

T
1174

 XOCHIMILCO SERVICIOS DE INFORMACION
ARCHIVO HISTORICO

124176

124176



Casa Abierta al Tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

**“Indicadores de calidad de suelos con diversos manejos, cultivados con
maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) en el estado de Oaxaca”**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Biológicas

P R E S E N T A

M. en C. Martha Angélica Bautista Cruz

Comité Tutorial:

Cotutor: Dr. Fernando de León González

Cotutor: Dr. Rogelio Carrillo González

Asesora: Dra. María del Rosario Arnaud Viñas

México, D.F., septiembre de 2008

**El Doctorado en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma
Metropolitana pertenece al Padrón de Postgrados de Excelencia del
CONACYT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio
PFP-20-93.**

**El Jurado designado por las Divisiones de Ciencias Biológicas y de la
Salud de las Unidades Iztapalapa y Xochimilco aprobó la Tesis que
presentó:**

M. en C. Martha Angélica Bautista Cruz

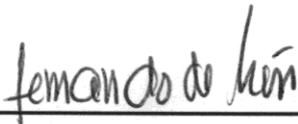
Matrícula: 205 182 493

El día 01 de septiembre del año 2008.

Jurado

Codirectora

Cotutor: Dr. Fernando de León González

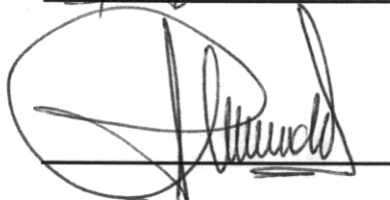


Codirector

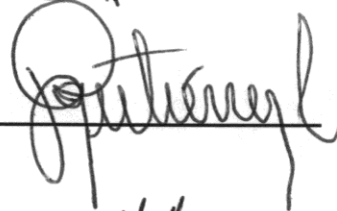
Cotutor: Dr. Rogelio Carrillo González



Asesora: Dra. María del Rosario Arnaud Viñas



Sinodal: Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena



Sinodal: Dr. Alejandro Alarcón



Este trabajo está dedicado a mi familia. En especial a mi amado hijo Carlos Javier por iluminar mi vida y ser el principal motivo que me impulsa a seguir adelante y a dar lo mejor de mí. A Oscar, mi hermano, por cuidar de mi hijo como suyo, por ser mi apoyo incondicional tanto en momentos difíciles como en aquéllos de felicidad. A Javier por los momentos de convivencia mutua. A mi padre por compartir su amor y su experiencia con nosotros. A mi hermano César por su apoyo y ayuda en mi vida cotidiana. Finalmente, a la memoria de mi querida madre, por su enseñanza de vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme salud y fortaleza para culminar una más de mis metas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante la realización de mis estudios doctorales.

A los integrantes del comité tutorial, Dr. Fernando de León González, quien aceptó ser mi amigo y mi maestro a pesar de las distancias y de los tiempos, por su amistad y apoyo. A la Dra. María del Rosario Arnaud Viñas por su amistad y por haberme alentado a dar este nuevo paso en mi formación académica. Al Dr. Rogelio Carrillo González por su forma particular de hacer comentarios, los cuáles contribuyeron al desarrollo y enriquecimiento del trabajo.

A los miembros del Jurado, Dra. María del Carmen Gutiérrez Castorena, Dr. Alejandro Alarcón y Dr. Alejandro Alberto Azaola Espinoza por la disposición mostrada en todo momento y los comentarios críticos y constructivos que hicieron al documento final.

A la Dra. Reyna Fierro Pastrana por el afecto que me ha brindado y por su gran profesionalismo.

Al Dr. Celerino Robles Pérez por haberme aceptado en su proyecto de investigación y destinar parte de los recursos económicos para el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Al Lic. Ernesto Olivares Montes por su generosidad, por todo el apoyo que me otorgó para poder llegar al final de este proceso.

Al CIIDIR IPN Unidad Oaxaca por las facilidades brindadas durante la realización de mis estudios de postgrado.

A mi amigo, Raúl Rivera García, por su paciencia y ayuda en la edición de figuras.

Al Ing. Néstor Pérez Paz y al Sr. Ricardo Sandoval Delgado que en algún momento me acompañaron y ayudaron en el trabajo de campo.

A los productores de agave de las comunidades de Tlacolula, San Baltazar Guelavila y Soledad Salinas que aceptaron colaborar en este estudio.

A Lulú y Roselia, compañeras entrañables.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron para que este trabajo se pudiera realizar y terminar. Una disculpa de antemano, ya que es probable que haya olvidado mencionar a alguien.

Indicadores de calidad de suelos con diversos manejos, cultivados con maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) en el estado de Oaxaca

Resumen

El objetivo de este estudio fue generar información para el mejor entendimiento de los sistemas agrícolas cultivados con *Agave angustifolia* Haw. en el distrito de Tlacolula, Oaxaca. Con esto se buscan opciones para su manejo sustentable mediante la descripción de la fertilidad del suelo, la selección de un conjunto mínimo de indicadores y su integración en índices prácticos que muestren el estado actual de la calidad del suelo y el impacto de las prácticas de manejo empleadas. Se consideraron tres áreas con diferentes condiciones topográficas (valle, lomerío y montaña) en Oaxaca, México, asociadas a sistemas de labranza con tracción mecánica (TM), tracción animal (TA) y labranza mínima (LM), respectivamente, las cuáles han sido cultivadas con *A. angustifolia* por 20-30 años aproximadamente después de la conversión de selva baja caducifolia a campos agrícolas. También se incluyó la edad de las plantas de agave como factor de variación: 1.5-3.5 años (clase 1), 3.6-5.5 años (clase 2) y 5.6-7.5 años (clase 3). Las muestras de suelo se tomaron a dos profundidades (0-20 y 21-40 cm) en parcelas de 4,000 m² dentro de cada sitio y clases de edad de la planta. Los suelos del sitio montañoso (LM) tuvieron valores más altos de carbono orgánico (23.9 g kg⁻¹), N disponible (23.1 mg kg⁻¹) y carbono de la biomasa microbiana (969.6 µg g⁻¹) que los suelos del valle (TM) y lomerío (TA). El

Ca^{2+} y el K^+ intercambiable, el P_{Olsen} y la resistencia a la penetración del suelo se incrementaron con la edad de la planta. En contraste, el N disponible disminuyó.

Los indicadores de calidad se obtuvieron para la capa superficial del suelo (0-20 cm). Con el análisis de componentes principales se seleccionó al carbono orgánico, pH, carbono de la biomasa microbiana y Mg^{2+} intercambiable como indicadores de calidad del suelo en los sitios estudiados. Los indicadores obtenidos se integraron en un índice de calidad del suelo. De los sistemas agrícolas muestreados, el suelo de montaña con LM tuvo el valor más alto del índice de calidad del suelo. A pesar de que el carbono orgánico fue el indicador más afectado por los sitios y el manejo del suelo asociado a ellos, la adecuada selección de las prácticas de labranza condicionada por la diferente topografía del área de estudio (planicie, lomerío y montaña) ha permitido que los sistemas estudiados conserven un contenido moderado de carbono orgánico, particularmente el suelo de montaña (LM), lo cual refleja un manejo adecuado por parte de los agricultores. Los resultados del presente estudio revelaron que la conversión de selva baja caducifolia a plantaciones de agave y el cultivo de esta especie durante un período aproximado de 20-30 años en sitios con pendientes pronunciadas (70%) no han representado una degradación en la fertilidad y calidad del suelo. Como una forma aproximada de resolver la falta de datos de calibraciones para la adecuada interpretación de un análisis de suelo, la obtención de indicadores de calidad puede ser una opción, especialmente para suelos sin análisis previos, como es el caso de los suelos cultivados con *A. angustifolia*. Valores de 23.9 g kg⁻¹ de carbono orgánico, 7.5 de pH, 2.0 cmol_c kg⁻¹ de Mg^{2+} intercambiable y 969.6 µg g⁻¹ de carbono de la biomasa microbiana se podrían

sugerir como adecuados para mantener una productividad sustentable de *A. angustifolia*, aunque lo más conveniente sería obtener las calibraciones para este tipo de suelo y de cultivo. Es posible que la cantidad de N, P, K⁺ y Ca²⁺ disponible en los suelos de los tres sitios (Tlacolula, San Baltazar y Soledad) sea suficiente para mantener una producción aceptable de este agave. De acuerdo con el análisis de indicadores de calidad realizado en este estudio, el nutrimento que requiere restitución inmediata es el Mg²⁺. El suelo de San Baltazar presentó la concentración más baja de este nutrimento. Algunas prácticas de manejo que podrían contribuir a mantener e incrementar la calidad del suelo en la zona de estudio son: (i) incorporar residuos orgánicos y materiales composteados para conservar o aumentar la cantidad de materia orgánica, (ii) continuar utilizando prácticas de LM en la medida de lo posible, (iii) seguir con las asociaciones de cultivos como el maíz y el frijol durante los primeros dos o tres años del ciclo de cultivo del agave, debido a que cultivos como el frijol pueden fijar vía simbiótica cantidades importantes de N, sin contaminar el ambiente y a un bajo costo económico y, (iv) añadir fertilizantes orgánicos y minerales que aporten principalmente Mg²⁺ para restituir los reservorios naturales del suelo.

Palabras clave: Carbono orgánico; Fertilidad del suelo; Labranza mínima; Magnesio intercambiable.

Soil quality indicators in soils with different soil management cultivated with maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) in Oaxaca

Abstract

The aim of this study was to gain information about *Agave angustifolia* Haw. agricultural systems in Tlacolula, Oaxaca, Mexico. This research look forward the sustainable management of these soils through the description of the soil fertility properties, the selection of a minimum set of indicators and its integration into a practical index that allows to know the state of the soil quality and the impact of the soil management used for *A. angustifolia* cropping. Three areas with different topographic conditions (valley, hill and mountain) associated with the tillage systems, disk ploughing (DP), animal drawn ploughing (ADP) and minimum tillage (MT), respectively, were considered. These areas have been cultivated with *A. angustifolia* for 20-30 years approximately after the conversion of dry deciduous lowland forest to agricultural fields. In addition, plant ages were included as factor of variation: 1.5 to 3.5 yr (class 1), 3.6 to 5.5 yr (class 2) and 5.6 to 7.5 yr (class 3). Soil samples were taken at two soil depths (0-20 and 21-40 cm) from 4,000 m² plots within each site and plant age classes. Soil from the mountain site (MT) had the higher values of soil organic carbon (23.9 g kg⁻¹), available N (23.1 mg kg⁻¹) and soil microbial biomass carbon (969.6 µg g⁻¹) than in the hill and valley fields. Exchangeable Ca²⁺ and K⁺, extractable P_{Olsen} and cone penetration resistance of soil increased with plant age. In contrast, available N decreased.

Soil quality indicators were calculated for the topsoil (0-20 cm). On the basis of principal component analysis, it was concluded that soil properties such as pH, soil organic carbon, soil microbial biomass carbon and exchangeable Mg^{2+} can be used as indicators to assess soil quality in *A. angustifolia* plantations. Soil organic carbon was the most sensitive indicator of soil quality for these soils. The soil quality indicators obtained were integrated in a soil quality index. From the agricultural systems, the mountain soil (MT) showed the highest value of the soil quality index. Although the soil organic carbon was the more affected indicator by the sites and soil management associated with them, the appropriate selection of tillage system determined by the topographic condition of the study area (valley, hill and mountain) has allowed that the studied systems conserve a moderate content of soil organic carbon, particularly, the soil of mountain (MT), which reflects an appropriate soil management carried out by the farmers. Results of this study revealed that the conversion of dry deciduous lowland forest to agave plantations and the cropping of this specie during a period approximately of 20-30 years in sites with steep slopes (70%) have not represented a degradation in the soil fertility and soil quality. As a provisional way to solve the lack of calibrations for suitable interpretation of a soil analysis, the obtaining of soil quality indicators can be an option, especially when no records on soil analysis are available, such as the soils cropped with *A. angustifolia*. Values of 23.9 g kg⁻¹ of organic carbon, 7.5 of pH, 2.0 cmol_c kg⁻¹ of exchangeable Mg^{2+} and 969.6 μg g⁻¹ of soil microbial biomass carbon can be considered as appropriate to maintain a sustainable productivity of *A. angustifolia*, although a more advisable procedure would be to obtain the calibrations for this type of soil and crop.

It is possible that the amount of N, P, K⁺ and Ca²⁺ available in the soils of the three sites (Tlacolula, San Baltazar and Soledad) is sustainable for the agave production. According to soil quality indicators analysis carried out in this study, it is likely that Mg²⁺, requires immediate restitution in San Baltazar soil, which showed the lowest concentration. Some practices of soil management that could contribute to maintain and to increase the soil quality in the study area are: (i) to incorporate organic and composted materials to conserve or to increase the soil organic matter, (ii) to continue with the use of minimum tillage practices, (iii) to continue with the associations of crops as maize and bean during the first two or three years of the crop cycle, because crops such as the bean can to fix important amounts of N in a symbiotic manner, without contaminating the environment and with a low economic cost and, (iv) to add organic and mineral fertilizers that provide mainly Mg²⁺ to reconstitute the natural soil pools.

Key words: Exchangeable magnesium; Minimum tillage; Soil fertility; Soil organic carbon.

Índice de Contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT	IV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO 2	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
CAPÍTULO 3	8
CONCEPTOS SOBRE CALIDAD DEL SUELO, SUS INDICADORES E ÍNDICES	8
La calidad del suelo	8
Indicadores de calidad del suelo	9
Condiciones que deben cumplir los indicadores de calidad del suelo	12
Selección de los indicadores de calidad del suelo	13
Indicadores químicos	14
Indicadores físicos	15
Indicadores biológicos	15
Indicadores de calidad y agricultura sustentable	17
Evaluación de la calidad del suelo	19
Evaluación cuantitativa de la calidad del suelo	20
Valores de referencia para evaluar la calidad del suelo	22
Variación espacial y temporal de la calidad del suelo	24
Evaluación cualitativa de la calidad del suelo	29
Índices de calidad de suelos	30
Generación de índices de calidad de suelos	32
Precauciones respecto al uso del concepto de calidad del suelo y sus indicadores	35
REFERENCIAS	37
CAPÍTULO 4	46
FERTILIDAD DEL SUELO EN PLANTACIONES DE <i>AGAVE ANGUSTIFOLIA</i> HAW.	46
INTRODUCCIÓN	46
Requerimientos edafoclimáticos de <i>Agave angustifolia</i> Haw.	51
Suelos	52
Fisiografía	52
Altitud	52
Clima	53

Temperatura.....	53
Precipitación.....	53
Requerimientos nutrimentales.....	53
Composición química de hojas y vinazas de agave.....	55
MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
Descripción de los sitios y técnicas de cultivo.....	56
Muestreo del suelo.....	60
Análisis del suelo.....	61
Análisis estadísticos.....	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
Propiedades del suelo en plantaciones de agave.....	65
Propiedades físicas.....	65
Propiedades químicas.....	67
Propiedades biológicas.....	70
Cambios en las propiedades del suelo asociados con la edad de las plantas de agave.....	73
CONCLUSIONES.....	79
REFERENCIAS.....	80
CAPÍTULO 5.....	91
INDICADORES E ÍNDICES DE CALIDAD DEL SUELO EN PLANTACIONES DE AGAVE ANGUSTIFOLIA HAW.....	91
INTRODUCCIÓN.....	91
MATERIALES Y MÉTODOS.....	94
Muestreo del suelo.....	97
Análisis del suelo.....	97
Análisis estadísticos.....	97
Selección de indicadores de calidad del suelo.....	97
Obtención de índices de calidad del suelo.....	100
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	108
Selección de las propiedades del suelo como indicadores de calidad.....	108
Integración de los indicadores seleccionados en índices de calidad del suelo.....	113
CONCLUSIONES.....	129
REFERENCIAS.....	131
CAPÍTULO 6.....	140
CONCLUSIONES GENERALES.....	140
CAPÍTULO 7.....	142

PERSPECTIVAS	142
ANEXOS	145
Anexo 1. Fotografías del área de estudio.....	146
Anexo 2. Productos del proyecto de investigación.....	148

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Indicadores potenciales para evaluar la calidad del suelo a diferentes escalas (tomado de Seybold et al., 1997).	27
Cuadro 2. Indicadores utilizados para evaluar la calidad del suelo en condiciones de un manejo racional (Astier-Calderón et al., 2002).	28
Cuadro 3. Fertilización sugerida para <i>Agave angustifolia</i> en el sur de Sinaloa (Campo Experimental Sur de Sinaloa, 2004).	54
Cuadro 4. Composición química de las fibras de agave.	55
Cuadro 5. Características físicas y químicas de las vinazas de <i>Agave tequilana</i> (Gobeille et al., 2006).	56
Cuadro 6. Ubicación geográfica y características topográficas generales de los sitios muestreados.	59
Cuadro 7. Propiedades físicas (media y error estándar) de suelos cultivados con <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	65
Cuadro 8. Propiedades químicas y biológicas (media y error estándar) a 0-20 cm de profundidad en suelos cultivados con <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	68
Cuadro 9. Propiedades químicas y biológicas (media y error estándar) a 21-40 cm de profundidad en suelos cultivados con <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	69
Cuadro 10. Propiedades del suelo (media y error estándar) que cambiaron significativamente con la edad de las plantas de agave.	74
Cuadro 11. Indicadores para evaluar cada una de las funciones del suelo (Masto et al., 2007).	101
Cuadro 12. Resultados del análisis de componentes principales a partir de 10 variables físicas, químicas y biológicas del suelo, muestreadas a 0-20 cm de profundidad en parcelas con selva baja caducifolia y en plantaciones de <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	108
Cuadro 13. Valores medios y porcentajes relativos de los indicadores empleados para obtener un índice de calidad en suelos bajo tres condiciones topográficas cultivados con <i>Agave angustifolia</i> Haw. manejados con tres sistemas de labranza en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México, cuando se utiliza un sistema de referencia.	113
Cuadro 14. Funciones del suelo y sus indicadores asociados utilizadas para proponer un índice de calidad del suelo en plantaciones de <i>Agave angustifolia</i> Haw.	116
Cuadro 15. Valor óptimo, límite superior e inferior de los indicadores de calidad del suelo seleccionados en plantaciones de <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	119
Cuadro 16. Remoción de nutrimentos del suelo por las hojas de <i>Agave sisalana</i> en el tercer ciclo de cultivo (tomado de Hartemink y Van Kekem, 1994).	122

Cuadro 17. Nutrientes disponibles para las plantas de <i>Agave angustifolia</i> en los suelos de los tres sitios (Tlacolula, San Baltazar, Soledad) al momento del estudio.....	123
Cuadro 18. Indicadores de calidad del suelo seleccionados para cada sitio de estudio y su respectiva calificación asignada con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001).....	125
Cuadro 19. Funciones del suelo y su calificación respectiva integradas en un índice de calidad del suelo con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001), Karlen et al. (2003) y Masto et al. (2007) para tres sitios y su sistema de labranza asociado en plantaciones de <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.....	126

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama conceptual de la función de la calidad del suelo para lograr una agricultura sustentable (tomado de Parr et al., 1992).....	18
Figura 2. Concepto básico de una gráfica de control Shewahart utilizada para observar continuamente la calidad del suelo. LCA, límite de control más alto; LCB, límite de control más bajo (Larson y Pierce, 1994).....	22
Figura 3. Ubicación de los sitios de estudio en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.	58
Figura 4. Representación esquemática de las principales fases involucradas en la determinación del carbono de la biomasa microbiana del suelo.	63
Figura 5. Resistencia a la penetración del suelo \pm dms (diferencia mínima significativa) y contenido de humedad en suelos cultivados con <i>Agave angustifolia</i> Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México. h= contenido de humedad del suelo.	66
Figura 6. Ejemplos de las calificaciones indicador-función del suelo. Se muestran tres situaciones: a) cuando un valor bajo del indicador es mejor; b) cuando un nivel alto del indicador es mejor; c) nivel óptimo del indicador (Tomado de Seybold et al., 1997).....	104
Figura 7. Modelo conceptual para integrar un conjunto mínimo de indicadores en un valor de índice de calidad del suelo (Andrews, 1998 citado por Karlen et al., 2003).	105
Figura 8. Diagrama de los componentes principales 1 y 2. El valor entre paréntesis indica la clase de edad de las plantas de agave: clase 1 (1.5-3.5 años), clase 2 (3.6-5.5 años) y clase 3 (5.6-7.5 años). LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica; SBC, selva baja caducifolia.....	109
Figura 9. Calificación asignada a la relación indicador-función del suelo con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001), Andrews et al. (2002) y Karlen et al. (2003).	118

Abreviaturas

Abreviatura	Definición
ACP	análisis de componentes principales
AEA	agregados estables en agua
CBM	carbono de la biomasa microbiana
CO	carbono orgánico
CP	componente principal
CPs	componentes principales
DA	densidad aparente
DMS	diferencia mínima significativa
h	contenido de humedad del suelo
LCA	límite de control más alto
LCB	límite de control más bajo
LM	labranza mínima
MO	materia orgánica
NBM	nitrógeno de la biomasa microbiana
ND	no disponible
RP	resistencia a la penetración del suelo
SBC	selva baja caducifolia
TA	tracción animal
TM	tracción mecánica

Capítulo 1

Introducción general

Entre los elementos estratégicos para alcanzar la sustentabilidad de los agroecosistemas, un denominador común es el mejoramiento y conservación de la fertilidad y productividad del suelo (Hansen, 1996). Para este fin, administradores de recursos, investigadores, científicos y quienes toman decisiones requieren indicadores que proporcionen información sobre el curso que seguirá la evolución de las propiedades del suelo, cuando sea sometido a diferentes condiciones de manejo. Estos indicadores edáficos frecuentemente están poco integrados, ya que evalúan los procesos edafológicos de manera aislada. El concepto calidad del suelo ayuda a resolver este problema, porque integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo en una situación determinada (Astier-Calderón et al., 2002). Una forma de evaluar el efecto de las prácticas de manejo es mediante la determinación de los indicadores de calidad del suelo. Las propiedades del suelo seleccionadas como indicadores de calidad deben cumplir los siguientes requisitos: (i) ser sensibles al mayor número posible de agentes de degradación; (ii) ser consistentes en la dirección del cambio experimentado como respuesta a un contaminante determinado; y (iii) poseer habilidad para reflejar los diferentes niveles de degradación (Elliott, 1994). Si el manejo mejora la calidad del suelo entonces se asegura la sustentabilidad del recurso; en caso contrario, el productor y el

investigador cuentan con un criterio, que en forma conjunta con otros de tipo económico y social, puede ayudar a proponer un mejor manejo.

En la región del mezcal del estado de Oaxaca (México), una extensa área de la vegetación original compuesta por selva baja caducifolia (SBC), fue talada y quemada, y el suelo aclareado para producir el cultivo de *A. angustifolia* Haw. Actualmente el manejo incluye tres condiciones topográficas asociadas con diferentes sistemas de labranza: (a) producción en valle dominada por tracción mecánica (TM); (b) producción en lomerío con tracción animal (TA) y (c) producción en montaña con elevadas pendientes dominada por labranza mínima (LM). La condición de pobreza de los suelos donde se cultiva agave se ve agravada por la rápida pérdida de suelo y nutrientes debido a la erosión hídrica ocasionada por las formas de siembra inadecuadas en terrenos de pendiente pronunciada (Chagoya-Méndez, 2004). Aunque los registros son muy escasos, se acepta que en un principio todos los agaves crecían de manera silvestre, fue a finales del siglo XIX y principios del XX cuando se inició el proceso de selección y cultivo de agaves mezcaleros, lo que trajo como resultado el abandono de otras especies de agave para especializarse en *A. angustifolia* (Sánchez-López, 2005). De acuerdo con los agricultores entrevistados, los sitios de estudio se han usado para el cultivo del agave por un tiempo aproximado de 20-30 años. Aunque *A. angustifolia* se puede desarrollar en suelos someros y poco fértiles, este sistema puede disminuir los reservorios naturales de nutrientes del suelo. Si esos nutrientes extraídos no son repuestos de manera natural o artificial, la fertilidad y la calidad física, química y biológica del suelo se degradan. La respuesta de los científicos y tecnólogos a los

problemas relacionados con la degradación del suelo ha sido proponer sistemas de agricultura sustentable. Sin embargo, en la actualidad no existen indicadores químicos, físicos y biológicos de la calidad del suelo universalmente aceptados para definir cuantitativamente la sustentabilidad de las prácticas de manejo. El objetivo general de este estudio fue generar información para el mejor entendimiento de los sistemas agrícolas cultivados con *A. angustifolia* en el distrito de Tlacolula, Oaxaca. Con ello se buscó contribuir a generar opciones para su manejo sustentable mediante la descripción de la fertilidad del suelo, la selección de un conjunto mínimo de indicadores y su integración en índices prácticos que permitan conocer cuál es el estado actual de la calidad del suelo y el impacto de las prácticas de manejo empleadas. La hipótesis planteada fue que el cambio de uso del suelo de selva baja caducifolia a plantaciones de *A. angustifolia* y el cultivo de esta especie por un periodo aproximado de 20-30 años así como la elevada pendiente de la zona de estudio han conducido a la degradación de la fertilidad y la calidad del suelo. En el Capítulo 2 se plantea la problemática relacionada con los suelos de la región del mezcal. El Capítulo 3 hace referencia a los conceptos sobre calidad del suelo, sus indicadores e índices. El Capítulo 4 trata sobre las propiedades de la fertilidad del suelo encontradas en los suelos del distrito de Tlacolula. En el Capítulo 5 se muestran los indicadores de calidad del suelo seleccionados, los cuales se integraron en índices de calidad de suelo, que permitieron evaluar la calidad de este recurso en las plantaciones de *A. angustifolia* estudiadas. En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones generales y, finalmente, en el Capítulo 7 se comentan las perspectivas del trabajo.

En los anexos se incluyen las fotografías de cada uno de los sistemas de manejo así como los productos del proyecto de investigación.

Referencias

- Astier-Calderón, M., Mass-Moreno, M., Etchevers-Barra, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36, 605-620.
- Chagoya-Méndez, V.M., 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación SAGARPA-Delegación Oaxaca. Oaxaca, México.
- Elliot, E.T., 1994. The potential use of soil biotic activity as an indicator of productivity. In: Pankhursts, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (eds.), *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, Wallingford, pp. 1-28.
- Hansen, J.W., 1996. Is Agricultural Sustainability a Useful Concept? *Agricultural Systems* 50, 117-143.
- Sánchez-López, A., 2005. Oaxaca Tierra de Maguey y Mezcal. 2nd ed. Impreso en la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax., México. pp. 91-108.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

La sobreexplotación del suelo durante muchas décadas ha propiciado la disminución de los sistemas de producción agrícola intensiva (Manna et al., 2005) y ha generado el temor de que la calidad del suelo pudiera haber cambiado negativamente y que este cambio sea irreversible (Anderson, 2003). El diagnóstico de la calidad del suelo y sus cambios en función del tiempo se han empezado a considerar parte de los procedimientos para lograr una agricultura sustentable (Karlen et al., 1997). Por lo tanto, es importante identificar las características del suelo responsables de los cambios en su calidad.

La región del mezcal en el estado de Oaxaca (México) incluye 7 distritos: Tlacolula, Zimatlán, Ejutla, Ocotlán, Yautepec, Miahuatlán y Sola de Vega. En esta región se cultivan alrededor de 15,000 ha con *A. angustifolia* Haw. (Chagoya-Méndez, 2004). En el distrito de Tlacolula las plantaciones de este agave generalmente se desarrollan en condiciones de lomerío y montaña. Se caracterizan por crecer en suelos de baja fertilidad, mínimo espesor, pendientes pronunciadas y pedregosidad, lo que contribuye al empobrecimiento y erosión del suelo. De 13,231 productores de agave solamente 52% aplica algún tipo de fertilizante, la dosificación y frecuencia de aplicación se elijen y ejecutan principalmente en función de las posibilidades económicas del productor, y en segundo término, de las recomendaciones técnicas derivadas de un análisis de suelo o de resultados

experimentales (Chagoya-Méndez, 2004). Es necesario conocer si los actuales sistemas de cultivo se ubican en una dirección de conservación de la calidad del suelo o si ponen en peligro su capacidad productiva, pero para los suelos de la región del mezcal no se tiene conocimiento de estudios científicamente válidos que permitan cumplir con los propósitos anteriores. Es por ello que en la presente investigación se buscó explorar la condición integral del suelo en los tres principales sistemas de manejo del agave, incluyendo además la edad de las plantas como factor de variación. De esta forma, el trabajo podrá servir de referencia para otros realizados en las demás regiones productoras de agave mezcalero o bien, para estudios que profundicen en los efectos del manejo del suelo sobre las propiedades y calidad del mismo, en una o más regiones.

Referencias

- Anderson, T.H., 2003. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* 98, 285-293.
- Chagoya-Méndez, V.M., 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación SAGARPA-Delegación Oaxaca. Oaxaca, México.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Manna, M.C., Swarup, A., Wanjari, R.H., Ravankar, H.N., Mishra, B., Saha, M.N., Singh, Y.V., Sahi, D.K., Sarap, P.A., 2005. Long-term effect of fertilizer and

manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. *Field Crops Res.* 93, 264-280.

Capítulo 3

Conceptos sobre calidad del suelo, sus indicadores e índices

La calidad del suelo

La calidad del suelo se ha percibido de muchas maneras desde que este concepto se popularizó a finales del siglo XX. Larson y Pierce (1991) postularon que la calidad del suelo podía ser vista de dos maneras: (1) como propiedades inherentes de éste; y (2) como procesos dinámicos del suelo determinados por el clima, el uso y la actividad antropogénica. Las propiedades inherentes del suelo son el resultado de sus factores de formación (clima, material parental, tiempo, relieve y biota). En cambio, los procesos dinámicos del suelo, reflejarían por ejemplo: la pérdida de arcilla y otras partículas de tamaño fino, materia orgánica (MO), nutrientes y otras propiedades benéficas, como consecuencia de las prácticas de manejo inadecuadas (Doran et al., 1996).

Actualmente, los científicos utilizan el concepto calidad de suelo para referirse a la capacidad de éste para ejercer sus funciones: 1) sostener la productividad biológica y la diversidad, 2) mantener la calidad ambiental y 3) promover la salud vegetal y animal (Harris et al., 1996), es decir, valorar todos los aspectos del suelo como proveedor de bienes y servicios para los humanos y el ecosistema. Esta capacidad para proporcionar ciertos servicios a las plantas, animales y al ambiente, depende de que tan adecuadamente el suelo cumpla sus funciones.

Gregorich et al. (1994) resaltaron que la calidad del suelo es una medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico. Arshad y Coen (1992) le dieron una connotación más ecológica a este concepto; la definieron como su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, manteniendo un ambiente sano. Como se puede apreciar, las definiciones más recientes de calidad del suelo se basan en la multifuncionalidad de este recurso y no sólo en un uso específico. Dado lo reciente del tema, es lógico pensar que este concepto continuará evolucionando (Singer y Ewing, 2000).

Gran parte de las definiciones señaladas fueron sintetizadas por el Comité para la Salud del Suelo de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (Soil Science Society of America) (Karlen et al., 1997) de la siguiente manera: la calidad del suelo es su capacidad para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o transformado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y su hábitat.

Indicadores de calidad del suelo

Los indicadores son, en general, descriptores que representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Dumanski et al., 1998). Según Adriaanse (1993) son referencia de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Tales indicadores

se aplican a muchos campos del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc). Los indicadores de calidad del suelo que hoy se manejan, tienen su fundamento en varios aspectos: un marco conceptual adecuado para este propósito, el entendimiento del sistema suelo, en los cambios que éste ha experimentado, y en sus relaciones con otros sistemas (vegetales, clima, poblaciones, etc). Los indicadores de calidad del suelo son propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que reflejan los cambios que ocurren en él (Soil Quality Institute, 1996). Sin embargo, no hay un completo acuerdo sobre cuáles deberían ser éstos. Para Dumanski et al. (1998) por ejemplo, dichos indicadores no podrían ser un grupo seleccionado *ad hoc* para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos. Esto es, con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional e internacional. En contraste, Bautista-Cruz et al. (2004) expresaron que los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo, en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan, como lo han sugerido Astier-Calderón et al. (2002). Seleccionar un solo grupo de indicadores sería difícil, ya que cada circunstancia ecosistémica o agroecosistémica responde a condiciones muy particulares. Así, por ejemplo, al análisis concurren diferentes tipos de suelos, de problemas ambientales, de sistemas de manejo, de escalas de tiempo y espacio, y de enfoques de investigación (científico, productivo, conservacionista, ecologista, político, etc.) (Astier-Calderón et al., 2002). Por su parte, Hünemeyer et al. (1997) establecieron que los indicadores deberían permitir: (a) analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sustentable; (b) analizar los posibles impactos antes de una

intervención; (c) monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y (d) ayudar a determinar si el uso del recurso es sustentable.

La ventaja de contar con indicadores bien seleccionados, es que éstos tienen la capacidad de describir los aspectos más importantes de la sustentabilidad con respecto de una decisión o conjunto de decisiones, tanto de manera desagregada como cuando se agregan en un índice. Al parecer lo ideal es disponer de un conjunto de indicadores definidos de acuerdo al tipo de función del suelo que se trate de evaluar y del nivel jerárquico en que tales funciones se ubiquen. Así, habría indicadores de calidad del suelo que se aplicarían a escala global, nacional, regional y de sitio, de acuerdo con la función principal que se evalúa.

