

# LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS DE LADERA DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA, MÉXICO

## HILLSIDE SOILS FERTILITY AT THE OAXACA'S NORTHERN SIERRA, MÉXICO

Miguel Á. Vergara-Sánchez<sup>1</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>2</sup> y Juliana Padilla-Cuevas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (sesamo000@hotmail.com). <sup>2</sup>Edafología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (jetchev@colpos.mx) (jpadic@colpos.mx)

### RESUMEN

La definición del estado de la fertilidad de un suelo requiere información sobre disponibilidad de los nutrimentos, presencia de elementos tóxicos y propiedades químicas, físicas y biológicas. Ello permite tomar decisiones acerca de su manejo, en particular de la aplicación de fertilizantes. En la Sierra Norte de Oaxaca, México, ha cambiado el uso del suelo, de forestal a agrícola, incorporando al cultivo terrenos con pendientes pronunciadas (>30%). Se desconoce el efecto que dicho cambio ha tenido en la fertilidad del suelo y en el potencial productivo de los cultivos. El propósito del presente trabajo fue estudiar las propiedades químicas asociadas con la fertilidad actual de los suelos de ladera en tres microcuencas experimentales representativas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México, para determinar el efecto del cambio de uso. Dichas propiedades fueron significativamente diferentes para los suelos de cada región, aunque comparten algunos rasgos comunes. Los suelos de las tres regiones presentaron pH ácido, concentraciones relativamente bajas de fósforo (<7 mg kg<sup>-1</sup>) y escasas bases intercambiables (<18 cmol kg<sup>-1</sup>), condiciones restrictivas para la producción. Los valores más bajos de estas propiedades se encontraron en la región Mixe (pH 4.9, fósforo Olsen 4.4 mg kg<sup>-1</sup>, suma de bases 3.6 cmol kg<sup>-1</sup>), pero la materia orgánica en esa región fue el doble (6.9%) que en la región Cuicateca, donde hubo un mayor grado de erosión. Los resultados indican que un aumento de la productividad puede lograrse si la fertilidad de los suelos de las tres regiones es mejorada mediante el encalado y la adición de materiales fertilizantes sintéticos y orgánicos que contengan principalmente calcio y fósforo.

**Palabras clave:** Oaxaca, propiedades químicas del suelo, uso de la tierra.

### INTRODUCCIÓN

En la Sierra Norte de Oaxaca, México, ha cambiado el uso de la tierra, de forestal a agrícola, incorporando áreas originalmente arboladas, con elevadas pendientes (20 a 60%), al cultivo de maíz. En esas

### ABSTRACT

To define the fertility status of a soil, information about nutrient availability, toxic elements, and chemical, physical, and biological properties is required. Based on this information, decisions about soil management can be taken, particularly, about the application of fertilizers. In the Northern Sierra of Oaxaca, México, land use has changed from forestry to agricultural exploitation, incorporating lands with steep slopes (>30%) to cultivation. The effect of this change on soil fertility and productive potential of crops is unknown. The purpose of the present work was to study the chemical properties associated with the current fertility of hillside soils in three experimental micro-watersheds, representative of the Mazateca, Cuicateca, and Mixe regions of the Northern Sierra of Oaxaca, México, in order to determine the effect of the change in soil use. Said properties were significantly different for the soils of each region, though they share some common features. The soils of the three regions presented acid pH, relatively low concentrations of phosphorus (<7 mg kg<sup>-1</sup>), and scarce exchangeable bases (<18 cmol kg<sup>-1</sup>), restrictive conditions for production. The lowest values of these properties were found in the Mixe region (4.9 pH, 4.4 mg kg<sup>-1</sup> Olsen phosphorus, 3.6 cmol kg<sup>-1</sup> exchangeable bases), but organic matter in this region was twice as much as in the Cuicateca region, where a higher degree of erosion was observed. The results indicate that an increase of productivity may be reached if soil fertility of the three regions is improved through liming and the addition of synthetic and organic fertilizers containing mainly calcium and phosphorus.

**Key words:** Oaxaca, chemical soil properties, land use.

### INTRODUCTION

In the Northern Sierra of Oaxaca, México, land use has changed from forestry to agricultural production, integrating originally wooded areas with steep slopes (20 to 60%) to corn cultivation. In these hillside areas, approximately 80% of the agricultural area of Oaxaca, traditional agriculture is practiced, with few technological resources and limited agricultural productivity; there is shortage of fertilizers and other inputs. This situation is attributable to the prevailing socio-economic conditions

Recibido: Mayo, 2004. Aprobado: Enero, 2005.

Publicado como ENSAYO en *Agronomía* 39: 259-266. 2005.

áreas de ladera, aproximadamente 80% del área agrícola de Oaxaca, se practica una agricultura tradicional, con pocos recursos tecnológicos y limitada productividad agrícola; el uso de fertilizantes y otros insumos es escaso. Esta situación es atribuible a las condiciones socioeconómicas prevalentes y la falta de información sobre la fertilidad de los suelos de la región.

La fertilidad del suelo se ha relacionado con la capacidad de suministro de nutrimentos esenciales para los cultivos y niveles no tóxicos de ciertos elementos, así como con otras propiedades (pH, CE, PSB, CIC) que restringen la expresión del rendimiento máximo posible del agrosistema (Peck *et al.*, 1977). Hay conceptos más amplios de la fertilidad de un suelo (Finck, 1995; Sims, 2000), que la consideran un atributo de la tierra, resultado de múltiples propiedades del suelo que interactúan constantemente con las plantas y el ambiente.

