

INDICADORES BIOQUÍMICOS DE CALIDAD EN TEPETATES CULTIVADOS DEL EJE NEOVOLCÁNICO MEXICANO

BIOCHEMICAL INDICATORS OF QUALITY IN CULTIVATED TEPETATES OF THE MEXICAN TRANSVOLCANIC BELT

Silvia Pajares-Moreno¹, Juan F. Gallardo-Lancho^{1*}, Sara Marinari², Jorge D. Etchevers-Barra³

¹Consejo Superior de Investigaciones Científicas, IRNASa. 37071 Salamanca, España. (jgallard@usal.es). ²Università della Tuscia. Viterbo, Italia. ³Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Estado de México, México.

RESUMEN

Los tepetates (tobas volcánicas endurecidas ubicadas en el Eje Neovolcánico Mexicano) habilitados para la agricultura presentan un alto grado de degradación debido a malas prácticas de manejo. El objetivo del trabajo fue definir características bioquímicas que puedan usarse como indicadores tempranos del estado de recuperación de tepetates. Durante el periodo 2002-2005 parcelas experimentales cultivadas desde 1986 se sometieron a tres prácticas agronómicas de manejo: tradicional (Tt), mejorado (Tm) y orgánico (To). Otras dos parcelas roturadas en 2002 se trataron con los manejos tradicional (Rt) y orgánico (Ro). Como referencia se eligieron dos tepetates sin cultivar (Tv y Td). Se tomaron muestras de suelo y se determinó: C orgánico (COS), N total (Nt), C y N de biomasa microbiana (BM), respiración del suelo (RS), mineralización de N, actividades deshidrogenasa, β -glucosidasa, fosfatasa, ureasa y proteasa, amonificación de la arginina y diferentes índices metabólicos. Los tepetates sin cultivar, con escaso contenido en COS y Nt, tuvieron los valores más bajos de todas las variables bioquímicas, las cuales aumentaron con los años de cultivo, sobre todo con los manejos To y Tm. Los mayores valores de BM, RS y actividad enzimática se relacionaron con el aumento del COS en las parcelas con esos manejos, sugiriendo un incremento de la calidad y fertilidad de dichos sustratos. Por tanto, el adecuado manejo de los tepetates, con adición de materia orgánica o fertilizantes con cobertura de residuos de cosecha, promovió la mejora de sus propiedades bioquímicas. Estas variables se correlacionaron significativamente, indicando la existencia de estrechas relaciones entre los procesos bioquímicos en los tepetates. Las variables bioquímicas estudiadas fueron indicadores útiles para evaluar cambios en la calidad de los tepetates cultivados con diferentes manejos.

ABSTRACT

Tepetates (hardened volcanic tuff located in the Mexican Transvolcanic Belt) conditioned for agricultural use are highly degraded due to poor management practices. The objective of this study was to define biochemical characteristics that can be used as early indicators of the state of tepetate recovery. During the period 2002-2005, experimental plots cultivated since 1986 were subjected to three agronomic management practices: traditional (Tt), improved (Tm) and organic (To). Another two plots plowed in 2002 were treated with traditional (Rt) and organic (Ro) management. As a reference, two plots of tepetates without cultivation were selected (Tv and Td). Soil samples were collected, and the following variables were determined: soil organic carbon (SOC), total N (Nt), microbial biomass C and N (BM), soil respiration (RS), N mineralization, dehydrogenase, β -glucosidase, phosphatase, urease and protease activity, ammonification of arginine, and different metabolic indexes. The tepetates without cultivation, containing little SOC and Nt, had the lowest values of all of the biochemical variables, which increased with years of cultivation, especially with To and Tm management. The highest values of BM, RS and enzyme activity were associated with the increase in SOC in To and Tm plots, suggesting improved quality and fertility of these substrates. Therefore, appropriate management of tepetates, with supplements of organic matter or fertilizers with harvest residue cover, promoted better biochemical properties. These variables correlated significantly, indicating the existence of close relationships among the biochemical processes in the tepetates. The biochemical variables studied were useful indicators for assessing changes in quality of the tepetates cultivated under different management systems.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Noviembre, 2008. Aprobado: Enero, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 121-134. 2010.

Key words: enzyme activity, fragipan, metabolic indexes, agricultural management, soil organic matter.

Palabras clave: actividad enzimática, fragipán, índices metabólicos, manejos agrícolas, materia orgánica del suelo.

INTRODUCCIÓN

El término tepetate se usa en México para referirse a suelos derivados de tobas volcánicas que presentan capas endurecidas por procesos geológicos y pedológicos (Zebrowski, 1992; Quantin *et al.*, 1993). Sin embargo, se ha propuesto un uso más restrictivo de dicho término (Etchevers *et al.*, 2006) que se aplica sólo a capas endurecidas formadas a partir de material piroclástico (toba), localizadas a diferentes profundidades del perfil.

Los tepetates se distribuyen en el Eje Transvolcánico Mexicano, principalmente en los Estados de México y Tlaxcala, ocupando una superficie de 30 000 km² (Zebrowski, 1992), 30 a 40 % de los suelos agrícolas y tienen una importante repercusión en los recursos disponibles para la población rural (Quantin *et al.*, 1998). Sin embargo, el manejo intensivo de estos sustratos tiene un efecto perjudicial en la calidad y cantidad de la materia orgánica edáfica (MOS), afectando las propiedades de los tepetates y, por tanto, a su fertilidad (Etchevers *et al.*, 1992; Werner, 1992).

Los tepetates se clasifican en tipos fragipán y duripán. Los de tipo fragipán pueden incorporarse a la agricultura mediante roturación y prácticas agrícolas adecuadas (Navarro y Zebrowski, 1992). El principal factor limitante para la producción agrícola reside en las bajas concentraciones de C orgánico edáfico (COS), N total (Nt) y P asimilable, que son insuficientes para el crecimiento de las plantas (Etchevers *et al.*, 1992; Etchevers y Brito, 1997). Además, los tepetates presentan baja aireación e infiltración de agua, por lo cual son muy susceptibles a la erosión hídrica (Prat *et al.*, 1997). Estos problemas se pueden corregir a corto plazo; los nutrimentales mediante adición de abonos químicos y orgánicos y los físicos mediante prácticas mecánicas para crear una adecuada estructura y reducir la erosión.

La calidad edáfica se entiende como la capacidad que tiene el suelo para funcionar adecuadamente en un ecosistema (Karlen *et al.*, 1997). Se pueden usar propiedades físicas y químicas para definir la calidad del suelo: textura, densidad aparente, capacidad de retención de agua, contenido de agregados, pH o MOS (Doran y Parkin, 1994; Gil *et al.*, 2005). Estas variables cambian lentamente y, por consiguiente, se

INTRODUCTION

The term tepetate is used in México to refer to soils derived from volcanic tuff that have layers hardened by geological and pedological processes (Zebrowski, 1992; Quantin *et al.*, 1993). A narrower use, however, has been proposed for the term (Etchevers *et al.*, 2006), to be applied only to the hardened layers formed from pyroclastic material (tuff) located at different depths of the profile.

Tepetates are distributed throughout the Mexican Transvolcanic Belt, mainly in the states of México and Tlaxcala, where they occupy an area of 30 000 km² (Zebrowski, 1992), 30 to 40 % of the agricultural land of those states and have a major impact on the resources available to the rural population (Quantin *et al.*, 1998). However, intensive management of these substrates has a damaging effect on quality and quantity of soil organic matter (SOM), affecting properties of the tepetates, and therefore, their fertility (Etchevers *et al.*, 1992; Werner, 1992).

Tepetates are classified as fragipan and duripan. Fragipan types can be conditioned for agriculture by plowing and proper agricultural practices (Navarro and Zebrowski, 1992). The main limiting factor for agricultural production lies in the low concentrations of soil organic carbon (SOC), total N (Nt) and available-P, which are found in concentrations insufficient for plant growth (Etchevers *et al.*, 1992; Etchevers and Brito, 1997). Moreover, aeration and water infiltration are negligible in tepetates, making them very susceptible to water erosion (Prat *et al.*, 1997). These problems can be corrected on the short term; nutritional problems by additions of chemical and organic fertilizers, and physical problems by mechanical means to create suitable structure and reduce erosion.