La sustentabilidad del suelo debe guiar la selección de los indicadores de calidad de suelo, en el contexto de la agricultura sustentable. Pero, en el concepto de sustentabilidad hay tres elementos o dimensiones implícitos: la dimensión económica, la social y la ecológica (Goodland y Daly, 1996; Hünne Meyer et al., 1997). La sustentabilidad ecológica se refiere a las características fundamentales para la supervivencia que deben mantener los ecosistemas naturales o transformados a través del tiempo en cuanto a componentes e interacciones. La sustentabilidad económica implica la producción a una rentabilidad razonable y estable a través del tiempo, lo cual haga atractivo continuar con dicho manejo. Y, la sustentabilidad social es un concepto que aspira a que la forma de manejo del recurso permita a la organización social un grado aceptable de satisfacción de sus necesidades. El manejo sustentable puede, por lo tanto, significar distintas cosas

según la función principal del recurso o del momento histórico en que se hace una evaluación. El desarrollo agrícola sustentable abarca las tres vertientes.

Condiciones que deben cumplir los indicadores de calidad del suelo

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de calidad deben cubrir las siguientes condiciones (Doran y Parkin, 1994):

- describir procesos que ocurren en el ecosistema
- integrar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo
- reflejar los atributos de sustentabilidad que se quieren medir
- ser sensibles a variaciones de clima y manejo
- ser accesibles a muchos usuarios y aplicables a condiciones de campo
- su medición debe ser reproducible y fácil de interpretar
- ser sensibles para detectar cambios en el suelo como resultado de la degradación causada por el hombre y de los sistemas de manejo
- de ser posible, ser componentes de una base de datos del suelo ya existente
- ser evaluados a través de métodos cuantitativos y/o cualitativos

Las propiedades del suelo que son cuantificables y afectadas de manera primaria por los procesos de degradación son: profundidad, capacidad de retención de agua, densidad aparente, conductividad hidráulica, disponibilidad de nutrientes, MO, pH y conductividad eléctrica. El alcance y grado de los cambios en estos parámetros de

calidad del suelo depende de factores agroclimáticos, hidrogeológicos, sistemas de manejo, prácticas de cultivo y culturales, y varios de ellos están intrínsecamente interrelacionados o son afectados por otras variables, por lo que su designación como variables indicadoras de calidad no siempre es sencilla y dependen del origen y evolución del suelo. Por ejemplo, el contenido de MO en un Andosol no es comparable con el contenido en un Vertisol. Otro ejemplo son los suelos con alto contenido de caolinita, nunca podrán tener igual capacidad de intercambio catiónico que uno que contenga vermiculita o esmectita. Por lo que la composición mineralógica también es un factor determinante de las propiedades del suelo, pero la mineralogía difícilmente se podría incluir como un análisis de rutina del suelo, en comparación con la determinación de MO, por ejemplo.

Selección de los indicadores de calidad del suelo

Utilizar todas las propiedades del suelo como indicadores sería imposible, por lo cual, para un tipo específico de suelo, se debe hacer una identificación y selección de un mínimo de aquellas que puedan proveer información acerca del funcionamiento de este recurso. Pero, la evaluación de la calidad de un suelo tendría poco o ningún valor si los indicadores no son seleccionados rigurosamente (Nortcliff, 2002).

Según el Instituto de la Calidad del Suelo de los Estados Unidos (Soil Quality Institute, 1996) la selección de indicadores se debe basar en:

- el uso del suelo

- la relación entre un indicador y la función del suelo a evaluar
- la facilidad y confiabilidad de la medición
- la variación entre el tiempo y el área de muestreo
- la compatibilidad con la rutina de muestreo
- la habilidad requerida para su uso e interpretación

Indicadores químicos

Los indicadores químicos son características que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y los microorganismos (Soil Quality Institute, 1996). Larson y Pierce (1991), Doran y Parkin (1994) y Karlen et al. (1997) recomendaron determinar la disponibilidad de nutrientes, C orgánico total, C orgánico lábil, pH, conductividad eléctrica, capacidad de adsorción de fosfatos, capacidad de intercambio de cationes, cambios en la MO, N total y N mineralizable. Estos indicadores serían más apropiados cuando la función principal del suelo fuese la producción agrícola o la forestal, pero para otras funciones como la de soportar la construcción de casas, carreteras o aeropuertos o la de servir como un sistema natural de purificación, habría otro grupo de características que podría ser más adecuado.

Indicadores físicos

Las características físicas del suelo son necesarias en la evaluación de la calidad de este recurso, porque no se pueden mejorar fácilmente (Singer y Ewing, 2000). Estas propiedades están relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros: estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento de agua, conductividad hidráulica saturada (Larson y Pierce, 1991; Arshad y Coen, 1992; Karlen et al., 1997). Su importancia radica en que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua dentro del perfil y hacia a las plantas o a los sistemas naturales de almacenaje, las limitaciones que impone para el crecimiento de las raíces y la emergencia de las plántulas.

Indicadores biológicos

Los indicadores biológicos de la calidad del suelo tienen la virtud de integrar gran cantidad de factores que afectan su calidad. Estos abarcan la abundancia de micro y macroorganismos, incluidos bacterias, hongos, nemátodos, lombrices, anélidos y artrópodos así como los subproductos derivados de su actividad (Soil Quality Institute, 1996; Karlen et al., 1997; Salomon et al., 2000). Incluyen funciones como la tasa de respiración (para detectar actividad microbiana de descomposición de la MO del suelo), abundancia de ergosterol y otros subproductos de los hongos; tasas de descomposición de los residuos vegetales, N y C de la biomasa microbiana (Soil

Quality Institute, 1996; Karlen et al., 1997). La razón de haber seleccionado estas variables es porque la biomasa microbiana es mucho más sensible al cambio que el C total (Sparling, 1997).

En general, los parámetros físicos y físico-químicos son poco empleados, porque solamente se ven afectados cuando el suelo experimenta un cambio realmente drástico (Filip, 2002). Por el contrario, los parámetros biológicos y bioquímicos son sensibles a ligeras modificaciones que el suelo puede sufrir en presencia de cualquier agente de degradación (Nannipieri et al., 1990). Por lo tanto, siempre que la sustentabilidad de las funciones del suelo y sus diferentes usos tengan que ser evaluadas, los indicadores deben incluir parámetros biológicos y bioquímicos (Gil-Sotres et al., 2005). Si se considera el amplio número de propiedades biológicas y bioquímicas involucradas en el funcionamiento del suelo, se deben contemplar diferentes niveles de estudio, los cuáles exigen emplear grupos específicos de propiedades (Visser y Parkinson, 1992). Un nivel es el de la comunidad biótica, el cual implica el uso de propiedades relacionadas con la estructura de la población microbiana. Un segundo nivel involucra estudios de población, el cual considera la dinámica de organismos específicos o comunidades de organismos (indicadores biológicos). Un tercer nivel, es el ecosistémico, el cual incluye propiedades relacionadas con los ciclos biogeoquímicos (C, N, P y S), especialmente aquéllas ligadas a la transformación de la MO en el suelo; es decir, propiedades relacionadas con el tamaño, diversidad y actividad de la biomasa microbiana, así como la actividad de las enzimas hidrolíticas del suelo (Gil-Sotres et al., 2005). Actualmente, la estructura de las poblaciones microbianas se determina con técnicas moleculares,

entre las que se incluyen, perfil de ácidos grasos y caracterización del ácido desoxirribonucleico (Nannipieri et al., 2002).

Indicadores de calidad y agricultura sustentable

De acuerdo con Parr et al. (1992) y Schjonning et al. (2004) la agricultura sustentable es un sistema integrado de prácticas de producción animal y vegetal, que tiene aplicación en un sitio específico y que a largo plazo:

- Satisface las necesidades humanas de alimento y fibras
- Mejora la calidad del ambiente y los recursos naturales básicos
- Hace uso eficiente de recursos no renovables
- Usa ciclos y controles biológicos naturales
- Mejora la viabilidad económica de la unidad productiva
- Mejora la calidad de vida del agricultor y la sociedad

Con esta base se puede indicar que la calidad del suelo es el eje central o la clave para pasar de la agricultura más o menos racional a una agricultura sustentable, como se establece en la Fig. 1.

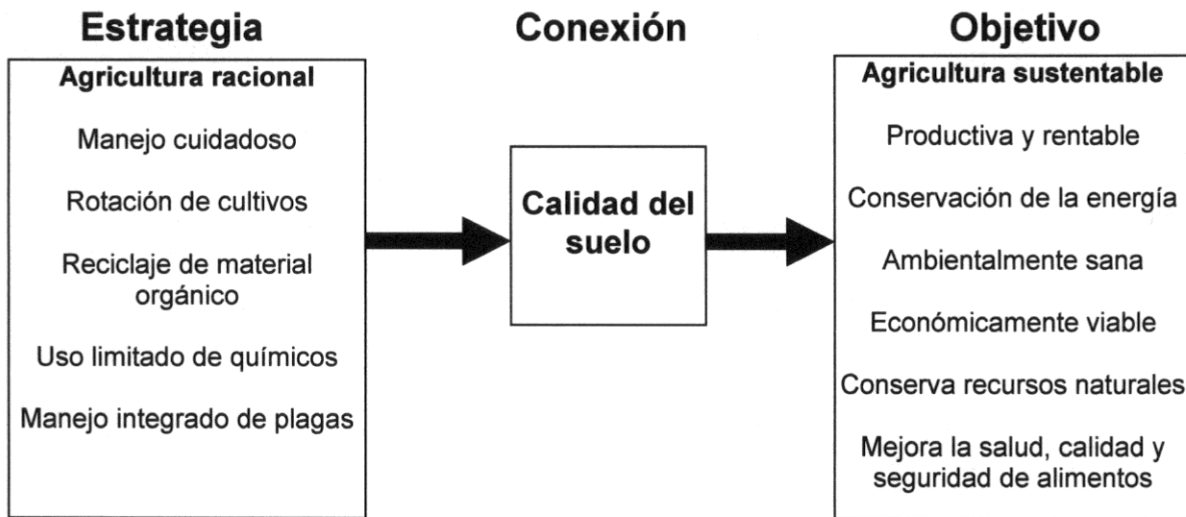


Figura 1. Diagrama conceptual de la función de la calidad del suelo para lograr una agricultura sustentable (tomado de Parr et al., 1992).

Mantener y mejorar la calidad del suelo en sistemas cultivados de manera continua es vital para mantener la productividad agrícola y la calidad ambiental para las futuras generaciones (Reeves, 1997). El CO es la propiedad del suelo que con mayor frecuencia se elige como el indicador más importante de la calidad del suelo y la sustentabilidad agrícola, por su influencia sobre otros indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo. La respiración y el almacenamiento de nutrientes, así como la tasa de retorno de la MO al suelo son indicadores de calidad que dependen esencialmente del CO (Reeves, 1997). Otros indicadores de calidad del suelo ligados al CO son la tasa de infiltración, la formación y estabilidad de agregados, la densidad aparente, la capacidad de intercambio catiónico, la actividad enzimática y la presencia de invertebrados. Los estudios agrícolas a largo plazo han mostrado que el cultivo continuo origina una disminución del CO del suelo,

aunque la tasa y magnitud de esta disminución depende del sistema de cultivo y de labranza, del tipo de clima y suelo. A largo plazo, la labranza de conservación puede mantener o incrementar el CO del suelo cuando se acopla con sistemas intensivos de cultivo (Reeves, 1997).

La sustentabilidad de un sistema agrícola se debería medir apropiadamente a lo largo de milenios (Sandor y Eash, 1991) citados por Reeves (1997), no en años, décadas o siglos (Reeves, 1997). La prueba más convincente de la sustentabilidad de un sistema agrícola es un experimento a largo plazo con resultados positivos (Steiner, 1995).

Evaluación de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad del suelo, o su interpretación, se debería considerar como un proceso a través del cual los recursos edáficos se evalúan con base en las funciones del suelo que surjan como respuesta a un estrés natural o introducido, o de una práctica de manejo. También es importante enfatizar que las evaluaciones de la calidad del suelo deben tener en cuenta propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos. Para la interpretación, las medidas se deben evaluar con respecto a tendencias a largo plazo o a señales de sustentabilidad. Una secuencia general de cómo evaluar la calidad del suelo es: (1) definir las funciones del suelo en cuestión, (2) identificar procesos edáficos específicos asociados a esas funciones, y (3) identificar propiedades del suelo e indicadores que sean suficientemente sensibles

como para detectar cambios en las funciones o procesos del suelo de interés (Carter et al., 1997).

Evaluación cuantitativa de la calidad del suelo

La evaluación cuantitativa de la calidad del suelo requiere identificar primero que todo la función principal que éste realiza, sus variaciones en tiempo y espacio, y sus modificaciones o cambios. Los valores para los indicadores clave se deben establecer teniendo en cuenta que variarán dependiendo del uso y la función específica del suelo, y del ecosistema o paisaje en el cual se haga la evaluación. Por ejemplo, el contenido de MO es frecuentemente considerado como un indicador principal de la calidad del suelo, de modo tal que, niveles de 2% de MO (1.2% de CO) en la capa superficial de Ultisoles del sureste de Estados Unidos hace que se consideren de muy buena calidad. En contraste, Molisoles con el mismo valor aplicado serían considerados como suelos degradados debido a que comúnmente presentan contenidos más altos de MO (Bezdiceck et al., 1996). Janzen et al. (1992) expresaron que la relación entre los indicadores de calidad y las funciones del suelo no siempre presentan una relación simple que incrementa linealmente con la magnitud del indicador, como se piensa comúnmente. Simplemente porque, un valor alto del indicador no necesariamente es mejor.

Se han propuesto varios enfoques para verificar los cambios que ocurren en la calidad del suelo. Respecto a esto, Larson y Pierce (1994) establecieron una evaluación en la que consideran los cambios en la calidad del suelo de un sistema de

manejo como medida de su sustentabilidad. Estos autores usaron un conjunto mínimo de propiedades del suelo para observar continuamente los cambios en la calidad del suelo a través del tiempo, mediante el empleo de gráficas de control. El uso de estas gráficas se ilustra en la Fig. 2. El límite de control más alto (LCA) y más bajo (LCB) está basado en tolerancias conocidas o deseables, o en la varianza media obtenida del funcionamiento pasado del suelo. Cuando un valor medio está fuera de los límites de control, el proceso se considera fuera de control, es decir, que la calidad del suelo está cambiando. Un sistema de manejo sustentable está caracterizado por valores que son estables con el tiempo. Las gráficas de control permiten identificar los cambios en parámetros críticos (indicadores de calidad) y emprender las acciones correctivas para asegurar la sustentabilidad del sistema (Larson y Pierce, 1994). El mejoramiento de la calidad de un suelo se percibe, en general, por incrementos y decrementos en el valor de algunas características. Por ejemplo, se puede incrementar la tasa de infiltración o de aireación, debido a un aumento en la cantidad de macroporos, a un mayor tamaño y estabilidad de los agregados y una mayor cantidad de MO. Pero pudiesen reducirse la densidad aparente, la resistencia a la labranza, el crecimiento radical, la tasa de erosión y la pérdida de nutrimentos (Astier-Calderón et al., 2002). En cuanto a la velocidad de dichos cambios, existen procesos irreversibles, o casi irreversibles, relacionados con las características más estables del suelo, o que cambian lentamente, como son la composición mineral, la distribución de partículas de diferentes tamaños, la formación de los suelos, el desarrollo del perfil, la erosión hídrica o eólica, etc. En contraste, otros cambios son rápidos, la mayoría reversibles, y tienen que ver con las

características inestables de los suelos como la temperatura, el contenido de humedad, la composición del aire del suelo, la concentración de nitratos y fosfatos, etc. (Arnold et al., 1990).

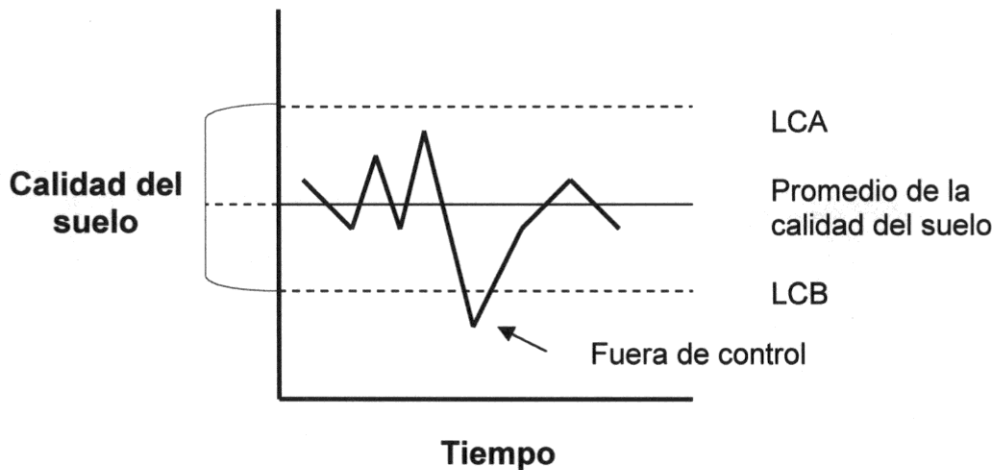


Figura 2. Concepto básico de una gráfica de control Shewhart utilizada para observar continuamente la calidad del suelo. LCA, límite de control más alto; LCB, límite de control más bajo (Larson y Pierce, 1994).

Valores de referencia para evaluar la calidad del suelo

En general, los indicadores se pueden interpretar en dos formas: (1) considerar los valores obtenidos para un suelo prístino como base de comparación y verificar los cambios que ocurren con el tiempo por efecto del uso y manejo, lo que determina si la calidad aumenta o decrece (Bezdicek et al., 1996; Seybold, et al., 1997; Masciandaro y Ceccanti, 1999; Karlen et al., 2001; Saviozzi et al., 2001); o (2)

contrastar los valores de los indicadores obtenidos con valores de referencia que se le han asignado a un suelo que funciona a una capacidad deseada (MacDonald et al., 1995; Kettler et al., 2000; Wick et al., 2000; Sánchez-Marañón et al., 2002). Con estos enfoques, en el primer caso se puede deducir el efecto del manejo sobre la calidad del suelo y su tendencia en el tiempo, en el segundo se puede concluir qué tan próximo está un suelo de la calidad óptima o deseada.

Para los suelos en su estado prístino, los valores de referencia representan la capacidad inherente de un suelo para funcionar, la cual está dada por sus factores y procesos de formación. El uso del suelo cambia sus condiciones prístinas, por lo tanto, se requiere un conjunto diferente de valores de referencia (Seybold et al., 1997). Los suelos con un manejo intensivo pueden estar funcionando a su máxima capacidad, pero a menudo funcionan a un potencial menor de lo que lo harían en su condición prístina. Contrariamente, las actividades humanas de recuperación de suelos pueden incrementar la capacidad máxima de los suelos para funcionar con relación a su condición prístina.

Sin embargo, debido a la falta de un acuerdo sobre la definición de calidad del suelo, actualmente no hay un consenso general respecto a qué suelos se pudieran considerar de máxima calidad (Gil-Sotres et al., 2005). Otra opción para establecer un suelo de máxima calidad es considerar un suelo capaz de mantener una productividad alta y de generar el mínimo impacto ambiental; por ejemplo, los suelos que mantienen una producción sustentable, altos niveles de calidad ambiental sin detrimento de la salud humana y animal (Jackson, 2002).

Idealmente, los valores de referencia se deberían desarrollar para cada serie y tipo de uso del suelo, pero esto sería una tarea monumental. Un enfoque más práctico es desarrollar valores de referencia para un grupo de suelos que funcionen de manera similar o que tengan una génesis similar. Este grupo de suelos puede ser taxonómicamente semejante, de un clima común o provenientes de un material parental afín. Por ejemplo, en Taxonomía de Suelos se podrían agrupar a nivel de familia. El entendimiento de los procesos pedogenéticos de un grupo de suelos similares contribuiría al desarrollo valores de referencia (Seybold et al., 1997). Los valores de referencia también se pueden obtener resumiendo datos de la literatura, reportes de investigación, datos de caracterización a partir del inventario de suelos (en inglés, Soil Survey), conociendo la pedogenesis de un suelo y a partir de funciones de pedotransferencia (Karlen et al., 1994; Seybold et al., 1997).

Variación espacial y temporal de la calidad del suelo

Para evaluar la calidad del suelo se deben considerar tanto las dimensiones en espacio como en tiempo. Ninguna propiedad del suelo es permanente, por lo que su tasa y frecuencia de cambio varía ampliamente. La calidad del suelo se puede evaluar a diferentes niveles: sitio, regional, nacional, e incluso mundial. Los investigadores han utilizado dos enfoques relacionados con la escala espacial para evaluar la calidad del suelo: (1) seleccionar indicadores para comparar la escala geográfica para la cual se realice la evaluación de la calidad del suelo; y (2) ampliar la información del indicador a una escala mayor de observación (cuena, región,

etc.). Hay que tomar en cuenta que la mayoría de la información de la literatura que se usa se ha generado para suelos manejados en grandes extensiones, como ocurre con las granjas agrícolas en Estados Unidos las cuales históricamente tienden a ser de mayor superficie. Sin embargo, las evaluaciones a nivel de granja, de cuenca y de región son menos precisas debido a que se cuenta con pocas mediciones reales y se tiene una mayor dependencia de los modelos de simulación y de las bases de datos existentes para estimar las mediciones. La pérdida de precisión y detalle en las evaluaciones de calidad del suelo es una de las principales desventajas de este enfoque. Aunque la ventaja más importante es el bajo costo de los recursos necesarios para coleccionar los datos (Seybold et al., 1997). A pesar de que se han propuesto conjuntos mínimos de propiedades del suelo (en inglés, MDS, minimum data sets) para su uso como indicadores de calidad del suelo a nivel de sitio (Arshad y Coen, 1992; Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1991, 1994), ninguno se ha evaluado a escala regional (Bredja et al., 2000). Los indicadores obtenidos a una escala pequeña (sitio) proporcionan mayor detalle, pero su costo es más alto y consumen más tiempo para el muestreo y la interpretación. Por lo tanto, es necesario desarrollar métodos que generalicen o relacionen la información puntual con una escala mayor de observación, esto es a nivel de cuenca o región. Para evaluar la calidad del suelo a este nivel se han utilizado métodos geoestadísticos (Seybold et al., 1997). En el Cuadro 1 se presenta una lista de los posibles indicadores para evaluar la calidad del suelo a nivel de sitio, granja, cuenca, región y nación.

No obstante, el nivel de aproximación recomendado para suelos agrícolas en parcelas pequeñas sería obtener indicadores a nivel de sitio, debido a que

proporcionan mayor información y precisión, a pesar de las desventajas ya mencionadas.

El tiempo es importante por su efecto sobre el clima, las condiciones de humedad del suelo, las acciones humanas, la etapa de desarrollo vegetal y otros factores que incrementan la variabilidad temporal del indicador. El intervalo de tiempo apropiado para medir los cambios en un indicador de la calidad del suelo está determinado por el tiempo de respuesta del indicador (Seybold et al., 1997).

Las propiedades biológicas como los indicadores ecológicos, son más dinámicas y, por lo tanto, tienen la ventaja de servir como señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos. Sin embargo, hay indicadores que requieren más de 10 años para exhibir cambios como respuesta a un manejo determinado (Cuadro 2).

Cuadro 1. Indicadores potenciales para evaluar la calidad del suelo a diferentes escalas (tomado de Seybold et al., 1997).

Biológicos	Químicos	Físicos
Indicadores a nivel de sitio, granja y cuenca		
Rendimiento del cultivo	Cambios en la cantidad y calidad de la materia orgánica	Profundidad del suelo superficial
Apariencia del cultivo	Cambios en el pH	Color
Deficiencias nutrimentales	Disponibilidad de P y K	Compactación
Lombrices	Contenido de cationes	Encostramiento
Producción de biomasa	Disponibilidad de N	Infiltración
	Salinidad	Escurrimiento
	Contenido de metales pesados	Estructura
Indicadores a nivel regional o nacional		
Productividad (estabilidad en el rendimiento)	Tendencias de la materia orgánica	Desertificación
Riqueza y diversidad de especies	Acidificación	Cobertura de la vegetación
Biomasa, densidad y abundancia	Salinización	Erosión eólica
Especies clave en el ecosistema	Cambios en la calidad del agua	Erosión hídrica

Cuadro 2. Indicadores utilizados para evaluar la calidad del suelo en condiciones de un manejo racional (Astier-Calderón et al., 2002).

Indicador	Profundidad (cm)	Tipo de tendencia	Tiempo requerido para percibir cambios (años)	Frecuencia de medición
Indicadores físicos				
Textura (%)	0-30	Equilibrio	>10 ³	Cada 2-3 años
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0-7.5	Reducción	<10	Anual
Retención de humedad (%)	0-15	Incremento	<1	Estacional
RP (MPa)	0-50	Disminución	<1	Estacional
Estabilidad de agregados de 1-2 mm de diámetro (%)	0-7.5	Incremento	<2	Estacional
Indicadores químicos				
pH	0-7.5	Neutralidad	>5	Estacional
Conductividad eléctrica (dSm ⁻¹)	0-7.5	Disminución	<2	Estacional
N total (kg ha ⁻¹)	0-30	Incremento	<2	Estacional
P disponible (mg kg ⁻¹)	0-30		<2	Estacional
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	0-30	Incremento	0-10	Anual
Indicadores biológicos				
N mineralizable (kg ha ⁻¹)	0-30	Incremento	<2	Periódicamente
Respiración (kg CO ₂ -C ha ⁻¹ día ⁻¹)	0-15	Variable	<2	Estacional
Lombrices de tierra m ⁻²	0-30	Incremento	<2	Periódicamente

CIC, capacidad de intercambio catiónico; RP, resistencia a la penetración del suelo.

Evaluación cualitativa de la calidad del suelo

También es posible realizar una evaluación cualitativa de la calidad del suelo, que aún cuando se considere subjetiva, se puede hacer más fácilmente, y algunas veces es más informativa para los agricultores (Romig et al., 1995; Seybold et al., 1997).

El encostramiento, el estancamiento de agua, la cobertura y vigor de la vegetación así como otras características pueden revelar posibles cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992).

Aplicación de una evaluación cualitativa de la calidad del suelo. Los productores estadounidenses reconocieron como suelos saludables aquellos que fueran más profundos y oscuros, fáciles de arar, que permitieran las labores de cultivo más temprano en primavera, que absorbieran y retuvieran más agua, que se secaran más pronto, que la descomposición de los residuos de los cultivos ocurriera más rápidamente en el otoño, que tuvieran contenidos más altos de MO y menor erosión, que la densidad de lombrices y su tamaño fuera elevado, que el olor que desprendieran fuera dulce y parecido a aire fresco, que los costos de los combustibles empleados en su laboreo fueran inferiores a otros, que la maquinaria usada se desgastara menos que lo habitual, que los requerimientos de fertilizantes fueran inferiores a la media, que el trabajo con los tractores fuera más fácil, que el rendimiento de los cultivos fuera mayor y los problemas con insectos y enfermedades menores, y las semillas de los cultivos producidos fueran de mejor calidad (Acton y Gregorich, 1995).

Similarmente, algunos indicadores cualitativos empleados por los agricultores de pequeñas parcelas para clasificar sus suelos como de alta o baja calidad en el país de Kenia fueron: rendimiento del cultivo, color, textura, capacidad de retención de agua y respuesta del suelo a la fertilización (Mairura et al., 2008).

En México, en la Sierra Norte de Oaxaca, los productores tradicionales que cultivan maíz en suelos de ladera, señalaron como características deseables de un suelo de calidad el que permitiera diversos cultivos, que fuera fácil de labrar, poroso, que los terrones húmedos se deshicieran con las manos, que retuviera agua, que no se erosionara, que tuviera color oscuro, que requiriera poca fertilización y que los cultivos sembrados presentaran un aspecto vigoroso (Vergara-Sánchez, 2003). Los campesinos de la microcuenca de Atécuaro, Michoacán (México) consideraron como suelos de buena calidad a aquellos que tuvieran un color pardo oscuro, que fueran húmedos, suaves, sueltos y más productivos. Por el contrario, para ellos los suelos de mala calidad son pegajosos, no consumen agua, son duros y difíciles de trabajar (Alcalá de Jesús et al., 2008).

Índices de calidad de suelos

Seleccionar indicadores de calidad de un suelo y medir su valor es de escasa utilidad, si no se desarrollan simultáneamente criterios que permitan su integración e interpretación. Valorar la calidad de un suelo, empleando una sola propiedad no es suficiente ni adecuado, es preferible contar con un sistema para combinar la

información que proporcionan los diferentes indicadores y generar un índice que integre en un solo valor la calidad del suelo y pueda ser fácilmente calculado e interpretado (Halvorson et al., 1996).

En el caso de los índices de calidad del suelo como en cualquier otro índice, se trata de buscar ciertos parámetros que permitan generar un valor que, independientemente de la naturaleza de los elementos empleados en su generación, permitan establecer una idea del estado de la calidad del suelo. Estos valores deben ser integrados de alguna manera, generalmente un algoritmo al que a cada factor se le asigna un coeficiente de ponderación, en función de algún razonamiento teórico o empírico. Estos indicadores deben generar información útil para la toma de decisiones referentes al manejo y las medidas preventivas y/o correctivas que eviten que la calidad del suelo se siga degradando o deteriorando.

Los esfuerzos actuales se han orientado a la generación de índices de calidad del suelo, que consideren cambios que ocurren tanto en propiedades físicas, químicas y biológicas, como en los procesos y características del suelo, en respuesta a la influencia antrópica (cambios de uso del suelo, diferentes prácticas de manejo), o por razones naturales, que son más fáciles de medir.

Generación de índices de calidad de suelos

Doran y Parkin (1994) propusieron un índice de calidad del suelo que se podría usar para proporcionar una evaluación de la función del suelo considerando resultados de: (i) producción sustentable; (ii) calidad ambiental; y (iii) salud animal y humana. Este índice de calidad del suelo considera seis elementos:

$$SQ = f(SQE1, SQE2, SQE3, SQE4, SQE5, SQE6) [1]$$

donde los elementos de la calidad del suelo (SQE_i) son:

SQE1= Producción de alimentos y fibras

SQE2= Erosividad

SQE3= Calidad del agua subterránea

SQE4= Calidad del agua superficial

SQE5= Calidad del aire

SQE6= Calidad de los alimentos

La ventaja de este enfoque es que las funciones del suelo se pueden evaluar con base en criterios específicos de funcionamiento establecidos para cada elemento, en un ecosistema o agroecosistema dado. Por ejemplo, el rendimiento de la producción de cultivos (SQE1); límites de pérdidas por erosión (SQE2); concentración límite de pérdida de compuestos químicos de la zona radical (SQE3); límites nutrimentales,

compuestos químicos y sedimentos arrastrados por superficies adyacentes de sistemas acuáticos (SQE4); tasa de producción y gases que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono o el efecto invernadero (SQE5); composición nutricional y cantidad de residuos químicos en alimentos (SQE6). Esta lista de elementos constitutivos de un índice de calidad está restringida a situaciones agrícolas. Otros elementos, como la calidad del hábitat silvestre, se podrían agregar para ampliar las aplicaciones de este enfoque. Actualmente, se carece de información suficiente para identificar con certeza la relación funcional óptima, utilizada para combinar los diferentes elementos de la calidad del suelo mostrados en la Ecuación 1. Sin embargo, para tal fin se ha propuesto una función multiplicativa simple (Ecuación 2).

$$SQ=(K1 \text{ SQE1})(K2 \text{ SQE2})(K3 \text{ SQE3})(K4 \text{ SQE4})(K5 \text{ SQE5}) (K6 \text{ SQE6}) [2]$$

donde K = coeficiente de peso o ponderación

Los factores de ponderación son asignados a cada elemento de la calidad del suelo por medio del peso relativo de coeficientes determinados, a través de información geográfica, intereses sociales y económicos. Por ejemplo, en una región dada la producción de alimentos puede ser el interés primario, y la calidad del aire ser de importancia secundaria. Si este fuera el caso, SQE1 debería tener una mayor ponderación que SQE5 (Doran y Parkin, 1994).

Estos índices basados en el conjunto mínimo de datos se podrían usar para observar continuamente y predecir los efectos de sistemas agrícolas y prácticas de manejo sobre la calidad del suelo, o podrían proporcionar señales tempranas de degradación (Parr et al., 1992).

Karlen et al. (1994) desarrollaron un índice de calidad con base en cuatro funciones del suelo: (i) regular el flujo de agua, (ii) retener y suministrar agua a las plantas, (iii) resistir la degradación y, (iv) sostener el desarrollo vegetal. Glover et al. (2000) y Diack y Stott (2001) utilizaron un enfoque similar. Harris et al. (1996) obtuvieron un índice de calidad considerando tres funciones del suelo que incluyeron su capacidad para: (i) resistir la erosión, (ii) proporcionar nutrientes a las plantas y, (iii) proporcionar un ambiente favorable para las raíces. Hussain et al. (1999) modificaron este enfoque y ajustaron los límites críticos de cada indicador de acuerdo con las condiciones locales. Andrews et al. (2004) seleccionaron los indicadores de calidad de acuerdo con los objetivos de manejo, asociados a las funciones del suelo y a otros factores específicos del sitio. Estos autores sugirieron seis funciones del suelo: (i) ciclo de nutrientes, (ii) relaciones suelo-agua, (iii) estabilidad física, (iv) capacidad de amortiguamiento, (v) resistencia y resiliencia y, (vi) biodiversidad y hábitat; y tres objetivos de manejo: productividad, reciclamiento del agua y, protección ambiental. Todas estas evaluaciones de calidad se desarrollaron para suelos de clima templado, pero los estudios sobre calidad del suelo en suelos de clima semiárido y de clima tropical, son escasos (Sharma et al., 2005).

Precauciones respecto al uso del concepto de calidad del suelo y sus indicadores

Autores como Brinkman (1997), Food Agriculture Organization of the United Nations (1997) y Sombroek (1997) han expresado varias consideraciones y restricciones para el desarrollo y uso de evaluaciones de la calidad del suelo, que también son aplicables a los indicadores de calidad del suelo. Entre las restricciones mencionadas se encuentran las siguientes:

1) La calidad del suelo no es un valor absoluto, tiene que ser valorada con relación a sus funciones y usos.

2) Indicadores simples, que representan el valor o cambio de una sola propiedad del suelo, podrían carecer de significado a menos que sean entendidas con absoluta claridad; las relaciones entre los factores del sistema como un todo.