La evaluación de la fertilidad del suelo es útil para determinar su potencial productivo, elucidar los factores edáficos que pueden limitar dicho potencial, y establecer el efecto de diversas prácticas de manejo en la dinámica nutrimental edáfica. Tal información es necesaria para elaborar e implementar programas de aplicación de fertilizantes (químicos u orgánicos) que resulten rentables y ambientalmente aceptables (Castellanos *et al.*, 2000). El diagnóstico integral de la fertilidad de un suelo puede basarse en la comparación de la intensidad de sus propiedades con un valor de referencia establecido como adecuado mediante procedimientos empíricos (Brown, 1987); también se puede deducir con enfoques mixtos basados en el entendimiento de cómo funciona un sistema agrícola y una validación empírica de la deducción (Rodríguez, 1993). La comparación indica si la condición de la fertilidad es deficiente, adecuada o excesiva. Sin embargo, en la mayoría de los casos los valores de referencia se obtienen en circunstancias distintas a la de los sitios donde se pretende aplicarlos.

El objetivo de esta investigación fue determinar el estado de la fertilidad de los suelos en las laderas de microcuencas representativas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México, y establecer una comparación entre ellas, con el propósito de generar información que permita un manejo más sustentable de los suelos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en microcuencas representativas de tres regiones de la Sierra Norte del Estado de Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca y Mixe), donde el Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) (Vergara *et al.*, 2004) había establecido sitios de observación y parcelas experimentales, con diferentes usos de suelo (forestal, agrícola permanente, agrícola mixto y agrícola anual). Vergara *et al.* (2004) describieron las características generales de las regiones y

and to the lack of information about soil fertility of the region.

Soil fertility has been related to the capacity of supplying essential nutrients to the crops and nontoxic levels of certain elements, as well as to other properties (pH, CE, PSB, CIC), which reduce the expression of maximum possible yield of the agro-system (Peck *et al.*, 1977). There are wider concepts of soil fertility (Finck, 1995; Sims, 2000), considering fertility as an attribute of the land, a result of multiple soil properties interacting constantly with plants and environment.

The evaluation of soil fertility is useful for the determination of productive potential, for the elucidation of edaphic factors which may limit said potential, and it serves to establish the effect of several management practices on soil nutritional dynamics. Such information is needed to elaborate and implement programs of (chemical or organic) fertilizer application, which may turn out to be profitable and environmentally acceptable (Castellanos *et al.*, 2000). The integrated diagnosis of soil fertility can be based on the comparison of the intensity of its properties, with a reference value established as adequate through empirical procedures (Brown, 1987); it can also be deduced by mixed approaches, based on the understanding of the functioning of an agricultural system and an empiric validation of the deduction (Rodríguez, 1993). The comparison tells if the fertility condition is deficient, adequate, or excessive. However, in most cases, the reference values are obtained in circumstances different from those of the sites where they are supposed to be applied.

The objective of this research was to determine the soil fertility status of the hillside soils in micro-watersheds, representative of the Mazateca, Cuicateca, and Mixe regions of the Northern Sierra of Oaxaca, México, and to establish a comparison among them, with the purpose to generate information which allows for a more sustainable soil management.

## MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in micro-watersheds representative of three regions of the Northern Sierra of the State of Oaxaca, México (Mazateca, Cuicateca, and Mixe), where the Sustainable Hillside Management Project (PMSL) (Vergara *et al.*, 2004) had established observation sites and experimental plots with different soil uses (forestry, permanent agriculture, mixed agriculture, and annual agriculture). Vergara *et al.* (2004) described the general characteristics of the regions and micro-watersheds under study and the land use systems selected in the three regions.

In each watershed, soil samples were taken (at 0-20 and 20-40 cm depth) in the following land use systems: secondary forests and permanent agricultural crops (coffee, grassland), mixed crops (intercropping maize with fruit trees, peach, and coffee), and annual

microcuencas de estudio y los sistemas de uso de la tierra seleccionados en las tres regiones.

En cada cuenca se obtuvieron muestras de suelo (0 a 20 y 20 a 40 cm de profundidad) en los siguientes sistemas de uso de la tierra: bosques secundarios y cultivos agrícolas permanentes (café, pradera), mixtos (maíz intercalado con muros vivos de árboles frutales, durazno y café) y anuales (milpa tradicional con predominancia de maíz criollo intercalado con frijol y ocasionalmente calabaza y arvenses, labranza de conservación y roza-tumba-quema). Estas muestras se recolectaron originalmente para hacer un estudio de la variabilidad espacial del carbono (Vergara *et al.*, 2004). El esquema de muestreo consistió en todos los casos, excepto en los indicados más abajo, en trazar en las parcelas dos líneas paralelas de 22 m de longitud, con una separación de 4 m entre ellas; las muestras se tomaron a una distancia de 2 m sobre las líneas paralelas. Adicionalmente se obtuvieron dos muestras sobre líneas perpendiculares a las líneas paralelas a 1/3 y 2/3 de la distancia entre el inicio y el fin de las líneas paralelas, tomándose un total de 26 muestras simples por sistema.

