

47 00381



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS

ESPECIES VEGETALES, ABONO Y FERTILIZANTE: SU
INFLUENCIA EN LA CALIDAD DE UN TEPETATE DE TETELA
DEL VOLCAN ESTADO DE MORELOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTORA EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)

P R E S E N T A

M. EN C. ALMA SOCORRO VELAZQUEZ RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DOCTOR DAVID FLORES ROMAN

MEXICO, D. F.

OCTUBRE, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

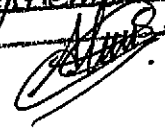
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres

A mi hermano y hermanas

Al Beduino, a Eduardo y a Kieslowsky

... a la Dirección General de Bibliotecas
... difundir en formato electrónico e impres-
... terido de mi trabajo recepciona-
NOMBRE: Alma Socorro Valdéz-
rodríguez Rodríguez
CHA 3- Septiembre - 2002


AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes instituciones y personas:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ciencias y al Instituto de Geología, por brindarme la posibilidad de acceder al conocimiento y poner a mi disposición lo necesario para la satisfacción de mis inquietudes científicas y culturales.

A la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP), por la beca brindada para la realización del doctorado y a la Dirección de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), por el apoyo económico otorgado para la realización de la investigación, a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

A las autoridades del vivero Nezahualcoyotl del Gobierno de la Ciudad de México, por la donación de las plantas de higuera.

Con respeto y admiración, al Dr. David Flores Román, por la entusiasta y acertada dirección del trabajo de investigación. Por su paciencia, dedicación y especialmente, por transmitirme sus conocimientos y obsequiarme su tiempo.

A los miembros del Jurado, Dra. Norma Eugenia García Calderón, Dr. David Flores Román, Dr. Ignacio Méndez Ramírez, Dr. Jorge Dionisio Etchevers Barra, Dr. Christian Prat Boutin, Dr. Fernando De León González y Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, por sus destacadas sugerencias, que permitieron el desarrollo de esta investigación y ampliaron mi criterio y conocimiento sobre la Ciencia del Suelo.

A mis amigos, compañeros y colegas del laboratorio de Fertilidad de Suelos, Aleida García Cruz, Jessica I. Díaz Avelar, Tania Izquierdo Castro, Tania A. Vargas González y Humberto Núñez Cardona, por su colaboración y amistad. En forma muy especial a Gilberto Vela Correa por su invaluable apoyo e incólume alegría con que recorrió conmigo el complejo e interesante mundo de los suelos y los tepetates.

A todos los integrantes del departamento de Edafología, por brindarme su tiempo y apoyo durante mi formación profesional y de posgrado. Especialmente al Dr. Jorge E. Gama Castro, Dra. Ernestina Vallejo Gómez, M. en C. Sergio Palacios Mayorga, M. en C. Lourdes Flores Delgadillo, C. Jorge René Alcalá Martínez, C. Pedro Avilés Jaimes, M. en C. Carolina Jasso Castañeda y Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, por compartir conmigo sus conocimientos y amistad.

Muy especialmente al Ingeniero Rodolfo Del Arenal Capetillo, por ser un importante eslabón de mi formación profesional y de posgrado, por ser parte fundamental de mi formación personal y por ser el mejor de los amigos.

Con profunda admiración, al Dr. Dante J. Morán Zenteno, Dr. Luca Ferrari Pedraglio y Dr. Juan Ignacio Rangel, por ser mis iconos de cultura, ciencia, humanismo y perseverancia, además de maravillosos amigos.

Al Dr. Rubén Kachaturov, M. en C. David Flores Hernández y Dr. Víctor Malpica Cruz, por su incondicional amistad y apoyo.

Al Dr. Sergio Rafael S. Cevallos Ferríz, por su valiosa y desinteresada colaboración.

A la Dra. Norma E. García Calderón, M. en C. María del Socorro Galicia Palacios, Dra. Italia Mercado Sotelo, Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza, del Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias, por el apoyo brindado para la realización de los análisis bioquímicos y por la calidez con que me acogieron.

Al Dr. Ignacio Méndez Ramírez y al Ing. José Luis Pablos Hach, por el gran apoyo brindado para la realización de los análisis estadísticos.

A la Dra. Elena Centeno García y M. en C. Barbara Martiny, por la revisión crítica del abstract.

Al Ing. Enrique González Torres, Secretario Técnico y al personal de cómputo, Francisco Montaña Coahuiláz y Rosario Flores Ramos, sin cuyo apoyo, este trabajo no hubiera sido posible.

A todo el personal académico, técnico y administrativo del Instituto de Geología, que facilitó mi desempeño e hizo grata mi estancia en el Instituto

A los Sres. Benito Abdón y Gonzalo Abdón, de la población de Tetela del Volcán, Morelos, por confiar en el éxito de la investigación y por el invaluable apoyo brindado para el establecimiento del experimento en campo.

A mis muy queridos amigos, Gaby, Chuy, Gris, Sandy, Noemi, Carmelita, Silvia, Gina, Adriana, Othon, Gerardo, Memo y Julio, por estar siempre a mi lado.

A los Oxisoles, por los gratos momentos compartidos.

A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud, por haber convertido estos años en un período de intenso crecimiento personal y profesional.

CONTENIDO		Página
RESUMEN		i
ABSTRACT		ii
I. INTRODUCCION		1
II. MARCO TEORICO		2
1. Tepetates		2
a. Definición		2
b. Importancia		4
c. Habilitación al proceso productivo		8
2. Fertilidad y Calidad		11
a. Definición		11
b. Diagnóstico		14
c. Indicadores de calidad para tepetate		15
3. Modificación de la Calidad		19
a. Importancia		19
b. Especies vegetales		19
c. Enmiendas		25
III. OBJETIVOS		31
1. General		31
2. Específicos		31
IV. HIPOTESIS		32
V. METODOLOGIA		33
1. Indicadores Químicos		33
a. Diseño experimental		33
b. Descripción del experimento		35
c. pH		39
d. Materia orgánica		39
e. Capacidad de intercambio catiónico		40
f. Bases intercambiables		40
g. Saturación de bases		40

2. Indicadores Físicos	41
a. Diseño experimental	41
b. Descripción del experimento	41
c. Formación de agregados	44
d. Estabilidad de agregados	44
3. Indicadores Bioquímicos	45
a. Diseño experimental	45
b. Carbono	45
c. Polisacáridos	46
d. Acidos fúlvicos	46
e. Acidos húmicos	46
4. Compuestos Orgánicos – Agregación Estable	47
a. Diseño experimental	47
b. Compuestos orgánicos y agregación	47
c. Compuestos orgánicos y estabilidad	47
VI. RESULTADOS Y DISCUSION	48
1. Indicadores Químicos	48
a. pH	48
b. Materia orgánica	51
c. Capacidad de intercambio catiónico	57
d. Bases intercambiables	58
e. Saturación de bases	59
f. Discusión general	60
2. Indicadores Físicos	62
a. Formación de agregados	62
b. Estabilidad de agregados	81
3. Indicadores Bioquímicos	96
a. Carbono	96
b. Polisacáridos	97
c. Acidos fúlvicos	99
d. Acidos húmicos	100
4. Compuestos Orgánicos – Agregación Estable	106
a. Compuestos orgánicos y agregación	106
b. Compuestos orgánicos y estabilidad	109
VII. CONCLUSIONES	116
VIII. LITERATURA CITADA	117
IX. APENDICES	I

RESUMEN

La exposición de capas endurecidas de origen piroclástico, llamadas tepetates, se lleva a cabo por la pérdida natural o antropogénica del suelo. Su afloramiento da como resultado áreas improductivas, fácilmente erosionables. La roturación del tepetate y la compensación de sus carencias nutrimentales, son prácticas comunes que han permitido el establecimiento de especies vegetales en estas capas. Sin embargo, algunos problemas relacionados con la recompactación de los fragmentos, la escasa formación de suelo y el uso de indicadores de calidad inadecuados, son aspectos que no han sido resueltos debido, en parte, al poco conocimiento de la dinámica química, física y bioquímica de este sistema.

