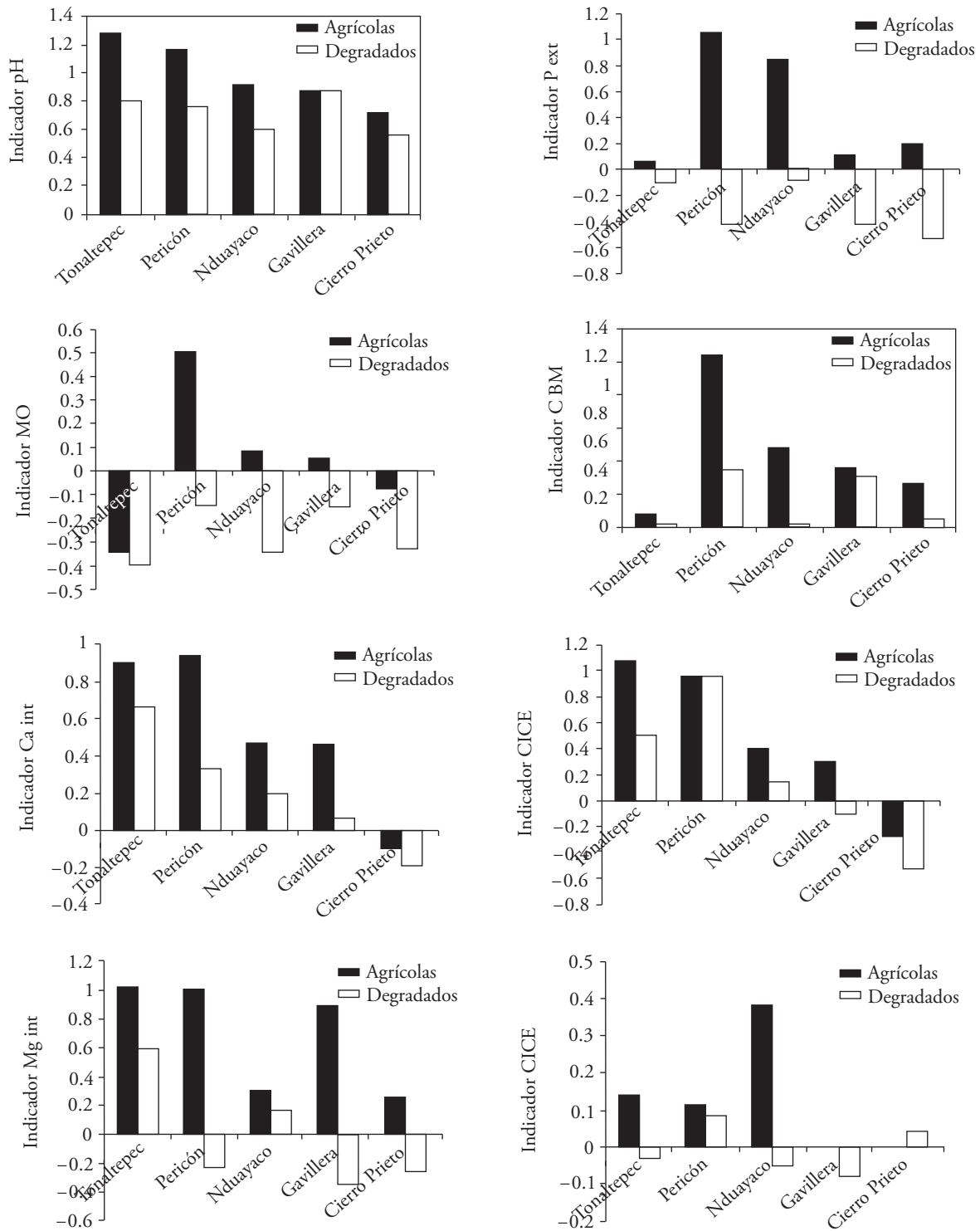


Figura 1. Valores de los indicadores de calidad de suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña.
 Figure 1. Values of the soil quality indicators of the Mixteca Alta Oaxaqueña.