Soil quality is understood to be the capacity of the soil to function adequately in an ecosystem (Karlen *et al.*, 1997). Physical and chemical properties can be used to define soil quality: texture, bulk density, water retention capacity, aggregate content, pH or SOM (Doran and Parkin, 1994; Gil *et al.*, 2005). These variables change slowly and, consequently, many years are needed to detect significant changes. In contrast, soil biochemical properties (SOC and Nt, microbial biomass [BM], mineralizable N, soil respiration [RS], enzyme activity, etc.) are sensitive to small changes in the soil and, therefore, can provide

requieren muchos años para apreciar cambios significativos. Por el contrario, las propiedades bioquímicas edáficas (C y N, la biomasa microbiana [BM], N mineralizable, respiración del suelo [RS], actividad enzimática, etc.) son sensibles a pequeños cambios edáficos y, por tanto, proporcionan información exacta e inmediata de cambios en la calidad edáfica (Caravaca *et al.*, 2002; Nannipieri *et al.*, 2003). La BM es el componente activo de la MOS, responsable de su mineralización (Goyal *et al.*, 2000) y de la RS, por lo que suele utilizarse para cuantificar la actividad microbiana. La BM y la RS están influenciadas por el clima, las propiedades físicas y químicas y las prácticas agrícolas (Wang *et al.*, 2003).

Las actividades enzimáticas del suelo son indicadores sensibles y tempranos de cambios producidos por el manejo en la calidad edáfica (Masciandaro y Ceccanti, 1999; Pascual *et al.*, 2000; Nannipieri *et al.*, 2003). Las enzimas hidrolasas actúan así: 1) la ureasa (URa) y la proteasa (PRa) hidrolizan el N orgánico y producen N inorgánico; 2) la fosfatasa (PHa) cataliza la hidrólisis de los compuestos de P orgánico en inorgánico y los hace asimilables para las plantas; 3) la β -glucosidasa (GLa) hidroliza los enlaces β -D-glucopiranosidos para proporcionar estructuras carbónicas esenciales como fuente energética para los organismos heterótrofos edáficos (Eivazi y Zakaria, 1993).

Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) evaluar los efectos de diferentes prácticas agrícolas sobre la MOS y propiedades bioquímicas de tepetates; 2) validar el uso de variables bioquímicas como potenciales indicadores tempranos de recuperación de tepetates sometidos a diferentes manejos agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación, manejo agronómico y diseño experimental

La zona experimental se localiza en Santiago de Tlalpan, estado de Tlaxcala (México: 19° 20' N y 98° 20' O), a una altitud de 2600 m. El clima es templado subhúmedo, con una temperatura media anual de 14 °C y una precipitación anual de 700 mm, concentrada en verano.

En las parcelas más antiguas se hizo un roturado profundo (40 cm) en 1986 y 1990, delimitándose seis terrazas de 1300 m² cada una, cultivadas con fines de investigación de 1990 a 1992 y de 1995 a 1996. En la primera fase se evaluó la eficacia de diferentes dosis de fertilización (Werner, 1992) y en la segunda

exact and immediate information on changes in soil quality (Caravaca *et al.*, 2002; Nannipieri *et al.*, 2003). The BM is the active component of SOM, responsible for its mineralization (Goyal *et al.*, 2000) and RS, for which it is commonly used to quantify microbial activity. The BM and RS are affected by climate, physical and chemical properties and agricultural practices (Wang *et al.*, 2003).

Enzymatic activities in the soil are sensitive, early indicators of changes in soil quality produced by management (Masciandaro and Ceccanti, 1999; Pascual *et al.*, 2000; Nannipieri *et al.*, 2003). Hydrolase enzymes act in the following manner: 1) urease (URa) and protease (PRa) act by hydrolyze organic N and produce inorganic N; 2) phosphatase (PHa) catalyzes hydrolysis of the organic P compounds into inorganic, making them available for plants; 3) β -glucosidase (GLa) hydrolyzes the β -D-glucopyranoside bonds to provide essential carbon structures as sources of energy for the soil heterotrophic organisms (Eivazi and Zakaria, 1993).

The objectives of the present work were the following: 1) to evaluate the effects of different agricultural practices on SOM and biochemical properties of tepetates; 2) to validate the use of biochemical variables as potential early indicators of recovery of tepetates subjected to different agricultural management systems.

MATERIALS AND METHODS

Location, agronomic management, and experimental design

The experimental zone is located in Santiago de Tlalpan, state of Tlaxcala (México: 19° 20' N and 98° 20' W) at an altitude of 2600 m. Climate is temperate subhumid, with a mean annual temperature of 14 °C and annual rainfall of 700 mm, concentrated in summer.

The oldest plots were plowed (40 cm) in 1986 and 1990 and six 1300 m² terraces were delimited and cultivated for research purposes from 1990 to 1992 and from 1995 to 1996. In the first phase, effectiveness of different dosages of fertilizer was evaluated (Werner, 1992) and, in the second, conservation tillage methods were tested (Fechter *et al.*, 1997). Between 1997 and 2001, the plots were under traditional management by the farmer (rotation of wheat-barley-maize and later maize; yearly fertilization 45 kg N ha⁻¹ and 15 kg P ha⁻¹).

During the period from 2002 to 2005, the six terraces were used for the present study. Each terrace was subdivided into two

se probaron métodos de labranza de conservación (Fechter *et al.*, 1997). Entre 1997 y 2001 las parcelas se manejaron tradicionalmente por el agricultor (rotación de trigo-cebada-maíz y luego maíz, con fertilización anual de 45 kg N ha⁻¹ y 15 kg P ha⁻¹).

Durante el periodo de 2002 a 2005 las seis terrazas se utilizaron para la presente investigación. Cada terraza se subdividió en dos parcelas de 650 m² cada una y se establecieron tres tipos de manejo agrícola con rotación de cultivos (Cuadro 1): 1) tradicional (Tt), parcelas labradas cada año y cultivadas con bajo aporte de fertilizantes inorgánicos y con exportación de residuos de cosecha al final del ciclo agrícola; 2) mejorado (Tm), parcelas con cobertura de residuos de cosecha para la protección del suelo y moderado aporte de fertilizantes inorgánicos; 3) orgánico (To), parcelas cultivadas con aporte de fertilizantes orgánicos en forma de estiércol y compost. Al inicio del experimento (2002) se roturó una nueva terraza sobre un sustrato similar y se dividió en cuatro parcelas. Dos de ellas se manejaron con el sistema tradicional (Rt) y las otras dos con el sistema orgánico (Ro) (Cuadro 1). Un tepetate con vegetación natural (Tv) y otro desnudo (Td), localizados cerca de las parcelas agrícolas, se utilizaron como referencia. La preparación del terreno y las labores culturales se realizaron con tecnología local (mulas y algunas veces tractor).

El diseño experimental fue parcelas al azar con cuatro repeticiones en las parcelas viejas y dos en las nuevas. Dicho arreglo fue necesario por la ubicación de las terrazas construidas entre las cárcavas del terreno, hecho común en este tipo de agricultura.

Análisis químicos y bioquímicos

En agosto de 2005 se tomaron con una barrena cilíndrica muestras compuestas de suelo (mínimo 10 muestras simples por muestra compuesta) en cada parcela, a 10 cm de profundidad (la capa más sensible a los cambios). Las muestras fueron secadas al aire, homogeneizadas y tamizadas con malla de 2 mm.