El estudio se enfocó al uso de un grupo de indicadores físicos, químicos y bioquímicos de calidad de suelo, para caracterizar al tepetate y dar seguimiento a las modificaciones ocasionadas por la introducción de especies vegetales y adición de enmiendas. Con tal fin se establecieron plantas de higuera (*Ficus carica* L.) y pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth) en tepetate roturado, con adición de estiércol de bovino y fertilizante inorgánico. El experimento se realizó en condiciones de invernadero y campo, durante un período de dos años. Los resultados fueron procesados estadísticamente por análisis multivariados y correlaciones canónicas.

El análisis químico mostró que el pH, la C.I.C., el contenido de cationes intercambiables y la S. B., del tepetate, son potencialmente apropiados para un uso frutícola o pecuario y no se modificaron por los tratamientos. La calidad del tepetate mejoró como resultado del incremento de M. O. ocasionado por las plantas, lo que favoreció su habilitación a mediano plazo. Los indicadores físicos, fueron los adecuados para conocer la frecuencia y velocidad de formación de agregados estables. Este proceso estuvo determinado por la morfología radical. La higuera favoreció la desintegración de los fragmentos, mientras que el pasto Rhodes propició la agregación. Los valores de estabilidad de agregados mostraron la naturaleza temporal y transitoria de los enlaces entre fragmentos. El fertilizante incrementó la rizodepositación, mientras que el estiércol no tuvo influencia en la agregación. La dinámica bioquímica reveló un aporte significativo de polisacáridos y sustancias húmicas de las plantas y el estiércol, al tepetate. Se observó una correlación positiva entre la agregación estable y el contenido de polisacáridos y sustancias húmicas.

En conclusión, las especies vegetales y enmiendas utilizadas, mejoraron la calidad del tepetate, al incrementar su fertilidad química y favorecer la creación de una estructura constituida por agregados estables. Esto último, como consecuencia del aporte de compuestos orgánicos susceptibles de actuar como enlace entre los fragmentos.

ABSTRACT

Indurated layers of pyroclastic origin, known as tepetates, are exposed as the result of soil loss by natural and anthropogenic processes. These exposed tepetate layers have formed low productivity areas that are easily eroded. Fragmentation of the tepetate and the compensation of certain nutritional deficiencies have become common practices that permit crop production in these layers. However, some problems related to the re-compaction of fragments, the poor formation of soil and the application of unsuitable soil quality indicators have remained unresolved, due in part to insufficient knowledge of the chemical, physical and biochemical dynamics of this system.

This study was focused on the use of a group of physical, chemical and biochemical soil quality indicators in order to characterize the tepetate and to monitor modifications produced by the introduction of plant species and other amendments. The experiments that were carried out consisted of growing fig - trees (*Ficus carica* L.) and Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth) in tepetate that had been fragmented and to which bovine manure and inorganic fertilizer were added. Experiments were performed both in greenhouse and field conditions during two years. The results were statistically processed by multivariate and canonical correlation analyses.

The chemical analyses showed that the pH, cationic exchange capacity, exchangeable cation content and base saturation of the tepetate are potentially appropriate for fruit and grass crops, and were not modified by the experiment conditions. The increase in organic matter due to the introduction of the selected plants improved the tepetate quality and favored its middle term habilitation. The physical indicators proved to be suitable for determining the frequency and the rate of stable aggregate formation. This process seems to be controlled by the radical morphology. The fig-tree crop favored the disintegration of the fragments, whereas the Rhodes grass stimulated aggregation. The aggregate stability values indicate the temporal and transitory character of bonding among the fragments. The fertilizer increased rhizodeposition and the manure did not have any influence on the aggregation process. The biochemical dynamics showed that there was a significant contribution of polysaccharides and humic substances from plants and manure to the tepetate. A positive correlation was observed between the stable aggregation and the content of both the polysaccharides and humic substances.

In conclusion, the plants species and the amendments used improved the tepetate quality by increasing its chemical fertility and favoring the stable aggregate structure. The latter was the consequence of the addition of organic compounds that produced bonds among fragments.

I. INTRODUCCION

El afloramiento de los tepetates, capas endurecidas de origen piroclástico modificadas por procesos edafogénicos, constituye un problema ecológico, agrícola y social, debido a que su exposición implica intensos procesos erosivos, exposición de un sustrato no apto para el desarrollo de especies vegetales y, altos costos de inversión para tratar de recuperarlos o habilitarlos a un uso determinado.

Generalmente, el tepetate subyace a una capa de suelo fértil de espesor variable. Sin embargo, la pérdida del suelo ha permitido que la capa dura aflore, dando lugar a áreas no aptas para la agricultura. El tepetate en estado natural es improductivo, de tal manera, que las zonas en las que aflora se encuentran totalmente expuestas a la acción de los fenómenos erosivos. Condición que propicia que la extensión de las zonas con tepetate, se incremente.

Desde en punto de vista agrícola, pecuario y forestal, la presencia del tepetate ocasiona que la emergencia de las plántulas, el crecimiento radical, el movimiento del agua hacia horizontes inferiores y el intercambio gaseoso, sean afectados negativamente o impedidos. Lo que se asocia con la estructura masiva, que le confiere una resistencia a compresión simple superior a 15 kg/cm^2 , porosidad menor al 30% y dominio de microporos. Además, de un contenido de materia orgánica inferior al 0.5 % y niveles de nitrógeno total y fósforo extremadamente pobres, lo que limita significativamente la actividad microbiana.

No obstante, el conocimiento y seguimiento de la modificación de las características del tepetate, a través del uso de indicadores específicos, representa una opción que podría favorecer el desarrollo de estrategias enfocadas a revertir el efecto de aquellos factores que restringen su incorporación al proceso productivo, facilitando, a mediano plazo, la formación de suelo y su funcionamiento como sistema dinámico y sustentable.

II. MARCO TEORICO

I. Tepetates

a. Definición

Los tepetates son capas endurecidas, de origen volcánico, que se presentan en el perfil de algunos suelos. En la República Mexicana ocupan una superficie mayor a 30, 000 km² y el conocimiento de sus características y de su problemática con relación a la actividad agrícola, así como aquella asociada con su afloramiento, se remonta a épocas prehispánicas (Hernández, 1987).

La palabra "tepetate", como término nativo, incluye a todas las capas endurecidas. Sin embargo, con base en estudios recientes, científicamente se considera como tepetates a las capas endurecidas formadas por procesos geológicos, con influencia posterior de procesos edafogénicos y cuyo depósito original involucra materiales piroclásticos (Dubroeuca *et al.*, 1989; Quantin *et al.*, 1992; Zebrowski, 1992).