En los sistemas labranza tradicional, acahual, roza-tumba-quema y muros vivos, sólo se tomaron tres muestras compuestas, cada una conformada por cinco a siete submuestras obtenidas en cada tercio de la parcela, a las mismas profundidades. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron antes de determinar pH, materia orgánica (MO), carbono orgánico (Corg), nitrógeno (N), fósforo extraíble Olsen (P), calcio, potasio, magnesio y sodio intercambiables (Caí, Ki, Mgi y Nai) y acidez intercambiable (AI). Con los resultados de cationes intercambiables se calculó la suma de bases (SB), y con ésta, más la AI, se obtuvo la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE). La relación entre ambas (SB/CICE) expresada porcentualmente se denomina porcentaje de saturación de bases (PSB). Para estos análisis se usaron los métodos de la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2002).

Se calculó la media, varianza, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo de las propiedades de los suelos, en los diferentes sistemas de uso de la tierra y profundidades en cada una de las microcuencas, usando SAS (1985). Las medias se compararon con la prueba de Tukey, entre los sistemas y las profundidades de muestreo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran los promedios de las propiedades indicadoras de la fertilidad del suelo por microcuenca. Se promediaron los resultados de las profundidades 0 a 20 y 20 a 40 cm para generar un valor único para la profundidad 0 a 40 cm, con el propósito de caracterizar la fertilidad en la zona de máxima distribución radical. Para caracterizar mejor la distribución vertical de la fertilidad en los suelos de la zona, en la segunda parte del Cuadro 1 se presentan los resultados por profundidad de muestreo (0 a 20 y 20 a 40 cm). Los indicadores de fertilidad del suelo, independientemente de la profundidad, fueron significativamente diferentes entre las microcuencas.

Los suelos de las tres regiones son ácidos o muy ácidos (Jones and Wolf, 1984); los de la región Mazateca

(traditional cornfield (milpa) with predominant native maize mixed with bean and occasionally squash and arvenses; conservation tillage and slash and burn cultivation). These samples were originally collected in order to make a study of carbon spatial variability (Vergara *et al.*, 2004). The sampling plan consisted in all the cases, except those indicated below, in drawing two parallel 22 m-long lines in the plots, with a separation of 4 m between them; the samples were taken at a distance of 2 m on the parallel lines. Additionally, two samples were obtained on lines running perpendicularly to the parallels at 1/3 and 2/3 distances between the beginning and the end of the parallel lines, taking a total of 26 simple samples per system.

In the systems of traditional tillage, acahual, shifting cultivation, and intercropping, only three composite samples were taken, each composed of five to seven subsamples, obtained in each third of the plot at the same depth. The samples were air-dried and sieved before determining pH, organic matter (MO), organic carbon (Corg), nitrogen (N), Olsen extractable phosphorus (P), exchangeable calcium, potassium, magnesium, and sodium (Caí, Ki, Mgi, and Nai), and exchangeable acidity (AI). With the results of exchangeable cations the exchangeable bases (SB) was calculated, and with this plus AI, the effective cation exchange capacity (CIC) was obtained. The relation between both (SB/CIC) expressed in percentage terms is called base saturation percentage (PSB). For these analyses the methods of Mexican Official Norm were used (SEMARNAT, 2002).

Mean, variance, standard deviation, minimum and maximum value of soil properties in the different systems of land use and depths in each of the micro-watersheds, were calculated using SAS (1985). The means were compared with the Tukey test among the systems and sampling depths.

## RESULTS AND DISCUSSION

The means of the properties indicators of soil fertility per micro-watershed are shown in Table 1. The results of 0-20 and 20-40 cm depths were averaged in order to generate one only value for 0 to 40 cm depth, with the purpose to characterize the fertility in the zone of maximum root distribution. For a better characterization of vertical fertility distribution in the soils of the zone, in the second part of Table 1, the results per sampling depth (0-20 and 20-40 cm) are presented. The indicators of soil fertility, independently of depth, were significantly different among the micro-watersheds.

The soils of the three regions are acid or very acid (Jones and Wolf, 1984); those of the Mazateca region were more acid (5.2 pH) than those of the Cuicateca (5.6 pH), but less than those of the Mixe region (4.9 pH). The pH is correlated closely and negatively ( $r = -0.98$ ;  $p \leq 0.05$ ) to exchangeable acidity. The highest exchangeable acidity was found in the Mixe watershed ( $3.9 \text{ cmol kg}^{-1}$ ), which also has the most acid pH, whereas the Cuicateca basin with higher pH showed the lowest value ( $0.4 \text{ cmol kg}^{-1}$ ). High levels of exchangeable acidity and pH are normally related to scarcity of exchangeable bases and phosphorus

**Cuadro 1. Medias de las propiedades de los suelos en las microcuencas Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, México.**  
**Table 1. Means of soil properties in the Mazateca, Cuicateca, and Mixe microwatersheds of the Northern Sierra of Oaxaca, México.**