El COS se analizó por combustión seca (TOCA, Shimadzu) y el Nt por el método micro-Kjeldahl (Bremner, 1996). El C y N de la biomasa microbiana (C-BM y N-BM) se determinaron mediante fumigación con cloroformo y extracción con K₂SO₄ 0.5 M (Vance *et al.*, 1987). El C-BM se determinó mediante oxidación con K₂Cr₂O₇ (Nelson y Sommers, 1996) y el N-BM con el método del N-ninhidrina (Joergensen y Brookes, 1990). La RS *in vitro* se calculó mediante el cociente entre el C-CO₂ emitido durante el experimento y su tiempo de duración; las muestras edáficas se introdujeron en frascos de cierre hermético y se ajustaron a 55 % de humedad a capacidad de campo antes y durante los 30 d de incubación a 25 °C. La producción de CO₂ fue recolectada periódicamente en 10 mL de NaOH 0.5 M y valorada con HCl 0.5 N (Hernández y García, 2003). La mineralización

plots 650 m² each and three types of agricultural management were set up with crop rotation (Table 1): 1) traditional (Tt), plots worked every year and cultivated with low dosages of inorganic fertilizers and export of harvest residues at the end of each growing cycle; 2) improved (Tm), plots with harvest residue cover to protect the soil and moderate addition of inorganic fertilizers; 3) organic (To), plots cultivated with addition of organic fertilizers in the form of manure and compost. At the beginning of the experiment (2002), a new terrace over a similar substrate was plowed and divided into four plots. Two of these were managed under the traditional system (Rt) and the other two under the organic system (Ro) (Table 1). An area of tepetate with natural vegetation (Tv) and another bare area of tepetate (Td), both located near the agricultural plots, were used as references. Preparation of the land and cultural labors were performed with local technology (mules and occasionally a tractor).

The experimental design was random plots with four replications in the old plots and two in the new plots. This arrangement was necessary because of the location of the terraces constructed between ravines, a common occurrence in land under this type of agriculture.

Chemical and biochemical analyses

In August 2005 compound soil samples were collected with a cylindrical auger (a minimum of 10 simple samples per compound sample) from each plot to a depth of 10 cm (the layer that is most sensitive to changes). The samples were air-dried, homogenized and sifted through a 2 mm mesh.

SOC was analyzed by dry combustion (TOCA, Shimadzu) and Nt by the micro-Kjeldahl method (Bremner, 1996). Carbon and N of microbial biomass (C-BM and N-BM) were determined by fumigation with chloroform and extraction with 0.5 M K₂SO₄ (Vance *et al.*, 1987). Carbon of the BM was determined by oxidation with K₂Cr₂O₇ (Nelson and Sommers, 1996) and N-BM with the N-ninhydrin method (Joergensen and Brookes, 1990). *In vitro* RS was calculated using the quotient between the C-CO₂ emitted during the experiment and the time of its duration. The soil samples were placed in jars sealed hermetically, adjusting moisture to 55 % field capacity before and during the 30 d incubation period at 25 °C. Produced CO₂ was collected periodically in 10 mL 0.5 M NaOH and valuated with 0.5 N HCl (Hernández and García, 2003). Net N mineralization (Nm) was calculated as the difference in inorganic N between 0 and 30 d of incubation.

Dehydrogenase (DHa) activity was determined with the modified method of Casida *et al.* (1964), based on the calculation of the degree of triphenyltetrazolium chloride (TTC)

**Cuadro 1. Manejos agronómicos en parcelas de tepetates cultivados (2002-2005) en un área experimental de Tlaxcala (México).
Table 1. Agronomic management in plots of cultivated tepetate (2002-2005) in an experimental area of Tlaxcala (México).**

Año	Manejo [†]	Fertilización (N-P-K kg ha ⁻¹) y residuos orgánicos (Mg ha ⁻¹)				Cultivos				Residuos recibidos (Mg ha ⁻¹)
		2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005	2002-2005
1986	Tt	23-00-00	23-00-00	80-00-00	62-23-00	H+V	A	M+F	T	6.1 MS
1986	Tm	60-100-34	23-60-00	90-40-00	82-23-00	H+V	A+V	M+F	T	10.4 MS
1986	To	17 (CF)	15 (EF)	1.9 (ES)	3.0 (CS)	H+V+BV	A+V	M+F	T	7.8 MS
2002	Rt	23-46-00	23-00-00	81-00-00	62-23-00	H	A	M+F	T	2.6 MS
2002	Ro	21 (EF)	15 (EF)	2.6 (ES)	4.3 (CS)	H+V+BV	A+V	M+F	T	8.4 MS

[†]ES: estiércol seco; EF: estiércol fresco; CS: compost seco; CF: compost fresco; MS: materia seca; H: *Vicia faba*; A: *Avena strigosa*; BV: barrera viva; M: *Zea mays*; F: *Phaseolus vulgaris*; V: *Vicia villosa*; T: *Triticum aestivum* L.; Tt: tradicional; Tm: mejorado; To: orgánico; Rt: roturado en 2002 con Tt; Ro: roturado en 2002 con To. ES: dry manure; EF: fresh manure; CS: dry compost; CF: fresh compost; MS: dry matter; H: *Vicia faba*; A: *Avena strigosa*; BV: live barrier; M: *Zea mays*; F: *Phaseolus vulgaris*; V: *Vicia villosa*; T: *Triticum aestivum* L.; Tt: traditional; Tm: improved; To: organic; Rt: plowed in 2002 with Tt; Ro: plowed in 2002 with To.

neta del N (Nm) se calculó como la diferencia del N inorgánico entre 0 y 30 d de incubación.

La actividad deshidrogenasa (DHa) se determinó con el método modificado de Casida *et al.* (1964), basado en el cálculo del grado de reducción del cloruro de trifeniltetrazolio (TTC) a trifenilformazán (TPF) después de incubar el suelo 24 h. La amonificación de la arginina (AAR) se determinó midiendo la formación de amoníaco liberado tras incubar el suelo con arginina como sustrato 2 h a 25 °C (Alef y Kleiner, 1987, modificado). La GLa y la PHa se analizaron mediante el método de Tabatabai (1994), basado en la determinación colorimétrica de p-nitrofenol después de incubar el suelo 1.30 h a 37 °C con los sustratos p-nitrofenil glucopiranosido y p-nitrofenil fosfato. La URa se calculó en función del amonio liberado después de incubar las muestras con urea como sustrato 1.30 h a 37 °C (Nannipieri *et al.*, 1980). La PRa se analizó después de la incubación del suelo por 2 h a 50 °C con caseína como sustrato y determinando los péptidos liberados (Ladd y Butler, 1972).

Se calcularon algunos índices metabólicos como variables empíricas de calidad edáfica: el cociente metabólico (qCO₂) que representa respiración microbiana por unidad de biomasa (Anderson y Domsch, 1993); el cociente microbiano (Cmic:Org) que es el porcentaje de C-BM con respecto al COS (Anderson y Domsch, 1989) y el cociente de mineralización (Qmin) que indica la potencialidad de mineralización por unidad de COS (Álvarez y Anzueto, 2004).

Análisis estadísticos

Todos los análisis se realizaron por triplicado. Los datos mostraron una distribución normal y se realizó un ANOVA de una

reducción to triphenylformazan (TPF) after incubating soil for 24 h. Ammonification of arginine (AAR) was determined by measuring the amount of ammonium released after incubating the soil 2 h at 24 °C with arginine as the substrate (Alef and Kleiner, 1987, modified). Both GLa and PHa were analyzed with the Tabatabai method (1994), based on the colorimetric determination of p-nitrophenol after incubating the soil 1.30 h at 37 °C with p-nitrophenyl glucopyranoside and p-nitrophenyl phosphate. Urease (URa) was calculated in function of the ammonium released after incubating the samples for 1.30 h at 37 °C with urea as substrate (Nannipieri *et al.*, 1980). Protease (PRa) was analyzed after incubating the soil for 2 h at 50 °C with casein as substrate and determining released peptides (Ladd and Butler, 1972).

Some metabolic indexes were calculated as empirical variables of soil quality: metabolic quotient (qCO₂), which represents microbial respiration per unit of biomass (Anderson and Domsch, 1993); the microbial quotient (Cmic:Org), which is the C-BM percentage of SOC (Anderson and Domsch, 1989); and the mineralization quotient (Qmin), which indicates mineralization potential per unit of SOC (Álvarez and Anzueto, 2004).