constató durante las visitas al terreno. Los indicadores de Ca_{int} (0.90 y 0.94) (Figura 1E) y CICE (1.06 y 0.96) (Figura 1F) de los suelos agrícolas de Tonaltepec y Pericón se consideran condiciones ideales para mantener una adecuada fertilidad del suelo. Sin embargo, la disponibilidad potencial de este calcio está limitada por la formación de carbonatos de calcio, a juzgar por los valores de pH en estos suelos (8.2 y 7.9, respectivamente) (Castellanos *et al.*, 2000). La mayoría de los suelos en Tonaltepec corresponden a Leptosoles que se caracterizan por la presencia de material calcáreo. En Nduayaco y Gavillera, el valor del indicador de Ca_{int} (0.5) dista en 50 % del valor ideal definido para los suelos agrícolas de la zona, y el indicador de CIE dista entre 70 y 60 % del valor ideal. Los valores de los indicadores de Ca_{int} y CICE fueron menores en los suelos degradados que en los agrícolas en ambas localidades, lo cual es una clara indicación de una menor cantidad de Ca en los suelos degradados. Los valores negativos de los indicadores Ca_{int} y CICE en los suelos agrícolas y degradados de Cerro Prieto muestran que estos suelos requieren una atención especial para mejorar su calidad y fertilidad. En este sitio los suelos degradados también presentaron condiciones deficitarias en cuanto al contenido de Mg y K intercambiables (Figuras 1G y 1H, respectivamente) como lo indican los valores negativos de los indicadores de esas variables. El caso más extremo fue el indicador K_{int} con valores menores a 0.1 en los suelos agrícolas, por lo que dista en 90 % del valor ideal ($V_n=1$). Esta condición es preocupante porque tanto el potasio como el fósforo son elementos esenciales para los cultivos. Lo anterior define la necesidad de corregir el manejo del suelo e incluir el aporte de fertilizantes con potasio.

Los indicadores que definieron mejor la fertilidad baja de los suelos agrícolas y degradados de la MAO fueron MO, P_{ext} , Mg y K intercambiables. De estos indicadores, Liu *et al.* (2013) han usado K_{int} y Bi *et al.* (2013) usaron P_{dis} ; además, Bautista *et al.* (2011) reportaron que el indicador de Mg_{int} fue el mejor para evaluar la calidad de suelos semiáridos de Oaxaca, pero señalan que se debe cuidar la inclusión de este atributo químico porque sus variaciones pueden estar afectadas por la mineralogía del suelo. Otros indicadores seleccionados por Bautista *et al.* (2011) son COS, pH, C_{BM} , Mg_{int} , Ca_{int} , K_{int} , los cuales explicaron la mayor parte de la variabilidad de las propiedades de suelos semiáridos. Según Bautista *et al.*

the soil for fertilization, as we found during field visits. The Ca_{int} indicators (0.90 and 0.94) (Figure 1E) and ECEC (1.06 and 0.96) (Figure 1F) of the agricultural soils of Tonaltepec and Pericón are considered as ideal conditions to maintain an adequate soil fertility. However, the potential availability of this Ca is limited by the formation of calcium carbonates, judging by the pH values in these soils (8.2 and 7.9, respectively) (Castellanos *et al.*, 2000). The majority of the soils in Tonaltepec correspond to Leptosols that are characterized by the presence of calcareous material. In Nduayaco and Gavillera, the value of the Ca_{int} indicator (0.5) is 50 % lower than the ideal value defined for the agricultural soils of the area, and the ECEC indicator is between 70 and 60 % lower than the ideal value. The values of the Ca_{int} and ECEC indicators were lower in the degraded soils than in the agricultural ones in both locations, which is a clear indication of a lower amount of Ca in the degraded soils. The negative values of the Ca_{int} and ECEC indicators in the agricultural and degraded soils of Cerro Prieto show that these soils require special attention to improve their quality and fertility. In this site the degraded soils also presented deficit conditions in terms of the exchangeable Mg and K contents (Figures 1G and 1H, respectively) as indicated by the negative values of the indicators of these variables. The most extreme case was the K_{int} indicator with values lower than 0.1 in agricultural soils, which is why it is 90% lower than the ideal value ($V_n=1$). This condition is worrisome because K as well as P are essential elements for crops. This defines the need to correct soil management and apply fertilizers with potassium.