| Cuenca   | n <sup>†</sup> | pH    | MO    | Corg  | N     | Pols                | Al                    | Cai   | Ki    | Mgi   | Nai    | SB     | CICE   | PSB    |
|--|----------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|  |                |       | %     |       |       | mg kg <sup>-1</sup> | cmol kg <sup>-1</sup> |       |       |       |        | %      |        |        |
| Medias generales por microcuenca (0-40 cm de profundidad) <sup>‡</sup> |                |       |       |       |       |                     |                       |       |       |       |        |        |        |        |
| Mazateca   | 372            | 5.2 b | 6.4 a | 3.9 a | 0.3 a | 5.8 a               | 1.9 b                 | 3.9 b | 0.2 b | 0.7 b | 0.28 a | 5.1 b  | 7.1 b  | 63.3 b |
| Cuicateca  | 166            | 5.6 a | 3.1 b | 1.9 b | 0.2 b | 6.0 a               | 0.4 c                 | 9.6 a | 0.7 a | 6.5 a | 0.01 b | 16.7 a | 17.1 a | 94.8 a |
| Mixe   | 214            | 4.9 c | 6.9 a | 4.2 a | 0.3 a | 4.4 b               | 3.9 a                 | 2.6 c | 0.2 b | 0.7 b | 0.05 b | 3.6 c  | 7.4 b  | 41.6 c |
| DSH <sup>§</sup>   |                | 0.1   | 0.5   | 0.3   | 0.3   | 0.7                 | 0.3                   | 0.9   | 0.1   | 0.9   | 0.08   | 1.5    | 1.4    | 5.6    |
| Medias por microcuenca y profundidad (0-20 y 20-40 cm) <sup>‡</sup>    |                |       |       |       |       |                     |                       |       |       |       |        |        |        |        |
| Mazateca (0-20 cm)   | 186            | 5.2 b | 7.7 b | 4.7 b | 0.4 b | 6.5 a               | 1.7 b                 | 4.8 b | 0.3 b | 0.9 b | 0.29 a | 6.3 b  | 8.0 b  | 73.1 b |
| Cuicateca (0-20 cm)  | 96             | 5.7 a | 3.7 c | 2.3 c | 0.2 c | 7.2 a               | 0.2 c                 | 9.7 a | 0.7 a | 5.2 a | 0.01 b | 15.6 a | 15.8 a | 97.3 a |
| Mixe (0-20 cm)   | 107            | 5.0 c | 9.4 a | 5.6 a | 0.5 a | 5.2 b               | 3.8 a                 | 3.5 c | 0.3 b | 1.1 b | 0.07 b | 5.0 b  | 8.8 b  | 51.7 c |
| DSH <sup>§</sup>   |                | 0.14  | 0.74  | 0.44  | 0.03  | 1.08                | 0.45                  | 1.22  | 0.10  | 0.95  | 0.12   | 1.82   | 1.64   | 6.57   |
| Mazateca (20-40 cm)  | 186            | 5.2 b | 5.1 a | 3.1 a | 0.3 a | 5.1 a               | 2.2 b                 | 3.1 b | 0.2 b | 0.4 b | 0.27 a | 3.9 b  | 6.2 b  | 53.6 b |
| Cuicateca (20-40 cm)   | 70             | 5.4 a | 2.2 c | 1.4 c | 0.1 c | 4.3 ab              | 0.7 c                 | 9.4 a | 0.7 a | 8.2 a | 0.01 b | 18.3 a | 19.0 a | 91.3 a |
| Mixe (20-40 cm)  | 107            | 4.9 c | 4.4 b | 2.7 b | 0.2 b | 3.6 c               | 4.0 a                 | 1.6 c | 0.1 b | 0.4 b | 0.03 b | 2.1 b  | 6.1 b  | 31.5 c |
| DSH <sup>§</sup>   |                | 0.16  | 0.61  | 0.36  | 0.03  | 1.0                 | 0.49                  | 1.19  | 0.15  | 1.52  | 0.11   | 2.43   | 2.27   | 9.29   |

<sup>†</sup> n = número de muestras ♦ n = number of samples.

<sup>‡</sup> Letras diferentes en la misma columna y profundidad indican diferencias estadísticas significativas (p≤0.05%) ♦ Different letters in the same column and depth indicate statistically significant differences (p≤0.05%).

<sup>§</sup> DSH = diferencia mínima significativa ♦ DSH = Minimum significant difference.

MO = materia orgánica; Corg = carbono orgánico; N = nitrógeno; Pols = fósforo Olsen; Al = acidez intercambiable; Cai, Ki, Mgi, y Nai = calcio, potasio, magnesio y sodio intercambiable; SB = suma de bases; CICE = capacidad de intercambio catiónico efectiva; PSB = porcentaje de saturación de bases ♦ MO = organic matter; Corg = organic carbon; N = nitrogen; Pols = Olsen phosphorus; Al = exchangeable acidity; Cai, Ki, Mgi, and Nai = exchangeable calcium, potassium, magnesium, and sodium; SB = exchangeable bases; CICE = effective cationic exchange capacity, PSB = base saturation percentage.

fueron más ácidos (pH 5.2) que los de la Cuicateca (pH 5.6) pero menos que los de la Mixe (pH 4.9). El pH se correlacionó estrecha y negativamente (r=-0.98, p≤0.05) con la acidez intercambiable. La mayor acidez intercambiable se presentó en la cuenca Mixe (3.9 cmol kg<sup>-1</sup>), misma que tiene el pH más ácido, mientras que la cuenca Cuicateca, con mayor pH, mostró el menor valor (0.4 cmol kg<sup>-1</sup>). Altos niveles de acidez intercambiable y pH ácidos normalmente se relacionan con escasez de bases intercambiables y de fósforo (Sánchez, 1976). La mayor parte de esa acidez se atribuye, en los suelos minerales, a la presencia de aluminio intercambiable que forma iones hidroxialuminio, Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> y Al(OH)<sup>2+</sup>, al ser desplazado hacia la solución de suelo, altamente tóxicos para las plantas (Brady y Weil, 1999). La elevada acidez intercambiable de las tres zonas, en particular la Mixe, donde la colonización humana ha sido reciente y los suelos han tenido menos ciclos de cultivo, se atribuye a las escasas aplicaciones de fertilizantes, particularmente fosfatados, las cuales tienden a neutralizar el efecto del exceso de aluminio intercambiable.