Statistical analysis

All of the analyses were performed in triplicate. The data exhibited a normal distribution, and a one-way ANOVA (p≤0.05) was done, depending on the type of management. A Pearson correlation and a principal components analysis (PCA) were performed with Varimax rotation; only the factors above 0.6 were considered in the PCA. The software STATISTICA 8 was used for the statistical analysis.

vía ($p \leq 0.05$) según el tipo de manejo. Se realizó un análisis de correlación de Pearson y un análisis de componentes principales (ACP) con rotación Varimax; sólo los factores mayores a 0.6 se consideraron en el ACP. Se usó el programa STATISTICA 8 para el análisis estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efectos de las prácticas agrícolas en la materia orgánica edáfica (MOS) y las propiedades bioquímicas edáficas

Los contenidos de COS y Nt fueron bajos en todos los manejos (de 0.7 mg C g^{-1} en Td a 4.4 mg C g^{-1} en To; y de 0.15 mg N g^{-1} en Td a 0.53 mg N g^{-1} en To; Cuadro 2), lo cual es característico en este tipo de sustratos volcánicos endurecidos (Etchevers *et al.*, 1992; Báez *et al.*, 2002). Los mayores valores se observaron con los manejos To (con abonos orgánicos) y Tm (con fertilizantes en

RESULTS AND DISCUSSION

Effects of agricultural practices on soil organic matter (SOM) and soil biochemical properties

Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (Nt) contents were low in all of the management types (from 0.7 mg C g^{-1} in Td to 4.4 mg C g^{-1} in To and from 0.15 mg N g^{-1} in Td to 0.53 mg N g^{-1} in To; Table 2), which is characteristic of this type of hardened volcanic substrate (Etchevers *et al.*, 1992; Báez *et al.*, 2002). The highest values were observed with To (with organic fertilizers) and Tm (with fertilizers in larger quantities than in Tt and with harvest residues). This is due mainly to the humification of organic residues and the manures added to the soil (Etchevers *et al.*, 1992; Álvarez *et al.*, 2000). The contents of SOC and Nt contents did not increase at the same rate with Tt due to excessive tillage, low additions of fertilizers, and extraction of

Cuadro 2. Propiedades químicas y bioquímicas e índices metabólicos de tepetates sometidos a diferentes manejos agronómicos. Table 2. Chemical and biochemical properties and metabolic indexes of tepetates subjected to different agronomic management systems.

Propiedad o índice metabólico	Manejo						
	Tt	Tm	To	Rt	Ro	Tv	Td
COS [†] (mg g^{-1})	3.4 b	4.0 ab	4.4 a	1.5 d	2.6 c	1.25 d	0.7 e
Nt (mg g^{-1})	0.46 b	0.50 ab	0.53 a	0.29 d	0.38 c	0.20 e	0.15 e
C-BM ($\mu\text{g g}^{-1}$)	100 c	131 ab	147 a	94 cd	118 b	94 cd	74 d
N-BM ($\mu\text{g g}^{-1}$)	11.4 b	16.7 a	16.3 a	7.4 c	13.3 ab	5.5 cd	4.0 d
RS ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	8.7 b	11.9 a	11.3 a	7.8 bc	10.9 a	7.7 bc	6.3 c
Nm ($\mu\text{g g}^{-1}$)	10.5 b	11.6 a	12.3 a	3.9 c	6.3 c	2.7 c	3.5 c
DHa ($\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	90.9 b	101.3 b	121.7 a	37.6 c	86.8 b	32.2 c	21.0 c
AAR ($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	0.55 ab	0.56 ab	0.65 a	0.42 b	0.63 a	0 c	0 c
GLa ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	35.1 b	54.8 a	61.9 a	22.7 c	34.1 b	27.8 bc	14.3 d
PHa ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	1724 b	1948 a	2088 a	218 d	393 c	327 c	142 e
URa ($\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	16.1 b	20.1 a	21.2 a	5.0 d	11.4 c	9.4 c	2.4 e
PRa ($\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	30.1 c	40.2 b	50.4 a	28.8 c	37.2 b	16.4 d	11.9 e
qCO ₂	3.6 ab	4.0 a	3.6 ab	3.4 bc	3.8 ab	3.3 bc	3.2 c
Cmic:Corg	3.1 e	3.3 e	3.4 e	6.1 c	4.6 d	7.8 b	9.5 a
Qmin	2.5 d	2.9 d	2.7 d	4.9 c	4.2 c	5.9 b	7.4 a

Valores con distinta letra en cada fila son diferentes ($p \leq 0.05$) * Values with different letter in a row are different ($p \leq 0.05$).

[†]COS: C orgánico del suelo; Nt: N total; C-BM: C biomasa microbiana; N-BM: N biomasa microbiana; RS: respiración del suelo; Nm: N mineralizado; DHa: actividad deshidrogenasa; AAR: amonificación de arginina; GLa: actividad β -glucosidasa; PHa: actividad fosfatasa; URa: actividad ureasa; PRa: actividad proteasa; qCO₂: cociente metabólico; Cmic:Corg: cociente microbiano; Qmin: cociente de mineralización; Tt: tradicional; Tm: mejorado; To: orgánico; Rt: roturado en 2002 con Tt; Ro: roturado en 2002 con To; Tv: tepetate con vegetación; Td: tepetate desnudo * COS: soil organic C; Nt: total N; C-BM: microbial biomass C; N-BM: microbial biomass N; RS: soil respiration; Nm: N mineralization; DHa: dehydrogenase activity; Aar: ammonification of arginine; GLa: β -glucosydase activity; PHa: phosphatase activity; URa: urease activity; PRa: protease activity; qCO₂: metabolic quotient; Cmic: microbial quotient; Qmin: mineralization quotient; Tt: traditional; Tm: improved; To: organic; Rt: plowed in 2002 with Tt; Ro: plowed in 2002 with To; Tv: tepetate with natural vegetation; Td: tepetate bare area.

mayores cantidades que en el Tt y con residuos de cosecha). Esto se debe principalmente a la humificación de los restos orgánicos y estiércoles añadidos al suelo (Etchevers *et al.*, 1992; Álvarez *et al.*, 2000). Los contenidos de COS y Nt no aumentaron al mismo ritmo con el Tt debido al excesivo laboreo, la baja adición de fertilizantes y la extracción de residuos de cosecha. En cuatro años, los tepetates recientemente roturados manejados con Ro incrementaron más intensamente los valores de estas variables que en los tepetates sin cultivar (Tv y Td). Resultados similares para estos sustratos fueron reportados por Etchevers y Brito (1997) y Báez *et al.* (2002). Según Álvarez *et al.* (2000), la adición de estiércol bovino y compost a tepetates recientemente incorporados a la agricultura aumenta la actividad microbiana. Los menores valores de COS se encontraron en Td y de Nt en Td y Tv, debido a que son sustratos endurecidos que no recibieron aportes significativos de residuos orgánicos.