Por su parte Sojka y Upchurch (1999) y Sojka et al. (2003) expresaron su reserva, respecto al uso del concepto de calidad del suelo, para valorar las condiciones y la sustentabilidad de los suelos y como guía para la investigación y políticas de conservación, señalando que ha faltado un análisis crítico más profundo de las bases del concepto, pudiendo darse el caso que éste suplante a mediciones e interpretaciones de comprobada eficacia, para evaluar al suelo en sus diversos aspectos. Indican que la indexación (acción de indexar, es decir, registrar ordenadamente datos e informaciones, para elaborar un índice, Real Academia Española, 2008) de propiedades del suelo siempre se ha realizado con fines muy

específicos y concretos, pero que el concepto de calidad del suelo es demasiado general e inespecífico, por lo cual su uso irrestricto implica posibles riesgos.

Singer y Ewing (2000) señalaron que una evaluación útil de la calidad del suelo, requiere de un consenso acerca de porqué la calidad del suelo es importante, cómo se define ésta, cómo se puede medir y cómo responderá con respecto al manejo. Este consenso implica considerar juicios de valor. Los juicios de valor empleados para seleccionar o excluir propiedades del suelo que se puedan usar como indicadores de la calidad del mismo, deben ser elaborados por expertos capaces de apreciar la importancia de tales propiedades en el funcionamiento del sistema, con un enfoque multidisciplinario y balanceando los aspectos sociales, técnicos, económicos y ecológicos implicados de forma objetiva. Si los juicios de valor cambian, es posible llegar a diferentes resultados con respecto a la calidad de un mismo suelo.

Incluso Lackley (1998) señaló que la "calidad" de un sistema agrícola o natural, no es un atributo científico objetivo. Sojka y Upchurch (1999) indicaron que la definición de calidad depende del contexto donde se dé y por lo tanto es subjetiva. Por otra parte, aún no existe una forma homogénea, estándar, aceptada globalmente, de interpretar los valores de calidad del suelo (Hortensius y Welling, 1996; Mausbach y Tugel, 1997).

A pesar de estas restricciones, se debe tener en mente que el concepto de calidad ha ido y seguirá evolucionando gradualmente (Karlen et al., 2001), por lo que la investigación en este aspecto puede contribuir a clarificar su validez y en esta controversia los científicos de la Ciencia del Suelo jugarán un papel insustituible.

Referencias

- Acton, D.F., Gregorich, L.J., 1995. The health of our soils toward sustainable agriculture in Canada. Centre of Land and Biological Resources Research. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont.
- Adriaanse, A., 1993. Environmental Policy Performance Indicators. A study on the Development of Indicators for Environmental Policy in the Netherlands. Sdu Uitgeverij Koninginnergrach. The Netherlands.
- Alcalá de Jesús, M., Alanís-González, N., García-Rangel, R., 2008. Clasificación local de tierras en la microcuenca de Atécuaro, Municipio de Morelia, Michoacán. In: Valencia-Moreno, M., Vega-Granillo, L. (eds.), Libro de Resúmenes. 1er Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del Noroeste de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste. Hermosillo, Sonora, México.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Sci. Soc. Am. J. 68, 1945-1962.
- Arnold, R.W., Szabolcs, I., Targulain, V.O., 1990. Global Soil Change. Report of an IIASA-ISSS-UNEP Task Force on the Role of Soil in Global Change. International Institute for Applied Systems Analysis, Luxemburg, Australia. p. 51.
- Arshad, M.A., Coen, G.M., 1992. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. Am. J. Altern. Agr. 7, 25-31.

- Astier-Calderón, M., Mass-Moreno, M., Etchevers-Barra, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelo en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36, 605-620.
- Bautista-Cruz, A., Etchevers-Barra, J., del Castillo, R.F., Gutiérrez, C., 2004. Calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 2004/2 [En línea] Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/>. Consultado el 21 de marzo del 2008.
- Bezdicsek, F.D., Papendick, R.I., Lal, R., 1996. Introduction: Importance of Soil Quality to Health and Sustainable Land Management. In: *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. Special publication 49.
- Bredja, J.J., Moorman, T.B., Karlen, D.L., Dao, T.H., 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2115-2124.
- Brinkman, R., 1997. Land quality indicators: aspects of land use, land, soil and plant nutrients. In: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development*. Land and Water Bull. 5. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Anderson, D.W., Doran, J.W., Janzen, H.H., Pierce, F.J., 1997. Concepts of soil quality and their significance. In: Gregorich, E.G., Carter, M. (eds.), *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Elsevier Science Publishers; Amsterdam, Netherlands.
- Diack, M., Stott, D.E., 2001. Development of a soil quality index for the Chalmers Silty Clay Loam from the Midwest, USA. In: Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C.

- (eds.), The Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Meeting held on May 24-29 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Doran, J.W., Parkin, B.T., 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Sci. Soc. Am. Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, J.W., Sarrantonio, M., Liebig, M.A., 1996. Soil Health and Sustainability. In: Sparks, D.L. (ed.), Advances in Agronomy. Vol. 56. Academic Press, Inc. pp. 1-54.
- Dumanski, J., Gameda, S., Pieri, C., 1998. Indicators of land quality and sustainable land management. The World Bank, Washington, DC.
- Filip, Z., 2002. International approach to assessing soil quality by ecologically-related biological parameters. Agric. Ecosyst. Environ. 88, 169-174.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations., 1997. Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. Land and Water Bull. 5. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M.C., Seoane, S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. Soil Biol. Biochem. 37: 877-887.
- Glover, J.D., Reganold, J.P., Andrews, P.K., 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchard in Washington state. Agric. Ecosyst. Environ. 80, 29-45.
- Goodland, R., Daly, H., 1996. Environmental sustainability: universal and non-negotiable. Ecol. Appl. 6, 1002-1017.

- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367-386.
- Halvorson, J.J., Smith, J.L., Papendick, R.I., 1996. Integration of multiple soil parameters to evaluate soil quality: a field example. *Biol. Fertil. Soils* 21, 207-214.
- Harris, R.F., Karlen, D.L., Mulla, D.J., 1996. A conceptual framework for assessment and management soil quality and health. In: Doran, J.W., Jones, A.L. (ed), *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special publication No. 49, ASA y SSSA. Madison, WI., USA. pp 61-82.
- Hortensius, D., Welling, R., 1996. International standardization of soil quality measurements. *Soil Sci. Plant Anal.* 27, 387-402.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R., Müller, S., 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Hussain, I., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen, D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Res.* 50, 237-249.
- Jackson, W., 2002. Natural systems agriculture: a truly radical alternative. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 111-117.
- Janzen, H.H., Larney, F.J., Olson, B.M., 1992. Soil quality factors of problem soils in Alberta. In: *Proc. Alberta Soil Science Workshop*, Lethbridge, Alberta, Canada, Universidad de Alberta, Edmonton, pp. 17-28.

- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., 2001. Soil quality: current concepts and applications. In: Sparks, D.L. (ed.), *Advances in Agronomy Vol. 74*. Academic Press. pp. 1-38.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Karlen, D.L., Wollenhaupt, N.C., Erbach, D.C., Berry, E.C., Swan, J.B., Each, N.S., Jordahl, J.L., 1994. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil Tillage Res.* 31, 149-167.
- Kettler, T.A., Lyon, D.J., Doran, J.W., Powers, W.L., Stroup, W.W., 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 339-346.
- Lackley, R.T., 1998. Ecosystem management: paradigms and prattle, people and prizes. *Renewable Resources J.* 16, 8-13.
- Larson, W.E., Pierce, F.J., 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In: *Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2.* IBSRAM Proc. 12(2). Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand.
- Larson, W.E., Pierce, F.J., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdiceck, D.F., Stewart, B.A. (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment. Special Publication No. 35.* Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin. pp. 37-51.

- MacDonald, K.B., Fraser, W.R., Wang, F., Lelyk, G.W., 1995. A geographical framework for assessing soil quality. In: Acton, D.F., Gregorich, L.J. (eds.), *The health of our soils: toward sustainable agriculture in Canada*. CLBRR, RB, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Ont. pp.19-30.
- Mairura, F.S., Mugendi, D.N., Mwanje, J.I., Ramisch, J.J., Mbugua, P.K., Chianu, J.N., 2008. Scientific evaluation of smallholder land use knowledge in Central Kenya. *Land Degrad. Develop.* 19, 77-90.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., 1999. Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. *Soil Tillage Res.* 51, 129-137.
- Mausbach, M.J., Tugel, A., 1997. Soil quality—a multitude of approaches. Keynote address. Kerney Foundation Symposium. *California soil quality: From critical research to sustainable management*. Berkeley, Ca.
- Nannipieri, P., Ceccanti, B., Grego, S., 1990. Ecological significance of biological activity in soil. In: Bollag, J.M., Stotzky, G. (eds.), *Soil Biochemistry* vol. 6. Marcel Dekker, New York. pp. 293-355.
- Nannipieri, P., Kandeler, E., Ruggiero, P., 2002. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: Burns, R.G., Dick, R.P. (eds.), *Enzymes in the Environment*. Marcel Dekker, New York, pp.1-33.
- Nortcliff, S., 2002. Standardization of soil quality attributes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 161-168.

- Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B., Meyer, R.E., 1992. Soil quality: attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Altern. Agric.* 7, 5-11.
- Real Academia Española, 2008. Diccionario de la lengua española. Vigésima segunda edición. [En línea] Disponible en: <http://buscon.rae.es/draeI/>. Consultado el 05 de mayo del 2008.
- Reeves, D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43, 131-167.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., Mc Sweeney, K., 1995. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conservation* 50, 229-236.
- Salomon, D., Trosset, L., Faivre, P., 2000. Studies of micro-arthropoda in anthropized soils in alpin's level (North Alps). In: Rubio, J.L., Asins, S., Andreu, V., de Paz, J.M., Gimeno, E. (eds.), *Europe Soil Conservation. Third International Congress*. [En línea] Disponible en: www.zalf.de/essc/valindex.htm. Consultado el 24 de abril del 2004.
- Sánchez-Marañón, M., Soriano, M., Delgado, G., Delgado, R., 2002. Soil quality in mediterranean mountains environments: effects of land use change. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 66, 948-958.
- Saviozzi, A., Levi-Minzi, R., Cardelli, R., Riffaldi, R., 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant Soil* 233, 251-259.

- Schjonning, P., Elmholt, S., Christensen, B.T., 2004. Soil quality management, synthesis. In: Schjonning, P., Elmholt, S., Christensen, B.T. (eds.), *Managing Soil Quality: Changes in Modern Agriculture*, pp. 315-333.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L., Rogers, H.H., 1997. Quantification of Soil Quality. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Stewart, B.A. (eds.), *Soil Process and the Carbon Cycle*. Press Inc. USA. pp. 387-403.
- Sharma, K.L., Mandal, U.K., Srinivas, K., Vittal, K.P.R., Mandal, B., Grace, J.K., Ramesh, V., 2005. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dry Alfisol. *Soil Tillage Res.* 83, 246-259.
- Singer, M.J., Ewing, S., 2000. Soil Quality. In: Sumner, M.E. (ed.), *Handbook of Soil Science*. Chapter 11. CRC Press, USA.
- Soil Quality Institute., 1996. *Indicators for Soil Quality Evaluation*. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service.
- Sojka, R.E., Upchurch, D.R., 1999. Reservations Regarding the Soil Quality Concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1039-54.
- Sojka, R.E., Upchurch, D.R., Borlaug, N.E., 2003. Quality soil management or soil quality management: performance vs. semantics. In: Sparks, D.L. (ed.), *Advances in Agronomy Vol. 79*. Academic Press. Inc. pp. 2-53.
- Sombroek, W.G., 1997. Land resource evaluation and the role of land-related indicators. In: *Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and*

- rural development. Land and Water Bull. 5. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Sparling, G.P., 1997. Soil Microbial Biomass, Activity and Nutrient Cycling as Indicators of Soil Health. In: Pankhursts, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.S.R. (eds.), Biological Indicators of Soil Health. Cab International. Printed in UK. pp. 97-105.
- Steiner, R.A., 1995. Long-term experiments and their choice for the research study. In: Barnett, V., Payne, R., Steiner, R. (eds.), Agriculture Sustainability Economic, Environmental and Statistical Considerations, John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 15-21.
- Vergara-Sánchez, M.A., 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis de Doctor en Ciencias. IRENAT, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx.
- Visser, S., Parkinson, D., 1992. Soil biological criteria as indicators of soil quality: soil microorganisms. Am. J. Alt. Agric. 7, 33-37.
- Wick, B., Tiessen, H., Menezes, R.S.C., 2000. Land quality changes following the conversion of the natural vegetation into silvo-pastoral systems in semi-arid NE Brazil. Plant Soil 222, 59-70.

Capítulo 4

Fertilidad del suelo en plantaciones de *Agave angustifolia* Haw.

Introducción

La degradación del suelo inducida por el hombre es una causa importante de la disminución en la productividad de muchos suelos (Hartemink y Bridges, 1995). Este tipo de degradación edáfica incluye la erosión eólica e hídrica, la pérdida de estructura, la salinización, la acidificación, la contaminación y la disminución de la fertilidad. La principal causa de la disminución en la fertilidad del suelo es la remoción neta de nutrientes ya sea por los productos cosechados y/o a través del incremento en las pérdidas de suelo en comparación con los ecosistemas naturales. Para evitar que los suelos se deterioren bajo un cultivo permanente es necesaria la restitución al suelo de los nutrientes removidos por la cosecha ya sea naturalmente; mediante el intemperismo y los ciclos biogeoquímicos, o a través del uso de fertilizantes químicos y orgánicos (Hartemink, 1997a). Solamente pocos suelos tendrán la capacidad para recuperarse de manera natural y rápida después de un periodo de cultivo continuo (Greenland y Szabolcs, 1994).

La degradación en la calidad del suelo asociada a la conversión de la vegetación primaria o secundaria a agroecosistemas se debe principalmente a la disminución en el contenido de materia orgánica (MO) (Smith et al., 2000). Las pérdidas rápidas iniciales de MO se deben a la mineralización de los reservorios biológicamente activos en el suelo: biomasa microbiana, MO particulada, carbohidratos, enzimas y C

soluble en agua. La disminución de más de 47 y 24% de la MO particulada y del carbono de la biomasa microbiana (CBM) ocurrió en menos de un año después del aclareo de un bosque secundario en el norte de Guam (Motavalli et al., 2000). Islam y Weil (2000) evaluaron el efecto del cambio de uso del suelo en un bosque tropical de Bangladesh, dominado por *Shorea robusta* y encontraron que la calidad del suelo disminuyó de manera significativa (-44%) cuando cambió el uso del suelo de forestal a agrícola, mientras que en sitios reforestados con *Acacia* o pastizales, la calidad del suelo mejoró entre un 6% y 16%. Estos autores atribuyeron la degradación en la calidad del suelo al rompimiento de los macroagregados, a la disminución de la biomasa microbiana, y a la pérdida de MO lábil debido al fuego, a la deforestación, a la labranza y a la erosión acelerada. Feller y Beare (1997) encontraron una disminución de 60% después de 3-5 años de cultivo continuo en suelos tropicales arenosos. La tasa de pérdida de MO está, entre otros factores, afectada por las estrategias de uso y manejo del suelo (Feller y Beare, 1997). McDonald et al. (2002) reportaron que el aclareo del suelo y el subsecuente cultivo originaron en un periodo mayor a 5 años, una reducción significativa del carbono orgánico (CO), N total, P disponible, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ intercambiables. La falta de la cubierta forestal originó pérdidas de suelo por erosión; y la agricultura incrementó 7 veces el escurrimiento superficial y 21 veces la erosión del suelo. Ellos también encontraron una densidad aparente (DA) significativamente más alta y una capacidad de retención de agua más baja. El método de roza-tumba y quema del suelo asegura un disturbio y degradación mínimos. Okore et al. (2007) encontraron que el suelo aclareado por el método de roza-tumba-quema tuvo una cantidad más alta de MO particulada, CO, N, CBM y

nitrógeno de la biomasa microbiana (NBM) después de cuatro años de cultivo asociado de maíz-mandioca seguido por dos años de descanso con mandioca, en comparación con otros métodos de aclareo del suelo.

Algunos estudios revelaron que el contenido de MO disminuyó en Vertisoles cultivados con cereales por periodos prolongados (> 35 años) (Datal et al., 2003). Weil y Magdoff (2004) argumentaron que la concentración y tasa de disminución del CO del suelo con respecto al tiempo varió considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, profundidad del perfil, precipitación, composición de la vegetación y prácticas de manejo.

En la región del mezcal del estado de Oaxaca (México), una extensa área de la vegetación original compuesta por selva baja caducifolia (SBC), fue talada y quemada, y el suelo aclareado para producir el cultivo de *A. angustifolia* Haw. En el pasado, la roza-tumba-quema era un sistema que podía ser reproducido en largos ciclos debido a que la presión demográfica no era tan fuerte en los territorios del sur y sureste mexicano. Después de la quema venía la siembra de sistemas de producción de autoconsumo que, como se sabe, incluían una fuente de carbohidratos, el maíz; una de proteínas, el frijol; y una gran variedad de plantas herbáceas como la calabaza y los chiles, con lo cual se aseguraba la dieta básica de la población indígena. Aunque los registros son muy escasos, se acepta que en un principio todos los agaves crecían de manera silvestre, fue a finales del siglo XIX y principios del XX cuando se inició el proceso de selección y cultivo de agaves mezcaleros, lo que trajo como resultado el abandono de otras especies de agave para especializarse en *A. angustifolia* (Sánchez-López, 2005). A partir de entonces,

el sistema de roza-tumba-quema se aplicó en los lomeríos y zonas serranas de Oaxaca para el cultivo de *A. angustifolia* (Cervantes-Ramírez, 2002). El sistema aseguraba el aporte de N, P y K en cantidades suficientes para la producción de las plantas anuales antes citadas, durante períodos cortos (3 a 6 meses). Cuando la fertilidad del suelo empezaba a decaer, los productores campesinos abandonaban el sitio para que se repoblara de nuevo con plantas leñosas que incluían árboles y arbustos y se restableciera la fertilidad del suelo a través de los ciclos biogeoquímicos por la microbiota del suelo y los fuertes aportes de MO de las plantas perennes. Mientras tanto, el productor iniciaba otro ciclo en terrenos cubiertos por la vegetación del lugar. En el caso del agave es muy probable que en el pasado se procediera con la intercalación e imbricación de las plantas de agave con la siembra del maíz, como ocurre actualmente. No se sabe si una vez alcanzada la madurez sexual del agave (7 y 10 años, aproximadamente), los productores abandonaban el terreno con la plantación de agave o bien, preferían el repoblamiento con plántulas de agave como se hace hoy en día. Es probable que ocurriera una agricultura itinerante debido a la degradación de la fertilidad y calidad del suelo una vez que se terminaba el ciclo de intercalamiento agave-maíz.

Actualmente, en la región del mezcal del estado de Oaxaca se cultivan 15,000 ha con *A. angustifolia*, una especie coloquialmente llamada “maguey espadín” la cual se usa como materia prima para la elaboración de la bebida alcohólica denominada “mezcal”. En esta actividad están involucrados 131 municipios y 226 comunidades (Chagoya-Méndez, 2004). El manejo incluye tres condiciones topográficas asociadas con diferentes sistemas de labranza: (a) producción en valle dominada por tracción

mecánica (TM); (b) producción en lomerío con tracción animal (TA) y (c) producción en montaña con elevadas pendientes dominada por labranza mínima (LM). La LM y la TA se consideran sistemas tradicionales no mecanizados, y la TM se considera un sistema moderno de labranza. *Agave angustifolia* se puede desarrollar en suelos someros y poco fértiles pero, como ocurre en otras plantaciones permanentes, este sistema puede disminuir los reservorios naturales de nutrientes del suelo, principalmente si no se suministran restituciones externas de nutrientes. Una encuesta local realizada en Oaxaca, orientada para conocer las técnicas de cultivo de *A. angustifolia*, reveló que aproximadamente 52% de 13,231 productores encuestados en la región del mezcal utilizan algún tipo de fertilizante en sus plantaciones. Las dosis de fertilización están de acuerdo con el ingreso económico de los productores, pero no se derivan de un análisis químico de suelo o de resultados experimentales (Chagoya-Méndez, 2004).

Algunos estudios mostraron que la disminución de la producción de *A. sisalana* en el este de África se debió a un manejo poco efectivo de la fertilidad del suelo (Hartemink et al., 1996; Hartemink 1997 a,b). Nobel (1989) encontró que la productividad de *A. tequilana* (Weber variedad azul) se vió limitada por los bajos contenidos de N, P, K y B en el suelo. Recientemente, Gobeille et al. (2006) reportaron que la labranza basada en TM disminuyó los niveles de CO, N y P en plantaciones de *A. tequilana* en la parte central oeste de México.

Aunque alguna información se ha adquirido sobre las propiedades del suelo en plantaciones de agave (ver Hartemink et al., 1996; Hartemink, 1997 a,b; Gobeille et al., 2006), no hay datos básicos para los suelos cultivados con *A. angustifolia*. Este

hecho está determinado por varios factores como la dificultad para acceder a los campos de producción (topografía accidentada y malas condiciones del camino), la dispersión en el parcelamiento del suelo, la escasa disponibilidad de recursos económicos, la carencia de recursos humanos, las pocas universidades y centros de investigación y experimentación con que cuenta el país, aunado a su pobre presupuesto y a la falta de bases de datos y uso de estadísticas. Los objetivos de este estudio fueron: (i) determinar las propiedades de la fertilidad del suelo en plantaciones de *A. angustifolia*, considerando tres condiciones topográficas (valle, lomerío y montaña), y (ii) generar información acerca de los cambios en el suelo asociados con la edad de las plantas de agave. Las hipótesis planteadas fueron: (i) el cultivo de *A. angustifolia* durante un largo periodo en suelos de montaña con elevadas pendientes ha originado una disminución en la fertilidad de estos suelos con relación a los sitios del valle y lomerío, y (ii) algunas propiedades del suelo como el pH, CO, N, P_{Olsen}, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ intercambiables, CBM y resistencia a la penetración disminuyen al incrementar la edad de las plantas de agave.

Requerimientos edafoclimáticos de *Agave angustifolia* Haw.

El agave es una planta que crece y produce en diversos suelos y climas, donde predominan los suelos no aptos para otros cultivos agrícolas (Espinosa-Paz et al., 2005). Sin embargo, la información sobre los requerimientos edafoclimáticos y nutrimentales de los agaves es escasa. Para el caso de *A. angustifolia* la información que se logró encontrar se presenta enseguida.

Suelos

Se pueden identificar cuando menos 5 grupos de suelos en donde *A. angustifolia* se desarrolla bien: Cambisoles, Vertisoles, Regosoles, Litosoles y Rendzinas (Castro-Bravo, 2005; Cadena Agroalimentaria del Agave, 2006). En la región del mezcal del estado de Oaxaca dominan los Regosoles y los Leptosoles (Comisión Nacional de Biodiversidad, 2004).

Fisiografía

Se han encontrado cultivos de *A. angustifolia* en montañas, lomeríos, laderas, valles y planicies en el Estado de Oaxaca (Castro-Bravo, 2005; Cadena Agroalimentaria del Agave, 2006).

Altitud

Agave angustifolia se adapta bien desde los 600 m, aunque se puede desarrollar hasta los 1900 m. Las plantaciones en alturas superiores a las señaladas retrasan su crecimiento y desarrollo. La adaptación a condiciones extremas genera bajo crecimiento y baja concentración de azúcares (Castro-Bravo, 2005).

Clima

Los climas en donde puede crecer y desarrollarse *A. angustifolia* son: semicálido templado, subhúmedo, semidesértico (Castro-Bravo, 2005; Cadena Agroalimentaria del Agave, 2006).

Temperatura

Agave angustifolia tiene un mejor desarrollo cuando la temperatura oscila entre 22 y 30°C, aunque soporta temperaturas desde los 18 hasta los 38 °C (Castro-Bravo, 2005; Cadena Agroalimentaria del Agave, 2006).

Precipitación

El mejor desarrollo del agave ocurre con precipitaciones anuales superiores a 500 mm (Castro-Bravo, 2005; Cadena Agroalimentaria del Agave, 2006).

Los requisitos de agua para el buen desarrollo de las plantas de agave, considerando su hábitat, son de 400 a 800 mm anuales, bien distribuidos en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre (Castro-Bravo, 2005).

Requerimientos nutrimentales

Durante el proceso de desarrollo de la planta de agave, los elementos más importantes son el N, P y K. El N es el responsable de estimular el vigor de la planta al participar en el crecimiento de tejidos nuevos. El P participa en el crecimiento

adecuado de raíces y el establecimiento de plantas jóvenes, y el K es muy importante para la formación de azúcares (Campo Experimental Sur de Sinaloa, 2004).

A falta de recomendaciones precisas para la fertilización del cultivo de *A. angustifolia*, de acuerdo con los tipos de suelo en Sinaloa, las investigaciones y revisiones bibliográficas en otras regiones productoras, sugieren que el agave crece y se desarrolla bien con aplicaciones de N entre 45 a 110 kg ha⁻¹, P entre 28 a 80 kg ha⁻¹ y K entre 65 a 100 kg ha⁻¹, lo que puede variar con el tipo de suelo (arenoso, franco o arcilloso) y la edad de la plantación (uno o cuatro años). En el Cuadro 3 se muestran algunas sugerencias generales (Campo Experimental Sur de Sinaloa, 2004).

Cuadro 3. Fertilización sugerida para *Agave angustifolia* en el sur de Sinaloa (Campo Experimental Sur de Sinaloa, 2004).

Edad de la plantación (años)	Fórmula N-P-K (unidades ha ⁻¹)
1	40-20-25
2	50-15-35
3	75-10-35
4	75-10-35

Composición química de hojas y vinazas de agave

La industria agrícola es una gran fuente de generación de materiales fibrosos (raíces, tallos, hojas u otras partes de las planta), que por lo general son un subproducto de los procesos agrícolas (Balam-Cocom et al., 2006). En el Cuadro 4 se muestra la composición química de las fibras obtenidas de diferentes agaves y en el Cuadro 5 se muestran las características físicas y químicas de las vinazas provenientes de *A. tequilana*.

Cuadro 4. Composición química de las fibras de agave.

Agave	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Referencia
	-----%-----			
<i>A. tequilana</i> (hojas)	64.8	5.1	15.9	Iñiguez-Covarrubias et al. (2001)
<i>A. tequilana</i> (tronco)	64.9	5.5	16.8	" " "
<i>A. fourcroydes</i>	77.6	5.7	13.1	Antonio-Cruz et al. (2002)
<i>A. sisalana</i>	73.1	13.3	11.0	Bledzki y Gassan (1999)

Cuadro 5. Características físicas y químicas de las vinazas de *Agave tequilana* (Gobeille et al., 2006).

Propiedad	Valor
pH	3.35
N total (mg L ⁻¹)	243
Cu (mg L ⁻¹)	0.36
Zn (mg L ⁻¹)	0.39
P total (mg L ⁻¹)	20.6
Sólidos suspendidos (mg L ⁻¹)	3400
K (% peso sólido)	11
Mg (% peso sólido)	0.08
Ca (% peso sólido)	0.21
K (meq L ⁻¹)	2.80
Na (meq L ⁻¹)	5.4

Materiales y Métodos

Descripción de los sitios y técnicas de cultivo

El área de estudio se localiza en Oaxaca, México. El nombre local es región del mezcal, la cual incluye los distritos de Tlacolula, Yautepec, Miahuatlán, Ejutla, Sola de Vega, Ocotlán y Zimatlán (Chagoya-Méndez, 2004). La investigación se enfocó a Tlacolula porque es el distrito con la mayor producción (55%) de *A. angustifolia* (Chagoya-Méndez, 2004). Los sitios se ubican en las localidades de Tlacolula, San Baltazar Guelavila y Soledad Salinas (Fig. 3, Cuadro 6). Las posiciones geográficas se determinaron con un GPS Garming 12XL. De acuerdo con el mapeo de suelos

reportado por la Comisión Nacional de Biodiversidad (2004) y la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (1998) a la escala 1:4,000,000, las principales clases de suelo a 1060-1700 m de altitud son Regosoles y Leptosoles (Fig. 3). El material parental es roca caliza con lutita del Cretácico inferior (Castillo y Castro, 1996). La precipitación media anual es de 726 mm. La temperatura media anual varía entre 28 y 32°C. El clima es templado-semiárido (Comisión Nacional de Biodiversidad, 2004). La vegetación original es SBC (Lorence y García Mendoza, 1989), las especies dominantes son *Acacia* spp., *Bursera* spp., *Ipomea* spp., *Leucaena esculenta* y *Prosopis laevigata*. Una extensa área de la vegetación original se ha talado y quemado, y el suelo aclareado se ha utilizado para el cultivo de *A. angustifolia*. De manera general, de acuerdo con los agricultores entrevistados, el área de estudio se ha usado para el cultivo del agave por más de 100 años. Aunque los productores dueños de los terrenos contemplados en este estudio reportaron tener el siguiente tiempo aproximado cultivando agave en sus parcelas: Tlacolula, 20 años; San Baltazar Guelavila, 30 años; y Soledad Salinas 21 años. No obstante que los suelos han sido cultivados por largo tiempo con este agave, la variable de referencia usada en esta investigación fue el tiempo de uso actual en términos de edad de la planta, sin embargo, se debe tener en cuenta que esta variable es muy relativa y cuando el cultivo sea renovado o cambiado la variable de referencia cambiará.

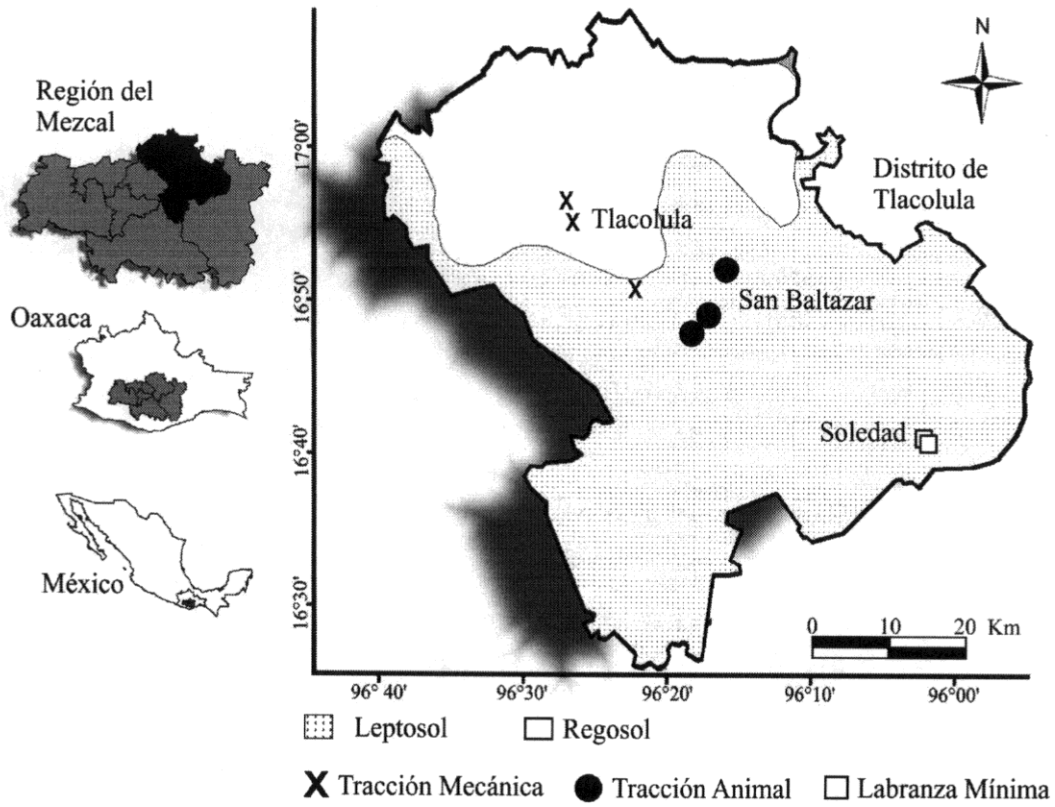


Figura 3. Ubicación de los sitios de estudio en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

Cuadro 6. Ubicación geográfica y características topográficas generales de los sitios muestreados.

	Tlacolula	San Baltazar	Soledad
Muestras de suelo	58	60	39
Sistema de labranza dominante	Tracción mecánica	Tracción animal	Labranza mínima
Pendiente mínima (%)	0.5	4.0	12.0
Pendiente máxima (%)	11.0	65.0	70.0
Profundidad radicular (cm)	18.6±2.3	22.0±2.5	8.2±0.8
Altitud (m)	1636	1545	1085
Posición geográfica	16° 94' N 96° 54' W	16° 80' N 96° 29' W	16° 40' N 96° 01' W
Distancia entre sitios (km)			
Tlacolula	0	20	51
San Baltazar		0	32
Soledad			0

Para el cultivo de *A. angustifolia* se practican tres sistemas de labranza, la selección de cada uno de ellos está condicionado por la topografía (Sánchez-López, 2005). La LM predomina en zonas montañosas con pendientes pronunciadas de 12 a 70%; la TA en lomerío con pendientes de 4 a 65%; y la TM en valles con pendientes de 0.5 a 11% (Anexo 1). En cada uno de los sitios de estudio (Tlacolula, San Baltazar y Soledad), se seleccionaron tres terrenos con plantaciones de *A. angustifolia* con las siguientes clases de edad de las plantas de agave: clase 1 (1.5-3.5 años), clase 2 (3.6-5.5 años) y clase 3 (5.6-7.5 años), con una repetición en cada sitio. Todos los agricultores cooperantes proporcionaron información acerca de la edad de sus agaves.