Los iones Ca, K y Mg intercambiables también se relacionaron en forma directa y estrecha con el pH (r=0.97; r=0.90; r=0.90; p≤0.05); esto es, cuando el pH

(Sanchez, 1976). The greatest part of this acidity is attributed, in mineral soils, to the presence of exchangeable aluminum forming hydroxialuminum ions, Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> and Al(OH)<sup>2+</sup>, as they are moved toward soil solution, highly toxic for the plants (Brady and Weil, 1999). The high exchangeable acidity in the three zones, particularly the Mixe region, where human settling has been recent and soils have had fewer crop cycles, is attributed to scarce applications of fertilizers, especially phosphate fertilizers, which tend to neutralize the effect of the excess of exchangeable aluminum.

The exchangeable Ca, K, and Mg ions were also related directly and closely to pH (r=0.97; r=0.90; r=0.90, p≤0.05); this means, when pH was lower, so was the concentration of these ions. In the Cuicateca region, the highest values of exchangeable Ca, K, and Mg were measured (9.6, 0.7, and 6.5 cmol kg<sup>-1</sup>), but this was not the case with exchangeable Na. The highest exchangeable Na concentration was recorded in the soils of the Mazateca region (0.28 cmol kg<sup>-1</sup>), value that does not constitute a problem. The concentrations of exchangeable Ca, K, and Mg in the soils of the Mixe and Mazateca regions are considered low, whereas in the Cuicateca zone, they would be high (Castellanos *et al.*, 2000) and enough to supply the demand of the crops. In the first two regions, it would

fue menor, la concentración de esos iones también lo fue. En la región Cuicateca se midieron los valores más altos de Ca, K y Mg intercambiables (9.6, 0.7 y 6.5 cmol kg<sup>-1</sup>), pero éste no fue el caso del Na intercambiable. La mayor concentración de Na intercambiable se registró en los suelos de región Mazateca (0.28 cmol kg<sup>-1</sup>), valor que no constituye un problema. Las concentraciones de Ca, K y Mg intercambiable en los suelos de las regiones Mixe y Mazateca se consideran bajas, mientras que en la Cuicateca serían altas (Castellanos *et al.*, 2000) y suficientes para abastecer la demanda de los cultivos. En las dos primeras regiones se recomendaría aplicar materiales de encalado para neutralizar el exceso de acidez y mejorar la disponibilidad de bases para los cultivos. La adición de gallinaza y superfosfato simple, además de contribuir a neutralizar en parte la acidez intercambiable y aportar fósforo y bases de intercambio, coadyuvaría a mejorar la fertilidad de los suelos de las cuencas Mazateca y Mixe (Cortés *et al.*, 2005).

La suma de las bases intercambiables (SB) es un indicador útil para interpretar la fertilidad de suelos, en particular cuando se relaciona con la capacidad de intercambio catiónico medida (CIC) o con la CICE, la cual se puede calcular para suelos neutros y ácidos con las bases intercambiables más la acidez intercambiable. La suma de bases de los suelos de la Cuicateca fue 16.7 cmol kg<sup>-1</sup>, tres veces mayor que la de la Mazateca (5.1 cmol kg<sup>-1</sup>) y casi cinco veces que la de la Mixe (3.6 cmol kg<sup>-1</sup>). Estos valores son congruentes con el pH y acidez intercambiable de los suelos de esas regiones, discutidos anteriormente.

Los mayores valores de CICE y PSB se determinaron en la microcuenca Cuicateca. La CICE en esta región (17.1 cmol kg<sup>-1</sup>) fue más del doble de la determinada en las otras dos cuencas (7.1 y 7.4 cmol kg<sup>-1</sup> para la Mazateca y la Mixe). De modo similar, PSB fue casi la mitad en las cuencas Mazateca y Mixe (63 y 42%) que en la Cuicateca (95%).

La mayor abundancia de cationes intercambiables y los valores relativamente altos de CICE y PSB en la Cuicateca, se relacionaron con el tipo de suelos predominantes: Rendzinas y Luvisoles (INEGI, 1988), así como con las condiciones climáticas de la región. La precipitación media anual en la región (Bradomin, 1984), es casi la mitad en la Cuicateca (774 mm), que en las otras dos cuencas (1474 y 1974 mm), lo cual significaría un menor lavado de bases. Adicionalmente, en esa región había una mayor utilización de fertilizantes químicos que en las otras dos, lo que ha contribuido al reabastecimiento de los cationes del suelo. Fertilizantes como el superfosfato simple y triple, contienen cantidades significativas de calcio (19.6 y 14.3%).

Un indicador químico de gran importancia para evaluar la productividad de un suelo es el fósforo extraíble,

be recommended to apply liming materials in order to neutralize the excess of acidity and improve the availability of bases for the crops. The addition of dried hen waste and simple super-phosphate, besides contributing to partly neutralizing exchangeable acidity and supplying phosphorus and bases of exchange, would contribute to improve soil fertility of the Mazateca and Mixe watershed (Cortés *et al.*, 2005).