Geológicamente, los tepetates son tobas alteradas, consolidadas por el soldamiento del material piroclástico, como resultado de su temperatura de depósito. El material original puede variar de ligera a medianamente soldado, lo que permitió el movimiento de fluidos y la posterior acción de los procesos pedogenéticos (Macías *et al.*, 1995). El proceso pedológico (Figura 1), involucra la presencia de arcilla y cementantes en solución y está regido por procesos físicos y químicos que tienen lugar a partir de la alteración de los feldespatos, el vidrio volcánico y otros materiales amorfos que normalmente constituyen a la toba (Oleshko *et al.*, 1994; Hidalgo *et al.*, 1997; Acevedo *et al.*, 2002).

Uno de los factores que intervienen en el proceso de endurecimiento de los tepetates es la precipitación de la sílice amorfa, cuyo contenido en estas capas, suele ser alto. Las observaciones de Kiftrick (1969), mostraron que la sílice constituye

un producto que se acumula porque precipita fácilmente, debido a su grado de disolución, que se encuentra entre 115 y 140 ppm de SiO_2 . La solubilidad es independiente del pH cuando es menor de 9, pero cuando es mayor se incrementa debido a la ionización del ácido ortosilícico (Shoji *et al.*, 1993).

De acuerdo con Flach *et al.* (1992), la presencia de sílice como agente cementante puede ser resultado de dos procesos: el lento intemperismo de los feldspatos o el rápido intemperismo del vidrio volcánico y materiales amorfos. Señalan que un 10% de sílice como $\text{Si}(\text{OH})_4$ puede actuar eficazmente como cementante, por su capacidad de ocupar los intersticios y formar capas alrededor de las partículas de arcilla, además, proponen la capacidad de polimerización de los geles de sílice, como el principal responsable de dicho efecto.

Por lo que se refiere a los procesos de precipitación y recristalización asociados a la movilidad de la sílice, Flach *et al.* (1969, 1992), mencionaron que la formación de ópalo A y ópalo CT, productos intermedios de la alteración del vidrio volcánico, depende directamente de la cinética de precipitación de la sílice. El ópalo A se forma cuando la concentración de $\text{Si}(\text{OH})_4$ en el fluido intersticial es superior a 60 mg/l y el ópalo CT, por alteración del ópalo A cuando la concentración se encuentra entre 20 y 60 mg/l. Cuando la concentración es menor de 20 mg/l, lo que predomina es el cuarzo microcristalino.

Durante la alteración del vidrio volcánico puede haber formación de minerales secundarios. Cuando se presentan temporadas secas, seguidas por períodos de alta humedad, la desecación favorece la concentración de la sílice en la solución y la formación de haloisita y cristobalita. Por el contrario, cuando las precipitaciones están bien distribuidas a lo largo del año, la concentración de sílice es baja y se forma caolinita. Cuando la concentración de sílice es elevada, en relación con la del Al_2O_3 , puede haber formación de esmectita (Thiry y Millot 1987; Velde, 1995).

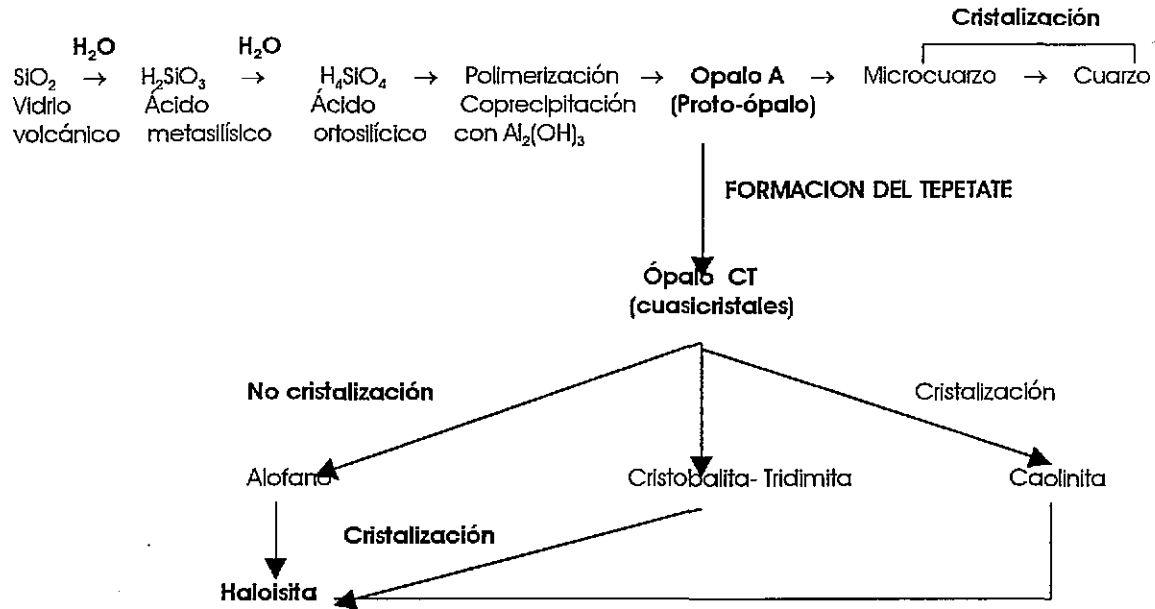


Figura 1. Proceso pedogénico de formación del tepetate

b. Importancia

En México, la distribución de las capas endurecidas de origen volcánico es muy amplia. El uso agrícola, pecuario y forestal de las áreas con tepetate, está severamente limitado por la erosión del suelo sobreyacente, así como por la dureza y baja fertilidad de la capa endurecida (Etchevers *et al.*, 1992; Navarro y Zebrowski, 1992). El afloramiento del tepetate constituye una forma grave de degradación, ya que la pérdida de la capa fértil es siempre resultado de fenómenos erosivos, cambio de uso del suelo y mal manejo del mismo (Werner, 1992; Quantin *et al.*, 1998).

Desde el punto de vista agrícola, la exposición del tepetate a la superficie o su presencia a escasa profundidad, ocasiona problemas debido a su dureza,

escaso contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, estructura masiva y alta densidad aparente (Quantin, 1998). Todo lo cual, influye negativamente en el intercambio gaseoso y el movimiento del agua, así como en aquellos procesos que los involucran, como son, la síntesis de compuestos orgánicos, la dinámica de los ciclos biogeoquímicos y la disponibilidad de nutrimentos. Procesos que, además, afectan significativamente la emergencia de las plántulas, el desarrollo radical y el establecimiento de especies vegetales y microorganismos (Navarro, 1998).

A causa de la dureza y carencia de materia orgánica del tepetate, su manejo requiere insumos y equipo, cuyo costo resulta de difícil acceso para los productores, lo que propicia el abandono de las zonas en las que se encuentra aflorado, convirtiéndolas en áreas improductivas y expuestas a los fenómenos erosivos, con lo que se favorece una continua y rápida degradación (Flores *et al.*, 1996; Quantin *et al.*, 1998).