Agave angustifolia alcanza la madurez sexual entre 7 y 10 años después de plantado. Mientras las plantas de agave alcanzan la madurez, los agricultores en todos los sitios de estudio siembran maíz como cultivo asociado durante los primeros dos o tres años del ciclo de cultivo del agave (clase de edad 1, solamente). Durante la cosecha, las hojas de la planta se cortan y se dejan en el terreno y paulatinamente se pueden incorporar a la parte superficial del suelo. Los periodos de descanso del suelo no se emplean frecuentemente en la producción de *A. angustifolia*. De acuerdo con los agricultores entrevistados, no se han aplicado herbicidas ni fertilizantes a ninguna de las plantaciones de agave muestreadas en este estudio. Sin embargo, los efluentes de las destilerías normalmente se incorporan al suelo en todos los sitios estudiados.

Muestreo del suelo

Las muestras de suelo se tomaron en parcelas representativas de 4,000 m² dentro de cada sitio y clases de edad de la planta, durante la primavera del 2005. Los procedimientos para el muestreo del suelo han sido descritos por Dick et al. (1996), Petersen y Calvin (1996) y Boone et al. (1999). Para el muestreo se seleccionaron cinco puntos, el primero en el centro de la parcela y los otros estuvieron separados 25 m del punto central, siguiendo la dirección de los cuatro puntos cardinales. El suelo se muestreó a las profundidades de 0-20 y 21-40 cm. Las muestras de suelo se transportaron al laboratorio en bolsas de plástico selladas. Las muestras de suelo secadas al aire y tamizadas (< 2 mm) se usaron para el análisis químico y físico del

suelo. Para la determinación del CBM, se tamizaron submuestras de suelo fresco (<4.76 mm) y se almacenaron a 4° C. Las muestras de suelo para el análisis de DA se tomaron a una profundidad de 0-20 cm con un cilindro de acero inoxidable de 50 mm de diámetro (tres repeticiones).

Análisis del suelo

Cada muestra de suelo se analizó individualmente. El fósforo disponible (P_{Olsen}) se extrajo con una solución de NaHCO_3 0.5 M ajustada a pH 8.5. El fósforo extraído se determinó siguiendo el procedimiento modificado de Murphy-Riley (Kuo, 1996). El CO del suelo se determinó (después de la remoción de carbonatos) utilizando el método de oxidación húmeda de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1982). El N disponible (la suma del NO_3^- y NH_4^+ inorgánicos) se extrajo mediante agitación del suelo con una solución de KCl 2 M (1:10 relación suelo:solución) por una hora en un agitador mecánico (Pare et al., 1995). El N disponible en el extracto de suelo se analizó usando el procedimiento de micro-destilación, el NO_3^- se redujo con aleación de Devarda a NH_4^+ (Mulvaney, 1996). El Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ intercambiables se extrajeron con una solución de acetato de amonio 1 M (pH 7.0) (Rowell, 1994). El Ca^{2+} y el Mg^{2+} se cuantificaron por absorción atómica, y el K^+ y el Na^+ por espectrometría de emisión en un Perkin-Elmer modelo 2380. El pH del suelo se midió usando una relación suelo-agua 1:2 y un medidor digital de pH Orion modelo 710 A. La DA se determinó por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). El contenido de agregados estables en agua (AEA) se midió utilizando el método de tamizado en

húmedo modificado por Kemper y Rosenau (1986) y Beare y Bruce (1993). El tamaño de los tamices utilizados fue 0.5, 0.7 y 1 mm. Para medir la resistencia a la penetración del suelo (RP) se usó un penetrómetro Bush SP 1000 operado manualmente. El CBM se estimó por el método de fumigación-incubación descrito por Jenkinson y Powlson (1976). Una muestra de 25 g de suelo a humedad de campo se fumigó con cloroformo libre de etanol durante 24 h. Después de la fumigación, las muestras de suelo se incubaron a 25° C en recipientes de acrílico por 10 días en presencia de NaOH para absorber el CO₂ liberado del suelo (Fig. 4). Al mismo tiempo el suelo no fumigado se incubó bajo las mismas condiciones. La producción de CO₂ se determinó por titulación del NaOH que permaneció en el sistema después de la incubación con HCl. Finalmente, el CBM se calculó como la diferencia entre el C extractable en las muestras fumigadas con cloroformo y en las no fumigadas (Voroney et al., 1993, Horwath y Paul, 1994). Durante los análisis de suelo, 10% de las muestras se duplicaron al azar para controlar la calidad del análisis. Los análisis químicos para el Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y Na⁺ intercambiables se realizaron utilizando curvas de calibración determinadas a partir de estándares preparados de soluciones patrón certificadas. También se analizaron blancos para determinar cualquier efecto matriz.

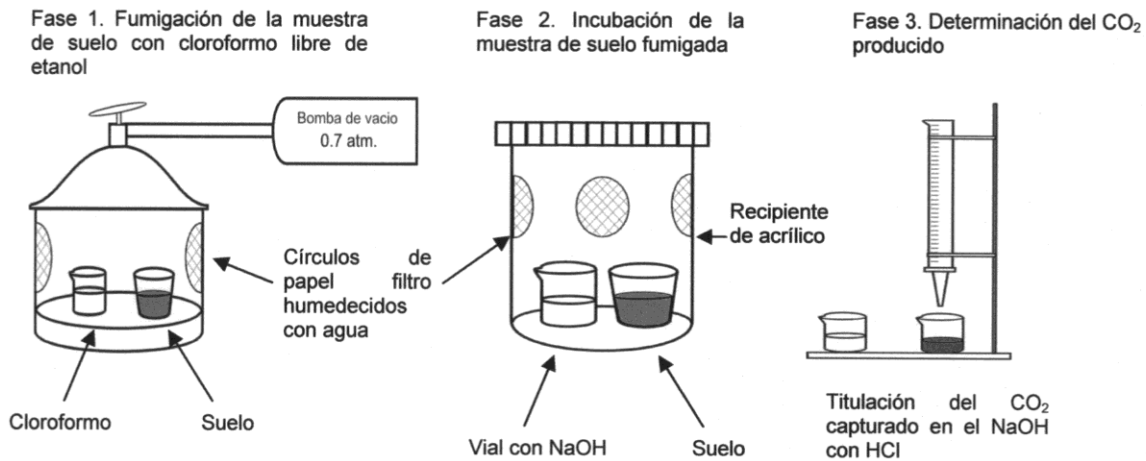


Figura 4. Representación esquemática de las principales fases involucradas en la determinación del carbono de la biomasa microbiana del suelo.

Análisis estadísticos

Se calculó la media, la varianza, el error estándar, el valor mínimo y el valor máximo de las propiedades del suelo en cada uno de los sitios de estudio y profundidades utilizando el software SAS (v. 8.01, SAS Institute, 1990).

El modelo general lineal usado para analizar los cambios en las propiedades del suelo (y) asociados al sitio (a), edad de las plantas de agave (b) y, profundidad del suelo (c) fue: $y = \beta_0 + \beta_1 a + \beta_2 b + \beta_3 c + \varepsilon$, donde β_i es el coeficiente de ponderación del modelo, β_0 es el valor medio general, y ε es el error el cual incluye todas las otras fuentes de variación no incluidas en el modelo, como orientación de la plantación o efectos del microclima. El valor medio de cada variable en los sitios de estudio se

comparó con la prueba de Tukey. Para examinar la relación entre las propiedades del suelo se empleó un análisis de correlación de Pearson.

Resultados y Discusión

Los detalles geográficos y topográficos de los tres sitios se muestran en el Cuadro 6. El número de muestras de suelo fue más bajo en Soledad porque no se pudieron obtener muestras a la profundidad 21-40 cm, ya que a esta profundidad se encontró el material parental. Los campos de agave con la pendiente más baja correspondieron a Tlacolula (valle). En los campos de cultivo de San Baltazar y Soledad se encontraron intervalos muy grandes de pendiente. En Soledad, la zona radicular fue solamente de 8 cm; en contraste, los otros dos sitios tuvieron zonas radiculares cercanas a los 20 cm, lo que indica que *A. angustifolia* se puede desarrollar sobre suelos con capa arable (en los casos de Tlacolula y San Baltazar) o sobre sustratos rocosos (en el caso de Soledad). El control de malezas y otras prácticas agrícolas consumen tiempo e implican riesgos de accidente para los productores de agave cuando las pendientes del terreno son >60%.

La TM, el sistema de labranza dominante en el valle, consiste de un sólo paso de arado de disco, uno o dos pasos de rastra y surcado a una profundidad de 20 a 25 cm. La TA, el sistema de labranza dominante en lomerío, consiste en un paso de yunta y surcado a una profundidad de 15 a 20 cm. La LM, el sistema de labranza dominante en montaña, consiste en la roza-tumba-quema de la cobertura vegetal, posteriormente abertura de un hoyo con la coa para sembrar las plantas de *A. angustifolia* (Sánchez-López, 2005).

Propiedades del suelo en plantaciones de agave

Propiedades físicas

Los valores de DA y AEA se muestran en el Cuadro 7. El sitio de Soledad mostró a la profundidad 0-20 cm el valor más alto de DA y AEA de 0.7-1 mm. En contraste, Tlacolula tuvo el valor más bajo de DA y AEA de 0.7-1 mm. El contenido de AEA de 0.5 mm fue similar en los tres sitios (Cuadro 7).

Cuadro 7. Propiedades físicas (media y error estándar) de suelos cultivados con *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

	Tlacolula (TM)	San Baltazar (TA)	Soledad (LM)
Profundidad del suelo (cm)		0-20	
AEA 0.5 mm (g kg ⁻¹)	18.1±2.4a	21.2±1.9a	21.5±1.6a
AEA 0.7 mm (g kg ⁻¹)	14.7±2.8c	18.0±1.9b	28.3±2.1a
AEA 1.0 mm (g kg ⁻¹)	18.2±3.7c	51.9±7.8b	102.2±12.6a
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.3±0.0c	1.6±0.1b	2.0±0.1a
Profundidad del suelo (cm)		21-40	
AEA 0.5 mm (g kg ⁻¹)	22.1±3.6a	20.4±1.8a	19.0±2.5a
AEA 0.7 mm (g kg ⁻¹)	20.2±4.3ab	15.6±2.1b	27.5±3.7a
AEA 1.0 mm (g kg ⁻¹)	42.1±11.4b	48.9±7.4b	88.1±11.3a

Letras diferentes en la misma fila y profundidad indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $P \leq 0.05$). AEA, agregados estables en agua; LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica.

El sitio de Soledad (LM) también presentó el contenido más alto de AEA de 0.7-1 mm a la profundidad 21-40 cm. Los dos sitios con capa arable (Tlacolula y San Baltazar) mostraron a la profundidad 21-40 cm un alto contenido de AEA de 1 mm y una compactación del suelo más alta que en la capa 0-20 cm, lo que sugirió un

efecto acumulado del arado de disco. El suelo de Soledad tuvo la RP más alta seguido por Tlacolula y San Baltazar (Fig. 5). Los suelos de Soledad y los de Tlacolula mostraron el intervalo más grande de RP, probablemente debido al efecto combinado de la posición del suelo en el paisaje (% de pendiente), contenido de MO y proporción de AEA.

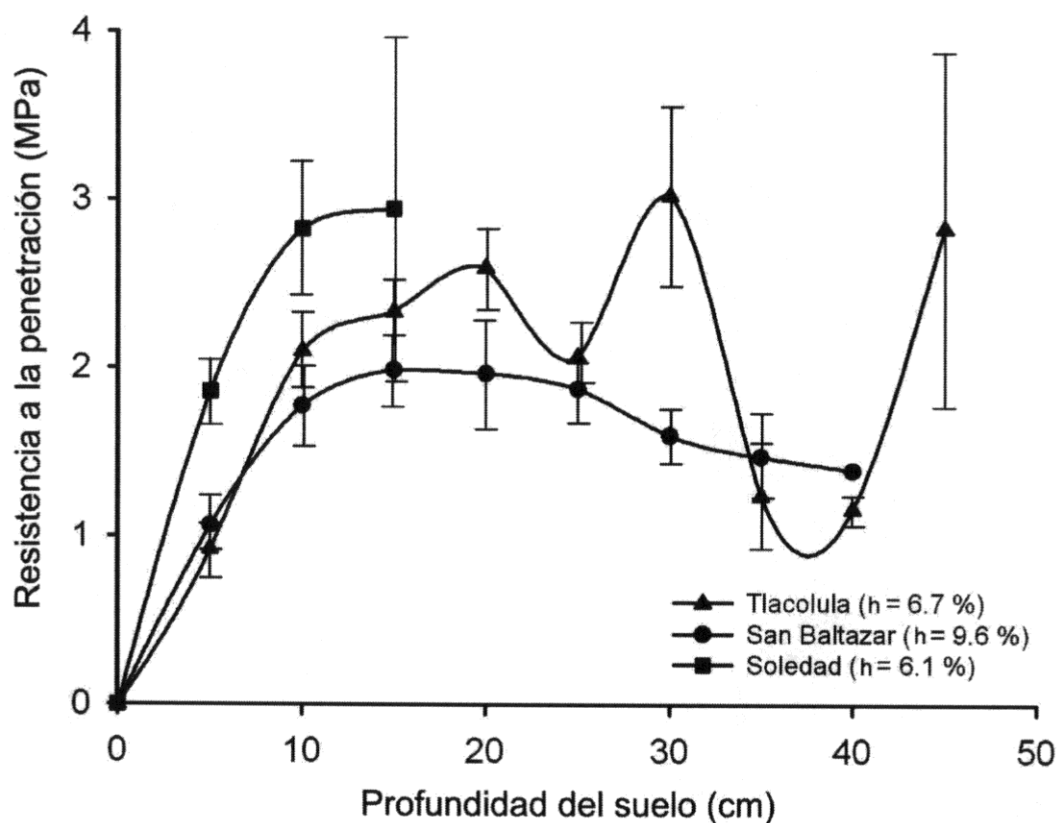


Figura 5. Resistencia a la penetración del suelo \pm dms (diferencia mínima significativa) y contenido de humedad en suelos cultivados con *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México. h, contenido de humedad del suelo.

disturbio más bajo del suelo y a una tasa más baja de descomposición de residuos (Reicosky et al., 1995). Dalal (1989) reportó que la LM redujo la erosión del suelo y el escurrimiento superficial, y consecuentemente el contenido de CO fue usualmente más alto en suelos con manejo de LM que en aquellos bajo labranza convencional. Rahman et al. (2003), Özpınar y Çay (2005) también encontraron un mayor contenido de CO en suelos bajo LM en comparación con suelos bajo labranza convencional.

Cuadro 8. Propiedades químicas y biológicas (media y error estándar) a 0-20 cm de profundidad en suelos cultivados con *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

	Tlacolula (TM)	San Baltazar (TA)	Soledad (LM)
pH	8.1±0.0a	8.2±0.1a	7.5±0.0b
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	12.5±0.6b	12.2±1.3b	23.9±1.2a
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	3.6±0.3a	2.0±0.2b	1.9±0.1b
N disponible (mg kg ⁻¹)	19.4±0.9b	20.4±1.2ab	23.1±1.0a
K ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	25.8±3.0a	8.0±0.5c	16.8±3.2b
Na ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	2.6±0.2a	1.2±0.1b	0.8±0.0b
Mg ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	2.0±0.2a	0.7±0.0c	1.2±0.0b
Ca ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	32.6±2.0b	39.3±1.1a	29.0±1.3b
Carbono de la biomasa microbiana (µg g ⁻¹)	433.8±10.3c	588.7±9.7b	969.6±14.8a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $P \leq 0.05$). LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica.

Cuadro 9. Propiedades químicas y biológicas (media y error estándar) a 21-40 cm de profundidad en suelos cultivados con *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

	Tlacolula (TM)	San Baltazar (TA)	Soledad (LM)
pH	8.1±0.0a	8.2±0.0a	7.4±0.1b
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	10.9±0.5b	10.6±1.0b	14.1±0.8a
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	3.1±0.3a	1.8±0.2b	1.5±0.1b
N disponible (mg kg ⁻¹)	19.4±1.4a	17.2±1.2a	18.5±1.0a
K ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	24.5±3.2a	7.1±0.4b	8.8±1.4b
Na ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	4.0±0.7a	1.3±0.1b	0.9±0.1b
Mg ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	2.4±0.2a	0.8±0.0b	1.2±0.1b
Ca ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	34.1±2.1ab	38.9±1.3b	29.4±2.8a
Carbono de la biomasa microbiana (µg g ⁻¹)	368.2±11.4c	467.7±8.0b	694.5±27.6a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $P \leq 0.05$). LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica.

Los suelos de Tlacolula (0-20 y 21-40 cm) tuvieron las concentraciones más altas de P_{Olsen}, K⁺, Mg²⁺ y Na⁺ intercambiables que San Baltazar y Soledad (Cuadros 8 y 9).

(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002) la concentración de P en este sitio se clasifica como baja, y la relación C:P es superior a 300. Por lo que, tal vez el P sea inmovilizado por la biomasa microbiana del suelo, propiedad que en este sitio mostró el valor más alto. El suelo de Tlacolula presentó un comportamiento opuesto, tuvo mayor disponibilidad de P, pero menor contenido de biomasa microbiana (Cuadro 8).

El N disponible no fue estadísticamente diferente entre los sitios a ambas profundidades del suelo. La MO mostró una asociación con el N disponible y el CBM ($r = 0.231$, $P < 0.002$; $r = 0.222$, $P < 0.003$, respectivamente). El CO, el P_{Olsen} , el N disponible y el Na^+ intercambiable fueron más altos a la profundidad 0-20 cm que a la profundidad 21-40 cm dentro de cada sitio (Cuadros 8 y 9). Wander y Bollero (1999) también reportaron valores más altos de estas propiedades en la capa superficial del suelo.

Propiedades biológicas

La biomasa microbiana se define como el componente vivo de la MO (Jenkinson y Ladd, 1981) excluyendo la macrofauna y las raíces vegetales (Sparling, 1997). La biomasa microbiana representa entre 1 y 5% (peso/peso) del CO total del suelo (Jenkinson y Ladd, 1981). Entre los numerosos métodos para medir la biomasa microbiana del suelo, el método de fumigación-incubación con cloroformo propuesto por Jenkinson y Powlson (1976) se utiliza ampliamente (Tate et al., 1988). Este método no cuantifica la mineralización, o extractabilidad de C no microbiano o de otras fracciones de la MO (Jenkinson y Powlson, 1976). Se ha reportado que la

solubilización con cloroformo del carbono no microbiano durante el desarrollo del método de fumigación-incubación (el cual involucra el uso de cloroformo para lisar las células microbianas) es insignificante (Kemmitt et al., 2008). Por otra parte, el método de fumigación-incubación emplea una solución de BaCl_2 para precipitar los carbonatos como BaCO_3 , que pudieran estar presentes en la muestra de suelo (Stotzky, 1965).

El CBM cambió significativamente entre los sitios y disminuyó en el siguiente orden: Soledad (montaña) > San Baltazar (lomerío) > Tlacolula (valle) (Cuadros 8 y 9). Aslam et al. (1999), Salinas-García et al. (2002) y Balota et al. (2004) también reportaron contenidos más altos de CBM bajo no labranza en comparación con labranza convencional. Si se considera que el componente microbiano puede variar de 100 a >1000 μg de C g^{-1} de suelo (Paul et al., 1999), el contenido de CBM en los suelos estudiados, en particular, en el suelo de montaña (LM) (Cuadros 8 y 9) se catalogaría como alto.

Para los tres sitios de estudio, el CBM fue superior en la capa 0-20 cm con relación a la profundidad 21-40 cm. Esto es consistente con un contenido más elevado de CO en la capa superficial del suelo con respecto al subsuelo (Brady y Weil, 1999). El CBM y el CO mostraron una correlación positiva ($r = 0.733$; $P < 0.0001$). Esta correlación se reflejó claramente en el suelo de Soledad, el cual tuvo el contenido más alto de CO y de CBM (Cuadro 8). En general, el contenido de CBM representó de 3 a 4% del CO en los suelos estudiados.

Los suelos de montaña (LM) tuvieron valores más altos de AEA de 0.7 y 1 mm, CO y CBM (Cuadros 7, 8 y 9) que los suelos del valle y lomerío. Este resultado

sugiere que el cultivo de agave en sitios montañosos (LM) con pendientes elevadas (70%) (Cuadro 6) durante un tiempo aproximado de 21 años no ha representado una disminución en la fertilidad de este suelo con relación a los suelos del valle y lomerío, por lo tanto, se rechazó la hipótesis planteada. Una posible explicación sería que las prácticas de LM en los sitios de montaña han conservado los agregados del suelo, como lo muestra el contenido más alto de AEA en estos suelos (Cuadro 7), lo cual tal vez originó una mineralización gradual de los reservorios biológicamente activos: biomasa microbiana, MO particulada, carbohidratos, enzimas y C soluble en agua (Motavalli et al., 2000).

Hartemink y Bridges (1995) estudiaron la influencia del material parental sobre la degradación de la fertilidad de Ferralsoles y Cambisoles cultivados con *A. sisalana* en Tanzania. Estos autores expresaron que la vulnerabilidad de un suelo a la degradación de su fertilidad está determinada por su condición química inicial, la cual ha recibido influencia de las condiciones climáticas actuales y pasadas, de la mineralogía del material parental, de la vegetación original y del uso del suelo. Hartemink y Bridges (1995) concluyeron que el material parental ejerció una fuerte influencia sobre la fertilidad de los Ferralsoles y Cambisoles cultivados intensivamente con *A. sisalana*, los cuales no habían recibido ningún tipo de fertilización. Los Ferralsoles derivados de gneiss tuvieron una calidad inherente inicial más baja que los Cambisoles derivados de calizas. A pesar de que ambos suelos han estado sometidos al mismo manejo y uso del suelo, la degradación de la fertilidad en los Cambisoles ha sido menor en comparación con la observada en los Ferralsoles, debido principalmente a la composición mineralógica del material

parental, la cual confiere mayores reservas nutrimentales a los Cambisoles que a los Ferralsoles. En este estudio, todos los suelos provienen de roca caliza. Con base en lo encontrado por Hartemink y Bridges (1995) otra posible explicación a la conservación de la fertilidad en los sitios estudiados es que éstos poseen una alta calidad inherente, debido tal vez, a la mineralogía del material parental.

Cambios en las propiedades del suelo asociados con la edad de las plantas de agave

Independientemente del sitio y la profundidad del suelo, la mayoría de las propiedades (pH, CO, Na⁺ y Mg²⁺ intercambiables, CBM, DA y contenido de las tres fracciones de AEA) no fueron afectadas por la edad de las plantas de agave ($P \geq 0.09$). Sólomente 5 de las 14 propiedades del suelo analizadas cambiaron significativamente con la edad del agave ($P \leq 0.01$) (Cuadro 10). El N disponible disminuyó. En contraste, el P_{Olsen}, el Ca²⁺ y K⁺ intercambiables incrementaron con la edad del agave. La RP también incrementó con la edad del agave (Cuadro 10). Con base en estos resultados la hipótesis planteada se aceptó parcialmente, puesto que propiedades como el pH, CO, CBM y Mg²⁺ intercambiable no cambiaron con la edad de las plantas de agave.

Cuadro 10. Propiedades del suelo (media y error estándar) que cambiaron significativamente con la edad de las plantas de agave.

Propiedad del Suelo	Clases de edad de la planta (años)		
	1.5-3.5	3.6-5.5	5.6-7.5
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	2.0±0.1c	2.6±0.2ab	2.9±0.3a
N disponible (mg kg ⁻¹)	22.4±0.6a	16.8±0.8b	18.9±0.9b
K ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	11.8±0.9b	17.7±2.1a	19.8±3.2a
Ca ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	32.9±0.3b	33.6±0.1b	38.8±0.1a
Resistencia a la penetración del suelo (MPa)	1.4±0.0b	1.4±0.0b	1.8±0.1a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas (Tukey; $P \leq 0.05$).

En los sitios de estudio el N disponible disminuyó con la edad del agave, probablemente porque la demanda de este nutriente por la planta es mayor que la incorporación de N al suelo. Los únicos aportes de MO al suelo, son los efluentes de las destilerías y las hojas del agave que quedan en el terreno después de la cosecha de las piñas. Las hojas de agave suelen ser ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que, como Porta et al. (1999) mencionaron, se consideran materiales orgánicos de compleja biodegradación. Por ejemplo, las hojas de *A. tequilana* contienen 64.8% de celulosa, 5.1% de hemicelulosa y 15.9% de lignina (Cuadro 4) (Iñiguez-Covarrubias et al., 2001). Las hojas de *A. sisalana* contienen 73.1% de celulosa, 13.3% de hemicelulosa y 11.0% de lignina (Cuadro 4) (Bledzki y Gassan, 1999). Incluso, las fibras de *A. tequilana* poseen un contenido de celulosa mayor que el de *Pinus ocarpa* (47.5%) (Iñiguez-Covarrubias et al., 2001).

El bagazo de *A. tequilana* posee una relación C:N aproximadamente de 125 (Iñiguez-Covarrubias et al., 2003). Una amplia relación C:N se asocia con una lenta

degradación y muy bajos aportes de N en forma mineral (Alexander, 1994). Si se toma como referencia el valor de la relación C:N reportado por Iñiguez-Covarrubias et al. (2003) y el elevado contenido de compuestos recalcitrantes en la hojas de agave, tales como la lignina (un precursor importante de las sustancias húmicas) (Porta et al., 1999) es posible que la tasa de degradación de la MO incorporada al suelo sea muy baja y como consecuencia la restitución de nutrimentos como N, P y S sea lenta. Otra posible explicación para el bajo contenido de N en los suelos estudiados es que el N incorporado con los residuos se integre al ciclo del N del sistema y en lugar de estar disponible para las plantas de agave sea inmovilizado por los organismos transformadores de la MO.

En suelos neutros y alcalinos el Ca^{2+} y en menor proporción el Mg^{2+} , llegan a ser los cationes dominantes en la solución del suelo (Hinsinger, 2001). Ruiz (1992) calculó que entre 9% y 20% del P soluble se encuentra en forma de complejos de Mg-P y Ca-P a pH's con valores de 7 y 8.5, respectivamente. Los iones fosfato tienden a precipitar con los cationes, cuando éstos se encuentran en alta concentración en la solución del suelo (Hinsinger, 2001). El tipo de mineral formado dependerá del pH, en suelos neutros y alcalinos, los iones P precipitan como fosfatos de Ca, ya sea como fosfatos dicálcicos u octacálcicos, hidroxiapatita y, eventualmente como apatitas, las cuales son menos solubles (Lindsay et al., 1989). La biodisponibilidad de P aumenta al disminuir el pH, probablemente debido al incremento en la solubilidad de los fosfatos de Ca (Hinsinger, 2001). Los cambios en el pH de la rizósfera se deben principalmente a los siguientes procesos (Hinsinger, 2001): (i) el desbalance entre aniones y cationes debido a su absorción por las

plantas. Cuando se absorben más cationes que aniones, la raíz de la planta libera un exceso de protones (H^+) para compensar las cargas eléctricas positivas con las negativas, por lo que la rizósfera se acidifica. Por el contrario, cuando se absorben más aniones que cationes, se libera un exceso de cargas negativas en forma de OH^- o HCO_3^- , esto origina una alcalinización en la rizósfera; (ii) la respiración de las raíces y; (iii) la producción de ácidos orgánicos por las raíces de las plantas.

Cuando hay una deficiencia de P en el medio la secreción de altas concentraciones de ácidos orgánicos se incrementa (Hoffland et al., 1989), y como consecuencia el pH de la rizósfera disminuye y el P (Jones y Darrah, 1994) y otros micronutrientes como Mn, Fe y Zn se hacen más disponibles en suelos calcáreos (Dinkelaker et al., 1989).

En este estudio no se obtuvo una explicación experimental para el incremento de P_{Olsen} , Ca^{2+} y K^+ intercambiables con la edad del agave, pero se podrían plantear las siguientes especulaciones:

El valor de pH varió de 7.5 a 8.2 y el Ca^{2+} fue el catión dominante en la solución del suelo (Cuadro 8); esto hace posible que una proporción del P soluble se encuentre en forma de fosfato de Ca. Probablemente, en la rizósfera del agave se lleven a cabo algunos de los procesos mencionados anteriormente, los cuales permiten la solubilización de los fosfatos de Ca y, como consecuencia, que la biodisponibilidad de P incremente. Tal vez, las plantas de agave con edad más avanzada sean más eficientes en producir una mayor cantidad de exudados radicales, asumiendo que éstas exhiben una densidad de raíces más alta en comparación con plantas más jóvenes. Las raíces de especies de plantas que liberan

ácidos orgánicos de bajo peso molecular pueden acidificar la rizósfera hasta valores tan bajos de pH como 4.8, contribuyendo así al desbalance de la relación $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{CaH}_2\text{PO}_4$ a favor del primero. Este podría ser un mecanismo muy importante para la adquisición de P en condiciones de deficiencia de suelos calcáreos, y a la vez explicaría la tolerancia de algunas especies a ciertos tipos de suelos (Ascencio y Lazo, 2001). Otro factor que podría contribuir a explicar el aumento en la concentración de P_{Olsen} , Ca^{2+} y K^+ intercambiables en el suelo con relación a la edad de la planta, sería que la demanda de estos nutrimentos por el cultivo disminuya al aumentar la edad de las plantas de agave. Se requiere estudiar a profundidad, la relación entre pH, disponibilidad de P y dinámica de los exudados de las raíces de acuerdo con la edad del agave.

También es posible que las hojas de agave y la adición de los efluentes de las destilerías (vinazas) restituyan al suelo parte del P, K^+ y Ca^{2+} removido por las plantas de agave, y que estos nutrimentos estén más disponibles en etapas más avanzadas del ciclo de cultivo del agave, debido como ya se mencionó anteriormente, a la lenta biodegradación de los materiales orgánicos adicionados al suelo. En el Cuadro 16 se presentan los datos referentes a la remoción de nutrimentos del suelo por las hojas de *A. sisalana* en el tercer ciclo de cultivo. Este agave puede absorber cantidades suficientes de N, P, Ca^{2+} y K^+ como para retornar parcialmente los macronutrimentos removidos por las hojas de la planta de agave al suelo, mediante el depósito de las hojas en el terreno después de la cosecha (Hartemink y Bridges, 1995). Gobeille et al. (2006) reportaron que las vinazas provenientes de los efluentes de las destilerías de *A. tequilana* contienen 0.399 mg

L⁻¹ de P total, 11% de peso sólido de K, 0.21% de peso sólido de Ca y 243 mg L⁻¹ de N total (Cuadro 5). Estos mismos autores encontraron que la adición de los efluentes de las destilerías incrementó la concentración de K⁺ y Ca²⁺ intercambiable en suelos con *A. tequilana* de 299.50 a 436.50 y de 1013.5 a 1416.2 mg kg⁻¹, respectivamente. Iñiguez y Crohn (2004) reportaron que la composta proveniente del bagazo de *A. tequilana* contiene 0.113% de P total, 0.56% de K total, 1545% de Ca total. Hartemink y Bridges (1995) encontraron que los materiales orgánicos parcialmente descompuestos de *A. sisalana* contienen aproximadamente 300 kg de N, 50 kg de P, 1230 kg de Ca y 80 kg de Mg por cada 50 toneladas.

Otro factor que tal vez contribuya a explicar el aumento en la concentración de P es que la cantidad de MO a menudo es mayor en suelos sin labranza que en suelos bajo labranza convencional. Sin embargo, la MO en suelos sin labranza es más lábil y susceptible a la degradación microbiana cuando hay destrucción de los agregados del suelo (Wright y Hons, 2005). Por lo que, el incremento en la concentración de P quizá se asocie con el depósito de MO (hojas de agave y vinazas) que al ser mineralizada aumenta la disponibilidad de fosfatos.

La presencia de carbonato libre es común en suelos derivados de roca caliza con un pH>7.0 (Hartemink y Bridges, 1995), condiciones que se cumplen en los sitios de estudio. Razón por la que la concentración de Ca²⁺ puede también incrementar y llegar a dominar el complejo de cambio, lo cual originaría condiciones físicas favorables (p.e. favorecer la agregación del suelo), pero también podría ser la causa de la deficiencia de elementos menores (hierro) y relaciones Ca:K poco favorables (Hartemink y Bridges, 1995).

La RP se incrementó con la edad del agave (Cuadro 10). Aunque en general las raíces contribuyen a mejorar la porosidad del suelo (Gregory, 2006), análisis micromorfológicos indican que el suelo alrededor de las raíces se compacta por la expansión de éstas a lo largo de su crecimiento (Dexter, 1987; Pierret et al., 2005; De León-González et al., 2007). Conforme avanza la edad de la plantación de agave, es de suponer una concentración más alta de raíces en las capas más superficiales de la rizósfera. Este hecho puede explicar el incremento en la RP en campos con agaves de edad avanzada.

Conclusiones

Las propiedades del suelo fueron significativamente diferentes en los campos de *Agave angustifolia* dependiendo del sitio. Los suelos del sitio montañoso (asociados al manejo de labranza mínima) tuvieron valores más altos de densidad aparente, resistencia a la penetración del suelo y agregados estables en agua de 0.7 y 1 mm, las cuales se pueden considerar propiedades favorables para resistir la erosión del suelo, principalmente en una topografía accidentada. El N disponible, el carbono orgánico, y el carbono de la biomasa microbiana de los suelos de montaña fueron también más altos que en los campos del valle (tracción mecánica) y lomerío (tracción animal). Este resultado sugiere que en los sitios montañosos a pesar de la elevada pendiente (70%), el cultivo de agave durante un largo periodo no ha representado una disminución en la fertilidad de este suelo con relación a los suelos del valle y lomerío. El Ca^{2+} y el K^+ intercambiables, el P_{Olsen} y la resistencia a la penetración del suelo incrementaron con la edad de las plantas de agave. En

contraste, el N disponible para las plantas disminuyó. En general, las propiedades químicas del suelo fueron más afectadas por la edad de la planta en comparación con las propiedades físicas y biológicas.