The summation of exchangeable bases (SB) is a useful indicator to interpret soil fertility, particularly, when related to measured cation exchange capacity (CIC) or to CICE, which can be calculated for neutral and acid soils with exchangeable bases plus exchangeable acidity. The summation of exchangeable bases of the Cuicateca soils was 16.7 cmol kg<sup>-1</sup>, three times as large as that of Mazateca (5.1 cmol kg<sup>-1</sup>), and nearly five times as that of Mixe soils (3.6 cmol kg<sup>-1</sup>). These values are congruent with pH and exchangeable acidity of the soils of these regions, previously discussed.

The highest CICE and PSB values were determined in the Cuicateca watershed. CICE in this zone (17.1 cmol kg<sup>-1</sup>) was more than twice the one determined in the other two watersheds (7.1 and 7.4 cmol kg<sup>-1</sup> for the Mazateca and the Mixe basin). Likewise, PSB in the Mazateca and Mixe watersheds (63 and 42%) was nearly half of that of the Cuicateca basin (95%).

The greatest abundance of exchangeable cations and the relatively high CICE and PSB values in the Cuicateca region are related to the predominant soil types: Rendzina and Luvisoles (INEGI, 1988) as well as to the climatic conditions of the region. Annual mean precipitation in the area (Bradomin, 1984) is in the Cuicateca basin (774 mm) nearly half of that in the other two watersheds (1474 and 1974 mm), which would mean less lixiviation of bases. Besides, in that region, chemical fertilizers were used more often than in the other two, which contributed to soil cation replenish. Fertilizers such as simple and triple super-phosphates contain significant amounts of calcium (19.6 and 14.3%).

Extractable phosphorus, an essential element for the plants whose natural availability is scarce, is a chemical indicator of great importance for the evaluation of soil productivity; for its measurement, in México, Olsen procedure has a wide range of application (Etchevers *et al.*, 1986; Etchevers *et al.*, 1990). In the three areas of study, Olsen P was below the limit of the low class (5.8, 6.0, and 4.4 mg kg<sup>-1</sup> in the Mazateca, Cuicateca, and Mixe zones) (CSTPA, 1980). Olsen-P was associated negatively to exchangeable acidity ( $r = -0.93$ ;  $p \leq 0.05$ ), as this increases, so does exchangeable aluminum. Phosphorus reacts quickly with aluminum, thus reducing its availability for the plants (Ulrich and Sumner, 1990).

Acid pH and the high AI of soils in the Mixe watershed are favorable conditions for a high AI concentration

un elemento esencial para las plantas cuya disponibilidad natural es escasa; para medirlo, en México el procedimiento de Olsen tiene un amplio espectro de aplicación (Etchevers *et al.*, 1986; Etchevers *et al.*, 1990). En las tres áreas de estudio el P Olsen fue inferior (5.8, 6.0 y 4.4 mg kg<sup>-1</sup> P en la Mazateca, Cuicateca y Mixe) al límite de la clase baja (CSTPA, 1980). El P-Olsen se asoció negativamente con la acidez intercambiable ( $r = -0.93$ ;  $p \leq 0.05$ ), porque a medida que ésta aumenta, también lo hace el aluminio intercambiable. El fósforo reacciona rápidamente con el aluminio, reduciendo así su disponibilidad para las plantas (Ulrich y Sumner, 1991).

El pH ácido y la elevada AI de los suelos en la microcuenca Mixe son condiciones propicias para una concentración alta de Al (Noble *et al.*, 1988) que, aunada a las bajas concentraciones de P y Ca intercambiable, limitarían el desarrollo de cultivos como frijol, chícharo, alfalfa, soya, hortalizas y otras especies sensibles (Vázquez y Bautista, 1993). A diferencia de lo que ocurre en las regiones Mazateca y Cuicateca, en la Mixe no existen variedades de maíz seleccionadas por los productores, con características de resistencia a las condiciones de acidez. Por tanto, se espera que los rendimientos de los cultivos, sin la debida fertilización, no alcancen el máximo posible que el agroecosistema pudiese permitir. La introducción de nuevas variedades de maíz o de frutales deberá considerar la condición actual de acidez, bajos niveles de fósforo y bases intercambiables de los suelos de la región, así como la realización de estudios de factibilidad técnica y económica de prácticas de encalado.

La MO promedio en la profundidad 0 a 40 cm fue similar en los suelos de la Mixe y Mazateca (6.9% y 6.4%). Estos valores son considerados como extremadamente ricos (Velasco, 1983) y duplican la MO en esa profundidad en la Cuicateca (3.1%). Estas diferencias se atribuyen al elevado grado de erosión en esta microcuenca, que se aprecia visualmente por la pérdida de una buena parte del horizonte superficial. En esta región se emplea tracción animal para preparar las tierras a pesar de las pendientes altas (>25%), mientras que en la Mixe y Mazateca la preparación de los suelos es manual, y prácticamente no existe erosión, aunque las pendientes son mayores a 30%. Las regiones Mazateca y Mixe tienen precipitaciones pluviales mayores que la Cuicateca, por lo que la producción de biomasa es más alta y consecuentemente debe ser mayor el aporte de material vegetal al suelo. Lo anterior se refleja también en el contenido de nitrógeno, que tuvo un comportamiento similar al de la materia orgánica.