En México se ha reportado la presencia de tepetates en los estados de Tlaxcala, Puebla, Michoacán, Jalisco, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Querétaro y Aguascalientes. En el Eje Neovolcánico, que está considerado como la región con mayor densidad poblacional del país, los tepetates (aflorados y no aflorados) ocupan una superficie aproximada de 30,700 km², el equivalente al 27% de su superficie total (Zebrowski, 1992). A este respecto, Servenay y Prat (2000) mostraron que los tepetates afloran, primero, al nivel de los piedemontes de las sierras, en donde se concentra la pequeña agricultura de secano.

Si se considera que México es un país en el que gran parte de su economía está basada en el aprovechamiento del suelo, la habilitación de áreas con tepetate, en los estados del Eje Neovolcánico en los que se ha detectado su presencia, constituye un problema cuya solución debe considerarse desde un punto de vista científico, social y económico.

En el estado de Morelos, que se ubica en la región Centro-Sur de la República Mexicana, entre los 18°22'08" y 19°07'10" de latitud Norte y 98°37'08" y 99°30'09" de longitud Oeste, los estudios de Flores *et al.* (1992, 1996) y Servenay y Prat (2000), indican la presencia de tepetates en la zona de piedemonte de las estructuras volcánicas, que corresponde a una franja altitudinal que va de los 1500 a los 2000 m (Figura 2), en donde podrían ocupar una superficie de 65,000 ha (D. Flores Román y G. Vela Correa, Comunicación personal, enero del 2001).



Figura 2. Distribución de los suelos con tepetate en el estado de Morelos.

En dicha franja, queda comprendida una parte significativa de la superficie de 11 de los 33 municipios del estado; Zacualpan de Amilpas, Tetela del Volcán, Ocuilco, Yecapixtla, Atlatlahuacan, Tlayacapan, Totolapan, Tlalnepanitla, Tepoztlán, Huitzilac y Cuernavaca. El establecimiento de una metodología de manejo adecuada al ambiente físico y cultural, reviste importancia, debido a la intensa actividad agropecuaria y frutícola del estado, en el que el 53% de su

superficie territorial son tierras de uso agrícola y frutícola, el 5% de pastizal, el 8% forestal, el 31% de selva y sólo el 3% se destina a otros usos (INEGI, 2000).

El municipio de Tetela del Volcán se localiza al nordeste del estado de Morelos, a los 18°54' de latitud Norte y 98°44' de longitud Oeste, a una altitud de 2220 m y cuenta con una superficie territorial de 98.518 km². Geológicamente, forma parte de la estructura del estratovolcán Popocatepetl y presenta capas endurecidas en toda la región que comprende el piedemonte. Dichas capas, de acuerdo con la geología de la zona, caracterizada por derrames de lava, flujos piroclásticos y flujos de lodo, debieron originarse de tobas de ligera a medianamente consolidadas, que se formaron a partir de flujos piroclásticos o materiales piroclásticos de caída (Macías *et al.*, 1995).

La vegetación nativa en el municipio, conformada por bosques de encino y encino – pino, actualmente se encuentra perturbada, debido a la deforestación de que ha sido objeto, para integrar las zonas a la fruticultura y agricultura. Durante el ciclo de cultivo 1998/1999, la agricultura se caracterizó por: (a) 682 ha cultivadas con huertas de aguacatero, tanto en el ámbito de parcela familiar, como comercial, (b) 263 ha con huertos de durazno, (c) 42 ha con higo, (d) 1768 ha con otros cultivos perennes como pera, chabacano, ciruela, zarzamora, manzana, capulín y tejocote, (e) más de 900 ha con cultivos de ciclo corto en condiciones de temporal, como maíz, frijol y jitomate, (d) 2 ha de pastizal inducido y, (e) floricultura intensiva (INEGI, 2000).

La actual situación frutícola, agrícola y pecuaria del municipio, aunada a las condiciones ambientales prevalecientes, precipitación total anual de 1062 mm, la intensidad, frecuencia y ocurrencia de los aguaceros, así como a las pendientes de medias a fuertes, ha incrementado la susceptibilidad del suelo a la erosión, permitiendo el afloramiento del tepetate. Por lo que es posible observar extensas

áreas improductivas, en las que estas capas endurecidas están totalmente expuestas a los fenómenos erosivos.

c. Habilitación al proceso productivo

La habilitación agroforestal de los tepetates ha sido motivo de interés y preocupación desde la época prehispánica. Algunos grupos, de los que destacan los tlaxcaltecas, establecieron prácticas de manejo que hasta nuestros días se consideran indispensables y que consistían en la roturación de la capa endurecida, la adición de ceniza de maguey como abono y el establecimiento, durante el primer año, de especies con alta producción de residuos susceptibles de ser adicionados al tepetate, con lo que lograban, en dos años, su habilitación para cultivo de maíz (Hernández, 1987).

Actualmente, organismos nacionales (Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Universidad Autónoma de Veracruz, Universidad Nacional Autónoma de México) e internacionales (IRD de Francia, Universidad de Giessen de Alemania, Fundación México - Alemania y la Unión Europea), han establecido en México programas enfocados al estudio de la caracterización morfológica, cartográfica, mineralógica y micromorfológica de los tepetates, así como de su erodabilidad y fertilidad.

Dichos estudios (Etchevers *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1992; Werner, 1992; Zebrowski, 1992; Prat *et al.*, 1997), han aportado información valiosa sobre las características físicas, químicas, biológicas y posibilidades de manejo, de estos materiales. A través de ellos se ha podido delimitar el origen de su problemática y revertir o aminorar sus características negativas, estableciéndose como indispensable para su habilitación e integración a la producción, la roturación de la capa como medio para disminuir la dureza e incrementar la porosidad y, la

adición de fertilizantes inorgánicos y abonos orgánicos, para incrementar la fertilidad y disponibilidad de nutrimentos para las plantas y microorganismos.

Con esa información como base, se ha logrado establecer en tepetate algunos cultivos de leguminosas, gramíneas y arbóreas (Navarro y Zebrowski, 1992; Arias y García, 1992; Prat *et al.*, 1997). Las especies forestales se han usado como parte de programas de reforestación, conservación y recarga de acuíferos, pero también por su fuerza de penetración radical ya que, en el caso de las especies rústicas como las latifoliadas y coníferas, se adaptan fácilmente a condiciones edáficas adversas (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001).

La roturación modifica la estructura del tepetate y da como resultado fragmentos que facilitan el establecimiento de las plantas, pero susceptibles de ser recompactados o erosionados, a causa de las fuerzas de impacto y rompimiento de las gotas de lluvia y de las involucradas con el laboreo (Quantin *et al.*, 1992), por lo que por sí sola no asegura la habilitación. Además, las partículas y pequeños fragmentos resultantes la desintegración, obstruyen los espacios llres, lo que repercute negativamente en la porosidad efectiva, con todos los problemas que este hecho conlleva (Janeau *et al.*, 1992; Lauffer *et al.*, 1997).

Lo anterior, hace indispensable la modificación del tepetate, mediante la formación de una estructura constituida por agregados, que permita la generación de una capa sin las limitantes que presenta en estado original. Los agregados aportan al suelo condiciones óptimas para el desarrollo de plantas y microorganismos, lo que se debe a su relación con la porosidad y la resistencia del sustrato a la erosión y recompactación (Hillel, 1982; Singer *et al.*, 1992).