The indicators that best defined the low fertility of the agricultural and degraded soils of the MAO were OM, P_{ext} , exchangeable Mg and K. Of these indicators, Liu *et al.* (2013) used K_{int} , and Bi *et al.* (2013) used P_{dis} ; in addition, Bautista *et al.* (2011) reported that the Mg_{int} indicator was the best one to evaluate the quality of semiarid soils of Oaxaca, but they point out that the inclusion of this chemical attribute should be taken care of because its variations may be affected by the mineralogy of the soil. Other indicators selected by Bautista *et al.* (2011) are SOC, pH, C_{BM} , Mg_{int} , Ca_{int} , K_{int} , which explained most of the variability of the properties of semiarid soils. According to Bautista *et al.* (2011), the SOC is a very sensitive SQI and is highly associated with farming

al. (2011), el COS es un ICS muy sensible y presenta una alta asociación con sistemas de labranza. Campos *et al.* (2007) también seleccionaron al Mg_{int} y a la CICE para monitorear la calidad del suelo en un transecto del Cofre de Perote, México.

Indicadores de calidad y degradación

La degradación de los suelos se confirmó en campo por la presencia de cárcavas, canales o movimiento de masas, debido a la remoción de suelo (Figura 2). En Cerro Prieto y Nduayaco la principal causa de la degradación se ha asociado a la actividad agrícola (Figura 2A y 2B). En Pericón, la quema y retiro de los residuos de cosecha podrían disminuir los nutrientes y la materia orgánica (Figura 2C). En cambio en Tonaltepec (Figura 2D) se considera que la degradación es producto del sobrepastoreo y la deforestación, ya que este municipio demanda cantidades importantes de leña para la elaboración de artesanías de barro.

El 62 % de los ICS de suelos agrícolas y degradados presentan clases de calidad baja, muy baja, de exceso y déficit. Lo anterior indica que un porcentaje

systems. Campos *et al.* (2007) also selected the Mg_{int} and ECEC to monitor the quality of the soil in a transect of Cofre de Perote, Mexico.

Quality and degradation indicators

The degradation of the soils was confirmed in the field by the presence of gullies, channels or mass movement due to the removal of the soil (Figure 2). In Cerro Prieto and Nduayaco, the main cause of degradation has been associated with agricultural activity (Figure 2A and 2B). In Pericón, the burning and removal of crop residues could decrease nutrients and organic matter (Figure 2C). On the other hand, in Tonaltepec (Figure 2D) degradation is considered to be the product of overgrazing and deforestation, since this municipality demands important quantities of firewood for the elaboration of mud crafts. Sixty two percent of the SQI of agricultural and degraded soils present low quality, very low, excess and deficit classes. This indicates that a considerable percentage of these soils do not have the fertility conditions required for the adequate development of potential MAO crops.