Las medias (por microcuenca y profundidad) de todas las propiedades determinadas fueron mayores en la profundidad 0 a 20 cm que en 20 a 40 cm, con excepción de la CICE, la SB y la AI. Las dos primeras fueron mayores en el estrato 20 a 40 cm en la Cuicateca, lo cual puede

(Noble *et al.*, 1988), which together with low P and exchangeable Ca concentrations, would limit the development of crops such as bean, peas, alfalfa, soybean, vegetables, and other susceptible species (Vázquez and Bautista, 1993). Different from the situation in the Mazateca and Cuicateca regions, in the Mixe zone there are no maize varieties selected by the producers with characteristics of resistance to conditions of acidity. Therefore, it is expected that crop yields without appropriate fertilization may not reach the possible maximum that the agro-system might allow for. At introducing new varieties of corn or fruit trees, the current condition of acidity, low levels of phosphorus and exchangeable soil bases of the region should be considered, as well as carrying out studies on technical and economic feasibility of liming practices.

Average MO at 0-40 cm depth was similar in the soils of Mixe, and Mazateca regions (6.9% and 6.4%). These values are considered extremely rich (Velasco, 1983) and double the MO at this depth in the Cuicateca zone (3.1%). These differences are attributed to the high degree of erosion in this watershed, which can be visually appreciated due to the loss of a considerable part of the surface horizon. In this region, animal traction is employed to prepare the land for tillage, in spite of the steep slopes (>25%), whereas the soil preparation in the Mixe and Mazateca regions is manual, and erosion does practically not exist, though slopes have gradients of more than 30%. The Mazateca and Mixe regions have more substantial rainfalls than the Cuicateca, that is why biomass production is higher, and consequently, the contribution of vegetal matter to the soil must be richer. The previous is also reflected in nitrogen content, which showed similar performance to that of organic matter.

The means (per microwatershed and depth) of all determined properties were greater at 0-20 than at 20-40 cm depth, except for CICE, SB, and AI. The two first were greater in the 20-40 cm stratum in the Cuicateca basin, which may be related to the clay content at this depth (13-50% at 0-20 cm; and 12-55% at 20-40 cm). AI was higher at the depth of 20-40 cm in the three regions according to the lower PSB and MO content in the deepest stratum.

When analyzing the properties of both depths (0-20 and 20-40 cm) separately, it is concluded that the performance was very similar to the one described above for 0-40 cm depth. In the Mixe region, MO changes more abruptly between both depths (from 9.4 to 4.4%), than in the other two regions. A possible explanation might be less time of soil exploitation in this region, where population density is lower, and colonization began later. If in this region, with annual precipitation close to 2000 mm, the soil is not adequately protected, nor management practices are integrated to avoid erosion of the surface

relacionarse con el contenido de arcilla en esa profundidad (13 a 50% de 0 a 20 cm, y 12 a 55% en 20 a 40 cm). La AI fue mayor en la profundidad 20 a 40 cm en las tres regiones, en congruencia con el menor PSB y contenido de MO en el estrato más profundo.

Cuando se analizan las propiedades de ambas profundidades (0 a 20 y 20 a 40 cm) por separado, se concluye que el comportamiento fue muy similar al descrito anteriormente para la profundidad 0 a 40 cm. En la región Mixe la MO cambia más abruptamente entre ambas profundidades (de 9.4 a 4.4%) que en las otras dos regiones. Una posible explicación sería el menor tiempo de explotación de los suelos de esa región, donde la densidad poblacional y tiempo de colonización es menor. Si en esta región, con precipitación anual cercana a 2000 mm no se protege adecuadamente el suelo ni se incorporan prácticas de manejo que eviten la erosión de la capa superficial, puede perderse la materia orgánica en un corto plazo. Esto disminuiría la capacidad del suelo para proporcionar condiciones favorables para el crecimiento de los cultivos (menor porosidad, menor velocidad de infiltración de agua, menor capacidad de retención de la misma, disminución de la capacidad de abastecimiento nutrimental del suelo, mayor acidificación), como lo indican Brady y Weil (1999). Lo anterior causaría una disminución de la producción de alimentos por unidad de superficie, menor ocupación de mano de obra y empobrecimiento.

### CONCLUSIONES

De acuerdo con las condiciones del presente estudio se concluye que la fertilidad de los suelos en pendientes pronunciadas (>30%) en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, se encuentra en una condición de debilidad, agravada por el escaso uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos y el desconocimiento de la práctica de encalado. Las bajas concentraciones de fósforo disponible, el bajo pH y elevada acidez intercambiable, y la baja saturación de bases fueron comunes en los suelos (0 a 20 y 20 a 40 cm) de las tres regiones. Se puede concluir que estos suelos presentan serias restricciones químicas que limitan los rendimientos de los cultivos. Los problemas de fertilidad química fueron más acentuados en las regiones Mazateca y Mixe que en la Cuicateca, problemas que pueden resolverse mediante la adición de enmiendas calcáreas o dolomíticas y la aplicación de materiales fertilizantes que contengan fósforo y calcio (superfosfato simple y triple) o fertilizantes orgánicos (gallinaza). En contraste, los valores medios de materia orgánica (un indicador de la condición física, 3 a 6%) permiten colegir que la condición física de estos suelos estaría menos amenazada por los factores de degradación.

layer, organic matter may be lost in the short term. This would decrease the soil capacity to provide favorable conditions for crop growth (less porosity, lower water infiltration rate, less water retention, diminution of nutrient supply to the soil, higher acidification), as Brady and Weil (1999) point out. The aforementioned would cause a diminution of food production per surface unit, less employment of labor, and impoverishment.