Referencias

- Alexander, M., 1994. Introducción a la microbiología del suelo. 2da. reimpresión. AGT Editor, S.A., México. pp: 355-371.
- Antonio-Cruz, R., Mendoza-Martínez, A.M., 2002. Synthesis and characterization of graft copolymers from natural fibers. *International Journal of Polymeric Materials* 51, 661-674.
- Ascencio, J., Lazo, J.V., 2001. Crecimiento y eficiencia de fósforo de algunas leguminosas cultivadas en arena regada con soluciones nutritivas con fosfatos inorgánicos de hierro y calcio. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 18, 13-32.
- Aslam, T., Choudhary, M.A., Saggar, S., 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil Tillage Res.* 51 (1-2), 103-111.
- Balam-Cocom, R.J., Duarte-Aranda, S., Canché-Escamilla, G., 2006. Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la "piña" de henequén y polipropileno. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5 (1), 39-44.
- Balota, E.L., Colozio A.F., Andrade, D.S., Dick, R.P., 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res.* 77 (2), 137-145.

- Beare, M.H., Bruce, R.R., 1993. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: Implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56, 87-104.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*, Monograph No. 9, 2nd ed. ASA., Madison, WI. pp. 363-375.
- Bledzki, A.K., Gassan, J., 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24, 221-274.
- Boone, D.R., Grigal, D.F., Sollins, P., Ahrens, R.J., Armstrong, D.E., 1999. Soil Sampling, Preparation, Archiving, and Quality Control. In: Robertson, G.P., Coleman, D.C., Bledsoe, C.S., Sollins, P. (Eds.), *Standard Soil Methods For Long Term Ecological Research*. Oxford University Press, USA. pp. 3-27.
- Brady, C.N., Weil, R.R., 1999. *The Nature and properties of soils*. Prentice Hall. USA. pp: 1-56.
- Cadena Agroalimentaria del Agave., 2006. [En línea]. Disponible en: www.sdr.gob.mx/Contenido/Cadenas%20Productivas/cadenas%202006/agave.pdf. Consultado el 15 de noviembre del 2007.
- Campo Experimental Sur de Sinaloa., 2004. *Guía para la Asistencia Técnica Agropecuaria para el Área de Influencia del Campo Experimental Sur de Sinaloa*. INIFAP-CIRNO-CESSI. Agenda Técnica. Segunda Edición. Mazatlán, Sinaloa, México. 170 p.

- Castillo, N.F., Castro, M.J. (Eds.), 1996. Consejo de Recursos Minerales. Monografía Geológico Minera del Estado de Oaxaca. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales, México.
- Castro-Bravo, C. 2005. Manual para la producción y paquete tecnológico de agave. [En línea]. Disponible en: www.sdr.gob.mx/.../agricolas/AGAVE%20MEZCALERO/MANUAL%20DE%20PRODUCCION%20AGAVE%20MEZCALERO.pdf. Consultado el 15 de noviembre del 2007.
- Cervantes-Ramírez, M., 2002. Agave. In: Pavón, M. (Ed.), Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto de Geografía, UNAM. pp. 63-99.
- Chagoya-Méndez, V.M., 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación SAGARPA-Delegación Oaxaca. Oaxaca, México.
- Chan, K.Y., Heenan, D.P., 2005. The effect of stubble burning and tillage on soil carbon sequestration and crop productivity in southeastern Australia. *Soil Use Man.* 21, 427-431.
- Comisión Nacional de Biodiversidad., 2004. [En línea]. Disponible en: <http://www.conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Consultado el 14 de marzo del 2006.
- Dalal, R.C., 1989. Long term effects of no-tillage, crop residue, and nitrogen application on properties of a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1511-1515.

- Datal, R.C., Eberhard, R., Grantham, T., Mayer, D.G., 2003. Application of sustainability indicators, soil organic matter and electrical conductivity, to resource management in the northern grains region. *Aust. J. Exp. Agric.* 43 (3), 253-259.
- De León-González, F., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Chávez, M.C., Castillo-Juárez, H., 2007. Root-aggregation in a pumiceous sandy soil. *Geoderma* 142 (3-4), 308-317.
- Dexter, A.R., 1987. Compression of soil around roots. *Plant Soil* 97, 401-406.
- Dick, P.R., Thomas, D.R., Halvorson, J.J., 1996. Standardized Methods, Sampling, and Sample Pretreatment. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for assessing soil quality*. SSSA. Special Publication 49. USA. pp. 107-121.
- Dinkelaker, B., Römheld, V., Marschner, H., 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant Cell Environ.* 12, 285-292.
- Espinosa-Paz, H., Bravo-Mosqueda, E., López-López, P., Arredondo-Velásquez, C., 2005. El agave mezcalero de Oaxaca: Avances en Investigación. INIFAP. Libro Técnico No. 3. México. 180 p.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.
- Gobeille, A., Yavitt, J., Stalcup, P., Valenzuela, A., 2006. Effects of soil management practices on soil fertility measurements on *Agave tequilana* plantations in Western Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 87 (1), 80-88.
- Greenland, D.J., Szabolcs, I., 1994. *Soil resilience and sustainable land use*, CABI, Wallingfor, UK.

- Gregory, P.J., 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.* 57, 2–12.
- Hartemink, A., 1997a. Soil fertility decline in some major soil grouping under permanent cropping in Tanga region, Tanzania. *Geoderma* 75, 215-229.
- Hartemink, A., 1997b. Input and output of major nutrients under monocropping sisal in Tanzania. *Land Degrad. Dev.* 8, 305-310.
- Hartemink, A., Bridges, E.M., 1995. The influence of parent material on soil fertility degradation in the coastal plain of Tanzania. *Land degradation & Rehabilitation* 6, 215-221.
- Hartemink, A., Osborne, J.F., Kips, P.A., 1996. Soil fertility decline and fallow effects in ferralsols and acrisols of sisal plantations in Tanzania. *Exp. Agric.* 32, 173-184.
- Hinsinger, P., 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil* 237, 173-195.
- Hoffland, E., Findenegg, G.R., Nelemans, J.A., 1989. Solubilization of rock phosphate by rape II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. *Plant Soil* 113, 161-165.
- Horwath, W.R., Paul, E.A., 1994. Microbial biomass. In: Weaver, R.W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdicek, D., Smith, S., Tabatabai, A., Wollum, A. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. SSSA Book Series 5. Madison, WI. pp. 753–773.
- Hussain, L., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Res.* 50, 237-249.

- Iñiguez, G., Crohn, D.M., 2004. Utilization of by-products from the tequila industry. Part 6. Fertilization of potted geranium with a slaughterhouse waste compost. Rev. Int. Contam. Ambient. 20, 53-58.
- Iñiguez-Covarrubias, G., Díaz-Teres, R., Sanjuán, R., Anzaldo-Hernández, Rowell, R.M., 2001. Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: potencial value of *Agave tequilana* Weber azul. Bioresource Technology 77, 101-108.
- Iñiguez-Covarrubias, G., Flores, S., Martínez, L., 2003. Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 5. Biodegradación del material de descarte de la industria de la curtiduría. Revista Int. Contam. Ambient. 19 (2), 83-91.
- Islam, K.R., Weil, R.R., 2000. Land use effect on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. Agric. Ecosyst. Environ. 79 (1), 9-16.
- Jenkinson, D.S., Ladd, J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, E. A., Ladd, J.N. (eds.), Soil Biochemistry vol. 5, Marcel Dekker, Inc, New York and Basel, pp. 415-471.
- Jenkinson, D.S., Powlson, D.S., 1976. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil-V: A method for measuring soil biomass. Soil Biol. Biochem. 8, 209-213.
- Jones, D.L., Darrah, P.R., 1994. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. Plant Soil 166, 247-257.
- Kemmitt, S.J., Lanyon, C.V., Waite, I.S., Wen, Q., Addiscott, T.M., Bird, N.R.A., O'Donnell A.G., Brookes, P.C., 2008. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass-a new perspective. Soil Biol. Biochem. 40, 61-73.

- Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Agron. Monogr. no. 9. ASSA and SSSA, Madison, WI. pp. 425-442.
- Kuo, S., 1996. Phosphorus. In: Bigham, J.M. et al. (eds.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA y ASA. pp. 869-919.
- Lindsay, W.L., Vlek, P.L.G., Chien, S.H., 1989. Phosphate minerals. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (eds.), *Minerals in soil environment*. 2nd edn. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA, pp. 1089-1130.
- Lorence, D.H., García-Mendoza, A., 1989. Oaxaca, México. In: Campbell, D.G., Hammond, H.D. (Eds.), *Floristic Inventory of Tropical Countries. The status of plant systematic collections and vegetation, plus recommendations for the future*. The New York Botanical Garden. pp. 259.
- McDonald, M.A., Healey, J.R., Stevens, P.A., 2002. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 92, 1-19.
- Motavalli, P.P., Discekichi, H., Kuhu, J., 2000. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79 (1), 17-27.
- Mulvaney, R.L., 1996. Nitrogen-inorganic forms. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. SSSA Series 5*. SSSA and ASA, Madison, WI. pp. 1123-1184.

- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. Agron. Monogr. no. 9. ASSA and SSSA, Madison, WI. pp. 539-579.
- Nobel, P.S., 1989. A nutrient index quantifying productivity of agaves and cacti. J. Appl. Ecol. 26, 635-645.
- Okore, I.K., Tijani-Eniola, H., Agboola, A.A., Aiyelari E.A., 2007. Impact of land clearing methods and cropping systems on labile soil C and N pools in the humid zone forest of Nigeria. Agric. Ecosyst. Environ. 120, 250-258.
- Özpinar, S., Çay, A., 2005. Effects of minimum and conventional tillage systems on soil properties and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in clay-loam in the Çanakkale region. Turk J. Agric. For. 29, 9-18.
- Pare, T., Gregorich, E.G., Ellebert, B.H., 1995. Comparison of soil nitrate extracted by potassium-chloride and adsorbed on an anion-exchange membrane in-situ. Communications in Soil Science and Plant Analysis 26 (5-6), 883-898.
- Paul, E. A., Harris, D., Klug, M.J., Ruess, R.W., 1999. The determination of microbial biomass. In: Robertson, G.P., Coleman, D.C., Bledsoe, C.S., Sollins, P. (eds.), Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research. Oxford University Press, New York, pp. 291-317.
- Petersen, G.R., Calvin, L.D., 1996. Sampling. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Summer, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Number 5. SSSA Book Series. USA. pp. 1-17.

- Pierret, A., Moran, C.J., Doussan, C., 2005. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytologist* 166, 967-980.
- Porta, C.J., López, A.M., Roquero, C., 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2da. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. España. pp: 75-527.
- Rahman, M.H., Tanaka, A., Hoque, S., 2003. Long-term effects of tillage on physicochemical properties of modified Andisol of Northeast Honshu Island. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34 (11-12), 1743-1757.
- Reicosky, D.C., Kemper, W.D., Langdale, G.W., Douglas, C.L., Rasmussen, P.E., 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50, 253-261.
- Rowell, D.L., 1994. *Soil Science. Methods and Applications*. Longman Scientific & Technical. Singapore. pp. 325-326.
- Ruiz, L., 1992. Mobilisation du phosphore des apaptites dans la rhizosphère. Rôle de l'excrétion de protons par les racines. PhD Thesis, Montpellier II University, 125 p.
- Salinas-García, J.R., Velásquez-García, J. de J., Gallardo-Valdez, M., Díaz-Mederos, P., Caballero-Hernández, F., Tapia-Vargas, L.M., Rosales-Robles, E., 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. *Soil Tillage Res.* 66 (2), 143-152.
- Sánchez-López, A., 2005. *Oaxaca Tierra de Maguey y Mezcal*. 2nd ed. Impreso en la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax., México. pp. 91-108.
- SAS Institute Inc., 1990. *SAS/STAT. User's guide, version 6*. Cary, NC.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca., 1998. Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana. Primera Aproximación 1996. Escala 1:4000 000. México. [En línea]. Disponible en: <http://conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Consultado el 08 de agosto del 2008.
- Smith, O.H., Petersen, G.W., Needdman, B.A., 2000. Environmental indicators of agro-ecosystems. *Adv. Agron.* 69, 75–97.
- Sparling, G.P., 1997. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. In: Pankhurts, C., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (eds.), *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, UK. pp. 97-118.
- Stotzky, G., 1965. Microbial respiration. In: Black, C.A. (ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Am. Soc. Agron. Inc., Publisher Madison, Winsconsin, USA, pp. 1550-1572.
- Tate, K.R., Ross, D.J., Feltham, C.W., 1988. A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. *Soil Biol. Biochem.* 20 (3), 329-335.
- Voroney, R.P., Winter, J.P., Beyaert, R.P., 1993. Soil Microbial Biomass C and N. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. USA. pp. 277-286.
- Wander, M.M., Bollero, G.A., 1999. Soil Quality Assessment of Tillage Impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 961-971.

Weil, R.R., Magdoff, F., 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In: Magdoff, F., Weil, R.R. (eds.), *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press Boca Raton, pp. 1-43.

Wright, A.L., Hons, F.M., 2005. Soil carbon and nitrogen in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 141-147.

Capítulo 5

Indicadores e índices de calidad del suelo en plantaciones de *Agave angustifolia* Haw.

Introducción

En este capítulo se describe la selección de un conjunto mínimo de indicadores y su integración en índices prácticos que permitieron conocer cuál es el estado actual de la calidad del suelo en la zona de estudio. La calidad del suelo es su capacidad para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o transformado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Karlen et al., 1997). Las funciones del suelo que determinan su calidad incluyen la habilidad de este recurso para (1) promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sustentable); (2) atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y (3) favorecer la salud de plantas, animales y humanos (Doran y Parkin, 1994). Como se puede apreciar, el concepto de calidad del suelo toma en cuenta, por un lado, las propiedades intrínsecas del suelo y, por otro, las relaciones del suelo con el ambiente, las plantas, los animales y los seres humanos (Astier-Calderón et al., 2002). La respuesta del suelo al manejo también depende de su calidad; ya que la capacidad de amortiguamiento de los suelos está determinada por varias de sus propiedades, por lo tanto, es importante identificar las propiedades del suelo responsables de los

cambios en su calidad. Dichas propiedades se pueden considerar como indicadores de la calidad del suelo para evaluar la sustentabilidad agrícola (Masto et al., 2007). Los indicadores de calidad del suelo deberían reflejar los procesos del ecosistema; integrar propiedades químicas, físicas y biológicas así como procesos del suelo; ser accesibles a muchos usuarios; aplicables a condiciones de campo; y sensibles a variaciones en manejo y clima (Doran y Parkin, 1994). Numerosos trabajos sobre evaluación de la calidad del suelo han demostrado que la labranza reducida, las prácticas de manejo que retornan los residuos vegetales al suelo y la aplicación de abonos originan cambios significativos en las propiedades del suelo (Karlen y Stott, 1994). Este tipo de estudios son necesarios para desarrollar estrategias de manejo que apliquen la información de la calidad del suelo obtenida a situaciones y regiones específicas (Hussain et al., 1999). Jackson et al. (2004) estudiaron los efectos de cuatro tipos de labranza sobre el suelo y encontraron que la labranza mínima (LM) con incorporación de materia orgánica (MO) incrementó el contenido de carbono orgánico (CO), de N total, de C y N microbianos y disminuyó la densidad aparente (DA). Wander y Bollero (1999) evaluaron el efecto de la agricultura sin labranza y la labranza convencional sobre la calidad del suelo en Mollisoles y Alfisoles de Estados Unidos y encontraron que la agricultura sin labranza mejoró la condición biológica y física del suelo. Similarmente, Liebig et al. (2004) estudiaron suelos de las Grandes Planicies del Noreste de Norte América y reportaron que los suelos sin labranza tuvieron contenidos significativamente mas altos de CO, N potencialmente mineralizable, C microbiano, mayor estabilidad de agregados y una tasa más rápida de infiltración con relación a suelos bajo labranza convencional.

Numerosas investigaciones revelan el efecto de los diferentes tipos de labranza sobre la calidad del suelo, y la literatura es muy abundante aunque aquí sólo se mencionan algunos ejemplos. Sin embargo, en plantaciones de agave, particularmente de *A. angustifolia* no se tienen reportados estudios que evalúen el efecto de la labranza sobre la calidad del suelo. Actualmente, el manejo de *A. angustifolia* involucra tres condiciones topográficas asociadas con diferentes sistemas de labranza: (a) producción en valle dominada por tracción mecánica (TM); (b) producción en lomerío con tracción animal (TA) y (c) producción en montaña con elevadas pendientes dominada por LM. La LM y la TA se consideran sistemas tradicionales no mecanizados, y la TM se considera un sistema moderno de labranza. Los estudios sobre evaluación de la calidad del suelo son necesarios para el desarrollo de estrategias que aseguren la sustentabilidad del suelo y de las prácticas de manejo (Hussain et al., 1999, Wander y Bollero, 1999).

Los análisis estadísticos multivariados tales como el análisis de componentes principales (ACP) son herramientas útiles en la evaluación de la calidad del suelo. Este análisis es un procedimiento no subjetivo para extraer información de un conjunto amplio de datos (Wander y Bollero, 1999). Sin embargo, seleccionar indicadores de calidad y medir su valor es de escasa utilidad si no se desarrollan simultáneamente criterios que permitan su interpretación. En general, los indicadores se pueden interpretar en dos formas: (1) considerar los valores obtenidos para cierto suelo como base de comparación y verificar los cambios que ocurren al transcurrir el tiempo por efecto del manejo, lo que determina si la calidad aumenta o decrece (Seybold et al., 1997; Masciandaro y Ceccanti, 1999; Karlen et al., 2001); y (2)

contrastar los valores de los indicadores obtenidos con valores de referencia que se le han asignado a un suelo que funciona a una capacidad deseada (Kettler et al., 2000; Wick et al., 2000). Con estos enfoques, en el primer caso se puede deducir el efecto del manejo sobre la calidad del suelo y su tendencia en el tiempo, en el segundo se puede concluir qué tan próximo está un suelo de la calidad óptima o deseada.

Los objetivos del presente trabajo fueron: (a) seleccionar propiedades del suelo que puedan ser utilizadas como indicadores de calidad en plantaciones de *A. angustifolia*, considerando tres condiciones topográficas (valle, lomerío y montaña) asociadas con tres tipos de labranza (TM, TA y LM, respectivamente) y, (b) integrar los indicadores de calidad seleccionados en un índice que permita la interpretación de la calidad del suelo en plantaciones de agave. La hipótesis planteada fue que el cambio de uso del suelo de selva baja caducifolia a plantaciones de *A. angustifolia* y el cultivo de esta especie por un periodo aproximado de 20-30 años han afectado negativamente algunos indicadores de calidad, lo cual se ha reflejado en la degradación de la calidad del suelo, en particular, en los sitios con las pendientes más elevadas (montaña).

Materiales y Métodos

El área de estudio, la información referente a la precipitación y la temperatura media anual, así como al clima y manejo del suelo se describieron ampliamente en el Capítulo 4. La vegetación original es selva baja caducifolia (SBC) (Lorence y García Mendoza, 1989). De manera general, de acuerdo con los agricultores entrevistados,

el área de estudio se ha usado para el cultivo del agave por más de 100 años. Aunque los productores dueños de los terrenos contemplados en este estudio reportaron tener el siguiente tiempo aproximado cultivando agave en sus parcelas: Tlacolula, 20 años; San Baltazar Guelavila, 30 años; y Soledad Salinas 21 años. No obstante que los suelos han sido cultivados por largo tiempo con este agave, la variable de referencia usada en esta investigación fue el tiempo de uso actual en términos de edad de la planta.

Para el cultivo de *A. angustifolia* se emplean tres sistemas de labranza, la selección de cada uno de ellos está condicionado por la topografía (Sánchez-López, 2005). La LM se usa en zonas montañosas con pendientes pronunciadas de 12 a 70%; la TA en lomerío con pendientes de 4 a 65%; y la TM en valles con pendientes de 0.5 a 11% (Anexo 1). En cada uno de los sitios de estudio (Tlacolula, San Baltazar y Soledad) se seleccionaron tres plantaciones de *A. angustifolia* con las siguientes clases de edad de las plantas de agave: clase 1 (1.5-3.5 años), clase 2 (3.6-5.5 años) y clase 3 (5.6-7.5 años), con una repetición en cada sitio. Todos los agricultores cooperantes proporcionaron información acerca de la edad de sus agaves.

Las evaluaciones de la calidad del suelo requieren medir el estado actual de un indicador y comparar los resultados con valores conocidos o deseables (Karlen et al., 1997; Arshad y Martin, 2002). Los valores óptimos se pueden obtener de suelos de ecosistemas no perturbados (Warketin, 1996; Arshad y Martin, 2002), donde el suelo funciona a su máximo potencial. Por ejemplo, Glover et al. (2000) usaron pastizales adyacentes al sitio experimental para obtener los valores de referencia. En este

estudio, se seleccionaron dos parcelas bajo SBC sin indicios visibles de perturbación, para utilizarlas como sistemas de referencia. Los valores de las propiedades edáficas de estas parcelas se consideraron la base de comparación para verificar los cambios en el suelo por efecto del sitio y del manejo asociado a ellos (Seybold et al., 1997; Masciandaro y Ceccanti, 1999; Karlen et al., 2001). Esto es válido sólo bajo dos supuestos que apoyan el enfoque comparativo entre suelos no perturbados y suelos perturbados: (1) que todos los sistemas bajo estudio fueron idénticos al tiempo cero y que no han sido selectivamente afectados por factores biológicos y, (2) que el clima no ha cambiado y es similar para todos los sitios usados en la comparación (Pennock y Kessel, 1997). En este caso, todos los sitios de estudio comparten clima, material parental y vegetación similares.

Agave angustifolia alcanza la madurez sexual entre 7 y 10 años después de plantado. Mientras las plantas de agave alcanzan la madurez, los agricultores en todos los suelos estudiados siembran maíz como cultivo asociado durante los primeros dos o tres años del ciclo de cultivo del agave (clase de edad 1, solamente). Los únicos aportes de MO al suelo son las hojas del agave que permanecen en el terreno después de la cosecha y los efluentes de las destilerías (ver capítulo 4). Los periodos de descanso del suelo no se emplean frecuentemente en la producción de *A. angustifolia*. De acuerdo con los agricultores entrevistados, no se han aplicado herbicidas ni fertilizantes a ninguna de las plantaciones de agave muestreadas en este estudio.

Muestreo del suelo

Los métodos de muestreo del suelo se describieron con detalle en el Capítulo 4. Este estudio solamente contempló la profundidad 0-20 cm, porque el suelo superficial: (a) es la capa más afectada por la perturbación y el desarrollo de las plantas y, (b) recibe el mayor impacto de la erosión, la infiltración del agua y la conservación de nutrientes (Franzluebbers, 2002).

Análisis del suelo

Los métodos analíticos utilizados en la determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo se mencionaron en el Capítulo 4. El CBM se estimó por el método de fumigación-incubación descrito por Jenkinson y Powlson (1976). Durante los análisis de suelo, 10% de las muestras se duplicaron al azar para verificar la reproducibilidad de las determinaciones.

Análisis estadísticos

Selección de indicadores de calidad del suelo

La reducción de un conjunto amplio de datos mediante el uso de ACP es muy útil para graficar de manera simple las características de la calidad del suelo, de tal forma que sean más fáciles de interpretar por los usuarios del suelo (Romig et al., 1995).

Los componentes principales (CPs) se definen como combinaciones lineales de las variables que explican la mayor proporción de la varianza dentro de un conjunto amplio de datos. Peña (2002) mencionó que la técnica de ACP es debida a Hotelling (1933) aunque su origen se encuentra en los ajustes ortogonales por mínimos cuadrados introducidos por Pearson (1901). Su utilidad es doble: (i) permite representar óptimamente en un espacio de dimensión pequeña observaciones de un espacio general p -dimensional. En este sentido, CPs es el primer paso para identificar las posibles variables latentes o no observadas que generan los datos, (ii) permite transformar las variables originales, en general, correlacionadas, en nuevas variables no correlacionadas, facilitando la interpretación de los datos (Peña, 2002). Cuando hay una alta correlación positiva entre todas las variables, el primer componente principal (CP) tiene todas sus coordenadas del mismo signo y se puede interpretar como un promedio ponderado de todas las variables. Los CPs restantes tienen coordenadas positivas y negativas, que implica que contraponen unos grupos de variables frente a otros (Peña, 2002). El signo denota el tipo de correlación existente entre los vectores propios. Cada CP contiene una parte de la variabilidad total de los vectores. El primer CP es el que contiene la mayor variabilidad. De la variabilidad restante, el segundo CP es el que incluye más información. El tercer CP posee la mayor variabilidad no contenida en los componentes anteriores. Así se continúa hasta que toda la variabilidad se ha distribuido diferencialmente entre los componentes (Crisci y López-Armengol, 1983). Todos los vectores propios contribuyen a todos los CPs, pero de manera diferencial, es decir, el vector 1 puede ser un importante aporte para el primer CP, pero pobre para el segundo. Cuanto más

alto es el valor del vector (sin importar el signo), mayor es su aporte al componente (Crisci y López-Armengol, 1983). Existen muchas estrategias documentadas en el uso de ACP para seleccionar un subconjunto a partir de un conjunto de datos más amplio (ver Andrews y Carroll, 2001; Bredja et al., 2000). Con el fin de seleccionar un conjunto mínimo de indicadores (Doran y Parkin, 1994) se realizó un ACP para analizar 10 variables edáficas de 20 parcelas, dos de las cuales pertenecen a SBC. Las siguientes variables previamente estandarizadas ($\bar{X}=0$ y $\sigma=1$), se incluyeron en el análisis: pH, CO, P_{Olsen} , N disponible, Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} intercambiables, DA y CBM. Estas propiedades se analizaron por su influencia en la fertilidad física, química y biológica del suelo, por su relación con algunos procesos del agroecosistema como la actividad biológica; por su facilidad de determinación y bajo costo económico. La fertilidad biológica, por ejemplo, se relaciona estrechamente con la biomasa microbiana, principal motor de la descomposición de la MO, derivada de los residuos vegetales y animales, así como del reciclaje de la misma. Los subproductos de su acción influyen de forma directa en las propiedades químicas y físicas de los suelos, por lo que dicha acción no se puede evaluar de manera independiente (Astier-Calderón et al., 2002).

Se consideró que los CPs que tuvieron los valores propios más altos representaron mejor los atributos del sistema. Por lo tanto, sólo se examinaron los CPs con valor propio ≥ 1 (Bredja et al., 2000). La evaluación de la significancia estadística de los vectores propios de cada CP se hizo de acuerdo con el método

propuesto por Jackson (1991). Los valores de correlación $\geq 70\%$ se consideraron significativos. El software utilizado fue SAS (v. 8.01, SAS Institute, 1990).

Obtención de índices de calidad del suelo

El procedimiento para indexar los indicadores de calidad del suelo involucra tres etapas de acuerdo con Karlen et al. (2003):

Etapa 1: Consiste en seleccionar los indicadores de calidad del suelo apropiados para evaluar de manera eficaz y eficiente las funciones del suelo (p.e. regular el flujo de agua, suministrar nutrimentos a las plantas, sostener la productividad de los cultivos) de acuerdo con el objetivo específico para el cual se desee evaluar la calidad del suelo.

Masto et al. (2007) propusieron los indicadores que se muestran en el Cuadro 11, para evaluar 6 funciones del suelo.

Cuadro 11. Indicadores para evaluar cada una de las funciones del suelo (Masto et al., 2007).

Indicadores	Función del suelo
Porosidad (0-7.5 cm)	Regular el flujo del agua
Carbono orgánico (0-7.5 cm)	
Máxima capacidad de retención de agua (0-15 cm)	Facilitar el movimiento y almacenamiento del agua
Porosidad (0-15 cm)	
Carbono orgánico (0-15 cm)	
Carbono orgánico (0-7.5 cm)	Resistir la degradación de la capa superficial
Arcillas (0-15 cm)	
Carbono de la biomasa microbiana (0-7.5 cm)	
Actividad deshidrogenasa (0-7.5 cm)	
Carbono de la biomasa microbiana (0-15 cm)	Resistir la degradación bioquímica
Actividad deshidrogenasa (0-15 cm)	
Respiración del suelo (0-15 cm)	
Actividad fosfatasa (0-15 cm)	
Carbono orgánico (0-15 cm)	
Capacidad de intercambio catiónico (0-15 cm)	Suministrar nutrimentos a las plantas
Carbono orgánico (0-15 cm)	
Nitrógeno total (0-15 cm)	
Capacidad de fijación de fósforo (0-15 cm)	
Capacidad de fijación de potasio (0-15 cm)	
Nitrógeno disponible (0-15 cm)	
Fósforo disponible (0-15 cm)	
Potasio disponible (0-15 cm)	
Azufre disponible (0-15 cm)	
Zinc disponible (0-15 cm)	
Carbono de la biomasa microbiana (0-15 cm)	
Respiración del suelo (0-15 cm)	
N disponible (0-15 cm)	Sostener la productividad de los cultivos
Carbono orgánico (0-15 cm)	
Capacidad de fijación de fósforo (0-15 cm)	
Capacidad de fijación de potasio (0-15 cm)	
Actividad deshidrogenasa (0-15 cm)	

Etapa 2: En esta etapa se asigna una calificación a la relación entre el indicador y la función del suelo que evalúa (VIS, valor de la relación entre el indicador y la función del suelo) (Karlen et al., 2003). La asignación de esta calificación depende de la función para la cual el valor del indicador se considere bueno o malo con respecto a la sustentabilidad agrícola (Liebig et al., 2001).

Esta etapa requiere del planteamiento de supuestos con respecto al impacto de un indicador sobre la función del agroecosistema. Por ejemplo, Liebig et al. (2001) consideraron que (i) un elevado contenido de CO representa una pérdida reducida de CO del suelo hacia la atmósfera, (ii) un alto rendimiento de grano y de N mejoran la sustentabilidad agrícola.

Liebig et al. (2001) utilizaron un enfoque simple y directo para calificar cada uno de los indicadores de sustentabilidad agrícola. La calificación que asignaron a cada indicador la obtuvieron de su diferencia relativa con respecto a su valor óptimo. Estos autores dieron una calificación de 1.0 al tratamiento más alto y los tratamientos restantes fueron calificados con base en su porcentaje relativo con relación al tratamiento más alto. Por ejemplo, si el tratamiento A mostró el rendimiento más alto (4.0 Mg ha^{-1}) con relación al tratamiento B (3.0 Mg ha^{-1}) y al tratamiento C (2.0 Mg ha^{-1}), suponiendo que el rendimiento más alto mejora la función del agroecosistema para producir alimentos y por ende, la sustentabilidad agrícola, los tratamientos A, B y C fueron calificados como 1.0, 0.75 ($3.0/4.0$) y, 0.50 ($2.0/4.0$).

Cuando los tratamientos son ordenados de manera descendiente, los valores del tratamiento más alto estarán en el denominador. En cambio, cuando los tratamientos son ordenados de manera ascendiente (donde el valor más bajo es más óptimo)

serán calificados con el valor más bajo en el numerador. En casos en los que sea posible conocer el valor crítico de un indicador, los tratamientos se calificarán con el valor crítico ya sea en el numerador o en el denominador dependiendo si los valores del tratamiento están por arriba o abajo de ese valor. Cuando se emplee este enfoque de calificación para los indicadores es posible asignar una calificación a un indicador para el cual no se conozca su valor crítico (Liebig et al., 2001). Esto implica una ventaja para el análisis, siempre y cuando se conozca bien el comportamiento de cada variable respecto a la evolución o degradación del suelo.

En esta etapa también se define la forma que seguirá la relación entre el indicador y la función del suelo que evalúa, que con frecuencia puede ser semejante a una distribución normal, a una asíntota superior o a una asíntota inferior (Andrews et al., 2002). Estos mismos autores determinaron la forma de la relación entre el indicador y la función del suelo que evalúa mediante un consenso entre los investigadores involucrados y los valores reportados en la literatura que cuantificaban la relación entre el indicador y la función del suelo. Por ejemplo, ellos utilizaron asíntotas superiores cuando un alto contenido de MO y de agregados estables en agua (AEA) en el suelo es mejor, debido a la función que estos indicadores tienen en la fertilidad del suelo, en regular y distribuir el flujo del agua y en la estabilidad estructural. En cambio, usaron una asíntota inferior cuando un valor bajo de DA del suelo es mejor, debido a que un valor alto de DA inhibe el desarrollo radical y la porosidad del suelo (Soil Survey Staff, 1998). En la Fig. 6 se muestran algunos ejemplos de las calificaciones indicador-función del suelo.