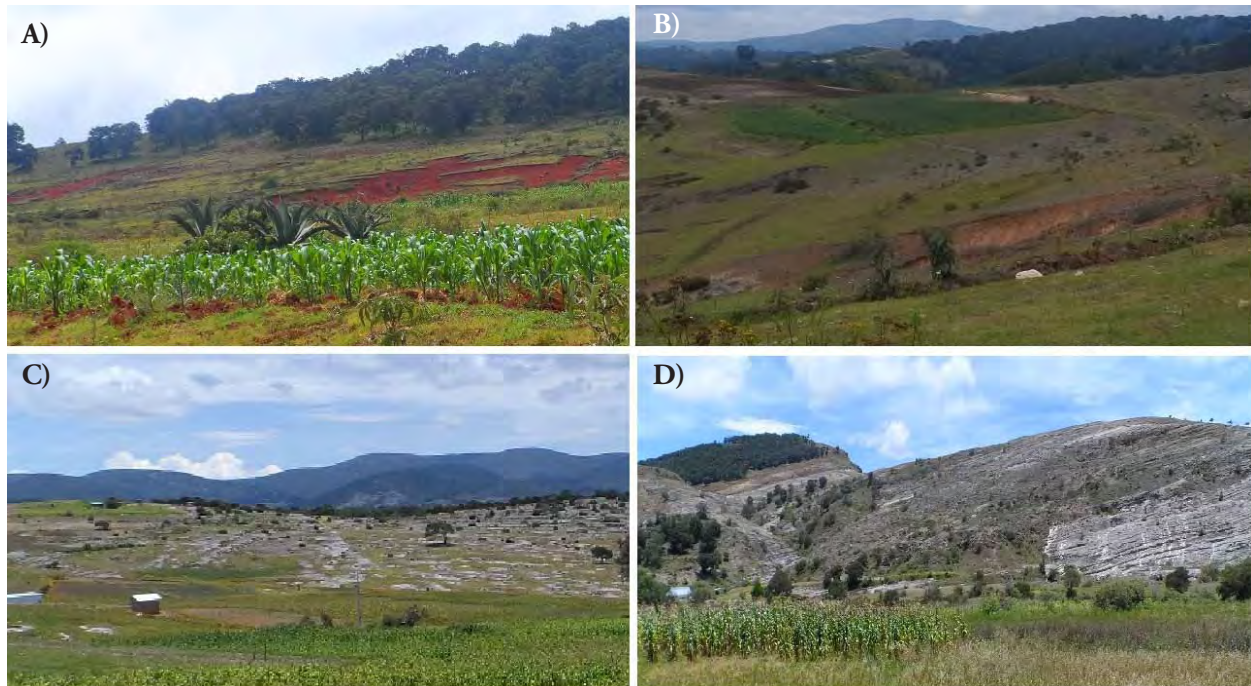


Figura 2. Sitios de muestreo de la Mixteca Alta Oaxaqueña. (2A): Cerro Prieto, San Miguel Chicahua; (2B): Nduayaco, Santiago Apoala; (2C): Pericón, Santa María Apazco; (2D): Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.

Figure 2. Sampling sites of the Mixteca Alta Oaxaqueña. (2A): Cerro Prieto, San Miguel Chicahua; (2B): Nduayaco, Santiago Apoala; (2C): Pericón, Santa María Apazco; (2D): Tonaltepec, Santo Domingo Tonaltepec.

considerable de esos suelos no tienen las condiciones de fertilidad requeridas para el desarrollo adecuado de los cultivos potenciales de la MAO.

La ubicación en el mapa temático de degradación (Figura 3) de las clases de calidad asociadas a los valores obtenidos para los ICS de la MAO, permitió definir una relación entre el estado actual de la degradación de los suelos, los valores de los ICS y las clases de calidad asociadas a éstos. Los valores de los ICS de los suelos agrícolas indicaron clases de calidad deficitaria (ICS < 0), moderada, baja y muy baja (ICS < 0.5) así como muy alta (Vn = 1) en los sitios de Gavillera, Nduayaco y Tonaltepec. Los sitios de Gavillera se ubicaron en el mapa de degradación en zonas con erosión hídrica con deformación de terreno, causada por sobrepastoreo, actividades agrícolas

The location in the thematic map of degradation (Figure 3) of the quality classes associated with the values obtained for the MAO soil quality index allowed to define a relationship between the current state of soil degradation, the SQI values and the quality classes associated with them. The SQI values of the agricultural soils indicated deficient quality classes (SQI < 0), moderate, low and very low (SQI < 0.5), as well as very high (Vn=1) in the sites of Gavillera, Nduayaco and Tonaltepec. The sites of Gavillera were located on the map of degradation in areas with water erosion and land deformation, caused by overgrazing, agricultural activity and overexploitation of vegetation for domestic use (Figure 3). The Nduayaco and Tonaltepec sites were located in areas of water erosion with loss of