### CONCLUSIONS

According to the conditions of the present study, it is concluded that soil fertility on steep slopes (>30%) in the Mazateca, Cuicateca, and Mixe regions of the Northern Sierra of Oaxaca is in conditions of debility, aggravated by the scarce use of organic and synthetic fertilizers and lack of experience in the practice of liming. Low concentrations of available phosphorus, low pH, and high exchangeable acidity, and the low base saturation were common in the soils (0-20 and 20-40 cm) of the three regions. It may be concluded that these soils have serious chemical restrictions which limit crop yields. The problems of chemical fertility were more perceptible in the Mazateca and Mixe than in the Cuicateca region, problems that can be solved by adding calcareous or dolomitic amendments and by the application of fertilizers containing phosphorus and calcium (simple and triple superphosphates) or organic fertilizers (dried hen waste). In contrast, the mean values of organic matter (an indicator of the physical condition, 3 to 6%) permit to deduce that the physical condition of these soils would be less threatened by degradation.

—End of the English version—



### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los Drs. M. Martínez M., J. I. Cortés F., L. Jiménez S. y A. Ramos S., y sus respectivos equipos de trabajo, todos miembros del Proyecto de Manejo Sustentable de Laderas (PMSL), por los aportes al desarrollo de este trabajo, así como el financiamiento del Global Environment Facility (GEF)/ Banco Mundial, el gobierno del Estado de Oaxaca, y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

### LITERATURA CITADA

- Bradomin, J. M. 1984. Monografía del Estado de Oaxaca, 3<sup>ra</sup> ed. México, D. F. 324 p.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 1999. The Nature and Properties of Soils. 12<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 881 p.

- Brown, J. R. 1987. Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation. Soil Science Society of America. Special Publication No. 21. SSSA Inc. Madison, Wisconsin. USA. 144 p.
- Castellanos Z., J., X. Uvalle-Bueno, y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2<sup>da</sup> ed. Colección INCAPA. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola, San Miguel de Allende, Guanajuato, México. 226 p.
- Cortés, F. J. I., A. Turrent F., P. Díaz V., L. Jiménez S., E. Hernández R., and R. Mendoza R. 2005. Hillside agriculture and food security in Mexico: Advances in the sustainable hillside management project. *In*: Lal, R. (ed) Climate Change and Global Food Security. CRC Press., Boca Raton, Florida. (En prensa).
- CSTPA. 1980. Handbook on Reference Methods for Soil Testing (Revised Edition). Council Soil Testing and Plant Analysis. Athens, Georgia, USA. 247 p.
- Etchevers B., J. D., P. Anzástiga A., V. Volke H., y G. Goijberg R. 1986. Correlación y calibración de métodos químicos para la determinación de fósforo disponible en suelos del Estado de Puebla. *Agrociencia* 65: 161-178.
- Etchevers B., J. D., P. Anzástiga A., V. Volke H., G. Goijberg R., y A. Galvis S. 1990. Selección de un método de análisis de fósforo para los suelos de la Mixteca de Cárdenas, Oaxaca, mediante correlación y regresión múltiple. *Agrociencia (serie Agua-Suelo-Clima)* 1(2): 57-72.
- Finck, A. 1995. From the fertilization of crops to the management of nutrients in crop rotations and farming systems. An overview. *Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* FAO, Rome. 12: 67-82.
- INEGI, 1988. Síntesis Geográfica del Estado de Oaxaca. V3 Anexo cartográfico (14 mapas). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México. 59 p.
- Jones, B. J., and B. Wolf. 1984 Manual of soil testing procedure using modified Morgan extracting reagent. Benton laboratories Inc. Athens Georgia, USA. 62 p.
- Noble, A. D., M. E. Sumner, and A. K. Alva. 1988. The pH dependency of aluminum phyto-toxicity alleviation by calcium sulfate. *Soil Sci. Soc. America J.* 52: 1398-1402.
- Peck, T. R., J. T. Cope, and D. A. Whitney. 1977. Soil testing. Correlating and interpreting the analytical results. ASA Special Publication Number 22. American Society of Agronomy, Madison, WI. 117 p.
- Rodríguez S., J. 1993. La Fertilización de los Cultivos, un Método Racional. Colección en Agricultura. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 208 p.
- Sánchez, P. A. 1976. Properties and Management of Soils in the Tropics. J. Wiley and Sons. New York. USA. 618 p.
- SAS, 1985. Introductory guide for personal computers. 6<sup>th</sup> ed. Statistical Analysis System Institute, Raleigh N. C. USA. 111 p.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 31 diciembre 2002. 75 p.
- Sims, J. T. 2000. Soil fertility evaluation. (p. D106-D154). *In*: Sumner M. E. (ed) Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2111 p.
- Ulrich, B., and M. E. Sumner. 1991. Soil Acidity. Springer-Verlag. Heidelberg, Germany. 224 p.
- Vázquez A., A., y A. N. Bautista. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y planta. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Chapingo, México. 29 p.
- Velasco M., H. A. 1983. Uso y Manejo del Suelo: Estudios de Campo, Determinaciones Físicas y Químicas, Prácticas de Recuperación y Manejo. Limusa. México. 191 p.
- Vergara S., M. A., J. D. Etchevers B., y M. Vargas H. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana* 22(3): 359-367.