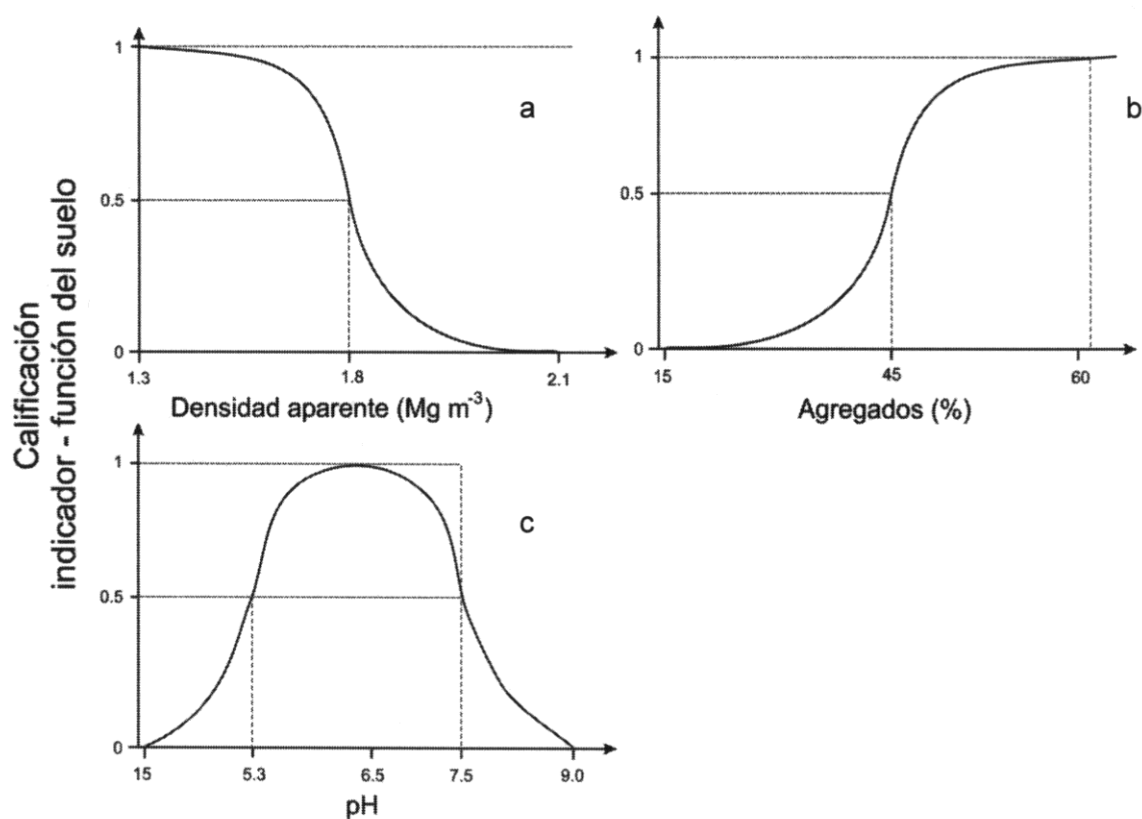


Figura 6. Ejemplos de las calificaciones indicador-función del suelo. Se muestran tres situaciones: a) cuando un valor bajo del indicador es mejor; b) cuando un nivel alto del indicador es mejor; c) nivel óptimo del indicador (Tomado de Seybold et al., 1997).

Etapa 3: Consiste en valorar las funciones del suelo de interés, dependiendo del objetivo para el cual se haga la evaluación de la calidad. La valoración de cada una de las funciones del suelo (VFS, valor de la función del suelo) está determinada por la suma de la calificación de cada uno de los indicadores relacionados con esa función. En esta etapa los indicadores físicos, químicos y biológicos de la calidad del suelo con unidades de medida totalmente diferentes se pueden combinar [p.e.

cantidad de lombrices por ha^{-1} , pH (adimensional), y DA ($g\ cm^{-3}$)] (Karlen et al., 2003).

Las tres fases involucradas en la obtención de un índice de calidad del suelo se presentan de manera esquemática de acuerdo con Karlen et al. (2003) en la Fig. 7.

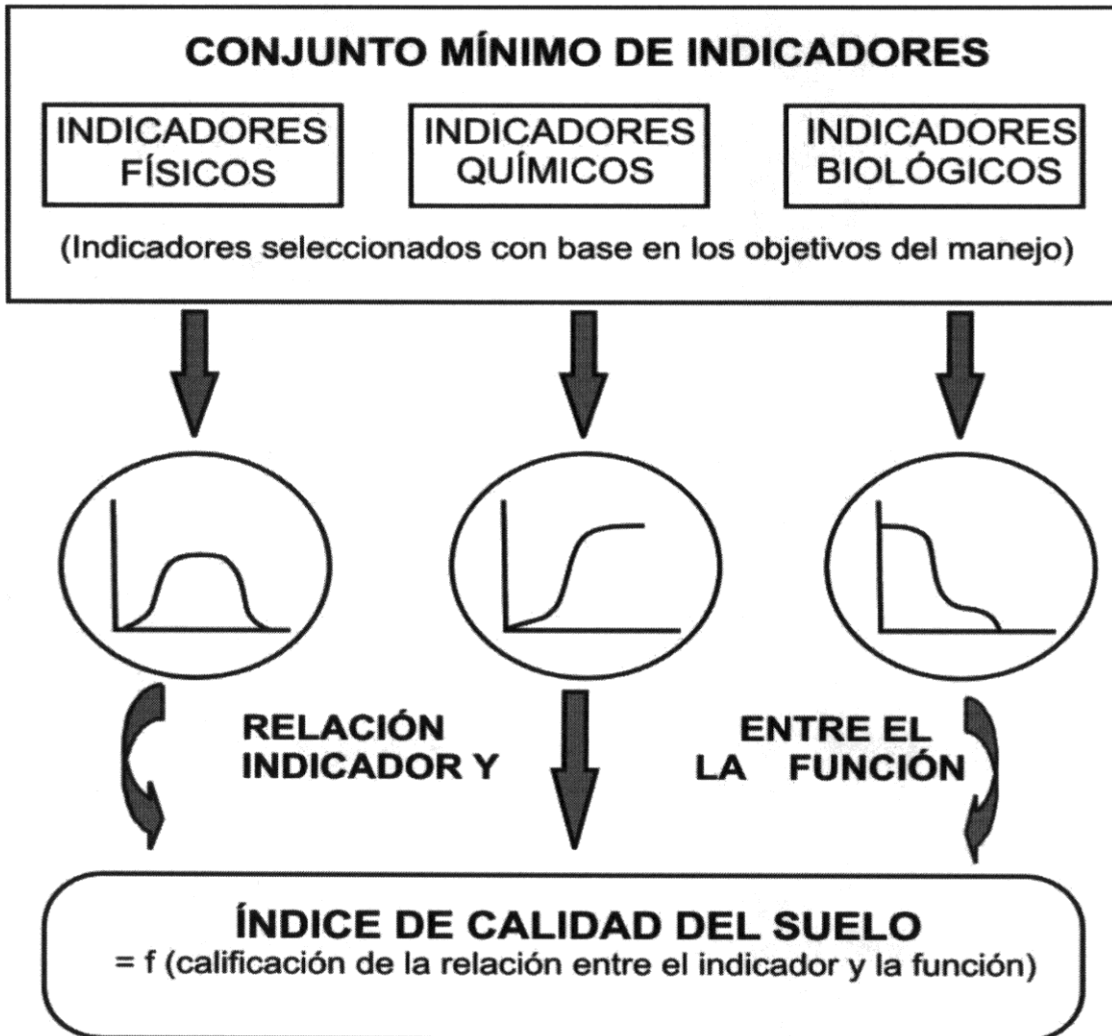


Figura 7. Modelo conceptual para integrar un conjunto mínimo de indicadores en un valor de índice de calidad del suelo (Andrews, 1998 citado por Karlen et al., 2003).

Los índices de calidad del suelo se obtuvieron bajo dos condiciones:

Condición 1. Los indicadores seleccionados se utilizaron para comparar un sistema de referencia con los sistemas agrícolas. El suelo de referencia fue el sistema bajo vegetación natural (SBC), el cual se considera que no ha sufrido perturbación significativa. A los indicadores químicos y bioquímicos de este sistema se les asignó una calidad de 100% y se compararon, en términos relativos, con los valores de los indicadores en los sistemas agrícolas. El índice se calculó sumando los valores relativos de los indicadores involucrados, aplicando la metodología propuesta por Astier-Calderón et al. (2002) para evaluar la sustentabilidad de la producción agropecuaria. Se partió de las siguientes suposiciones, que no necesariamente son ciertas:

1. Los sitios muestreados originalmente tenían características parecidas.
2. La variación observada es debida al manejo del suelo durante el cultivo.
3. Los métodos de análisis incluyen la variación analítica en el promedio obtenido.
4. El método de muestreo es el adecuado a las condiciones, el número de muestras es representativo de la heterogeneidad natural del suelo y no está afectado por la variación topográfica.
5. No ha habido factores de variación importantes en la historia del cultivo.

Condición 2. Se compararon únicamente los sistemas agrícolas. Para cada sitio y su sistema de labranza asociado, el índice de calidad del suelo se obtuvo de acuerdo con el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001) y Karlen et al. (2003) mediante las ecuaciones 1 y 2 propuestas por Mastro et al. (2007).

$$ICS = \frac{\sum VFS}{n} \quad [1]$$

Donde ICS es el índice de calidad del suelo, VFS es valor asignado a cada una de las funciones del suelo que se evalúan y n es el número de funciones del suelo seleccionadas.

$$VFS = \frac{\sum VIS}{n} \quad [2]$$

Donde VIS es la calificación de la relación entre el indicador y la función del suelo que evalúa y n es el número de indicadores seleccionados para cada una de las funciones del suelo a evaluar.

El valor del índice de calidad del suelo en los sitios de estudio se comparó con la prueba de Tukey.

Resultados y Discusión

Selección de las propiedades del suelo como indicadores de calidad

Con base en los resultados del ACP (Cuadro 12) solamente se interpretaron los primeros dos CPs porque fueron los únicos que tuvieron un valor propio ≥ 1 y explicaron 71% de la varianza total.

Cuadro 12. Resultados del análisis de componentes principales a partir de 10 variables físicas, químicas y biológicas del suelo, muestreadas a 0-20 cm de profundidad en parcelas con selva baja caducifolia y en plantaciones de *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

Componentes principales	1	2	3
Valor propio	4.02	2.43	0.82
Porcentaje	44.74	27.06	9.18
Porcentaje acumulativo	44.74	71.79	80.98
Vectores propios			
pH	<u>0.4264 (0.8557^{**})</u>	-0.2715 (-0.4237)	0.1547 (0.1406)
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	<u>-0.4396 (-0.8821^{***})</u>	0.1715 (0.2676)	0.1709 (0.1554)
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	0.3393 (0.6808)	0.2793 (0.4358)	0.2829 (0.2572)
Nitrógeno disponible (mg kg ⁻¹)	-0.3348 (-0.6719)	-0.0144 (-0.0225)	0.6025 (0.5477)
Na ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	-0.3322 (-0.4320)	0.3532 (0.2375)	0.2162 (0.1584)
K ⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	0.1749 (0.3509)	<u>0.4800 (0.7490[*])</u>	0.5299 (0.4817)
Mg ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	<u>0.3601 (0.7226[*])</u>	0.3465 (0.5407)	-0.2210 (-0.2009)
Ca ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	0.0015 (0.0030)	<u>0.5622 (0.8773^{***})</u>	-0.1504 (-0.1367)
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.3040 (0.6100)	0.3898 (-0.6083)	0.3868 (0.3517)
CBM (μg g ⁻¹)	<u>-0.3806 (-0.7637[*])</u>	0.0013 (-0.0020)	0.0408 (0.0371)

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.001$; *** $P \leq 0.0001$. Las variables originales y sus vectores propios subrayados se utilizaron para interpretar el componente principal. Las variables originales y sus vectores propios en cursivas y subrayados dentro del componente principal 1 corresponden a las propiedades del suelo que se incluyeron en el conjunto mínimo de indicadores. CBM, carbono de la biomasa microbiana.

Los vectores propios más altos del primer CP (44% de la varianza total) incluyeron, en orden descendente, CO, pH, CBM y Mg^{2+} intercambiable. El segundo CP (27% de la varianza total) incluyó Ca^{2+} y K^+ intercambiables. El primer CP fue el que mejor separó los sitios topográficos asociados a diferentes sistemas de labranza. Se diferenciaron claramente cuatro grupos, de acuerdo al primer CP: (a) suelos de valle con TM, (b) suelos de lomerío con TA, (c) suelos de montaña con LM y (d) suelos de SBC sin labranza (Fig. 8).

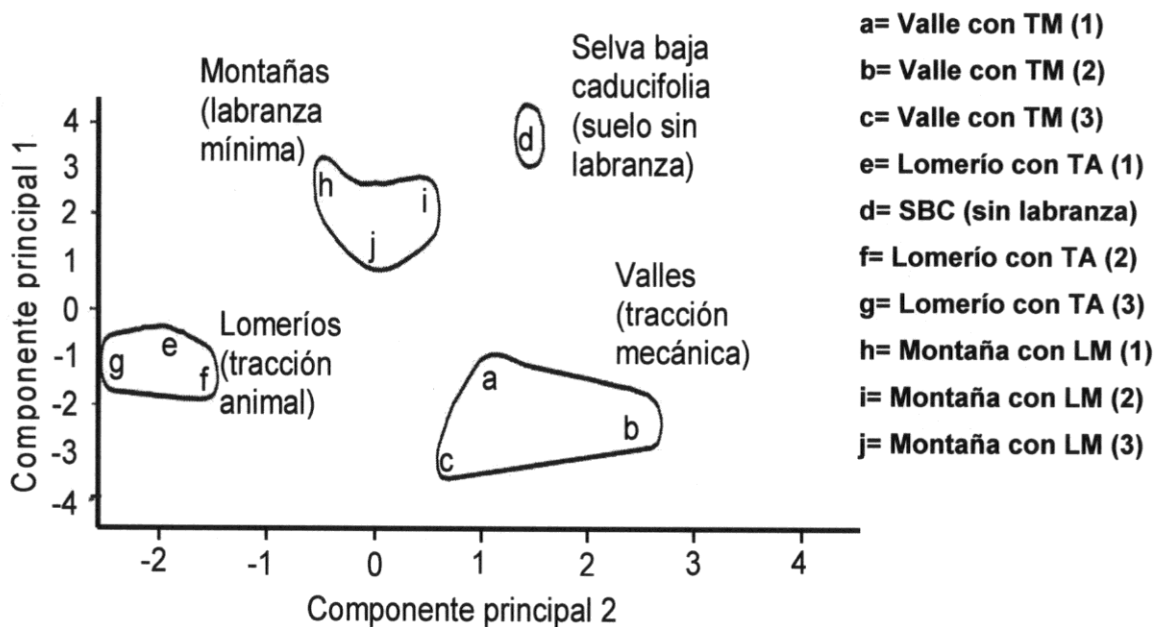


Figura 8. Diagrama de los componentes principales 1 y 2. El valor entre paréntesis indica la clase de edad de las plantas de agave: clase 1 (1.5-3.5 años), clase 2 (3.6-5.5 años) y clase 3 (5.6-7.5 años). LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica; SBC, selva baja caducifolia.

El valor del primer CP fue mayor en suelos de SBC y en suelos de montaña (LM). Esto probablemente se deba a que los suelos de SBC y los suelos de montaña (LM) sufren un disturbio menor, comparado con los suelos de lomerío (TA) y los suelos de valle (TM). Como consecuencia, la oxidación de la MO (tallos, hojas, etc.) y la tasa de descomposición de los residuos es baja (Reicosky et al., 1995), lo que ofrece una mayor disponibilidad de sustrato para la biomasa microbiana. Los resultados sugieren que los principales cambios en las propiedades edáficas de los tres sitios y el manejo asociado a ellos están relacionados con el CP1.

El CP1 y sus parámetros químicos y bioquímicos (CO, pH, CBM y Mg^{2+} intercambiable) asociados (Cuadro 12) se pueden utilizar como indicadores para evaluar la calidad del suelo porque: (i) reflejan los procesos del ecosistema, tales como la actividad biológica, (ii) integran propiedades químicas y biológicas del suelo; (iii) son accesibles a muchos usuarios; (iv) son aplicables a condiciones de campo; y, (v) son sensibles a variaciones en el manejo del suelo (Doran y Parkin, 1994).

El segundo CP mostró diferencias entre los sitios en propiedades del suelo aparentemente poco relacionadas al sistema de labranza (Fig. 8). En particular, el segundo CP sugiere que el suelo de SBC posee el contenido más alto de Mg^{2+} intercambiable ($2.4 \pm 0.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), seguido por el suelo de valle utilizado bajo TM ($2.0 \pm 0.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), el suelo de montaña con LM ($1.2 \pm 0.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y el suelo de lomerío con TA ($0.7 \pm 0.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

El CO tuvo el vector propio más alto dentro del primer CP (Cuadro 12), por lo que este indicador fue el más sensible en separar los sitios de estudio y los sistemas de labranza asociados a cada uno. La MO se ha considerado un importante indicador de

la calidad del suelo y de la sustentabilidad agrícola por ser un reservorio y fuente de nutrimentos, por mejorar las propiedades físicas y químicas, y promover la actividad biológica del suelo (Doran y Parkin, 1994; Gregorich et al., 1994). Similarmente, Bredja et al. (2000) y Sparling y Schipper (2002) mediante ACP encontraron que el CO y el N total contribuyeron de manera importante a separar los suelos de los sitios que ellos estudiaron.

El CBM también resultó ser un importante indicador de la calidad del suelo en los sistemas de estudio. La actividad de la biomasa microbiana refleja las funciones del agrosistema asociadas con el ciclo de nutrimentos, fertilidad del suelo, cambio global del C y, tasa de retorno de la MO al suelo (Horwath y Paul, 1994). La biomasa microbiana es fundamental para mantener las funciones del suelo, ya que ésta representa la principal fuente de enzimas que regulan los procesos de transformación de elementos biogeoquímicos en el suelo, de degradación de residuos y aporte de proteínas, vitaminas, aminoácidos y sustancias solubilizadoras de nutrimentos como el fósforo. También controla la síntesis y degradación de MO, la descomposición de los residuos orgánicos, y es un indicador temprano de los cambios en el suelo originados por el manejo, contaminación con metales pesados, hidrocarburos, plaguicidas y prácticas de fertilización (Landgraf y Klose, 2002).

Si se considera la función clave de la biomasa microbiana en el funcionamiento adecuado del suelo, se puede entender su amplio uso como indicador de la calidad edáfica (Gil-Sotres et al., 2005). De hecho, de acuerdo con estos autores cuando se estima la calidad del suelo utilizando propiedades individuales, 40% de los artículos publicados que ellos consultaron usaron algún parámetro bioquímico general como el

CBM, la actividad deshidrogenasa, la respiración del suelo, la capacidad de mineralización del N o el contenido de ATP. Entre los parámetros bioquímicos generales, el CBM se considera el más confiable (41% de autores). Sin embargo, resultados obtenidos por diversos autores muestran resultados contradictorios. El CBM se incrementó con la intensidad del pastoreo en suelos de pradera (Holt, 1997; Banerjee et al., 2000) y con la rotación cereal-pastizal (Dalal, 1998), disminuyó cuando el suelo se cultivó (Caldwell et al., 1999), y el efecto de la cero labranza no fue claro (Dalal, 1998).

El CO y el CBM ya se han incluido como los principales indicadores en la mayoría de los índices de calidad del suelo propuestos por diversos autores (e.g. Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994; Sharma et al., 2005). En este estudio, el Mg^{2+} intercambiable resultó ser uno de los indicadores importantes, lo cual se puede deber al hecho de que se examinaron suelos intensivamente cultivados con *A. angustifolia* durante un largo período, donde cantidades significativas de Mg^{2+} intercambiable pudieron haber sido liberadas de las reservas naturales del suelo en respuesta a la demanda del cultivo. A pesar de ello, la inclusión de Mg^{2+} como indicador de la calidad del suelo en los sitios estudiados se debe tomar con reserva, pues hay que descartar que la variación observada en el Mg^{2+} se deba a la diferente composición mineralógica de los suelos estudiados. Los trabajos de Pennock y Kessel (1997) y Vergara-Sánchez (2003) ya han reportado al Mg^{2+} intercambiable como indicador de la calidad del suelo en agroecosistemas forestales.

Integración de los indicadores seleccionados en índices de calidad del suelo

Condición uno

Los valores del índice se ubicaron entre 231.4 que correspondió al suelo de lomerío (TA) y 400.0 en el suelo de referencia (SBC) (Cuadro 13). El índice de calidad de suelo calculado para los sistemas agrícolas disminuyó en el siguiente orden: suelo de montaña (LM) > suelo de valle (TM) > suelo de lomerío (TA). El suelo de referencia (SBC) tuvo el porcentaje relativo más alto de CBM, seguido por el suelo de montaña (LM), suelo de lomerío (TA) y suelo de valle (TM) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Valores medios y porcentajes relativos de los indicadores empleados para obtener un índice de calidad en suelos bajo tres condiciones topográficas cultivados con *Agave angustifolia* Haw. manejados con tres sistemas de labranza en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México, cuando se utiliza un sistema de referencia.

Indicador	Valle (TM)	Lomerío (TA)	Montaña (LM)	SBC (sin labranza)
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	12.5 (37.9)	12.0 (36.4)	23.9 (72.4)	33.0 (100.0)
pH	8.1 (115.7)	8.2 (117.1)	7.5 (107.1)	7.0 (100.0)
Carbono de la biomasa microbiana (µg g ⁻¹)	433.8 (35.4)	598.0 (48.9)	969.6 (79.3)	1222.3 (100.0)
Mg ²⁺ intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	2 (83.3)	0.7 (29.2)	1.2 (50.0)	2.4 (100.0)
Valor del índice	272.4	231.4	308.8	400.0

El valor entre paréntesis indica el porcentaje relativo de cada indicador. LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica; SBC, selva baja caducifolia.

En los sistemas agrícolas los porcentajes relativos de pH fueron más altos que en el sistema de referencia (SBC) (Cuadro 13). Los suelos de lomerío con TA tuvieron valores similares de pH (8.2±0.13) a aquellos de valle con TM (8.1±0.07); en

contraste, los suelos de montaña con LM (7.5 ± 0.05) y los suelos de SBC (7.0 ± 0.06) mostraron los valores más bajos de pH. Motta et al. (2002) reportaron que el pH es susceptible al efecto de sitio y sistemas de labranza. La conversión de SBC a plantaciones de agave elevó el pH del suelo, posiblemente debido al efecto inicial de encalado por incorporación de las cenizas de la biomasa vegetal incinerada durante el proceso de roza-tumba-quema (Asio et al., 1998).

Aunque en el suelo de valle (TM) los porcentajes relativos de Mg^{2+} intercambiable fueron más altos, estuvieron lejos del porcentaje relativo del suelo de referencia (SBC) (Cuadro 13). En el suelo de montaña (LM) este indicador presentó 50% del porcentaje relativo del suelo de referencia. Incluso, en el suelo de lomerío (TA), no presentó ni la tercera parte del porcentaje relativo del suelo de referencia.

La degradación en la calidad del suelo asociada a la conversión de la vegetación primaria o secundaria a agroecosistemas se debe principalmente a la disminución en el contenido de MO (Smith et al., 2000). Al respecto, autores como Feller y Beare (1997), Motavalli et al. (2000) y McDonald et al. (2002) reportaron pérdidas de MO mayores al 24% y 60% en un periodo menor a 1-5 años posterior al cambio de uso del suelo. Los resultados obtenidos en este estudio se contraponen a lo reportado en la literatura, ya que los suelos estudiados a pesar de estar sometidos durante un periodo aproximado de 20-30 años al cultivo con agave después de la conversión de SBC a campos agrícolas poseen un contenido moderado de CO, en particular, los suelos de montaña (LM) (Cuadros 8 y 9). Estos suelos con pendientes máximas del orden de 70% tuvieron el contenido más alto de CO (Cuadros 8 y 9) y presentan una pérdida aproximada de 27% de CO con respecto al suelo de SBC, el cual tuvo un

contenido de CO de 33.0 g kg^{-1} (Cuadro 13). Este resultado sugiere que la adecuada selección de las prácticas de labranza condicionada por la diferente topografía del área de estudio (planicie, lomerío y montaña) ha sido un manejo adecuado por parte de los agricultores. Por ello, la conversión de selva baja caducifolia a plantaciones de agave y el cultivo de esta especie durante aproximadamente 20-30 años en sitios con pendientes pronunciadas no ha representado una degradación en la fertilidad y calidad del suelo, por lo tanto, se rechazó la hipótesis planteada. Es probable, que junto con la adecuada selección del sistema de labranza, otros factores, como el tipo de cultivo, de clima y de suelo interactúen de manera importante en el mantenimiento de la fertilidad y calidad de este recurso natural. A largo plazo, la labranza de conservación puede mantener o incrementar el CO del suelo cuando se acopla con sistemas intensivos de cultivo (Reeves, 1997). A nivel mundial, los agricultores de pequeñas parcelas han cultivado agroecosistemas sustentables con base en el conocimiento que han acumulado a través de prácticas locales (Pulido y Bocco, 2003).

Condición dos

En este estudio las funciones del suelo que se evaluaron se seleccionaron de las propuestas por Masto et al. (2007) (Cuadro 11). Las funciones del suelo seleccionadas así como los indicadores asociados a cada una de ellas se presentan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Funciones del suelo y sus indicadores asociados utilizadas para proponer un índice de calidad del suelo en plantaciones de *Agave angustifolia* Haw.

Indicador	Función del suelo
Carbono orgánico	Regular el flujo de agua
Carbono orgánico	Resistir la degradación de la capa superficial
Carbono de la biomasa microbiana	
Carbono orgánico	Suministrar nutrimentos a las plantas
Carbono de la biomasa microbiana	
Mg ²⁺ intercambiable	
pH	
Carbono orgánico	Sostener la productividad de los cultivos
Mg ²⁺ intercambiable	
pH	

De manera análoga a lo propuesto por Andrews et al. (2002) y Karlen et al. (2003) y aplicando el enfoque de Liebig et al. (2001) se calificó la relación entre el indicador y la función del suelo que se evaluó (Fig. 9). También se consideró la literatura sobre calidad del suelo consultada para establecer en qué caso el valor del indicador se considera bueno o malo con respecto a la sustentabilidad agrícola. De esta manera, con base en la influencia que el CO y el CBM ejercen sobre la fertilidad del suelo, la estabilidad estructural y el ciclo de nutrimentos (Tiessen et al., 1994; Soil Survey Staff, 1998) se asumió que un contenido alto de CO es mejor (Rao, 1995); también un alto contenido de CBM es mejor (Masto et al., 2007). Para el pH es recomendable un valor de 7.0 (Jones y Wolf, 1984) debido a su influencia sobre la disponibilidad de nutrimentos (Andrews et al., 2002). Con base en estos criterios, el valor óptimo, el límite superior y el límite inferior para el CO, CBM y pH se obtuvo del suelo de Soledad (LM) porque en este sitio se encontraron los valores más altos para estos

indicadores y el valor de pH estuvo más cercano a la neutralidad (Cuadro 8). Para el Mg^{2+} intercambiable se consideró un valor crítico de $3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Etchevers-Barra et al., 1971). El valor óptimo, el límite superior y el límite inferior para este indicador se tomó del suelo de Tlacolula (TM) porque este suelo presentó la concentración media más alta de Mg^{2+} intercambiable, la cual está mas cercana al valor crítico de 3 (Cuadro 8). En el Cuadro 15 se muestran los indicadores de calidad del suelo, su valor óptimo y su límite inferior y superior.

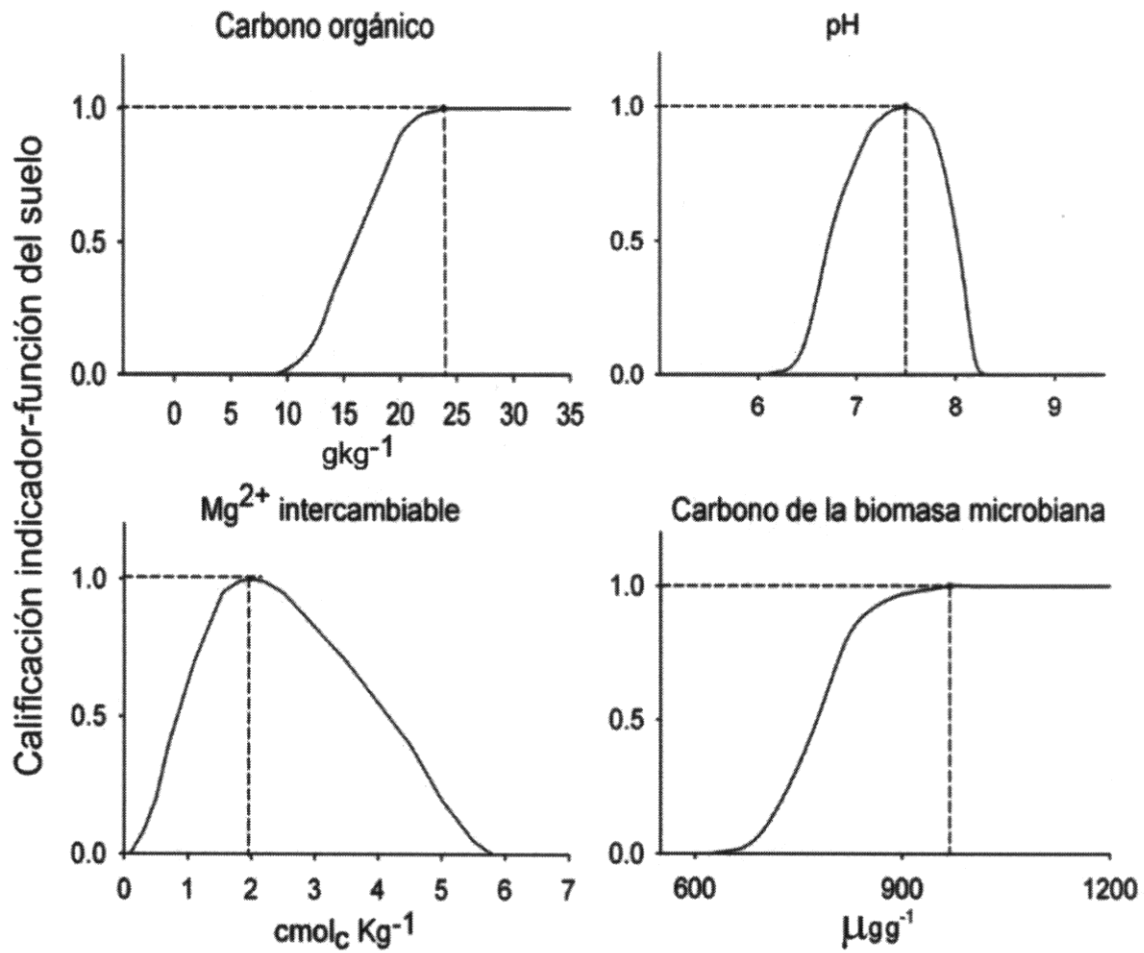


Figura 9. Calificación asignada a la relación indicador-función del suelo con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001), Andrews et al. (2002) y Karlen et al. (2003).

Cuadro 15. Valor óptimo, límite superior e inferior de los indicadores de calidad del suelo seleccionados en plantaciones de *Agave angustifolia* Haw. en el Distrito de Tlacolula, Oaxaca, México.

Indicador		Valor óptimo	Límite inferior	Límite superior
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	Un contenido alto es mejor	23.9	10.7	35.2
pH	Cercano a la neutralidad es mejor	7.5	6.2	8.1
Carbono de la biomasa microbiana (μg g ⁻¹)	Un contenido alto es mejor	969.6	809.6	1122.4
Mg intercambiable (cmol _c kg ⁻¹)	---	2.0	0.1	5.8

Los análisis de suelo se emplean para estimar la disponibilidad nutrimental de un elemento en particular (Westerman, 1990). Para la adecuada interpretación de estos análisis es preciso contar con calibraciones, que se obtienen a través de la ejecución de costosos y complejos experimentos de campo específicos para cada sistema de cultivo y en los que se establece la relación entre rendimiento económico y disponibilidad de nutrimentos, los cuáles han sido escasamente realizados en México (Etchevers-Barra, 1999). Las calibraciones, en sentido estricto, se deberían hacer para cada cultivo y tipo de suelo. A menudo se recurre al empleo de valores que se han generado en otras zonas y aún para otros cultivos (extrapolación), pero la precisión que se alcanza con este procedimiento es mucho más baja que la que se obtiene con las calibraciones locales (Etchevers-Barra, 1999). Como una forma aproximada de resolver la falta de datos de calibraciones, la obtención de indicadores de calidad del suelo puede ser una opción que permita al extensionista o

al productor aplicar dosis de fertilización adecuadas a las características edáficas, tipo de asociación de cultivos e intensidad de densidad de siembra del cultivo principal, especialmente para suelos sin análisis previos. En las regiones agrícolas como la del agave en Oaxaca, la generación de indicadores de calidad puede ser una opción para orientar al productor o a los técnicos de campo en materia de tipo y dosis de fertilización. Los valores reportados en el Cuadro 15 se podrían sugerir como los intervalos adecuados o suficientes de estos nutrimentos en el suelo para poder mantener una productividad sustentable de *A. angustifolia*, esto, si se consideran los criterios mencionados anteriormente y establecidos por Etchevers-Barra et al. (1971); Jones y Wolf (1984); Rao (1995) y Masto et al. (2007). Aunque, estos valores se deberían tomar con cautela, ya que lo más conveniente es obtener calibraciones para cada cultivo y tipo de suelo (Etchevers-Barra, 1999). En este contexto se debe tomar en cuenta que *A. angustifolia* es una especie calcícola, que se desarrolla bien en suelos con un pH alcalino, cantidades moderadas de (MO) (Fundación Produce Oaxaca, 2007) con altas concentraciones de N, P, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺, elementos que son determinantes para obtener plantas con alto contenido de sacarosa (Secretaría de Economía, 2003; Campo Experimental Sur de Sinaloa, 2004).

Para este estudio no fue posible obtener datos de producción de *A. angustifolia* en cada uno de los sitios estudiados y la literatura a este respecto es muy limitada. La única información que se logró localizar fue la reportada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2007) con una producción de *A. angustifolia* de 7,011 toneladas para el municipio de San Pedro Quiatoni (al cual pertenece la

comunidad de Soledad Salinas) y de 6,264 toneladas para el municipio de Tlacolula. De acuerdo con estos datos hubo una mayor producción de *A. angustifolia* en las zonas de montaña con LM (Soledad) con relación a los suelos de valle con TM (Tlacolula). Este hecho junto con los resultados derivados de este estudio parecen poner de manifiesto que la fertilidad y la calidad del suelo en los suelos de montaña no se han degradado a pesar de las altas pendientes de los sitios.

El manejo del suelo para el cultivo de *A. sisalana* difiere del involucrado en el cultivo de *A. angustifolia*. Las fibras que se utilizan como materia prima en la industria del cordaje (Hartemink y Wienk, 1995) se obtienen de las hojas de *A. sisalana*, por lo que no hay restitución de nutrimentos al suelo a través de materiales orgánicos provenientes de las hojas. En cambio, la parte que se utiliza de *A. angustifolia* es la base o "piña", lo que permite que las hojas se depositen en el terreno después de la cosecha y, de esta manera, junto con las vinazas de la destilería que comúnmente son incorporadas al suelo, poder restituir parcialmente los nutrimentos absorbidos por la planta de agave.