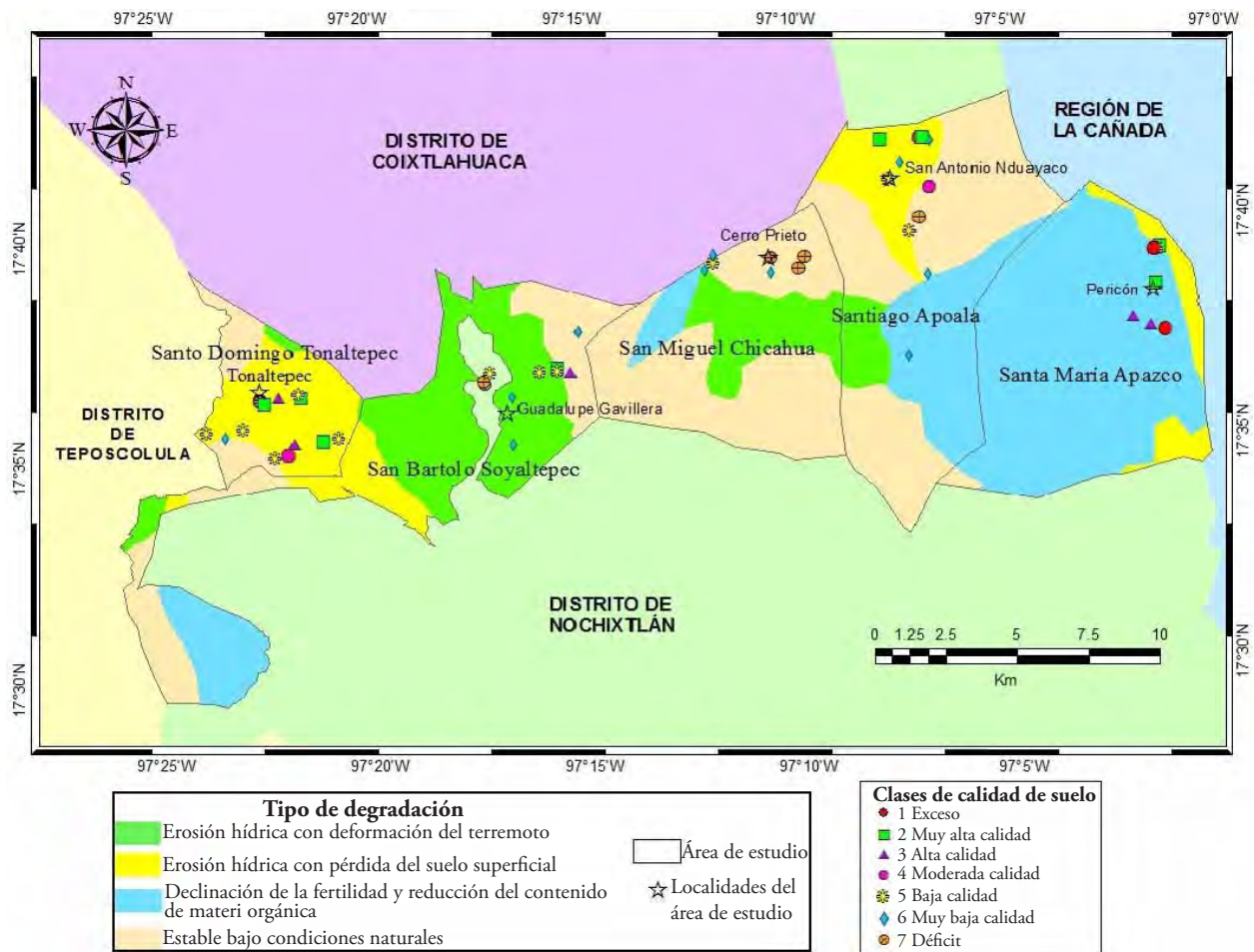


Figura 3. Ubicación de sitios y clases de calidad de suelos de la Mixteca Alta Oaxaqueña en el mapa temático de degradación.
Figure 3. Location of sites and soil quality classes of the Mixteca Alta Oaxaqueña in the thematic degradation map.

y sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico (Figura 3). Los sitios de Nduayaco y Tonaltepec se ubicaron en zonas de erosión hídrica con pérdida de suelo superficial, y la degradación se atribuye principalmente a la deforestación con remoción de la vegetación para uso doméstico, sobrepastoreo y actividades agrícolas (Figura 3).

La información de los sitios de Pericón y Cerro Prieto se discute aparte. En Pericón, los suelos agrícolas y degradados se localizan en áreas que presentan una degradación debida a la declinación de la fertilidad y reducción del contenido de MO, debido a la deforestación con remoción de vegetación y a las actividades agrícolas (Figura 3). Sin embargo, los valores de los indicadores P_{ext} y C_{BM} para el suelo agrícola de esta localidad, presentaron valores altos (ICS ~ 1), lo que define una clase de calidad muy alta. Esto confirma que el manejo del suelo agrícola, consistente en adición de material orgánico, es adecuado. En Cerro Prieto, los ICS de los suelos agrícolas y degradados se localizan en áreas estables en las condiciones normales (Figura 3). Sin embargo, en ambas condiciones los valores de los ICS fueron muy bajos o negativos, al igual que los ICS de los suelos degradados de Tonaltepec, Pericón, Nduayaco y Gavillera. Esto confiere a todos ellos clases de calidad muy baja y deficitaria, y por tanto una fuerte declinación de su fertilidad.