La materia orgánica desempeña una función importante en la formación de agregados en tepetate, debido a que, a través de su descomposición y resíntesis, se producen compuestos que actúan como enlace entre la fracción mineral

(Perfect y Kay, 1990). Además, contribuye a corregir la deficiencia de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, esenciales para el desarrollo de especies vegetales y microorganismos, cuyo contenido en el tepetate es bajo (Etchevers *et al.*, 1997; Ferrera *et al.*, 1997). Sin embargo, la agregación en sí misma tampoco es suficiente, sino que es necesario que los agregados formados sean suficientemente estables para que resistan los cambios bruscos de humedad y labranza.

La resistencia de las unidades a las fuerzas de rompimiento como el arrastre por agua o viento y el laboreo, depende, principalmente, de la presencia de materia orgánica y del tipo de compuestos involucrados. De tal manera, que el conocimiento de la transformación de los compuestos orgánicos adicionados al tepetate, resulta indispensable para controlar y mantener los cambios estructurales con fines de habilitación (Feller *et al.*, 1996).

De acuerdo con Etchevers *et al.* (1997), Ferrera *et al.* (1997), Acevedo *et al.* (2001) y Velázquez *et al.* (2001), en tepetate fragmentado, los productos de rizodepositación, actúan como enlace entre la fracción mineral y dan lugar a la formación de agregados estables. La estabilidad estructural así lograda, se incrementa al aumentar el tiempo de permanencia de plantas sobre el tepetate, por la acción continua de la transformación de la materia orgánica.

Hayes y Tapp (1994) y Tisdall (1994), han destacado que las especies vegetales contribuyen decisivamente a la recuperación de suelos. Sus experimentos demuestran la efectividad de las plantas en la formación de agregados y en la modificación de suelos con una estructura deficiente, lo que se relaciona directamente con el efecto del sistema radical en la fragmentación, reorganización y estabilización del material.

En sus estudios, los mismos autores señalaron que la fragmentación se presentó como respuesta a la presión ejercida por las raíces, durante su

crecimiento. La agregación fue resultado, principalmente, del empaquetamiento de grupos de partículas por las raíces y de la formación de puentes de naturaleza orgánica con la fracción mineral. La estabilidad dependió de los compuestos orgánicos aportados por las plantas, los cuales, por ser de carácter hidrófobo, impidieron la disgregación, al regular la entrada del agua a las unidades.

Estudios realizados en México, en condiciones de invernadero, con tepetate fracturado (Velázquez *et al.*, 2001; Acevedo *et al.*, 2001), mostraron que las especies vegetales influyeron significativamente en la modificación de la estructura. De acuerdo con los resultados, las plantas con raíces axonomorfas y gran fuerza de penetración, como la casuarina y el eucalipto, favorecieron el rompimiento de los fragmentos iniciales (50%) y la formación de macroagregados por empaquetamiento radical. Los pastos, por su parte, indujeron la formación de altos porcentajes de macroagregados (25%) y microagregados (10%) estables, como resultado de su rápida proliferación radical y de la capacidad de sus raíces para penetrar en poros de diámetro reducido.

De lo anterior, surge la idea de que los tepetates son susceptibles de habilitarse a un uso frutícola o pecuario, si se induce el proceso de fragmentación - agregación, la adición de materia orgánica, el establecimiento de plantas con un alto potencial de agregación y el seguimiento de los cambios estructurales.

2. Fertilidad y Calidad

a. Definición

El suelo constituye un componente importante de la biosfera. Actúa como sustrato para la producción de alimentos y fibras, como base de las comunidades naturales de plantas, como filtro para el agua y el aire, tiene influencia sobre el clima global, recibe y degrada productos tóxicos, transforma los residuos de

plantas y animales reciclando los nutrimentos y actúa como sistema para secuestrar carbono atmosférico (Etchevers, 1999).

De acuerdo con la Word Reference Base of Soil Resources (1999), el suelo se define como el "continuo de espacio - tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, siendo el producto de la alteración de rocas y materiales, mediante los procesos pedogenéticos que operan a través del tiempo sobre el material parental y el propio suelo".

No obstante la innegable influencia del suelo sobre la supervivencia de las especies, el ser humano ha inducido su degradación a través de la erosión, contaminación, cultivo extensivo, sobrepastoreo, tala, salinización y desertificación (Doran y Zeiss, 2000), dejando al descubierto, en muchos casos, las capas subyacentes, cuyas características no siempre son adecuadas para el establecimiento de especies vegetales o animales.

Una capa, es un sustrato en el que se reconocen propiedades inherentes al material parental, pero poco afectada por procesos pedogenéticos, por lo que carece de las propiedades diagnósticas de un horizonte. Puede presentar intemperización geoquímica, cementación, densidad aparente alta y acumulación de carbonatos o sales solubles (IMT y SCT, 1998). Algunas, como los tepetates, son susceptibles de propiciar la formación de suelo, si se conocen y compensan los factores que limitan su fertilidad (ORSTOM, 1997).

La fertilidad de suelos, es una disciplina científica que integra los principios básicos de la biología, la química y la física de suelos, para desarrollar prácticas que permitan manejar los nutrimentos de una manera benéfica, tanto ambiental como económicamente (Sims, 2000). Es la cualidad que permite a un suelo proporcionar los compuestos apropiados, en las cantidades debidas y en el

balance adecuado, para el crecimiento de plantas específicas, cuando factores tales como la luz y la temperatura son favorables (SEMARNAT, 2000).

Calidad es un concepto más amplio, que se refiere a la capacidad de una clase específica de suelo para funcionar, dentro de los límites de un sistema natural o alterado, como sostén de la productividad de las plantas y los animales, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, sostener la salud humana y su hábitat (Karten *et al.*, 1997). Este concepto, aplicado a tepetates, parecería contradictorio, dado que por sus características, en estado natural, el tepetate no permite el desarrollo de plantas y microorganismos. Sin embargo, la calidad puede ser referida a sistemas naturales o alterados, considera factores tanto del orden físico, como químico y hace referencia al uso del suelo, de tal manera, que podría hablarse de la calidad agrícola del tepetate, aunque antes de la habilitación ésta sea muy baja o, probablemente, nula.

Doran y Zeiss (2000) sugieren que calidad y sostenibilidad son sinónimos. Sin embargo, de acuerdo con Herrick (2000), la calidad constituye un indicador del manejo sostenible del suelo, ya que para el desarrollo de técnicas de manejo, es necesario considerar la eficiencia de uso del recurso, su capacidad para mantener un equilibrio con el medio y que sea favorable tanto para el hombre, como para el resto de las especies. Lo cual se puede conocer a través de la evaluación de la calidad y de la dirección de los cambios a través del tiempo.

Por lo tanto, la evaluación de la calidad y fertilidad, ayuda a identificar áreas con problemas ambientales o de producción, hacer estimaciones realistas y precisas sobre la producción de alimentos y fibras, dar seguimiento a los cambios en la sostenibilidad del recurso y apoyar a los diferentes sectores en la formulación y evaluación de políticas de uso de suelo y agricultura sostenible. Por lo que puede ser aplicado a diferentes sustratos.

b. Diagnóstico

El diagnóstico de la calidad, se lleva a cabo a través de indicadores específicos, que se seleccionan con base en la función del sustrato, lo que permite aplicarlos a ecosistemas definidos (Karlen *et al.*, 1997). Los indicadores son propiedades, características o procesos, susceptibles de medir, para evaluar los cambios que ocurren en el suelo como resultado de la intervención directa o indirecta del hombre. Su inspección permite conocer la situación actual del sistema, el posible impacto de una intervención, el impacto y dirección de las intervenciones y la sostenibilidad del recurso (Herrick, 2000). Lo más relevante es, que todo lo detectado debe enfocarse a corregir y evitar la ocurrencia de daños irreversibles en la calidad, o bien, a su mejoramiento (Wang *et al.*, 1995).