Hartemink y Van Kekem (1994) estudiaron la disminución de la fertilidad en Ferralsoles cultivados con *A. sisalana* en Tanzania y encontraron que este agave requiere grandes cantidades de nutrimentos, especialmente de N, Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺. En el Cuadro 16 se muestra la cantidad de cada uno de estos nutrimentos removidos por las hojas *A. sisalana* durante el tercer ciclo de cultivo, los cuales permitieron obtener un rendimiento total de fibra de 11 ton ha⁻¹ (Hartemink y Van Kekem, 1994).

Cuadro 16. Remoción de nutrimentos del suelo por las hojas de *Agave sisalana* en el tercer ciclo de cultivo (tomado de Hartemink y Van Kekem, 1994).

Nutrimento	(kg ha ⁻¹)
N	258.5
P	38.5
K ⁺	385
Ca ²⁺	891
Mg ²⁺	330

Si se considera como marco de referencia la cantidad de nutrimentos removidos por las hojas de *A. sisalana* para obtener un rendimiento de fibra de 11 ton ha⁻¹ y se tienen en cuenta los siguientes factores, tal vez se pueda sugerir un diagnóstico de la fertilidad de los suelos estudiados, el cual se deberá tomar con mucha precaución:

1. los requerimientos nutrimentales de *A. sisalana* son específicos para esta especie y pueden variar en el caso de *A. angustifolia*.
2. el tipo de suelo donde se desarrolla *A. sisalana* es diferente (Ferralsoles; Hartemink y Van Kekem, 1994) al de la zona de estudio (Regosoles y Leptosoles).
3. la calidad inherente del suelo es distinta debido a sus factores de formación (clima, material parental, biota, relieve, tiempo).
4. el manejo del suelo involucrado en el cultivo de una u otra especie no es el mismo.
5. *Agave angustifolia* es una especie nativa de Oaxaca, pero *A. sisalana* no es una especie nativa de Tanzania, por lo que pudo haber desarrollado mecanismos de adaptación para poder crecer y producir en esos ambientes.

La cantidad de nutrimentos disponibles para las plantas de *A. angustifolia* en el suelo de la zona de estudio se presenta en el Cuadro 17. De manera general, y con base en los valores mostrados en el Cuadro 16, es posible que la cantidad de N, P, K⁺ y Ca²⁺ disponible en los suelos de los tres sitios (Tlacolula, San Baltazar y Soledad) sea suficiente para mantener una producción aceptable de este agave. El nutrimento que requiere restitución inmediata es el Mg²⁺, el suelo de San Baltazar presentó la concentración más baja de este nutrimento (Cuadro 17), lo cual se reflejó claramente en la baja calificación obtenida por el indicador en este sistema con relación a los otros dos (Cuadro 18). Por lo tanto, sería conveniente mantener o incrementar los reservorios naturales del suelo mediante la adición conjunta de enmiendas minerales y orgánicas que aporten principalmente Mg²⁺.

Cuadro 17. Nutrimentos disponibles para las plantas de *Agave angustifolia* en los suelos de los tres sitios (Tlacolula, San Baltazar, Soledad) al momento del estudio.

Nutrimento (Ton ha ⁻¹)	Tlacolula (TM)	San Baltazar (TA)	Soledad (LM)
N	50.44	65.28	92.40
P	9.36	6.40	7.60
K	26.22	10.00	26.27
Ca ²⁺	33.90	50.30	46.40
Mg ²⁺	1.26	0.54	1.16

LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica.

Larson y Pierce (1991) hacen la analogía entre la medición de la salud y la calidad de los suelos y un examen médico para los seres humanos. Los médicos hacen uso de indicadores básicos del funcionamiento del organismo: la temperatura, la presión sanguínea, el pulso y de algunos otros análisis. En contraste, en el caso de los suelos no se ha definido un grupo único de indicadores básicos de su calidad (Astier-Calderón et al., 1999). En este estudio, el ACP permitió seleccionar a partir de un conjunto inicial de 10 propiedades del suelo, sólo 4 de ellas como indicadores de la calidad del suelo en plantaciones de *A. angustifolia*, éstas fueron CO, pH, CBM y Mg^{2+} intercambiable debido a que tuvieron los vectores propios con el valor más alto dentro del CP1 y a su elevada correlación con este componente (Cuadro 12), además de que explicaron la mayor variabilidad entre los sistemas estudiados. Razones por las que se considera que determinando solamente estas 4 propiedades del suelo se puede conocer, de manera general, la fertilidad y la calidad del suelo en plantaciones de *A. angustifolia*, tomando en cuenta que estos indicadores describen los procesos que reflejan los cambios que ocurren en los suelos de este agroecosistema en particular (Soil Quality Institute, 1996).

En el Cuadro 18 se presenta la calificación asignada a cada indicador de calidad del suelo con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001).

Cuadro 18. Indicadores de calidad del suelo seleccionados para cada sitio de estudio y su respectiva calificación asignada con base en el enfoque propuesto por Liebig et al. (2001).

Indicador	Tlacolula (TM)	San Baltazar (TA)	Soledad (LM)
Carbono orgánico	0.5	0.5	1.0
pH	0.9	0.9	1.0
CBM	0.4	0.6	1.0
Mg ²⁺ intercambiable	1.0	0.4	0.6

LM, labranza mínima; TA, tracción animal; TM, tracción mecánica.

El valor del índice de calidad fue significativamente más alto en el suelo de Soledad (Cuadro 19), no hubo diferencia estadística entre el valor del índice en el suelo de San Baltazar (TA) y Tlacolula (TM). El valor del índice de calidad en el suelo de Soledad (LM) fue 0.31 y 0.38 puntos más que en el suelo de Tlacolula (TM) y en el suelo de San Baltazar (TA), respectivamente.

La interpretación de los valores *per se* no es fácil; por lo que no se debe dar por terminada la búsqueda de formas más adecuadas en la generación de índices para zonas con plantaciones de *A. angustifolia*. La integración de diversas propiedades químicas, físicas y biológicas, medidas en diferentes escalas, con diferentes dinámicas e interrelaciones complejas, es una tarea difícil, pero merece ser continuada. Otra importante consideración en el desarrollo de un índice de calidad es la variación temporal y espacial asociada al uso del suelo. La evaluación de la calidad del suelo se debe hacer a la escala y con los indicadores más apropiados para el objetivo para el cual se haga la evaluación (Karlen et al., 2001). Ninguna propiedad del suelo es permanente, por lo que su tasa y frecuencia de cambio varía ampliamente (Cuadro 2).

La calidad del suelo está dada por los procesos de formación del suelo, por lo tanto, cada suelo tiene una habilidad natural para funcionar. Esta habilidad inherente se puede definir por un conjunto de parámetros que reflejan el potencial ideal de un suelo para realizar una función específica (Karlen et al., 1997). En este sentido, es importante considerar que el índice de calidad propuesto en este trabajo se basó en resultados obtenidos para suelos de un clima semiárido bajo plantaciones de *A. angustifolia*, con un contenido moderado de CO en comparación con otros suelos, por lo que está específicamente diseñado para ser aplicado a este tipo de suelos y de cultivo. Tiene la limitante de que se basó en un solo muestreo, por lo que la variación temporal asociada al uso o intemperismo natural no se puede evaluar por ahora. Hay que considerar que muchas funciones del agroecosistema son mejor evaluadas a través de varios años (Liebig et al., 2001). También se debe contemplar

que la información respecto al tiempo de uso del suelo para el cultivo del agave se obtuvo directamente del conocimiento local con los productores, pero que no se respaldó con información científica.

El enfoque de Liebig et al. (2001) para integrar los indicadores de calidad en un índice proporciona a los usuarios la habilidad para evaluar sistemas de manejo en un contexto más amplio. Los agroecosistemas por su naturaleza, son sistemas altamente complejos, cuyas partes discretas y sus interacciones son difíciles de cuantificar. Por lo tanto, las mismas razones que hacen atractivo a este procedimiento de indexación también limitan su uso para caracterizaciones generales del funcionamiento del agroecosistema. La principal limitante se relaciona con la importancia que se da al aspecto ambiental de la sustentabilidad agrícola. La sustentabilidad agrícola, sin embargo, no sólo incluye la dimensión ambiental, sino también las dimensiones económica y la social (Harwood, 1990; Hünneimyer et al., 1997). Un índice ideal debería entonces integrar estas tres dimensiones. No obstante, la integración de ellas en un solo índice es una tarea complicada, debido a la complejidad de cada una (Sands y Podmore, 2000). Un enfoque más práctico para cuantificar el funcionamiento del agroecosistema hacia la sustentabilidad agrícola sería iniciar con una sola dimensión (como se hizo en este estudio) y entonces trabajar hacia la integración de las otras dos (Liebig et al., 2001).

Una desventaja más específica de este procedimiento de indexación se relaciona con la dificultad para determinar cuál o cuáles funciones del agroecosistema dirigen el funcionamiento de éste hacia la sustentabilidad. El uso de coeficientes numéricos para asignar una mayor o menor importancia a las funciones del agroecosistema así

como la selección de los indicadores clave en la evaluación se puede considerar arbitraria, a causa de los supuestos implicados en cada circunstancia. Estos supuestos se deben hacer con el mejor juicio profesional basados en información creíble. A pesar de sus limitaciones, el procedimiento de indexación tiene el potencial para evaluar de manera efectiva sistemas de manejo a través de las funciones del agroecosistema y proporciona a los usuarios una medición sencilla para evaluar la sustentabilidad agrícola (Liebig et al., 2001).

Es necesario llevar a cabo más estudios sobre los cambios en la calidad del suelo a largo plazo para tener una evaluación completa del impacto del manejo sobre las características del suelo, tal y como lo han sugerido Kennedy y Schillinger (2006).

Conclusiones

Este trabajo reveló que el carbono orgánico, pH, carbono de la biomasa microbiana y Mg^{2+} intercambiable se pueden utilizar como indicadores de calidad del suelo en las plantaciones de *Agave angustifolia* Haw. estudiadas. En los sistemas agrícolas, el suelo de montaña con labranza mínima tuvo el valor más alto del índice de calidad del suelo. A pesar de que el carbono orgánico fue el indicador más afectado por los sitios y el manejo del suelo asociado a ellos, la adecuada selección de las prácticas de labranza condicionada por la diferente topografía del área de estudio (planicie, lomerío y montaña) ha permitido que los sistemas estudiados conserven un contenido moderado de carbono orgánico, particularmente el suelo de montaña (labranza mínima), lo cual refleja un manejo adecuado por parte de los agricultores. Los resultados del presente estudio revelaron que la conversión de selva baja

caducifolia a plantaciones de agave y el cultivo de esta especie durante un periodo aproximado de 20-30 años en sitios con pendientes pronunciadas (70%) no ha representado una degradación en la fertilidad y calidad del suelo. Como una forma aproximada de resolver la falta de datos de calibraciones para la adecuada interpretación de un análisis de suelo, la obtención de indicadores de calidad puede ser una opción, especialmente para suelos sin análisis previos, como es el caso de los suelos cultivados con *A. angustifolia*. Valores de 23.9 g kg⁻¹ de carbono orgánico, 7.5 de pH, 2.0 cmol_c kg⁻¹ de Mg²⁺ intercambiable y 969.6 µg g⁻¹ de carbono de la biomasa microbiana se podrían sugerir como adecuados para mantener una productividad sustentable de *A. angustifolia*, aunque lo más conveniente sería obtener las calibraciones para este tipo de suelo y de cultivo. Es posible que la cantidad de N, P, K⁺ y Ca²⁺ disponible en los suelos de los tres sitios (Tlacolula, San Baltazar y Soledad) sea suficiente para mantener una producción aceptable de este agave. De acuerdo con el análisis de indicadores de calidad realizado en esta tesis, el nutrimento que requiere restitución inmediata es el Mg²⁺, el suelo de San Baltazar presentó la concentración más baja de este nutrimento. Por lo tanto, sería conveniente mantener o incrementar los reservorios naturales del suelo mediante la adición conjunta de enmiendas minerales y orgánicas que aporten principalmente Mg²⁺.

Referencias

- Andrews, S.S, Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, D.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., Munk, D.S., 2002. On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley. *Agron. J.* 94, 12-23.
- Andrews, S.S., Carroll, C.R., 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecol. Applic.* 11, 1573-1585.
- Arshad, M.A., Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro ecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 153-160.
- Asio, V.B., Jahn, R., Stahr, K., Margraf, J., 1998. Soils of the tropical forest of Leyte, Philippines. II: Impact of different land-uses on status of organic matter and nutrient availability In: Schulte, A., Ruhiyat, D. (Eds.), *Soils of tropical forest ecosystem characteristics, ecology and management*. Springer-Verlag, Berlin. p. 35-44.
- Astier-Calderón, M., Mass-Moreno, M., Etchevers-Barra, J., 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36, 605-620.
- Banerjee, M.R., Burton, D.L., McCaughey, W.P., Grant, C.A., 2000. Influence of pasture management on soil biological quality. *Journal of Range Management* 53, 127-133.
- Bredja, J.J., Moorman, T.B., Karlen, D.L., Dao, T.H., 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2115-2124.

- Caldwell, B.A., Griffiths, R.P., Sollins, P., 1999. Soil enzyme response to vegetation disturbance in two lowland Costa Rican soils. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1603-1608.
- Campo Experimental Sur de Sinaloa., 2004. Guía para la Asistencia Técnica Agropecuaria para el Área de Influencia del Campo Experimental Sur de Sinaloa. INIFAP-CIRNO-CESSI. Agenda Técnica. Segunda Edición. Mazatlán, Sinaloa, México. 170 p.
- Crisci, J.V., López-Armengol, M.F., 1983. Introducción a la teoría y práctica de la taxonomía numérica. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C. pp. 71-92.
- Dalal, R.C., 1998. Soil microbial biomass-what do the numbers really mean? *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 649-665.
- Doran, J.W., Parkin, B.T., 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Sci. Soc. Am. Inc. Special Publication. Number 35.* Madison, Wisconsin, USA.
- Etchevers-Barra, J.D., 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana* 17 (3), 209-219.
- Etchevers-Barra, J.D., Espinoza, G., Riquelme, E., 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2a edición. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillan, Chile.
- Feller, C., Beare, M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.

- Ferrera-Cerrato, R., Almaraz-Suarez, J.J., 1996. Factores que afectan la fijación simbiótica de nitrógeno en frijol común. In: Pérez-Moreno, J., Ferrera-Cerrato, R. (eds.), *Nuevos Horizontes en Agricultura: Agroecología y Desarrollo Sostenible*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, México. pp. 184-196.
- Franzluebbers, A.J., 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Tillage Res.* 66, 95-106.
- Fundación Produce Oaxaca., 2007. Introducción sistema producto maguey-mezcal. *Agroproduce*. pp. 4.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M.C., Seoane, S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37, 877-887.
- Glover, J.D., Reganold, J.P., Andrews, P.K., 2000. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchard in Washington state. *Agric. Ecosyst. Environ.* 80, 29-45.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J Soil Sci.* 74, 367-385.
- Hartemink, A.E., Van Kekem, A.J., 1994. Nutrient depletion in Ferralsols under hybrid sisal cultivation in Tanzania. *Soil Use and Management* 10, 103-107.
- Hartemink, A.E., Wienk, J.F., 1995. Sisal production and soil fertility decline in Tanzania. *Outlook on Agriculture* 24 (2), 91-96.

- Harwood, R.R., 1990. A history of sustainable agriculture. In: Edwards, C.A., et al. (eds.), Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conserv. Soc., Ankeny, IA.
- Holt, J. A., 1997. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid Northeastern Australia. *Applied Soil Ecology* 5, 143-149.
- Horwath, W.R., Paul, E.A., 1994. Microbial biomass. In: Weaver, R.W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdicek, D., Smith, S., Tabatabai, A., Wollum, A. (Eds.), Methods of soil analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 753-773.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R., Müller, S., 1997. Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Hussain, I., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen, D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Res.* 50, 237-249.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática., 2007. Anuario Estadístico Oaxaca. Tomo III. México. pp. 1386-1387.
- Jackson, J.E., 1991. A user's guide to principal components analysis. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Jackson, L.E., Ramirez, I., Yokota, R., Fennimore, S.A., Koike, S.T., Henderson, D. M., Chaney, W.E., Calderón F.J., Klonsky, K., 2004. On-farm assessment of organic matter and tillage management on vegetable yield, soil, weeds, pests, and economics in California. *Agric. Ecosys. Environ.* 103 (3), 443-463.

- Jenkinson, D.S., Powlson, D.S., 1976. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil-V: A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 8, 209-213.
- Jones, B.J., Wolf, B., 1984. Manual of soil testing procedure using modified Morgan extracting reagent. Benton Laboratories, Inc. Athens Georgia, USA.
- Karlen D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., 2001. Soil quality: current concepts and applications. *Advances in Agronomy* 74, 1-38.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: why and how?. *Geoderma* 114, 145-156.
- Karlen, D.L., Stott, D.E., 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special Publication No. 35, ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 53-72.
- Kennedy, A.C., Schillinger, W.F., 2006. Soil Quality and Water Intake in Traditional-Till vs. No-Till Paired Farms in Washington's Palouse. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 940-949.
- Kettler, T.A., Lyon, D.J., Doran, J.W., Powers, W.L., Stroup, W.W., 2000. Soil quality assessment after weed-control tillage in a no-till wheat-fallow cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 339-346.

- Landgraf, D., Klose, S., 2002. Mobile and readily available C and N fractions and their relationship to microbial biomass and selected enzyme activities in a sandy soil under different management systems. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 9-16.
- Larson, W.E., Pierce, F.J., 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdiceck, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Special Publication No. 35. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp 37-51.
- Larson, W.E., Pierce, F.J., 1991. Conservation and Enhancement of Soil Quality. In: *Evaluation for sustainable land management in the developing world*. Vol. 2. IBSRAM Proc. 12(2). Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand.
- Liebig, M.A., Tanaka, D.L., Wienhold, B.J., 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. *Soil Tillage Res.* 78 (2), 131-141.
- Liebig, M.A., Varvel, G., Doran, J., 2001. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agron. J.* 93, 313-318.
- Lorence, D.H., García-Mendoza, A., 1989. Oaxaca, México. In: Campbell, D.G., Hammond, H.D. (Eds.), *Floristic Inventory of Tropical Countries. The status of plant systematic collections and vegetation, plus recommendations for the future*. The New York Botanical Garden. pp. 259.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., 1999. Assessing soil quality in different agroecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances. *Soil Tillage Res.* 51, 129-137.

- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., Patra, A.K., 2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 130-142.
- McDonald, M.A., Healey, J.R., Stevens, P.A., 2002. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 92, 1-19.
- Motavalli, P.P., Discekichi, H., Kuhu, J., 2000. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79 (1), 17-27.
- Motta, C.V., Reeves, D.W., Touchton, J.T., 2002. Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in twon coastal plain soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33 (5-6), 913-932.
- Peña, D., 2002. Análisis de datos multivariantes. Mc Graw Hill, España. pp. 133-170.
- Pennock, J.D., Kessel, Van C., 1997. Clear cut forest harvest impacts on soil quality indicators in the mixedwood forest of Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 75, 13-32.
- Pulido, J.S., Bocco, G., 2003. The traditional farming system of a Mexican indigenous community: The case of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Mexico. *Geoderma* 111, 249-265.
- Rao, S., 1995. Analysis of soils for available inorganic nutrients. In: Tandon, H.L.S. (ed.), *Methods of analysis of soils, plants, water and fertilisers*. Fertiliser Development and Cooperation Organisation, New Delhi, India, pp. 13-35.

- Reeves, D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43, 131-167.
- Reicosky, D.C., Kemper, W.D., Langdale, G.W., Douglas, C.L., Rasmussen, P.E., 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50, 253-261.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., McSweeney, K., 1995. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conserv.* 50, 229-236.
- Sánchez-López, A., 2005. Oaxaca Tierra de Maguey y Mezcal. 2nd ed. Impreso en la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oax., México. pp. 91-108.
- Sands, G.R., Podmore, T.H., 2000. A generalized environmental sustainability index for agricultural systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79, 29-41.
- SAS Institute Inc., 1990. SAS/STAT. User's guide, version 6. Cary, NC.
- Secretaría de Economía., 2003. Diario Oficial. Cuarta sección. México. pp. 7.
- Seybold, C.A., Mausbach, M.J., Karlen, D.L., Rogers, H.H., 1997. Quantification of Soil Quality. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Process and the Carbon Cycle*. Press Inc. USA. pp. 387-403.
- Sharma, K.L., Mandal, U.K., Srinivas, K., Vittal, K.P.R., Mandal, B., Grace, J.K., Ramesh, V., 2005. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dry Alfisol. *Soil Tillage Res.* 83, 246-259.
- Smith, O.H., Petersen, G.W., Needdman, B.A., 2000. Environmental indicators of agro-ecosystems. *Adv. Agron.* 69, 75-97.
- Soil Quality Institute., 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in

- cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service.
- Soil Survey Staff, 1998. A rapidly executable point protocol for partial soil quality evaluation. USDA-NRCS Nat. Soil Survey Cent., Lincoln, NE.
- Sparling, G.P., Schipper, L.A., 2002. Soil quality at a National Scale in New Zealand. *J. Environ. Qual.* 31, 1848-1857.
- Tiessen, H., Cuevas, E., Chacon, P., 1994. The role of organic matter in sustaining soil fertility. *Nature (London)* 371, 783-785.
- Vergara-Sánchez, M.A., 2003. Identificación y selección de indicadores de calidad del suelo y sustentabilidad en sistemas naturales y agrícolas de ladera en Oaxaca. Tesis de Doctor en Ciencias. IRENAT, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx.
- Wander, M.M., Bollero, G.A., 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 961-971.
- Warketin, B.P., 1996. Overview of soil quality indicators. In: Proceedings, soil quality assessment for the praires workshop, Edmonton, January 22-24, pp. 1-13.
- Westerman, R.L. (ed.), 1990. Soil testing and plant analysis. Third ed. Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wisconsin.
- Wick, B., Tiessen, H., Menezes, R.S.C., 2000. Land quality changes following the conversion of the natural vegetation into silvo-pastoral systems in semi-arid NE Brazil. *Plant Soil* 222, 59-70.

Capítulo 6

Conclusiones generales

1. Los suelos del sitio montañoso mostraron valores más altos de carbono orgánico, N disponible y carbono de la biomasa microbiana que los suelos del valle (labranza mecánica) y lomerío (tracción animal). Dichos suelos se manejan con labranza mínima, y por tanto, se encuentran más cercanos al ecosistema natural en comparación con los sitios con labranza mecánica.
2. Independientemente del sitio y la profundidad del suelo, el Ca^{2+} y el K^+ intercambiable, el P_{Olsen} y la resistencia a la penetración del suelo incrementaron con la edad de la planta. En contraste, el N disponible disminuyó.
3. El carbono orgánico, pH, carbono de la biomasa microbiana y Mg^{2+} intercambiable fueron los indicadores de calidad en los sitios estudiados que surgieron del análisis realizado mediante el método de componentes principales. De estos indicadores, el carbono orgánico fue el indicador más sensible.
4. En los sistemas agrícolas, el suelo de montaña con labranza mínima tuvo el valor más alto del índice de calidad del suelo.
5. A pesar de que el carbono orgánico fue el indicador más afectado por los sitios y el manejo del suelo asociado a ellos, la adecuada selección de las prácticas de labranza condicionada por la diferente topografía del área de estudio (planicie, lomerío y montaña) ha permitido que los sistemas estudiados conserven un contenido moderado de carbono orgánico, particularmente el suelo de montaña (labranza mínima), lo cual refleja un manejo adecuado por parte de los agricultores.

Los resultados de este estudio revelaron que la conversión de selva baja caducifolia a plantaciones de agave y el cultivo de esta especie durante un periodo aproximado de 20-30 años en sitios con pendientes pronunciadas (70%) no han representado una degradación en la fertilidad y calidad del suelo.

6. Valores de 23.9 g kg^{-1} de carbono orgánico, 7.5 de pH, $2.0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Mg^{2+} intercambiable y $969.6 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de carbono de la biomasa microbiana se podrían sugerir como adecuados para mantener una productividad sustentable de *A. angustifolia*, aunque lo más conveniente sería obtener las calibraciones para este tipo de suelo y de cultivo.

7. De acuerdo con el análisis de indicadores de calidad realizado en este estudio, el nutrimento que requiere restitución inmediata es el Mg^{2+} . El suelo de San Baltazar presentó la concentración más baja de este nutrimento.

8. Para mantener e incrementar la calidad del suelo en la zona de estudio se recomiendan las siguientes prácticas de manejo: (i) incorporar residuos orgánicos y materiales composteados para conservar o aumentar la cantidad de materia orgánica, (ii) continuar utilizando prácticas de labranza mínima en la medida de lo posible, (iii), seguir con las asociaciones de cultivos como el maíz y el frijol durante los primeros dos o tres años del ciclo del cultivo del agave debido a que cultivos como el frijol pueden fijar vía simbiótica cantidades importantes de N, sin contaminar el ambiente y a un bajo costo económico y, (iv) añadir fertilizantes orgánicos y minerales que aporten principalmente Mg^{2+} para restituir los reservorios naturales del suelo.

Capítulo 7

Perspectivas

En general, los estudios realizados acerca de la fertilidad de suelos cultivados con especies de agave son escasos. Los trabajos de Hartemink y Van Kekem (1994), Hartemink y Wienk (1995), Hartemink et al. (1996) y Hartemink (1997 a,b) se han enfocado al estudio de la fertilidad de suelos cultivados con *Agave sisalana* en el este de África. Las investigaciones de Nobel (1989) y Gobeille et al. (2006) se han dirigido al estudio de las propiedades de suelos cultivados con *A. tequilana* en la parte central oeste de México. Para el caso particular del estudio de las propiedades de la fertilidad de los suelos cultivados con *A. angustifolia* Haw. en la región del mezcal del estado de Oaxaca, México, la presente tesis representa el primer estudio exploratorio y una primera referencia regional sobre las propiedades de la fertilidad del suelo en plantaciones de *A. angustifolia*. Los resultados derivados de este trabajo permitieron conocer el manejo que se le da a los suelos cultivados con *A. angustifolia* y cómo ello se relaciona con la fertilidad y la calidad del suelo. Sin embargo, todavía hay muchos vacíos en el conocimiento de este importante agroecosistema. En cuanto a otros campos de investigación importantes que conviene explorar en el futuro, se citan los siguientes:

- (1) Efecto de los sistemas de labranza sobre las propiedades del suelo en uno o más sitios. Para lo cual se debe controlar el estado de la fertilidad inicial y otras variables experimentales de tal manera que el efecto exclusivo de un sistema de labranza se pueda evaluar.

(2) Efecto en la fertilidad del suelo de las hojas del agave y de las vinazas derivadas de las destilerías, las cuáles son básicamente el único aporte de materia orgánica en los suelos estudiados.

(3) Efecto de tipo, dosis y época de aplicación de fertilizantes sobre el crecimiento del agave, bajo diferentes condiciones edáficas (profundidad del suelo, principalmente). Este tipo de estudios ayudará a determinar los requerimientos nutrimentales del agave en condiciones particulares de las zonas productoras. Se debe considerar en estos trabajos el efecto del intercalado de cultivos como el maíz y frijol durante los primeros dos o tres años del desarrollo del agave sobre el crecimiento de la biomasa radicular y aérea de esta planta.

(4) Se requiere un trabajo experimental específico, que incluya diferentes tratamientos de tipo y cantidad de aportes orgánicos y/o minerales para probar diferentes hipótesis sobre la dinámica de nutrimentos con relación a la edad del agave.

(5) Profundizar en la dinámica de la biomasa microbiana y actividad enzimática a lo largo del año (cubriendo el período seco y período húmedo) y en el ciclo de producción de la especie. Podemos suponer que estas variables se incrementan notablemente durante el período de mayor humedad en el suelo (Sparling, 1997) y que presentan cambios con la dinámica del crecimiento de la planta en su ciclo completo.

Referencias

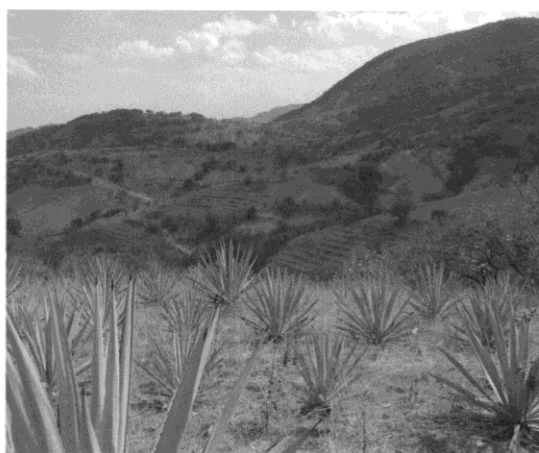
- Gobeille, A., Yavitt, J., Stalcup, P., Valenzuela, A., 2006. Effects of soil management practices on soil fertility measurements on *Agave tequilana* plantations in Western Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 87 (1), 80-88.
- Hartemink, A., 1997a. Soil fertility decline in some major soil grouping under permanent cropping in Tanga region, Tanzania. *Geoderma* 75, 215-229.
- Hartemink, A., 1997b. Input and output of major nutrients under monocropping sisal in Tanzania. *Land Degrad. Dev.* 8, 305-310.
- Hartemink, A., Osborne, J.F., Kips, P.A., 1996. Soil fertility decline and fallow effects in ferralsols and acrisols of sisal plantations in Tanzania. *Exp. Agric.* 32, 173-184.
- Hartemink, A.E., Van Kekem, A.J., 1994. Nutrient depletion in Ferralsols under hybrid sisal cultivation in Tanzania. *Soil Use and Management* 10, 103-107.
- Hartemink, A.E., Wienk, J.F., 1995. Sisal production and soil fertility decline in Tanzania. *Outlook on Agriculture* 24 (2), 91-96.
- Nobel, P.S., 1989. A nutrient index quantifying productivity of agaves and cacti. *J. Appl. Ecol.* 26, 635-645.
- Sparling, G.P., 1997. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. In: Pankhursts, C., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (eds.), *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International, UK. pp. 97-118.

Anexos

Anexo 1. Fotografías del área de estudio.



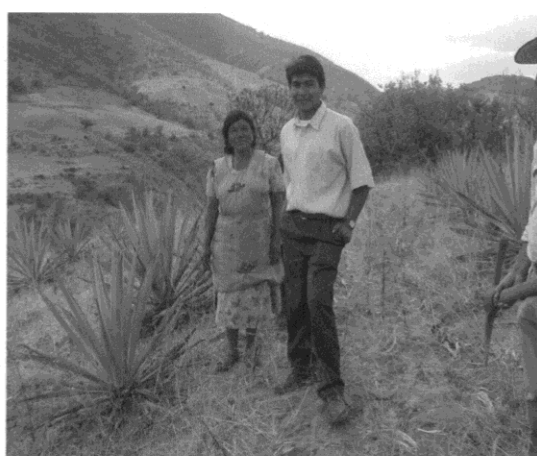
**Labranza mecánica en planicie
(Tlacolula)**



**Tracción animal en lomerío
(San Baltazar Guelavila)**



**Labranza mínima en montaña
(Soledad Salinas)**



**Productores cooperantes de *Agave
angustifolia* Haw. en San Baltazar
Guelavila**



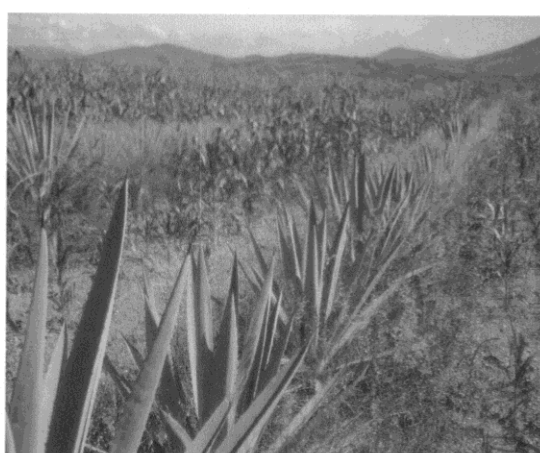
Interacción fragmentada de selva baja caducifolia con cultivos de *Agave angustifolia* Haw.



Vegetación de selva baja caducifolia adyacente a cultivos de *Agave angustifolia* Haw.



Cultivo de *Agave angustifolia* Haw. en montaña con una pendiente de 70%



Cultivo de maíz asociado durante los primeros 2-3 años del ciclo de cultivo de *Agave angustifolia* Haw.

Anexo 2. Productos del proyecto de investigación.