Los resultados anteriores indican que para la mayoría de los sitios evaluados hubo una coincidencia en el estado de la degradación del suelo (mapa temático de degradación) y los valores de ICS y clases de calidad. Sólo en Cerro Prieto y Pericón esta coincidencia no fue clara. En ambos casos, los valores de los ICS indicaron condiciones de fertilidad del suelo no coincidentes, con lo cual podría haberse deducido a partir del mapa de degradación. Lo anterior es atribuible a la escala de los documentos usados para generar el mapa temático de degradación (1:250,000). Las coincidencias anteriores pueden mejorarse si se usan mapas de mayor escala. Sin embargo, el desarrollo de cartografía a nivel regional requiere una inversión considerable debido a la gran cantidad de trabajo de campo que se debe realizar. Además, en el país se dispone de recursos cartográficos considerables, los cuales pueden ser complementados con información como fue el caso del estudio actual. De esta manera puede ampliarse el uso de la cartografía actual, lo que si permitiría hacer recomendaciones a nivel regional.

surface soil; and degradation is attributed mainly to deforestation with removal of vegetation for domestic use, overgrazing and agricultural activity (Figure 3).

Information on the Pericón and Cerro Prieto sites is discussed separately. In Pericón, agricultural and degraded soils are located in areas that present degradation due to the decline of fertility and reduction of OM content, as a result of deforestation with vegetation removal and agricultural activity (Figure 3).

However, the values of the P_{ext} and C_{BM} indicators for the agricultural soil of this locality presented high values (SQI ~ 1), which defines a very high-quality class. This confirms that the management of agricultural soil comprising the addition of organic material is adequate. In Cerro Prieto, the SQI of agricultural and degraded soils are located in stable areas under normal conditions (Figure 3). However, in both conditions the values of the SQI were very low or negative, like the SQI of the degraded soils of Tonaltepec, Pericón, Nduayaco and Gavillera. This confers them very low quality and deficit classes, and therefore a great decline of fertility.

The previous results indicate that most of the evaluated sites coincided in the state of the soil degradation (thematic degradation map) and the values of SQI and quality classes. Only in Cerro Prieto and Pericón this coincidence was not clear. In both cases, the values of the SQI indicated different soil fertility conditions, which is deduced from the degradation map. The above is attributable to the scale of the documents used to generate the thematic degradation map (1: 250,000). Previous matches can be improved if larger scale maps are used.

However, the development of cartography at the regional level requires a considerable investment due to the large amount of field work that must be done. In addition, in the country there are considerable cartographic resources, which can be complemented with new information, as was the case with the current study. In this way, the use of current cartography can be expanded, which would allow to make recommendations at the regional level.

CONCLUSIONS

The indicators of OM, P_{ext} , and exchangeable K and Mg defined more closely the current state

CONCLUSIONES

Los indicadores de MO, P_{ext} , K y Mg intercambiables definieron más cercanamente el estado actual de la fertilidad de los suelos de la MAO y evidencian su degradación. El valor de los ICS permitió detectar cambios producidos en los atributos usados para generar estos ICS. La ubicación de las clases de calidad en el mapa temático de degradación permitió relacionar el cambio en los atributos evaluados con el uso y manejo de los suelos. Con ello se cumple uno de los criterios más importantes requeridos para el uso de indicadores de calidad.

El monitoreo de los valores de los ICS dentro de una escala única puede ayudar a los tomadores de decisiones de las localidades consideradas (Comités Rurales, etc.) para definir estrategias agronómicas correctivas, a nivel sitio específico, para aumentar la fertilidad de los suelos. Los valores de los ICS obtenidos permiten generar una línea base o de inicio de la calidad de los suelos de la MAO. Esto servirá para dar seguimiento o ajustar las prácticas agrícolas de la región con objeto de controlar la degradación actual del suelo. Los ICS y clases de calidad fueron generadas con procedimientos sencillos y con información disponible, por lo cual esta metodología se puede usar en localidades con recursos económicos y técnicos muy limitados.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E., M. Carrasco, O. León, E. Martínez, P. Silva, G. Castillo, I. Ahumada, G. Borie, y S. Gonzáles. 2005. Criterios de Calidad de Suelo Agrícola. Ministerio de Agricultura. Gobierno de Chile. 205 p.
- Alfaro, S. G. 2004. Suelos. In: García-Mendoza A. J., M. J. Ordóñez, M. Briones-Salas (eds). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fundation, México. pp: 55-65.
- Astier, M., M. Maass-Moreno, y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36: 605-620.
- Bautista, C. A., J. Etchevers B., R. del Castillo F., y C. Gutiérrez C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas XIII* (2), mayo-agosto. Asociación Española de Ecología Terrestre, España. (Consulta: enero 2015).
- Bautista-Cruz, A., F. De León-González, R. Carrillo-González, and C. Robles. 2011. Identification of soil quality indicators for maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) plantations in Southern Mexico. *Afr. J. Agric. Res.* 6: 4795-4799.
- Bautista-Cruz, A., y J. D. Etchevers B. 2014. Una Revisión sobre los Conceptos de la Calidad del Suelo: Sus Indicadores e