Los indicadores se dividen en sensoriales y objetivos (Arshad *et al.*, 1996). Los sensoriales son los que se obtienen de observaciones simples o de la interpretación de fotografías. Los objetivos son procesos, características y propiedades que pueden medirse y se dividen en físicos, químicos y biológicos. Los físicos reflejan las limitaciones para el crecimiento radical, la emergencia de las plántulas y la infiltración; los químicos se refieren a condiciones que afectan la relación suelo - planta, la disponibilidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de nutrimentos y el efecto de los contaminantes; los biológicos se relacionan con la actividad y productos de los microorganismos.

Los indicadores objetivos pueden dividirse con base en su sensibilidad, es decir, de acuerdo con el tiempo que transcurre entre la aplicación de una intervención y la modificación de la característica (Wang *et al.*, 1995). Lo cual resulta útil para la elección de los indicadores para cada tipo de estudio:

- Sensibles, que son aquellos susceptibles de cambiar significativamente en períodos menores a 10 años. Incluyen: pH, materia orgánica, carbono

orgánico, fósforo y potasio asimilables, nitrógeno total, densidad aparente, distribución de agregados y Fe y Al extractable para suelos podzólicos.

- Moderadamente sensibles, los cuales se modifican, en la mayoría de los suelos, sólo después de 10 años. Tal es el caso de capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables, carbonatos y retención de humedad.
- No sensibles, que son propiedades cuya modificación es significativa después de 100 años, como por ejemplo, la mineralogía de las arcillas, el área superficial total y los óxidos totales.

Generalmente se evalúan las propiedades sensibles (indicadores dinámicos), debido a que su medición es menos costosa, accesible y los resultados son a corto plazo. Sin embargo, las de sensibilidad moderada reflejan el potencial del suelo para funcionar como tal, son indispensables para la correcta interpretación de las sensibles y constituyen la base para establecer intervalos apropiados para cada indicador dinámico (Herrick, 2000).

c. Indicadores de calidad para tepetate

El número y tipo de indicadores a usarse en un estudio, depende de los objetivos, la función y características del sustrato, su localización en el paisaje y el tiempo de observación. No obstante, existe consenso en que debe establecerse un grupo de indicadores con los más sencillos de medir, lógicos y replicables, los cuales deben evaluarse, invariablemente, en todas las investigaciones, a fin de que los resultados puedan compararse y extrapolarse.

De acuerdo con Doran y Zeiss (2000), los indicadores básicos deben cumplir con cinco requisitos: (1) ser sensibles a los cambios en el manejo, pero no a los factores climáticos a corto plazo, (2) tener una correlación positiva con las funciones que benefician al suelo, (3) que ayuden en la comprensión de por qué

una función es o no deseable, (4) ser comprensibles y útiles para todos aquellos sectores encargados del manejo del suelo y (5) que su medición sea accesible y económica, en términos de tiempo y dinero.

Por lo tanto, con conocimiento de los factores que limitan la fertilidad potencial y calidad de los tepetates, los indicadores cuyo seguimiento podría permitir dirigir y controlar la magnitud de los cambios ocurridos por la introducción de algún factor, serían aquellos que reflejen su condición nutrimental y estructural. De éstos, destacan pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, y saturación de bases, en cuanto a fertilidad (Etchevers *et al.*, 1992; SEMARNAT, 2000) y formación, distribución y estabilidad de agregados, para la estructuración (Janeau *et al.*, 1992; ORSTOM, 1997).

El pH se considera un factor decisivo en la calidad, ya que tanto los cultivos, como la biota, se desarrollan en un intervalo que, en la mayoría de los casos, se encuentra entre 6 y 8, además de que la disponibilidad de nutrimentos, la estructura y la actividad de los microorganismos, también están influenciados por éste (Simpson, 1991). De acuerdo con Wang *et al.* (1995), se trata de la característica química más sensible a las prácticas de manejo, principalmente de aquellas que involucran la adición, al suelo, de compuestos inorgánicos.

La materia orgánica del suelo está constituida por diferentes organismos vivos, residuos de plantas y animales, ligeramente alterados o descompuestos, cuya susceptibilidad a una descomposición posterior, es variable (Gregorich *et al.*, 1995). Constituye una fuente de nutrimentos para las plantas y microorganismos; favorece la infiltración y retención del agua; reduce los riesgos de erosión; controla la eficiencia y repercusión de la aplicación de pesticidas; interviene en la solubilización de algunos minerales; tiene una alta capacidad de adsorción, intercambio catiónico y quelatación; su color oscuro favorece la absorción de calor y se asocia con la formación de agregados estables (Wang *et al.*, 1995).

Las prácticas de manejo influyen en la materia orgánica, en estrecha relación con el clima, el tipo de cultivo y el tiempo. Por lo que, a largo plazo, es posible equilibrar su contenido, pero no es fácil establecer una cantidad como óptima para mejorar la calidad (Sikora y Stott, 1996). Sin embargo, de acuerdo con Topp *et al.* (1995), la cantidad mínima necesaria, para considerar como buena la calidad de un suelo, debe ser de 3%. Respecto a las fracciones que pueden usarse como indicadores, deben considerarse aquellas que responden rápidamente a los disturbios antropogénicos, como carbono, polisacáridos, lípidos y enzimas (Dinel *et al.*, 1998). La materia orgánica se considera un indicador importante debido a que de su contenido y calidad, no sólo dependen todos los procesos edáficos, sino que influye directamente en otros indicadores.

La capacidad de intercambio catiónico, las bases intercambiables y la saturación de bases, son indicadores de suma importancia en la evaluación de la fertilidad y calidad química del suelo o de una capa endurecida, ya que reflejan el contenido de nutrimentos disponibles para las plantas. Pero también, porque mediante su determinación, es posible conocer la capacidad potencial del sustrato para intercambiar elementos y con base en ellos, establecer dosis de fertilización y abonado (SEMARNAT, 2000).

Desde el punto de vista físico, la condición del suelo tiene efectos directos e indirectos sobre la producción agrícola y el ambiente y en consecuencia, sobre la calidad de este recurso. Cuando las características físicas se manejan adecuadamente, es posible mantener el balance de agua y aire, incrementar la dinámica de los ciclos biogeoquímicos, facilitar el desarrollo radical y la emergencia de las plántulas, aumentar la resistencia a la erosión y disminuir el efecto de procesos degradativos (Arshad *et al.*, 1996).

La estructura se refiere al arreglo y organización de las partículas primarias en agregados, de acuerdo con determinados modelos o patrones. Un agregado, por

lo tanto, es un grupo de dos o más partículas primarias que presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas que con las partículas que las rodean (Hillel, 1982; Diné *et al.*, 1998). Su calidad es difícil de definir y medir, pero una buena estructura implica que la distribución y estabilidad de los agregados no limita el potencial de producción de los cultivos (Arshad *et al.*, 1996). Un suelo formado por agregados estables, capaces de resistir las fuerzas de impacto y rompimiento de la lluvia, el aire y la labranza, presenta mejores condiciones para el establecimiento de especies vegetales y mantiene al sistema en equilibrio (Topp *et al.*, 1995).