Hubo un efecto positivo de los manejos y los años de cultivo sobre el C-BM, siendo significativamente mayor en las parcelas con mayor contenido de COS (147 y 131 $\mu\text{g g}^{-1}$ en To y Tm). Los bajos valores de C-BM y N-BM en Td (74 y 4 $\mu\text{g g}^{-1}$) se interpretan como una respuesta de las comunidades microbianas al estrés ambiental (Langer y Gunther, 2001). El manejo con mayor fertilización (Tm) aumentó significativamente el N-BMS en comparación con el tradicional (Tt); por tanto, hay una relación directa entre la fertilización y el aumento del N-BM, ya que la fertilización aumenta la producción de biomasa aérea y radical de los cultivos y, con ello, los retornos de C y N orgánicos al suelo, que son el sustrato para la población microbiana. En las parcelas cultivadas la RS fue significativamente más alta en los manejos mejorado y orgánico (Tm, To y Ro) que en los tradicionales (Tt y Rt); existiendo mayor contenido de COS en los primeros, dado que los residuos orgánicos mantienen la actividad microbiana. El Nm fue significativamente más alto en To y Tm (12.3 y 11.6 $\mu\text{g g}^{-1}$); en el primero se atribuyó a la presencia de altos niveles de COS y, por consiguiente, a una mayor actividad microbiana con este tratamiento, mientras que en el segundo se debió a la descomposición rápida de los residuos de cosecha aplicados con este manejo.

harvest residues. In four years, the recently plowed tepetates managed with Ro had higher values for these variables than the uncultivated tepetates (Tv and Td). Similar results for these substrates were reported by Etchevers and Brito (1997) and Báez *et al.* (2002). According to Álvarez *et al.* (2000), addition of cattle manure and compost to tepetates recently introduced into agriculture increases microbial activity. The lowest values of SOC were found in Td and those of Nt were found in Td and Tv; these hardened substrates did not receive significant supplements of organic residues.

There was a positive effect of management type and years of cultivation on C-BM; this effect was significantly greater in plots with higher SOC contents (147 and 131 $\mu\text{g g}^{-1}$ in To and Tm). The low values of C-BM and N-BM in Td (74 and 4 $\mu\text{g g}^{-1}$) are interpreted as a response of the microbial populations to environmental stress (Langer and Gunther, 2001). Management with higher dosages of fertilization (Tm) significantly increased N-BMS compared with traditional management (Tt); therefore, there is a direct relationship between fertilization and N-BM increases since fertilization increases the production of crop aerial and underground biomass and, with these, returns of soil organic C and N, which form the substrate for microorganisms. In cultivated plots, RS was significantly higher with improved and organic management (Tm, To and Ro) than with traditional management (Tt and Rt). There was a higher content of SOC in the former given that the organic residues sustain microbial activity. Nitrogen mineralization was significantly higher in To and Tm (12.3 and 11.6 $\mu\text{g g}^{-1}$); in the To system it was attributed to the presence of high levels of SOC and, therefore, greater microbial activity, while in the second, it was due to the rapid decomposition of the harvest residues applied under this management system.

Biochemical variables as potential early indicators of soil quality

Dehydrogenase (DHa) activity is considered an indicator of soil microbial metabolism. The highest values were found with To (122 mg TPF $\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$). Organic amendments normally stimulate soil enzymatic activity (Marcote *et al.*, 2001). The lowest DHa activity was observed in tepetate without cultivation (Tv and Td) and in the plowed plots

Variabes bioquímicas como potenciales indicadores tempranos de calidad del suelo

La actividad DHa es considerada un indicador del metabolismo microbiano edáfico. Los mayores valores se encontraron con el To (122 $\mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$). Las enmiendas orgánicas normalmente estimulan la actividad enzimática edáfica (Marcote *et al.*, 2001). La menor actividad DHa se obtuvo en los tepetates sin cultivar (Tv y Td) y en las parcelas roturadas manejadas con el sistema tradicional (Rt). Tanto las parcelas Tv y Td como las Rt tuvieron escaso contenido de MOS, indicando también baja presencia de microorganismos asociados (García *et al.*, 1997). La AAr fue significativamente mayor en los tratamientos orgánicos To y Ro (0.65 y 0.63 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$), lo cual refleja la mayor capacidad de amonificación de los tepetates manejados con estos dos tratamientos, que contrasta con la nula AAr de los tepetates sin cultivar (Tv y Td). González *et al.* (2007) mencionaron que la AAr es un buen indicador de los procesos microbianos en suelos cultivados con diferentes manejos.

Los mayores valores de GLa con To y Tm (62 y 55 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) se explican por un enriquecimiento del suelo con materiales frescos de naturaleza celulolítica, que actúan como sustrato para esta enzima (Caravaca *et al.*, 2002). Similarmente a lo reportado por Pascual *et al.* (2000) y Kanchikerimath y Singh (2001), la actividad PHa fue significativamente mayor con To y Tm (2088 y 1948 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), indicando una mayor presencia de compuestos orgánicos de P con estos tratamientos. La mayor actividad URa y PRa con To (21 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$ y 50 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{h}^{-1}$) se debe a la mayor disponibilidad de compuestos orgánicos de N. Las actividades de estas enzimas aumentan con la fertilización orgánica (Pascual *et al.*, 2000) y después de agregar estiércol animal (Kandeler y Eder, 1993).

Por tanto, el efecto de las prácticas de manejo en la inducción de una mayor actividad enzimática en el tepetate puede atribuirse al rizodepósito de sustancias orgánicas por plantas cultivadas y a la mayor disponibilidad de compuestos orgánicos (resultantes de la incorporación de cobertura vegetal y de insumos orgánicos añadidos con los años de cultivo).

managed under the traditional system (Rt). The Tv and Td plots as well as the Rt plots had scant SOM, also indicating sparse associated microorganisms (García *et al.*, 1997). Arginine ammonification (AAr) was significantly higher in the organic treatments To and Ro (0.65 and 0.63 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$), reflecting their greater capacity to ammonify these tepetates. This contrasts with the non-existent AAr of the uncultivated tepetates (Tv and Td). González *et al.* (2007) remarked that AAr is a good indicator of microbial processes in cultivated soils under different management systems.

The highest values of GLa with To and Tm (62 and 55 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) are explained by the enrichment of the soil with fresh cellulosic materials that serve as a substrate for this enzyme (Caravaca *et al.*, 2002). Similar to what was reported by Pascual *et al.* (2000) and Kanchikerimath and Singh (2001), PHa activity was significantly greater with To and Tm (2088 and 1948 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), indicating the presence of more P organic compounds with these treatments. Greater URa and PRa with To (21 $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1} \text{h}^{-1}$ and 50 $\mu\text{g tyrosine g}^{-1} \text{h}^{-1}$) is due to the greater availability of N organic compounds. The activity of these enzymes increases with organic fertilization (Pascual *et al.*, 2000) and with applications of animal manure (Kandeler and Eder, 1993).

Thus, the effect of management practices in the induction of greater enzymatic activity in tepetate can be attributed to rhizodeposition of organic substances by cultivated plants and the greater availability of organic compounds (resulting from the incorporation of plant cover and organic inputs to the soils over the years of cropping).

Metabolic indexes

The metabolic quotient ($q\text{CO}_2$), which reflects the physiological state of the soil microorganisms (Anderson and Domch, 1993), exhibits little variation among the tepetates subjected to the three treatments described (between 3.2 and 4.0 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{h}^{-1} / \mu\text{g C-BM} \times 10^{-3}$). The lowest values were found in uncultivated tepetates and the highest in cultivated tepetates (Table 2). In the latter, consequently, there would be more substrates used to satisfy the energy demand of the soil microflora (Joergensen and Scheu, 1999).

Índices metabólicos

El cociente qCO_2 , que refleja el estado fisiológico de los microorganismos edáficos (Anderson y Domsch, 1993), mostró poca variación entre los tepetates sometidos a los tres tratamientos descritos (entre 3.2 y 4.0 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ h}^{-1}/\mu\text{g C-BM} \times 10^{-3}$). Los menores valores se encontraron en los tepetates sin cultivar y los mayores en los cultivados (Cuadro 2). En estos últimos existirían, en consecuencia, mayor cantidad de sustratos usados para satisfacer la demanda energética de la microflora edáfica (Joergensen y Scheu, 1999).

El cociente $Cmic:Corg$, que refleja la disponibilidad del sustrato para los microorganismos (Joergensen y Scheu, 1999), varió entre 3.1 y 9.5 %. Los mayores y menores valores se obtuvieron en los tepetates sin cultivar (Td y Tv) y cultivados durante más tiempo (Tt, Tm y To). En los primeros se atribuye a su bajo contenido de COS, el cual aumenta con los años de cultivo. A pesar de que esta variable es uno de los índices más sensibles a las prácticas de manejo edáfico (Saviozzi *et al.*, 2001), en los tepetates cultivados más antiguos no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos.