of fertility of MAO soils and evidenced their degradation. The SQI values allowed to detect changes produced in the attributes used to generate these indicators. The location of quality classes on the degradation thematic map allowed to relate the change in the attributes evaluated with the use and management of the soils. This meets one of the most important criteria required for the use of quality indicators.

The monitoring of the values of the SQI within a single scale can help decision makers of the localities considered in this study (Rural Committees, etc.) to define corrective agronomic strategies at a specific site level to increase the fertility of soils. The values of the SQI obtained allow to generate a baseline or start of the quality of the MAO soils. This will serve to follow up or adjust the agricultural practices of the region in order to control the current degradation of the soil. The SQI and quality classes were generated with simple procedures and with available information, so this methodology can be used in localities with very limited economic and technical resources.

—End of the English version—



Índices. Editorial Académica Española. ISBN 978-3-8473-6509-9.

- Bi, C. J., Z. L. Chen, J. Wan, and D. Zhou. 2013. Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types. *Pedosphere* 23: 194-204.
- Bradomín, J. M. 1992. Toponimia de Oaxaca (Crítica Etimológica). Tercera Edición. Oaxaca, Oaxaca. pp: 171-172.
- Bravo, E. M., M. van Nieuwkoop, J. R. Contreras, J. L. Jiménez, y M. Morales Guerra. 1993. El potencial de la labranza de conservación en la Mixteca Oaxaqueña. INIFAP-CIMMYT-CEFAMOAX, Oaxaca, México. 50 p.
- Bremer, E., and K. Ellert. 2004. Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta. Alberta Environmentally Sustainable Agriculture. Soil Quality Program. Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Symbio AG Consulting. Lethbridge, Alberta. Canada. 32 p.
- Campos, C. A., K. Oleschko L., J. Etchevers B., and C. Hidalgo, M. 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *For. Ecol. Manage.* 248: 174-182.
- Cano, O. M., C. Torres, M. Vargas de Calderón, H. Moreno, A. Cruzado, J. Huamani, y I. Castilla. 1984. Manual Técnico No. 3. Análisis de suelos, tejido vegetal, aguas y fertilizantes. Dpto. de Suelos -EEA-La Molina-INIPA. Lima, Perú. pp: 47-53.