En condiciones óptimas, el suelo debe poseer grandes poros entre los agregados y poros pequeños en el interior de éstos, pero si la masa de suelo tiene baja densidad aparente o grandes espacios porosos, los procesos involucrados con el movimiento de agua, aire y el crecimiento radical, son afectados negativamente (USDA, 1996). El espacio poroso posee dos componentes, uno textural, que resulta del arreglo de las partículas minerales, se asocia a la porosidad intra - agregados y se modifica con el contenido de humedad. El otro estructural, que corresponde al arreglo de los agregados, se asocia a la porosidad inter - agregados y es afectado por la compactación (De León y Guérif, 1993).

En los agregados, las fuerzas de cohesión son mayores que las de separación (Hillel, 1982). Estas últimas, pueden ser de impacto y rompimiento, abrasivas y todas aquellas relacionadas con la entrada del agua a la unidad, mismas que se relacionan directamente con el cultivo, la labranza, los fenómenos erosivos y el humedecimiento (Topp *et al.*, 1995). Por lo tanto, los factores que incrementan la agregación son los que aumentan la permeabilidad, la cohesión entre partículas y moderan la entrada de agua a las unidades (Diné *et al.*, 1991), mismos que pueden agruparse en: coloides y cementantes inorgánicos, ciclos de humectación y secado, iones intercambiables, coloides y cementantes orgánicos, plantas y microorganismos (Tisdall y Oades, 1982).

3. Modificación de la Calidad

a. Importancia

La modificación de las características de un suelo, se da a través de procesos de adición, pérdida, transferencia y transformación de los minerales y la materia orgánica (IMT y SCT, 1998). Las características físicas y químicas del suelo determinan el establecimiento y desarrollo de especies vegetales y biota, pero al mismo tiempo, la presencia de éstas, modifica la dinámica de los procesos que tienen lugar en el suelo (Uren, 2001). Los cambios relacionados con las plantas y enmiendas, afectan la densidad de las poblaciones microbianas, la disponibilidad de nutrimentos y la solubilidad de los minerales (Neumann y Römheld, 2001).

Por lo tanto, el interés por mejorar la fertilidad y calidad de una capa endurecida roturada, se puede centrar en el estudio de la influencia de factores que incidan directamente y a corto plazo, en la disponibilidad de nutrimentos, la formación de agregados estables y la calidad de los compuestos orgánicos que se adicionen. Dos de los factores más importantes, los constituyen las especies vegetales y las fuentes directas o indirectas de materia orgánica y elementos nutritivos, como los estiércoles y fertilizantes inorgánicos.

b. Especies vegetales

El sistema radical de las especies vegetales es responsable de acelerar los cambios que ocurren en el suelo (Varanini y Pinton, 2001). Constituye el nexo entre la planta y el sustrato, es su medio de anclaje, lleva a cabo funciones vitales como la absorción de agua y nutrimentos, es un proveedor natural de materia orgánica al suelo y está considerado como el principal factor para favorecer la estructuración de suelos no agregados, o para modificar y dirigir la agregación en suelos con una deficiente o inadecuada estructuración (Tisdall, 1994). Además, los

productos de rizodepositación estimulan el crecimiento microbiano por su alto contenido energético, lo que influye, favorablemente, en la transformación de los compuestos orgánicos (Uren, 2001).

La influencia de las plantas en la estructuración es destacada, ya que no sólo favorece la desintegración del material, fase inicial de la agregación (Utomo y Dexter, 1982), sino que también, da lugar a la formación y estabilización de agregados. Su efecto puede ser físico, mediante los ciclos de humedecimiento y secado que se originan durante la absorción de nutrimentos, a través de la presión ejercida sobre el sustrato durante el desarrollo del sistema radical y, por la formación de estructuras reticulares que agrupan a las partículas y fragmentos en agregados. O bien, químico, como resultado de la liberación, al suelo, de los productos de rizodepositación (Tisdall y Oades, 1982; Tisdall, 1994).

El efecto de las raíces en la disgregación, se debe a la presión que ejercen sobre el sustrato, durante su crecimiento, la cual es suficiente para separar partículas y grupos de agregados. Al mismo tiempo, mediante la absorción de nutrimentos y agua, se crean condiciones de deshidratación que afectan la contracción y expansión de las arcillas (Hillel, 1982), con lo que disminuye la estabilidad de las unidades. Aunado a esto, el cambio de la relación catión/anión provocado por los protones liberados por las raíces, establecen condiciones de pH capaces de modificar el grado y velocidad de disolución de algunos compuestos o minerales (Badalucco y Kuikman, 2001).

Durante la elongación y expansión radical, se lleva cabo la separación de las unidades del suelo, debido a la presión que ejercen sobre ellas. Por ejemplo, las raíces de muchos pastos tienen diámetros de 0.25 mm o más, de tal manera que cuando el suelo tiene suficientes poros de mayor tamaño, proliferan sin problemas. Sin embargo, cuando el diámetro de los poros es menor, se requiere de una fuerza

de penetración mayor y de la producción de compuestos hidrolíticos, para lograr la alteración y disgregación de las unidades del suelo (Oades, 1993).

Las raíces de las plantas anuales ejercen presiones de hasta 9 MPa, pero su crecimiento se detiene y presentan cambios morfológicos importantes cuando los impedimentos sobrepasan los 3Mpa, lo que limita su crecimiento hasta en 80% (Bathke *et al.*, 1992). Sin embargo, las raíces de dicotiledóneas y arbóreas, ejercen una fuerte presión radial, con la que incrementan el diámetro de los poros y les permite penetrar en capas endurecidas o compactadas. En general, el crecimiento radical puede verse limitado cuando la densidad aparente es superior a 1.55, 1.65, 1.80 y 1.85 Mg/m³ en suelos arcillo – limosos, limosos, areno – limo - arcillosos y areno - limosos, respectivamente (Russell, 1988).

Las especies anuales tienen una capacidad de penetración limitada, pero logran alcanzar profundidades mayores a 30 cm al crecer en los llamados bioporos, que son aquellos canales que alguna vez fueron ocupados o hechos por otras raíces (u organismos) y que, al morir, se mantienen en el suelo debido a que sus paredes quedan recubiertas con compuestos orgánicos e inorgánicos de cierta estabilidad (Oades, 1993). En condiciones de baja humedad, las raíces se concentran en la superficie y llegan a cierta profundidad al crecer en las grietas, pero no pueden penetrar los bloques. Sin embargo, algunas raíces secundarias, terciarias o pelos radicales, crecen en los espacios que se forman por la reorganización de las partículas durante la absorción de nutrimentos, efecto que es más sobresaliente en las monocotiledóneas, por su densidad radical (Tisdall, 1994).

Por lo que respecta a la influencia de las raíces en la agregación, éstas constituyen agentes de unión temporales, si la formación de agregados se debe a fenómenos de empaquetamiento; transitorios, cuando es resultado de los compuestos liberados a rizósfera (rizodepositación) y, permanentes, en los casos en que el enlace con la fracción mineral está constituido por sustancias húmicas

(Hayes y Tapp, 1994). El empaquetamiento radical, actúa como agente estabilizador en las unidades > 0.25 mm de diámetro (macroagregados), mientras que los productos de rizodepositación y el humus, en los < 0.25 mm, es decir, en los microagregados (Feller *et al.*, 1996).