El cociente $Qmin$ fue significativamente mayor en los tepetates sin cultivar (Td y Tv) (7.4 y 5.9 $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ COS d}^{-1}$), disminuyó en las parcelas recientemente roturadas (Rt y Ro) y alcanzó valores significativamente más bajos en las parcelas cultivadas por más tiempo (Tt, Tm y To). Ello indica que la tasa de mineralización decreció con los años de cultivo, independientemente del manejo, lo cual favoreció la acumulación de MOS.

Interrelación de las variables químicas y bioquímicas

Se observaron elevadas correlaciones significativas entre las variables estudiadas, lo cual significa una alta interrelación entre los procesos bioquímicos en estos sustratos (Cuadro 3). Hubo una correlación positiva entre COS, Nt, C-BM, N-BM, RS y Nm, similar a la reportada por Masciandaro y Ceccanti (1999) y Goyal *et al.* (2000); de aquí se deduce que el COS y el Nt son los factores determinantes del tamaño y la actividad microbiana. Goyal *et al.* (2000) y Wang *et al.* (2003) indicaron que la disponibilidad de sustrato (en este caso el COS) es el principal determinante de

The quotient $Cmic:Corg$, which reflects the availability of the substrate for the microorganisms (Joergensen and Scheu, 1999), varied between 3.1 and 9.5 %. The highest and lowest values were obtained in uncultivated tepetates (Td and Tv) and in those cultivated for a longer time (Tt, Tm and To). In the former, this is attributed to the low content of SOC, which increases with years of cultivation. Although this variable is one of the indexes that is most sensitive to soil management practices (Saviozzi *et al.*, 2001), in the oldest cultivated tepetates there were no significant differences among the treatments.

The $Qmin$ quotient was significantly higher in uncultivated tepetates (Td and Tv) (7.4 and 5.9 $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ SOC d}^{-1}$), decreasing in recently plowed plots (Rt and Ro) and was significantly lower in plots cultivated for a longer time (Tt, Tm and To). This indicates that the rate of mineralization decreased with years of cultivation, regardless of the management system, favoring SOM accumulation.

Interrelationship of chemical and biochemical variables

High significant correlations were observed among the variables studied, pointing to strong interrelationships among the biochemical processes in these substrates (Table 3). There were positive correlations among SOC, Nt, C-BM, N-BM, RS and Nm, similar to those reported by Masciandaro and Ceccanti (1999) and Goyal *et al.* (2000). From this, it is deduced that SOC and Nt are factors that determine the magnitude of microbial activity. Goyal *et al.* (2000) and Wang *et al.* (2003) indicated that the availability of substrate (in this case, SOC) is the main determinant of BM and RS. The positive correlation between RS and BM indicates that the former can be considered an appropriate indicator of the amount of BM affected by the agronomic management systems studied.

Dehydrogenase had a high positive correlation with each of the rest of the variables, suggesting that it is a good indicator of enzymatic activity and BM in the soil. A high correlation was obtained between AAr and DHa, which is explained by the release of ammonium from arginine due to microbial activity (Alef and Kleiner, 1987). There were also high correlations among all of the hydrolases (URa, PRa GLa and PHa), suggesting an equilibrium in the

Cuadro 3. Matriz de correlación entre variables bioquímicas de tepetates sujetos a diferentes tipos de manejo.
Table 3. Correlation matrix among biochemical variables of tepetates subjected to different types of management.

	COS [†]	Nt	C-BM	N-BM	RS	Nm	AAr	DHa	GLa	PHa	URa	PRa	qCO ₂	Cmic:Org
Nt	0.967**	1												
C-BM	0.763**	0.712**	1											
N-BM	0.866**	0.843**	0.786**	1										
RS	0.799**	0.804**	0.818**	0.725**	1									
Nm	0.641*	0.571*	0.703**	0.758**	0.790**	1								
AAr	0.833**	0.858**	0.627*	0.752**	0.721**	0.519*	1							
DHa	0.961**	0.947**	0.817**	0.810**	0.810**	0.663*	0.822**	1						
GLa	0.908**	0.880**	0.818**	0.865**	0.821**	0.779**	0.726**	0.916**	1					
PHa	0.884**	0.877**	0.652*	0.764**	0.640*	0.516*	0.658*	0.886**	0.880**	1				
URa	0.920**	0.905**	0.785**	0.850**	0.774**	0.637*	0.702**	0.929**	0.937**	0.849**	1			
PRa	0.895**	0.860**	0.856**	0.807**	0.780**	0.723**	0.757**	0.891**	0.832**	0.719**	0.779**	1		
qCO ₂	0.829**	0.810**	0.702**	0.826**	0.718**	0.531*	0.709**	0.807**	0.785**	0.731**	0.783**	0.754**	1	
Cmic:Org	-0.943**	-0.852**	-0.711**	-0.814**	-0.764**	N.s.	-0.824**	-0.926**	-0.835**	-0.835**	-0.834**	-0.840**	-0.811**	1
Qmin	-0.922**	-0.790**	-0.646*	-0.801**	-0.662*	N.s.	-0.731**	-0.903**	-0.814**	-0.836**	-0.794**	-0.793**	-0.675*	0.935**

N.s.: no significativo; *: correlación significativa a p ≤ 0.05 (bilateral); **: correlación significativa a p ≤ 0.01 (bilateral) ✧ N.s.: non significant; *: significant correlation, p ≤ 0.05; **: significant correlation, p ≤ 0.01 (bilateral).

[†]COS: C orgánico del suelo; Nt: N total; C-BM: C biomasa microbiana; N-BM: N biomasa microbiana; RS: respiración del suelo; Nm: N mineralizado; AAr: amonificación de arginina; DHa: actividad deshidrogenasa; GLa: actividad β-glucosidasa; PHa: actividad fosfatasa; URa: actividad ureasa; PRa: actividad proteasa; qCO₂: cociente metabólico; Cmic:Org: cociente microbiano; Qmin: cociente de mineralización ✧ COS: soil organic C; Nt: total N; C-BM: microbial biomass C; N-BM: microbial biomass N; RS: soil respiration; Nm: N mineralization; AAr: ammonification of arginine; DHa: dehydrogenase activity; GLa: β-glucosydase activity; PHa: phosphatase activity; URa: urease activity; PRa: protease activity; qCO₂: metabolic quotient; Cmic: microbial quotient; Qmin: mineralization quotient.

la BM y la RS. La correlación positiva entre la RS y la BM indica que la primera puede considerarse un indicador apropiado de la cantidad de BM afectada por los manejos agronómicos aplicados.

La DHa tuvo alta correlación positiva con las demás variables, sugiriendo que es un buen indicador de la actividad y BM del suelo. Se obtuvo una alta correlación entre AAr y DHa, que se explica por la liberación de amoníaco a partir de la arginina debido a la actividad microbiana (Alef y Kleiner, 1987). También hubo una alta correlación entre todas las hidrolasas (URa, PRa, GLa y PHa), lo que sugiere un equilibrio entre los ciclos de los principales nutrientes. Estas actividades enzimáticas mostraron igualmente una buena correlación con las diferentes formas de C y N (COS, Nt, BM, RS y Nm).

El qCO_2 se correlacionó positivamente con las demás variables bioquímicas, mientras que el $Q_{mic:Corg}$ y el Q_{min} tuvieron una correlación negativa con las otras variables. La elevada correlación del qCO_2 con COS, C-BMS y RS indica que la respiración por unidad de BM es mayor en los tepetates que tienen un mayor contenido de C fácilmente degradable.

Para lograr una adecuada descripción de la calidad edáfica se considera más útil la máxima integración posible de propiedades químicas y bioquímicas que el análisis individual de estas variables (Insam y Domsch, 1988). Con este propósito se efectuó un ACP que permitiese describir un modelo de las relaciones entre variables edáficas individuales para extraer factores comunes responsables de la variación total.