Soil fertility properties on *Agave angustifolia* Haw. plantations

A. Bautista-Cruz^{a,b,*}, R. Carrillo-González^c, M.R. Arnaud-Viñas^a,
C. Robles^a, F. de León-González^d

^a CIIDIR IPN Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlan, 71230 Oaxaca, Mexico

^b Programa de Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma Metropolitana,
Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960 México D.F., Mexico

^c Colegio de Postgraduados, Edafología, Campus Montecillo, Carretera Mexico-Texcoco km 36.5, Texcoco 56230, Mexico

^d Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal,
Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960 México D.F., Mexico

Received 29 November 2006; received in revised form 12 June 2007; accepted 12 August 2007

Abstract

This study examined the variations in soil physical, chemical and biological properties from *Agave angustifolia* fields in three sites with different topographic conditions (valley, hill and mountain), in Oaxaca, Mexico, associated with the tillage systems, disk ploughing (DP), animal drawn ploughing (ADP) and minimum tillage (MT), respectively. Plant ages were 1.5–3.5 years (class 1), 3.6–5.5 years (class 2) and 5.6–7.5 years (class 3). Soil samples were taken at two soil depths (0–20 and 21–40 cm) from plots of 4000 m² within each site and plant age classes, during the spring of 2005. The main changes in soil properties were found in the mountain site. Soil bulk density (2.0 g cm⁻³), cone penetration resistance (CPR) (3.96 MPa), 0.7 and 1.0 mm water stable aggregates (WSA) (28.3 g kg⁻¹ and 102.2 g kg⁻¹, respectively) were higher in the mountain site than in the hill and valley fields. This result is consistent with the rocky substrate beneath the shallow soil. Soil organic carbon (SOC) (23.9 g kg⁻¹), available N (23.1 mg kg⁻¹) and soil microbial biomass carbon (SMBC) (969.6 μg g⁻¹) at the mountain site showed the highest values, suggesting that MT practiced in this topographic condition favours the organic matter accumulation and biological activity. Soil microbial biomass carbon and SOC seem to be the soil properties that were mainly affected by the sites and soil management associated with them. For the three sites, SOC, P_{Olsen}, available N, exchangeable Na⁺ and SMBC were higher at 0–20 cm depth than at 21–40 cm depth within each site. Exchangeable Ca²⁺ and K⁺, P_{Olsen} and CPR increased with plant age. In contrast, available N decreased. Soil chemical properties were more affected by the age of the plant than physical and biological properties. Results reported here represent a reference of the fertility properties of soils cultivated with *A. angustifolia*, which could be used in further studies focused on management and tillage systems.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Agave; Minimum tillage; Soil fertility

1. Introduction

Human-induced soil degradation is an important cause of the decline in productivity of many soils (Hartemink and Bridges, 1995). The cause for soil fertility decline is that most agricultural land use systems result in a net removal of nutrients from the soil either by the harvested product and/or through increased losses as

* Corresponding author at: CIIDIR IPN Oaxaca, Hornos 1003, Xoxocotlan, 71230 Oaxaca, Mexico.

Tel.: +52 951 5170610/5170400; fax: +52 951 5170610/5170400.

E-mail address: mbautistac@ipn.mx (A. Bautista-Cruz).

compared with natural ecosystems. Unless the nutrients removed by the harvested product are replaced either naturally, through weathering and bio-geocycling, or through the use of mineral and organic fertilizers, many soils will deteriorate under permanent cropping (Hartemink, 1997a). Monitoring of soil fertility trends on smallholders' farms is difficult because of the variability in these farming systems. On plantations, however, large areas are uniformly cropped and managed, and the land-use history is usually known, providing a sound base for soil fertility research.

In the "mezcal region" of Oaxaca (Mexico) an extended area of the original forest has been cut down and burned, and the soil cleared for *Agave angustifolia* Haw. cropping. Degradation in soil quality associated with the conversion of primary or secondary forest into low input agroecosystem is mainly due to the decline in soil organic matter (Smith et al., 2000). McDonald et al. (2002) reported that the land clearing and subsequent cropping promoted a significant reduction in soil organic carbon (SOC), total N, exchangeable K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , and available P. They also found a significantly higher bulk density and lower water holding capacity. The slash and burn method of land clearing ensures minimal soil disturbance and degradation. Okore et al. (2007) found that soils cleared under slash and burn method had a significantly higher particulate organic matter, C, N and microbial biomass C and N compared to other methods of land clearing.

In the "mezcal region" of Oaxaca 15,000 ha are cropped with *A. angustifolia*, a species colloquially called "maguey espadin" which is used as a basic supply for the manufacture of the alcoholic beverage called "mezcal". In this activity 131 municipalities and 226 communities are involved (Chagoya-Méndez, 2004). Nowadays, soil management involves three topographic conditions associated with different tillage systems: (a) valley production dominated by disk ploughing (DP); (b) hill production with animal drawn ploughing (ADP) and (c) mountain slopes cultivated with minimum tillage (MT; manual hoe). Minimum tillage and ADP are considered traditional non-mechanized systems, and DP is considered a modern tillage system. *A. angustifolia* can be grown in shallow and unfertilized soils but, as occur in other permanent plantations, this system can deplete the natural soil nutrient pools, mainly if external nutrient restitutions are not supplied. A local survey in Oaxaca, oriented to know the crop techniques used for growing *A. angustifolia*, revealed that approximately 52% of 13,231 producers surveyed in the mezcal region reported using some type of fertilizer on their plantations. Fertilizers rates are in accordance with producer incomes, but they

do not result from soil chemical analysis or experimental results (Chagoya-Méndez, 2004).

Some studies showed that the decline of production of *A. sisalana* in East Africa was due to the ineffective soil fertility management (Hartemink et al., 1996; Hartemink, 1997a,b). Nobel (1989) found that *A. tequilana* Weber blue variety productivity was limited by low contents of N, P, K and B in soil. Recently, Gobeille et al. (2006) reported that tillage based on DP decreased the levels of SOC, N and P in *A. tequilana* plantations at Western Central Mexico.

Although some information has been acquired about soil properties in agave plantations (e.g. Hartemink et al., 1996; Hartemink, 1997a,b; Gobeille et al., 2006), no basic soil data has been produced for soils cultivated with *A. angustifolia*. This fact is determined by the difficulty in accessing the production fields (rugged topography and bad road conditions) and the dispersal of land tenure. The aims of this exploratory study were (i) to determine the soil fertility properties in *A. angustifolia* plantations, considering three topographic situations (valley, hill and mountain), and (ii) to gain information about soil changes associated with the age of agave plants.

2. Materials and methods

2.1. Sites description and cropping techniques

The study area is located in Oaxaca, Mexico. The local name is mezcal region, which includes Tlacolula, Yautepec, Miahuatlan, Ejutla, Sola de Vega, Ocotlan and Zimatlan districts (Chagoya-Méndez, 2004). The research was focused in Tlacolula because it is the district with the highest production (55%) of *A. angustifolia* (Chagoya-Méndez, 2004). The location sites were Tlacolula, San Baltazar Guelavila and Soledad Salinas (Fig. 1; Table 1). Geographic positions were assessed by a Garmin 12XL GPS. According to the soil survey reported by the Comisión Nacional de Biodiversidad (2004) on the scale of 1:4,000,000, the main soil classes at 1060–1700 m of land elevation are Regosols and Leptosols (Fig. 1). The parent material is limestone rock with lutite from lower Cretaceous (Castillo and Castro, 1996). The average annual rainfall is 726 mm. The average annual temperature ranges between 28 and 32 °C. The climate is temperate-semiarid (Comisión Nacional de Biodiversidad, 2004). The vegetation type is a dry deciduous lowland forest (Lorence and García-Mendoza, 1989), where the dominant species are *Acacia* spp., *Bursera* spp., *Ipomea* spp., *Leucaena esculenta* and *Prosopis laevigata*. An extended area from the original

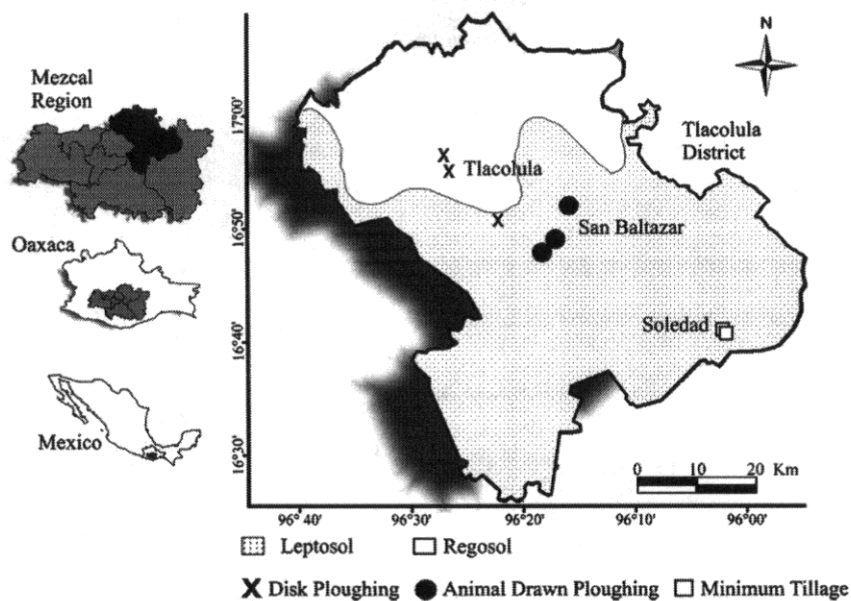


Fig. 1. Location of sampling sites in the Tlacolula district, Oaxaca, Mexico.

forest has been cut down and burned, and the soil cleared for *A. angustifolia* cropping. According to the interviewed landholders the study sites have been continuously used for agave cultivation for more than 100 years.

For *A. angustifolia* cropping three tillage systems are employed; the selection of each of them is conditioned by topography. Minimum tillage is used in the mountain zone with steep slopes of 12–70%; ADP in hills with slopes of 4–65% and DP in valleys with slopes of 0.5–11% (Sánchez-López, 2005). For each study site (Tlacolula, San Baltazar and Soledad), we selected three *A. angustifolia* plantations with the following plant age classes: class 1 (1.5–3.5 years), class 2 (3.6–5.5 years) and class 3 (5.6–7.5 years), with one replication at each site. All cooperative farmers agreed

to give information about the age of their *A. angustifolia* plants.

A. angustifolia reaches sexual maturity between 7 and 10 years after planting. While agave plants reach maturity, farmers in all study sites plant corn as an associated crop during the first two or three years of the crop cycle (age class 1 only). During the harvesting process, plant leaves are chopped and left in the field and eventually they can be incorporated into the topsoil. Fallow periods are not frequently employed in *A. angustifolia* production. According to interviewed landholders, herbicides and fertilizers have never been applied to any of the agave plantations sampled in this study. However, distillery effluents are normally incorporated into the soil in all study sites.

Table 1
Site characteristics of soils cropped with *Agave angustifolia* Haw. in Tlacolula District, Oaxaca, Mexico

	Tlacolula	San Baltazar	Soledad
Soil samples	58	60	39
Dominant tillage system	Disk ploughing	Animal drawn ploughing	Minimum tillage
Minimum slope (%)	0.5	4.0	12.0
Maximum slope (%)	11.0	65.0	70.0
Root depth (cm)	18.6 ± 2.3	22.0 ± 2.5	8.2 ± 0.8
Altitude (m)	1636	1545	1085
Geographic position	16°94'N 96°54'W	16°80'N 96°29'W	16°40'N 96°01'W
Distance between sites (km)			
Tlacolula	0	20	51
San Baltazar		0	32
Soledad			0

2.2. Soil sampling

Soil samples were taken from representative field surfaces (4000 m²) within each site and plantation age classes during the spring of 2005. The soil sampling procedures have been described by Dick et al. (1996), Petersen and Calvin (1996) and Boone et al. (1999). Five points were selected for sampling, the first one was field-centered and the others were 25 m separated from the central point following the four cardinal directions. Soil was sampled at 0–20 and 21–40 cm depths. Samples were transported to the laboratory in sealed plastic bags. Air-dried and sieved (<2 mm) soil samples were used for chemical and physical soil analysis. For soil microbial biomass carbon (SMBC) determination, fresh soil sub-samples were sieved (<4.76 mm) and stored at 4 °C. Soil samples for bulk density (D_B) were taken at the 0–20 cm depth using a 50 mm diameter soil auger (three replicates).

2.3. Soil analysis

Each soil sample was analyzed individually. Plant-available phosphorous (P_{Olsen}) was extracted with 0.5 M NaHCO₃ solution adjusted to pH 8.5. Extractable P was determined following the modified Murphy–Riley ascorbic acid procedure (Olsen and Sommers, 1982). Soil organic carbon was determined (after removal of carbonates) using the Walkley–Black wet oxidation method (Nelson and Sommers, 1982). Available N (the sum of inorganic NO₃⁻ and NH₄⁺) was extracted by shaking the soil with a 2 M KCl solution (1:10 soil:solution ratio) for 1 h on a mechanical shaker, followed by filtration. Soil extracts were analyzed for available N using a micro-distillation procedure, with Devarda's alloy NO₃⁻ was reduced to NH₄⁺ (Mulvaney, 1996). Exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and Na⁺ were extracted with 1 M ammonium acetate solution (pH 7.0). Exchangeable Ca²⁺ and Mg²⁺ were quantified by atomic absorption; and K⁺ and Na⁺ by emission spectrometry on a Perkin-Elmer Model 2380. Soil pH was measured using a 1:2 soil to water mixture and a digital pH meter Orion Model 710 A. Bulk density was determined using the core method (Blake and Hartge, 1986). The content of the water-stable aggregates (WSA) was measured using a modified single-sieve method (Kemper and Rosenau, 1986; Beare and Bruce, 1993). Sieve sizes were 0.5, 0.7 and 1 mm. A hand operated cone penetrometer Bush SP 1000 was used to measure cone penetration resistance (CPR). Soil microbial biomass carbon was estimated by the fumigation-incubation method described by Jenkinson and Powlson (1976). A 25 g sample of field moist soil

was fumigated with ethanol-free chloroform for 24 h. After fumigation, soil samples were incubated at 25 °C in acrylic bottles for 10 days in the presence of NaOH to absorb CO₂ released from soil. At the same time non-fumigated soils were also incubated under the same conditions. The CO₂ production was determined by HCl titration of NaOH remained in the system after incubation. Finally, SMBC was calculated as the difference between extractable C in chloroform-fumigated and nonfumigated samples (Voroney et al., 1993; Horwath and Paul, 1994). Throughout soil analyses, 10% of the samples were randomly replicated for quality control. Chemical analysis for Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and Na⁺ were performed using calibration curves determined from standards prepared from certified stock solutions. Sample blanks were analyzed to determine any matrix effects.

2.4. Statistical analysis

Mean, variance, standard error, minimum and maximum values of soil properties in each of the study sites and depths were calculated using SAS software system (V. 8.01, SAS Institute, 1990). The general linear model used to analyze the changes in the soil properties (y) associated to the site (a), agave plant age (b) and, soil depth (c) was $y = \beta_0 + \beta_1a + \beta_2b + \beta_3c + \varepsilon$, where β_i is a fitted coefficient of the model, β_0 is the general mean, and ε is the error term which includes all the other sources of variation not included in the model, as orientation of the plantation or microclimate effects. The means of each variable in the study sites were compared with the Tukey test. The Pearson's correlation was employed to examine the relationship between soil properties.

3. Results and discussion

Details of the three sites are shown in Table 1. The number of soil samples was lower in Soledad because no samples were obtained at the 21–40 cm depth, which consisted of rocky substrate. The crop fields with the lowest slope corresponded to Tlacolula (valley). In Soledad the root zone was only 8 cm; in contrast, the other two sites had root zones near to 20 cm, indicating that *A. angustifolia* can be grown on arable soils (in the cases of Tlacolula and San Baltazar) or under rocky substrates (in the case of Soledad). Very large slope ranges of crop fields were found in San Baltazar and Soledad. Weed control and other agricultural practices are time consuming and implicate accident risk for agave producers when field slopes are > 60%.

Table 2
Physical properties (means and standard error) of soils cropped with *Agave angustifolia* Haw. in Tlacolula district, Oaxaca, Mexico

	Tlacolula	San Baltazar	Soledad
Soil depth (cm)	0–20		
WSA 0.5 mm (g kg ⁻¹)	18.1 ± 2.4a	21.2 ± 1.9a	21.5 ± 1.6a
WSA 0.7 mm (g kg ⁻¹)	14.7 ± 2.8c	18.0 ± 1.9b	28.3 ± 2.1a
WSA 1.0 mm (g kg ⁻¹)	18.2 ± 3.7c	51.9 ± 7.8b	102.2 ± 12.6a
Bulk density (g cm ⁻³)	1.3 ± 0.0c	1.6 ± 0.1b	2.0 ± 0.1a
Soil depth (cm)	21–40		
WSA 0.5 mm (g kg ⁻¹)	22.1 ± 3.6a	20.4 ± 1.8a	19.0 ± 2.5a
WSA 0.7 mm (g kg ⁻¹)	20.2 ± 4.3ab	15.6 ± 2.1b	27.5 ± 3.7a
WSA 1.0 mm (g kg ⁻¹)	42.1 ± 11.4b	48.9 ± 7.4b	88.1 ± 11.3a
Bulk density (g cm ⁻³)	NA	NA	NA

Different lower-case letters (a, b or c) indicate homogenous means subgroups (Tukey test; $P < 0.05$); WSA: water stable aggregates; NA: not available.

Disk ploughing, the dominant tillage system in the valleys, consists of a single pass of the plough disk, one or two passes of the tiller disk and furrowed at a soil depth of 20–25 cm. Animal drawn ploughing, the dominant tillage system in hills, consists of one pass of the wooden plough and furrowed at a soil depth of 15–20 cm. Minimum tillage, the dominant tillage system in mountains, consists of slashing and burning the plant cover, opening the ground with a hoe for the individual *A. angustifolia* plants (Sánchez-López, 2005).

3.1. Soil properties in agave plantations

3.1.1. Physical soil properties

The bulk density and WSA values are shown in Table 2. The Soledad site showed the highest value of D_B and 0.7 and 1 mm WSA. In contrast, Tlacolula had the lowest values of D_B and 0.7 and 1 mm WSA. The content of 0.5 mm WSA was similar in the three sites (Table 2).

In the Soledad site (minimum tillage) the same trend for the 0.7 and 1 mm WSA found at the 0–20 cm soil depth was maintained at the 21–40 cm soil layer. Both sites with arable soils (Tlacolula and San Baltazar) showed at the 21–40 cm depth higher content of 1 mm WSA and higher soil compaction than in the 0–20 cm soil layer, suggesting an accumulated effect of disk ploughing. The soil of Soledad had the greatest CPR followed by Tlacolula and San Baltazar (Fig. 2).

Soil with the highest rooting depth was found in San Baltazar, followed by Tlacolula and Soledad (Table 1). Under these soil depths the penetrometer reached its maximum force capacity (50 kg) due to the presence of the parent material (all cases in Soledad) or soil compacted layers (some cases in Tlacolula and San Baltazar). Water-stable aggregates were highly correlated with SOC ($r = 0.409$; $P < 0.0001$).

3.1.2. Chemical soil properties

Chemical soil properties were statistically different among the sites, independently of the soil depth (Tables 3 and 4). Soils from the three sites were moderately alkaline. Soils of San Baltazar had similar values of pH than those of Tlacolula; in contrast, the soil of Soledad showed the lowest values of pH.

The pH was correlated closely and positively to exchangeable Ca²⁺ ($r = 0.729$; $P < 0.001$). At both soil depths, the highest exchangeable Ca²⁺ content was found in San Baltazar, which also had the highest pH value, whereas Soledad with the lowest pH value, showed the lowest exchangeable Ca²⁺ content (Tables 3 and 4). The soil of Soledad had the highest SOC content (Tables 3 and 4). According to Chan and Heenan (2005), tillage has been found as one of the two major processes responsible for the reduction of SOC (the other is stubble burning). The increase of SOC in Soledad as compared to San

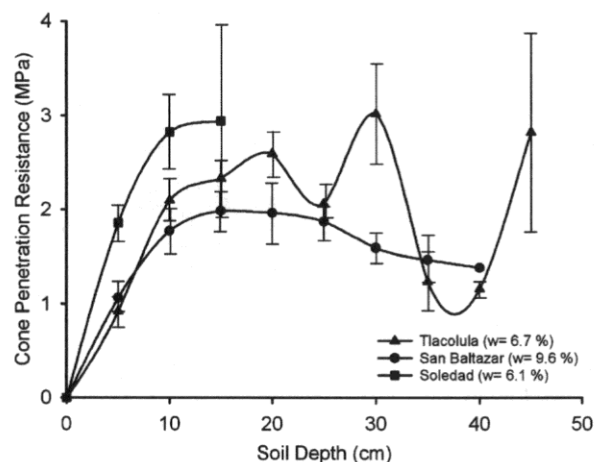


Fig. 2. Cone penetration resistance and water content of soils cropped with *Agave angustifolia* Haw. in Tlacolula district, Oaxaca, Mexico. w: water content of soil.

Table 3
Chemical and biological properties (means and standard error) at 0–20 cm depth of soils cropped with *Agave angustifolia* Haw. in Tlacolula district, Oaxaca, Mexico

	Tlacolula	San Baltazar	Soledad
pH	8.1 ± 0.0a	8.2 ± 0.1a	7.5 ± 0.0b
Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	12.5 ± 0.6b	12.2 ± 1.3b	23.9 ± 1.2a
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	3.6 ± 0.3a	2.0 ± 0.2b	1.9 ± 0.1b
Available N (mg kg ⁻¹)	19.4 ± 0.9b	20.4 ± 1.2ab	23.1 ± 1.0a
Exchangeable K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	25.8 ± 3.0a	8.0 ± 0.5c	16.8 ± 3.2b
Exchangeable Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2.6 ± 0.2a	1.2 ± 0.1b	0.8 ± 0.0b
Exchangeable Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2.0 ± 0.2a	0.7 ± 0.0c	1.2 ± 0.0b
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	32.6 ± 2.0b	39.3 ± 1.1a	29.0 ± 1.3b
Soil microbial biomass carbon (μg g ⁻¹)	433.8 ± 10.3c	588.7 ± 9.7b	969.6 ± 14.8a

Different lower-case letters (a, b or c) indicate homogenous means subgroups (Tukey test; $P < 0.05$).

Table 4
Chemical and biological properties (means and standard error) at 21–40 cm depth of soils cropped with *Agave angustifolia* Haw. in Tlacolula district, Oaxaca, Mexico

	Tlacolula	San Baltazar	Soledad
pH	8.1 ± 0.0a	8.2 ± 0.0a	7.4 ± 0.1b
Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	10.9 ± 0.5b	10.6 ± 1.0b	14.1 ± 0.8a
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	3.1 ± 0.3a	1.8 ± 0.2b	1.5 ± 0.1b
Available N (mg kg ⁻¹)	19.4 ± 1.4a	17.2 ± 1.2a	18.5 ± 1.0a
Exchangeable K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	24.5 ± 3.2a	7.1 ± 0.4b	8.8 ± 1.4b
Exchangeable Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	4.0 ± 0.7a	1.3 ± 0.1b	0.9 ± 0.1b
Exchangeable Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2.4 ± 0.2a	0.8 ± 0.0b	1.2 ± 0.1b
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	34.1 ± 2.1ab	38.9 ± 1.3b	29.4 ± 2.8a
Soil microbial biomass carbon (μg g ⁻¹)	368.2 ± 11.4c	467.7 ± 8.0b	694.5 ± 27.6a

Different lower-case letters (a, b or c) indicate homogenous means subgroups (Tukey test; $P < 0.05$).

Baltazar and Tlacolula was probably caused by a lower oxidation of SOM (stems, roots, etc.) due to the reduced tillage, soil disturbance and slower crop residue decomposition (Reicosky et al., 1995). Dalal (1989) reported that MT reduced soil erosion and surface runoff, and consequently the SOC content was usually higher in soils managed with MT than in those under conventional tillage (CT). Rahman et al. (2003), Özpınar and Çay (2005) also found a greater SOC content in soils under MT as compared to soils under CT.

The soils in Tlacolula (0–20 and 21–40 cm depth) had higher P_{Olsen} and exchangeable K⁺, Mg²⁺ and Na⁺ concentrations than San Baltazar and Soledad (Tables 3 and 4). A similar trend was observed on P levels by Hussain et al. (1999) in a Typic Fragiudalf under CT in comparison to non-tillage (NT) soils.

Available N was not statistically different among sites at both soil depths. However, soils in Soledad had a higher level of available N, although it was not statistically significant compared to San Baltazar and Tlacolula (Tables 3 and 4). Soil organic matter showed a strong relationship with available N and SMBC ($r = 0.231$, $P < 0.002$; $r = 0.222$, $P < 0.003$, respectively). Soil organic carbon, P_{Olsen}, available N and

exchangeable Na⁺ were higher at 0–20 cm than at 21–40 cm within each site (Tables 3 and 4). Wander and Bollero (1999) also reported higher values of these soil properties at the soil surface.

3.1.3. Biological soil properties

Soil microbial biomass carbon changed significantly among sites and decreased in the following order: Soledad > San Baltazar > Tlacolula (Tables 3 and 4). Aslam et al. (1999), Salinas-García et al. (2002) and Balota et al. (2004) also reported higher contents of SMBC under NT compared to CT.

For the three study sites, SMBC was higher at 0–20 cm layer than at the 21–40 cm depth. This is consistent with a higher content of SOC at the soil surface than in the subsoil.

3.2. Changes in soil properties associated with the age of agave plants

Independently of the site and soil depth, most of the soil properties (pH, SOC, exchangeable Na⁺ and Mg²⁺, SMBC, D_B , and the content of the three WSA fractions) were not affected by the age of the agave plants

Table 5
Soil properties (means and standard error) that significantly changed with the age of agave plants

Soil property	Plant age class (years)		
	1.5–3.5	3.6–5.5	5.6–7.5
P _{Olsen} (mg kg ⁻¹)	2.0 ± 0.1c	2.6 ± 0.2ab	2.9 ± 0.3a
Available N (mg kg ⁻¹)	22.4 ± 0.6a	16.8 ± 0.8b	18.9 ± 0.9b
Exchangeable K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	11.8 ± 0.9b	17.7 ± 2.1a	19.8 ± 3.2a
Exchangeable Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	32.9 ± 0.3b	33.6 ± 0.1b	38.8 ± 0.1a
Cone penetration resistance (MPa)	1.4 ± 0.0b	1.4 ± 0.0b	1.8 ± 0.1a

Different lower-case letters (a, b or c) indicate homogenous means subgroups (Tukey test; $P < 0.05$).

($P \geq 0.09$). Only 5 of the 14 soil properties analyzed changed significantly with the age of the agave ($P \leq 0.01$; Table 5). Exchangeable Ca²⁺ and K⁺ and P_{Olsen} increased with the age of the agave plant. In contrast, available N decreased. Cone penetration resistance of soil increased with the age of the agave plant (Table 5). It is well known that the soil around roots can be compacted by the expansion of roots (Dexter, 1987; Pierret et al., 2005). This fact can explain the increased CPR in fields with aged plants.

Results reported here represent a first regional reference on soil fertility properties of a large area cropped with *A. angustifolia*. Certainly, each one of the topographic sites is associated with a dominant tillage system; however the differences reported about soil properties could result from topography, crop management and the tillage system currently being used. A specific research focused on the effect of tillage systems on soil properties must be performed in one or more sites. An attempt should be made to control the initial fertility state and other experimental variables in such a way the exclusive effect of a tillage system could be evaluated.

4. Conclusions

Soil properties were significantly different in *A. angustifolia* fields depending on the site. The soils of the mountain site (associated to minimum tillage management) had significantly higher values of D_B , CPR and 0.7 and 1 mm WSA, which can be considered as favourable properties to resist soil erosion mainly in a rugged topography. Available N, SOC and SMBC of mountain soils were also higher than in the valley and hill fields. Soil microbial biomass carbon and SOC seem to be the soil properties that were mainly affected by the sites and soil management associated with them. Exchangeable Ca²⁺ and K⁺, P_{Olsen} and CPR increased with the age of *A. angustifolia* plants. In contrast, available N decreased. Soil chemical properties were

more affected by the age of the plant in comparison with physical and biological properties.

Acknowledgements

We are grateful to Alma Mijangos-Reyes, Raúl Rivera-García, Ricardo Sandoval and Néstor Pérez-Paz for their technical support. H. Castillo-Juárez and two anonymous reviewers provided valuable comments to the manuscript. Also, we would like to acknowledge the cooperation of the *A. angustifolia* producers in Oaxaca. CONACYT (Fellowship Number 141865), who financed the doctoral program of A. Bautista-Cruz at UAM (Doctorado en Ciencias Biológicas). To Fundación PRODUCE, Instituto Politécnico Nacional (SIP 20050369) and Colegio de Postgraduados, who partially financed the field sampling and laboratory tests.

References

- Aslam, T., Choudhary, M.A., Saggarr, S., 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil Tillage Res.* 51 (1–2), 103–111.
- Balota, E.L., Colozio, A.F., Andrade, D.S., Dick, R.P., 2004. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res.* 77 (2), 137–145.
- Beare, M.H., Bruce, R.R., 1993. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56, 87–104.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*, Monograph No. 9, second ed., ASA, Madison, WI, pp. 363–375.
- Boone, D.R., Grigal, D.F., Sollins, P., Ahrens, R.J., Armstrong, D.E., 1999. Soil sampling, preparation, archiving, and quality control. In: Robertson, G.P., Coleman, D.C., Bledsoe, C.S., Sollins, P. (Eds.), *Standard Soil Methods for Long Term Ecological Research*. Oxford University Press, USA, pp. 3–27.
- Castillo, N.F., Castro, M.J. (Eds.), 1996. Consejo de Recursos Minerales. Monografía Geológica Minera del Estado de Oaxaca. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales, México.

- Chagoya-Méndez, V.M., 2004. Diagnóstico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación SAGARPA-Delegación Oaxaca, Oaxaca, México.
- Chan, K.Y., Heenan, D.P., 2005. The effect of stubble burning and tillage on soil carbon sequestration and crop productivity in southeastern Australia. *Soil Use Man.* 21, 427–431.
- Comisión Nacional de Biodiversidad, 2004 [on line]. Available at: <http://www.conabioweb.conabio.gob.mx/metacarto/metadatos.pl>. Reviewed on March 14th, 2006.
- Dalal, R.C., 1989. Long term effects of no-tillage, crop residue, and nitrogen application on properties of a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1511–1515.
- Dexter, A.R., 1987. Compression of soil around roots. *Plant Soil* 97, 401–406.
- Dick, P.R., Thomas, D.R., Halvorson, J.J., 1996. Standardized methods, sampling, and sample pretreatment. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Special Publication 49. SSSA, USA, pp. 107–121.
- Gobeille, A., Yavitt, J., Stalcup, P., Valenzuela, A., 2006. Effects of soil management practices on soil fertility measurements on *Agave tequilana* plantations in Western Central Mexico. *Soil Tillage Res.* 87 (1), 80–88.
- Hartemink, A., 1997a. Soil fertility decline in some major soil grouping under permanent cropping in Tanga region, Tanzania. *Geoderma* 75, 215–229.
- Hartemink, A., 1997b. Input and output of major nutrients under monocropping sisal in Tanzania. *Land Degrad. Dev.* 8, 305–310.
- Hartemink, A., Bridges, E.M., 1995. The influence of parent material on soil fertility degradation in the coastal plain of Tanzania. *Land Degrad. Rehabil.* 6, 215–221.
- Hartemink, A., Osborne, J.F., Kips, P.A., 1996. Soil fertility decline and fallow effects in ferrallic soils and acrisols of sisal plantations in Tanzania. *Exp. Agric.* 32, 173–184.
- Horwath, W.R., Paul, E.A., 1994. Microbial biomass. In: Weaver, R.W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdicek, D., Smith, S., Tabatabai, A., Wollum, A. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. SSSA Book Series 5. Madison, WI, pp. 753–773.
- Hussain, L., Olson, K.R., Wander, M.M., Karlen, D.L., 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Res.* 50, 237–249.
- Jenkinson, D.S., Powlson, D.S., 1976. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.* 8, 209–213.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agron. Monograph No. 9, second ed., ASSA and SSSA, Madison, WI, pp. 425–442.
- Lorence, D.H., García-Mendoza, A., 1989. Oaxaca, México. In: Campbell, D.G., Hammond, H.D. (Eds.), *Floristic Inventory of Tropical Countries. The Status of Plant Systematic Collections and Vegetation, Plus Recommendations for the Future*, The New York Botanical Garden, pp. 259.
- McDonald, M.A., Healey, J.R., Stevens, P.A., 2002. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 92, 1–19.
- Mulvaney, R.L., 1996. Nitrogen-inorganic forms. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. SSSA Series 5. SSSA and ASA*, Madison, WI, pp. 1123–1184.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, Agron. Monograph No. 9, second ed., ASSA and SSSA, Madison, WI, pp. 539–579.
- Nobel, P.S., 1989. A nutrient index quantifying productivity of agaves and cacti. *J. Appl. Ecol.* 26, 635–645.
- Okore, I.K., Tijani-Eniola, H., Agboola, A.A., Aiyelari, E.A., 2007. Impact of land clearing methods and cropping systems on labile soil C and N pools in the humid zone Forest of Nigeria. *Agric. Ecosyst. Environ.* 120, 250–258.
- Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorous. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, second ed., Agron. Monograph. No. 9. ASSA and SSSA, Madison, WI, pp. 403–430.
- Özpinar, S., Çay, A., 2005. Effects of minimum and conventional tillage systems on soil properties and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in clay-loam in the Çanakkale region. *Turk J. Agric. For.* 29, 9–18.
- Petersen, G.R., Calvin, L.D., 1996. Sampling. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Number 5. SSSA Book Series. USA, pp. 1–17.
- Pierret, A., Moran, C.J., Doussan, C., 2005. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. *New Phytol.* 967–980.
- Rahman, M.H., Tanaka, A., Hoque, S., 2003. Long-term effects of tillage on physicochemical properties of modified Andisol of Northeast Honshu Island. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 34 (11–12), 1743–1757.
- Reicosky, D.C., Kemper, W.D., Langdale, G.W., Douglas, C.L., Rasmussen, P.E., 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50, 253–261.
- Salinas-García, J.R., Velásquez-García, J. de J., Gallardo-Valdez, M., Díaz-Mederos, P., Caballero-Hernández, F., Tapia-Vargas, L.M., Rosales-Robles, E., 2002. Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-western Mexico. *Soil Tillage Res.* 66 (2), 143–152.
- Sánchez-López, A., 2005. Oaxaca Tierra de Maguey y Mezcal, second ed., Fundación Produce Oaxaca A.C., Oaxaca, Mexico, p. 235.
- SAS Institute Inc., 1990. *SAS/STAT. User's guide*, Version 6. Cary, NC.
- Smith, O.H., Petersen, G.W., Needman, B.A., 2000. Environmental indicators of agro-ecosystems. *Adv. Agron.* 69, 75–97.
- Voroney, R.P., Winter, J.P., Beyaert, R.P., 1993. Soil Microbial Biomass C and N. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, USA, pp. 277–286.
- Wander, M.M., Bollero, G.A., 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 961–971.