- Cantú, M. P., A. Becker, J.C. Bedano, y H., F. Schiviano. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*. 25: 173-178.
- Castellanos, J.Z., J. X. Uvalle B., A. Aguilar S. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos 2a. Edición. Colección INCAPA. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Guanajuato, México. pp: 34-74.
- CONABIO. 2012. Áreas Geostatísticas Municipales 2012, escala: 1:250000. INEGI. Marco Geostatístico 2013 versión 6.0c (Inventario Nacional de Viviendas 2012). Aguascalientes, Ags., México (<http://www.conabio.gob.mx>). (Consulta: enero 2012).
- Cottenie, A. 1980. Soil and Plant Testing as a Basis of Fertilizer Recommendations. *Soil Bulletin* 38/2. FAO Roma. 119 p.
- CSTPA. 1980. Handbook on Reference Methods for Soil Testing (Revised Edition). Council Soil Testing and Plant Analysis. Athens, Georgia, USA. 247 p.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: Doran, J. W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart (eds). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special Publication Number 35. Soil Science Society of America. INC. Madison. Wisconsin. USA. pp: 3-21.*
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *In: Doran, J. W., and A. Jones J. (eds). Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication Number 49. Soil Science Society of America, INC. Madison. Wisconsin. USA. pp: 25-37.*
- Doran, J. W., and M. Safley. 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. *In: Pankhurst, C., B. M. Doube, and V.S. Gupta (eds). Biological Indicators of Soil Health. CAB International. Wallingford. pp: 1-28.*
- ESRI. 2013. Software ArcGIS 10.1. Redlands, CA. USA.
- Ghaemi, M., A. R. Astaraei, H. Emami, M. Nassiri M., and S. H. Sanaeinejad. 2014. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *J. Soil Sci. Plant Nut.* 14: 987-1004.
- Gomez, A. A., D. E. Kelly S., J. K. Syers, and K. J. Coughlan. 1996. Measuring sustainability of agricultural systems at farm level. *In: Doran, J. W., and A. Jones J. (eds). Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication Number 49. Soil Science Society of America, INC. Madison. Wisconsin. USA. pp: 401-410.*
- Govaerts, B., K. Sayre D., and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.* 87: 163-174.
- Gregorich, E. G., M. Carter R., J. Doran W., C. Pankhurst E., and L. Dwyer M. 1997. Biological attributes of soil quality. *In: Gregorich, E. G., and M. Carter R. (eds). Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. New York. NY. pp: 81-114.*
- INEGI.2007. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, Escala 1: 250 000. (Continuo Nacional) México. 2007. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consulta: enero 2012).
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO Roma. 191 p.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis Químico de Suelos. Omega, Barcelona. 662 p.
- Joergensen, R. G., and P. Brookes C. 1990. Ninhydrin reactive measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biol. Bioch.* 22: 1023-1027.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Shuman. 1997. Soil quality: Concept, rationale, and research needs. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 60 :4-10.
- Karlen D. L., J. C. Gardner, and M. J. Rosek. 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *J. Prod Agric.* 11: 56-60.
- Lal, R., D. Mokma, and B. Lowery. 1999. Relation between soil quality and erosion. *In: Lal, R. (ed). Soil Quality and Soil Erosion. Soil and Water Conservation Society. Ankeny. IO. pp: 237-258.*
- Larson, W. E., and F. J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *In: Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. International Board for Soil Resources and Management (IBSRAM) Proc.12 (2). Bangkok, Thailand. pp: 175-203.* Liu, Z., W. Zhou, J. Shen, S. Li, and C. Ai. 2013. Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity. *Biol. Fert. Soils* 50: 537-548.
- NRCS-Natural Resources Conservation Service. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053149.pdf. (Consulta: enero 2013).
- Plan Municipal de Desarrollo. San Juan Yucuita, Nochixtlán, Oaxaca. 2010. www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/oaxaca/municipios/20224a.htm-19k. (Consulta: noviembre 2016).
- Pieri, C. 1989. Fertilité des Terres de Savanes. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT. Paris, Francia. pp: 33-60.
- Qi, Y., L. Jeremy D., B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu. Province, China. *Geoderma* 149: 325-334.
- Ramales, O. M., M. Coronado A., y R. García J. 2014. Pobreza multidimensional y derechos humanos: situación actual en la Mixteca Oaxaqueña en el contexto de la política económica nacional. *Contribuciones a las Ciencias Sociales, Septiembre 2014.* www.eumed.net/rev/cccss/29/mixteca.html. (Consulta: noviembre 2016).
- Reynolds, W.D., C. Drury F., C. Tan S., C. Fox A., and X. Yang M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*: 152: 252-263.
- SARH, 1984. Guía para la asistencia técnica agrícola, Mixteca Oaxaqueña. Nochixtlán, Oaxaca, México. 138 p.
- Singh, M.J., and K. Khera, L. 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Res. Manage.* 23: 152-167.
- Shukla, M. K., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. Principal component analysis for predicting corn biomass and grain yields. *Soil Sci.* 169: 215-224.
- SEMARNAT – Colegio de Postgraduados. 2002. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la Re-

- pública Mexicana. Escala 1:250 000. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. México.
- SEMARNAT, 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, SNIARN. Edición 2008. Gobierno Federal. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/index.html. (Consulta: enero 2012).
- Seybold, C. A., M. J. Mausbach, D. L. Karlen, and H. H. Roger. 1997. Quantification of soil Quality. *In*: Lal, R., J. M. Kimble, R. F. Follet, and B. A. Stewart (eds). Soil Process and the Carbon Cycle. CRC Press, Boca Raton. Florida. USA. pp: 387-403.
- Torres, B. E., J. Cortés B., E. Mejía S., A. Exebio G., A. L. Santos H. y Ma. E. Delgadillo P. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca "El Joselito", Jesús María, Jalisco. *TERRA Latinoam.* 21:117-126.
- Xu, X., P. E. Thornton, and W. M. Post. 2013. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecol. Biogeogr.* 22: 737-749.