Los dos primeros componentes principales (CP) definieron 86.4 % de la variación total de las propiedades examinadas (Cuadro 4). El primer CP (CP1; indicador de disponibilidad energética para los microbios edáficos) explicó 60.1 % de la variación total y está conformado por las variables COS, Nt, C-BM, N-BM, DHa, GLa, PHa, URa, PRa y qCO_2 (relacionadas positivamente) y por dos variables correlacionadas negativamente con todas las anteriores ($C_{mic:Corg}$ y Q_{min}). El segundo CP (CP2; indicador de disponibilidad nitrogenada) explicó 16.3 % de la variación total y está constituido por las variables RS, Nm y AAr.

Las ordenadas X-Y de los valores de los factores de los dos CP reflejan la distribución de los manejos en base a las variables consideradas (Figura 1). El

cycles of the principal nutrients. These enzymatic activities, likewise, showed good correlations with the different forms of C and N (SOC, Nt, BM, RS and Nm).

The variable qCO_2 correlated positively with $Q_{mic:Corg}$, and Q_{min} had negative correlations with the other variables. The high correlations of qCO_2 with SOC, C-BMS and RS indicate that respiration per unit of BM is higher in the tepetates that have a higher content of easily degradable carbon.

To achieve an adequate description of soil quality, the greatest possible integration of chemical and biochemical properties is considered more useful than the individual analysis of these variables (Insam and Domsch, 1988). A PCA was therefore conducted to describe a model of the relationships among individual soil variables in order to extract the common factors responsible for the total variation.

The first two principal components (PC) defined 86.4 % of the total variation of the examined properties (Table 4). The first PC (PC1; indicator of energy available for soil microorganisms) explained 60.1 % of the total variation and comprises SOC, Nt, C-BM, N-BM, DHa, GLa,

Cuadro 4. Componentes principales (CP) y puntuaciones de los factores relacionados con las variables bioquímicas edáficas.

Table 4. Principal components (PC) and scores of the factors related to edaphic biochemical variables.

Variables	CP1	CP2
COS	0.96 ^a	0.20
Nt	0.95 ^a	0.19
C-BM	0.74 ^a	0.43
N-BM	0.91 ^a	0.29
RS	0.56	0.63 ^a
Nm	0.51	0.72 ^a
AAr	-0.17	0.78 ^a
DHa	0.95 ^a	0.24
GLa	0.93 ^a	0.20
PHa	0.96 ^a	-0.12
URa	0.96 ^a	0.063
PRa	0.85 ^a	0.367
qCO_2	0.81 ^a	0.28
$C_{mic:Corg}$	-0.93 ^a	-0.15
Q_{min}	-0.92 ^a	-0.07
Varianza explicada	60.11	16.28

^a Variables de cada componente usadas para la interpretación del ACP. ♦ Variables of each component used for the interpretation of PCA.

manejo To se encuentra entre el área de influencia de las variables del CP1 interrelacionadas positivamente (que hacen referencia al COS y a la actividad microbiana que participan en su mineralización) y las variables del CP2 (que expresan la mineralización de la MOS y la actividad microbiana que libera N asimilable). El manejo Tm está en el área de influencia de las variables del CP1 interrelacionadas positivamente; mientras que el Ro está influenciado por las variables del CP2. El manejo Rt y los tepetates Tv y Td carecen de energía y de N asimilable, mientras que el manejo Tt tiene limitado el suministro de N, lo que reduce su productividad.

Por tanto, los manejos situados en el primer cuadrante de la Figura 1 (Tm, To y Ro) serían los más adecuados, dado que las variables bioquímicas responden positivamente a estos manejos y, por ello, los tepetates cultivados con estos tratamientos tenderían hacia una mejor calidad edáfica. El manejo Tt muestra deficiencia de nitrógeno que limita su producción y un incremento sostenido de MOS.

CONCLUSIONES

El adecuado cultivo de los tepetates, mediante un manejo orgánico o una correcta fertilización con cobertura de residuos de cosecha, conduce a un incremento en los contenidos del carbono orgánico y nitrógeno total que conlleva a una mejora de las

PHa, URa, PR and qCO₂ (positively related) and two variables correlated negatively with all of the above (Cmic:Corg and Qmin). The second PC (PC2; indicator of nitrogen availability) explained 16.3 % of the total variation and is constituted by the variables RS, Nm and AAr.

The ordinates X-Y of the values of the two PC factors reflect the distribution of the management systems on the basis of the variables considered (Figure 1). Organic management To is found in the area of influence of the positively interrelated PC1 variables (which refer to SOC and the activity of microbes that participate in its mineralization) and PC2 variables (which express SOM mineralization and the microbial activity that releases available N). Improved management Tm is in the area of influence of the positively interrelated PC1 variables, while Ro is influenced by the PC2 variables. Management Rt and Tv and Td tepetates are lacking in energy and available N, while Tt management has a limited supply of N, which reduces plot productivity.

Thus, the management systems situated in the first quadrant of Figure 1 (Tm, To, and Ro) would be the most suitable, given that the biochemical variables respond to them positively. For this reason, tepetates cultivated under these treatments would tend to have better soil quality. Management Tm shows nitrogen deficiency, which limits production and sustained increases in SOM.

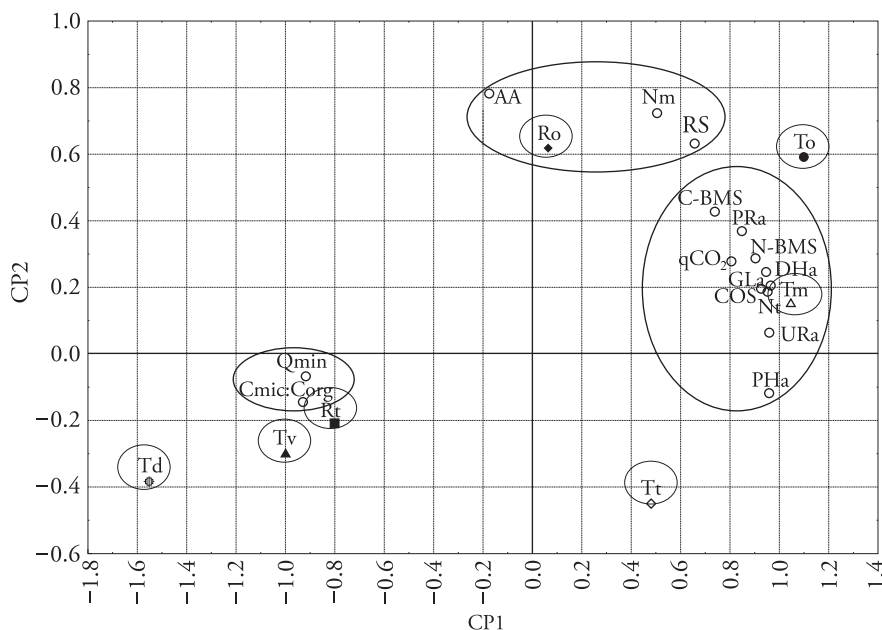


Figura 1. Gráfico de análisis de componentes principales (ACP) en relación con los componentes principales CP1 y CP2.
Figure 1. Graph of principal components analysis (PCA) related to principal components PC1 and PC2.

propiedades bioquímicas de dichos sustratos a corto plazo. Cuatro años de manejos orgánico o mejorado fueron suficientes para producir un aumento significativo del contenido la materia orgánica de los tepetates, mostrando un efecto positivo en la recuperación de estos sustratos.

Las variables bioquímicas edáficas (biomasa microbiana, respiración basal y actividades enzimáticas) fueron buenos indicadores de calidad de los tepetates manejados con diferentes prácticas agrícolas. Estas variables aumentaron con los años de cultivo, sobre todo con los tratamientos orgánico y mejorado, lo que sugiere una activa transformación bioquímica de los materiales orgánicos aportados con los abonos o residuos de cosecha.

El análisis de componentes principales fue una herramienta útil para integrar variables bioquímicas y evaluaron los efectos del manejo edáfico sobre la calidad de estos sustratos cultivados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea la financiación del Proyecto REVOLSO (Programa INCO) y al Ministerio Español de Educación y Ciencia la ayuda complementaria.

LITERATURA CITADA

- Alef, K., and D. Kleiner. 1987. Applicability of arginine ammonification as indicator of microbial activity in different soils. *Biol. Fertil. Soils* 5: 148-151.
- Álvarez S., J. D., y M. J. Anzueto M. 2004. Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 38: 13-22.
- Álvarez S., D., R. Ferrera C., y J. D. Etchevers B. 2000. Actividad microbiana en tepetate con incorporación de residuos orgánicos. *Agrociencia* 34: 523-532.
- Anderson, T. H., and K. H. Domsch. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biol. Biochem.* 21: 471-479.
- Anderson, T. H., and K. H. Domsch. 1993. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 25: 393-395.
- Báez P., A., J. D. Etchevers B., C. Hidalgo M., C. Prat, V. Ordaz C., y R. Núñez E. 2002. C orgánico y P-Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia* 36: 643-653.
- Bremner, J. M. 1996. Total nitrogen. *In: Sparks, D. L. (ed). Methods of Soil Analysis: Chemical Methods.* S. S. S. A. Madison, WI. pp: 1085-1086.
- Caravaca, F., G. Masciandaro, and B. Ceccanti. 2002. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil Till. Res.* 68:23-30.

CONCLUSIONS

Adequate cultivation of tepetates under organic management or correct fertilization with harvest residue cover leads to increases in organic carbon and total nitrogen, which in turn lead to short-term improvement of biochemical properties of these substrates. Four years of organic or improved management were sufficient to produce a significant increase in organic matter content in the tepetates, showing their positive effect in recovery of these substrates.

The soil biochemical variables (microbial biomass, basal respiration and enzymatic activities) were good indicators of the quality of tepetates managed with different agricultural practices. These variables increased with years of cultivation, especially with the organic and improved treatments, suggesting active biochemical transformation of the organic materials supplied in the form of organic fertilizers or harvest residues.

The principal components analysis was a useful tool for integrating biochemical variables, taking into account the effects of soil management on the quality of cultivated substrates.

—End of the English version—



- Casida, L. E., D. A. Klein, and T. Santoro. 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.* 98: 371-378.
- 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. Spec. Pub. N° 35, S.S.S.A. Madison, WI.* pp: 3-21.
- Eivazi, F., and A. Zakaria. 1993. β -Glucosidase activity in soils amended with sewage sludge. *Agric. Ecosyst. Environ.* 43: 155-161.
- Etchevers B., J. D., y H. Brito. 1997. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala. *In: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM. Quito.* pp: 202-212.
- Etchevers B., J. D., L. Cruz, J. Mares, y C. Zebrowski. 1992. Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra* 10: 379-384.
- Etchevers B., J. D., C. Hidalgo M., C. Prat, and P. Quantin. 2006. Tepetates of Mexico. *In: Lal, R. (ed). Encyclopedia of Soil Science.* Marcel Dekker. New York. pp: 1745-1748.
- Fechter, U., A. Vera, y G. Werner. 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t3) en el bloque

- de Tlaxcala, México. *In*: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM. Quito. pp: 351-358.
- García, C., T. Hernández, and F. Costa. 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 1-2: 123-134.
- Gil S., F., C. Trasar C., M. C. Leirós, and S. Seoane. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37: 877-887.
- González, M. G., J. F. Gallardo L., E. Gómez, G. Masciandaro, B. Ceccanti, and S. Pajares M. 2007. Potential universal applicability of soil bioindicators: Evaluation in three temperate ecosystems. *Ciencia Suelo (Argentina)* 25: 151-158.
- Goyal, S., K. Sakamoto, and K. Inubushi. 2000. Microbial biomass and activities along an Andosol profile in relation to soil organic matter level. *Microb. Environ.* 15: 143-150.
- Hernández, T., y C. García. 2003. Estimación de respiración microbiana del suelo. *In*: García, C., F. Gil S., T. Hernández, y C. Trasar C. (eds). Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos. Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 311-346.
- Insam, H., and K. H., Domsch. 1988. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on cronosequences of reclamation sites. *Microbiol. Ecol.* 15: 177-188.
- Joergensen, R. G., and P. C. Brookes. 1990. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts. *Soil Biol. Biochem.* 22: 1023-1027.
- Joergensen, R. G., and S. Scheu. 1999. Depth gradients of microbial and chemical properties in moder soils under beech and spruce. *Pedobiology* 43: 134-144.
- Kanchikerimath, M., and D. Singh. 2001. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agric. Ecosyst. Environ.* 86: 155-162.
- Kandeler, E., and G. Eder. 1993. Effect of cattle slurry in grassland on microbial biomass and on activities of various enzymes. *Biol. Fert. Soils* 16: 249-254.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Ladd, J. N., and J. H. A. Butler. 1972. Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.* 4: 19-30.
- Langer, U., and T. Gunther. 2001. Effects of alkaline dust deposits from phosphate fertilizer production on microbial biomass and enzyme activity in grassland soils. *Environ. Pollut.* 12: 321-327.
- Marcote, I., T. Hernández, C. García, and A. Polo. 2001. Influence of one or two successive annual applications of organic fertilizers on the enzyme activity of a soil under barley cultivation. *Biores. Technol.* 79: 147-154.
- Masciandaro, G., and B. Ceccanti. 1999. Assessing soil quality in different agroecosystems through biochemical and chemic-structural properties of humic substances. *Soil Till. Res.* 51: 129-137.
- Nannipieri, P., J. Ascher, M. T. Ceccherini, L. Landi, G. Pietra, and G. Renella. 2003. Microbial diversity and soil functions. *Eur. J. Soil Sci.* 54: 655-670.
- Nannipieri, P., B. Ceccanti, S. Cervelli, and E. Matarrese. 1980. Extraction of phosphatase, urease, protease, organic carbon and nitrogen from soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1011-1016.
- Navarro G., H., y C. Zebrowski. 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetates. *Terra* 10: 451-459.
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total C, organic C and organic matter. *In*: Sparks, D. L. (ed). *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods.* S. S. S. A. Madison, WI. pp: 961-1010.
- Pascual, J. A., C. García, T. Hernández, J. L. Moreno, and M. Ros. 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1877-1883.
- Prat, C., A. Báez P., y A. Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. *In*: Zebrowski, C., P. Quantin, y G. Trujillo (eds). Suelos Volcánicos Endurecidos. ORSTOM. Quito. pp: 371-383.
- Quantin, P., A. Arias, J. D. Etchevers B., R. Ferrera C., K. Olechko, H. Navarro G., G. Werner, y C. Zebrowski. 1993. Tepetates de México: Caracterización y habilitación para la agricultura. *Terra* 11: 11-13.
- Quantin, P., C. Prat, and C. Zebrowski. 1998. Soil restoration and conservation: Tepetates —indurate volcanic soils— in Mexico. *In*: Harper, D., and T. Brown (eds). *The Sustainable Management of Tropical Catchments.* John Wiley & Sons. New York. pp: 109-119.
- Saviozzi, A., R. Levi-Minzi, R. Cardelli, and R. Riffaldi. 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant & Soil* 233: 251-259.
- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. *In*: Weaver, R. W., J. S. Angle, P. S. Bottomly, D. Bezdicek, S. Smith, M. A. Tabatabai, and A. Wollum (eds). *Methods of Soil Analysis: Microbial and Biochemical Properties.* S. S. S. A. Madison, WI. pp: 775-833.
- Vance, E. D., P. C. Brookes, and D. S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- Wang, W. J., R. C. Dalal, P. W. Moody, and C. J. Smith. 2003. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biol. Biochem.* 35: 273-284.
- Werner, G. 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el Estado de Tlaxcala: Distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10: 318-331.
- Zebrowski, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de América Latina. *Terra* 10: 15-23.