De acuerdo con Dorioz *et al.* (1993), la absorción de agua por raíces de pasto, promovió una orientación y compactación en un área de 0.2 mm, efecto que fue más intenso en partículas de arena y conjuntos de microagregados, lo que corroboró lo expuesto por Tisdall y Oades (1982), acerca de que las raíces ejercen influencia física en macromedios de 0.02 a 1.0 mm.

Cabe señalar que algunos restos orgánicos pueden dar lugar a la formación de grandes microagregados (0.09 a 0.25 mm), así como que, ocasionalmente, inclusiones de algunos desechos pueden contribuir a la formación de agregados de 0.02 a 0.09 mm (Hayes y Tapp, 1994). En el caso de partículas poco reactivas y medios con poco contraste de potenciales hídricos, el único cambio estructural efectivo es el que provocan los agentes temporales, por lo que las raíces tienen una gran capacidad para inducir la estructuración en condiciones en las que los mecanismos inorgánicos, o químicos, no son efectivos (Dorioz *et al.*, 1993).

El efecto químico de las raíces sobre la estructuración, está directamente relacionado con la transformación microbiana de sus restos y con los compuestos metabólicos liberados a la rizósfera por las raíces. Dichos compuestos pueden cubrir grupos de partículas, agregados y fragmentos, con capas hidrófobas que protegen a las unidades de la entrada abrupta del agua, lo que incrementa su estabilidad (Russell, 1988). Además, actúan como lubricantes al penetrar en los poros del suelo, con lo que se facilita el crecimiento radical; al mismo tiempo establecen enlaces con la fracción mineral y funcionan como cementantes orgánicos, lo que repercute positivamente en la estabilidad estructural (Uren, 2001).

Los compuestos de rizodepositación contienen todos los componentes de las plantas (Tabla 1), excepto clorofila. En general, poseen una capacidad de intercambio catiónico de 5.3 a 23.6 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$, en las monocotiledóneas y de 20.2 a 53.2 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$, en las dicotiledóneas, así como un alto potencial de aglutinación de la fracción mineral (Tisdall, 1994). Muchos exudados se transforman mediante el metabolismo microbiano (con potenciales hídricos de -120 a - 500 kPa) en geles de polisacáridos extracelulares, con capacidad de intercambiar y almacenar cantidades significativas de agua, lo que evita la disgregación (Uren, 2001).

De los compuestos liberados por las plantas, los polisacáridos, principalmente, tienden a formar capas sobre los agregados, pero también penetran en los poros y precipitan como cementantes relativamente insolubles (Hillel, 1982). Cuando establecen enlaces con la fracción mineral, forman complejos susceptibles de unirse entre sí y con otras fracciones (Tisdall, 1994). En el trabajo realizado por Dorioz *et al.* (1993), se observó que los polisacáridos impregnaron una superficie mayor de 0.05 mm alrededor de las partículas minerales y dieron lugar a la formación de complejos de alta estabilidad.

Tabla 1. Compuestos orgánicos liberados por las raíces de las plantas

PRODUCTO	COMPUESTOS
Exudados Radicales	Arabinosa, fructuosa, galactosa, glucosa, maltosa, mannososa, oligosacáridos, ribosa, sucrosa, xilosa.
Aminoácidos	α y β - Alanina, arginina, asparagina, ácido aspártico, cisteína, cistina, glutamina, ácido glutámico, glicina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, triptofano, tirosina, valina.
Ácidos orgánicos	Acético, ascórbico, benzoico, butírico, cítrico, fumárico, glutárico, glicólico, málico, malónico, oxalacético, oxálico, hidroxibenzoico, propiónico, succínico, tartárico, valérico, vanílico.
Ácidos grasos	Linoleico, oleico, palmítico, esteárico.
Esteroles	Campesterol, colesterol, sitosterol, estigmasterol.
Factores de crecimiento	Acido p-amino benzoico, biotina, colina, ácido N-metil nicotínico, vitamina B ₁ (tiamina), B ₂ (riboflavina) y B ₆ (piridoxina).
Enzimas	Amilasa, invertasa, peroxidasa, fenolasa, fosfatasa, proteasa, poligalacturonasa.
Nucleótidos y flavonas	Adenina, guanina, uridina, citidina, flavonona.
Varios	Auxinas, ácido hidrocianico, glucósidos, compuestos reductores, etanol, inositol y mioinositol, polipéptidos, dihidroquinona.

Fuente: Uren, 2001

Cada planta desarrolla un tipo de raíz característico, por lo tanto, la cantidad y calidad de los exudados también varía entre especies, incluso, entre cultivares, así como la intensidad de los procesos metabólicos (Brimecombe *et al.*, 2001).

Estudios sobre formación de agregados estables, con relación a especies vegetales con características contrastantes, han demostrado que la intensidad de agregación depende del tamaño, fuerza y densidad radical, así como de la cantidad y calidad de la materia orgánica que aportan al suelo. Las plantas perennes, a diferencia de las anuales, tienen mayor influencia sobre la estructura debido al tiempo que permanecen en el sustrato y a que la fracción del carbono fijado que liberan a la rizósfera es mayor (Neumann y Römheld, 2001). Con las anuales, se acelera la mineralización de la materia orgánica y la destrucción de los agregados, a causa de la frecuencia de labranza, además, su crecimiento radical se restringe al período anterior a la floración (Russell, 1988).

Como la exudación depende del estado fisiológico de las células de la raíz, aumenta durante las etapas de crecimiento activo, pero el contenido de carbohidratos y proteínas, así como la colonización microbiana, disminuyen conforme se incrementa la edad de la planta (Brimecombe *et al.*, 2001). A este respecto, Karimian y Razmi (1990), analizaron el efecto de especies perennes en las características químicas de un suelo y observaron un incremento de materia orgánica, fósforo, potasio, manganeso, zinc y cobre, como consecuencia del metabolismo radical. Los estudios de Topp *et al.* (1995), mostraron que el promedio de mejoramiento estructural de un suelo cultivado con forrajes, fue de 4.5 años y el decaimiento por cultivo de maíz, fue de 0.2 años.

De las investigaciones en las que se compara el efecto de plantas con sistemas radicales distintos, sobre la estructuración (Oades, 1993), se resume que la raíz de las monocotiledóneas tiene mayor capacidad de agregación que la de las dicotiledóneas y que de las primeras, los pastos son más eficientes que los

cereales, por formar y estabilizar agregados, simultáneamente. Lo cual se atribuye a la mayor cantidad de compuestos orgánicos producidos por los pastos, ya que al ser la raíz fascicular mucho más densa que la axonomorfa, cuenta con más células productoras de mucílagos (Wild, 1992; Brimecombe *et al.*, 2001).

Sin embargo, estudios recientes (Badalucco y Kuikman, 2001) mostraron que, aun cuando las raíces finas de los pastos se desarrollan rápidamente con dosis de fertilización nitrogenada menores y poseen mayor capacidad de exploración del suelo, las especies con raíces gruesas, en densidades similares a las de los pastos, producen cantidades significativamente más altas de rizodepositación, que las finas, como resultado de sus altas tasas metabólicas.

Cuando las raíces se asocian con bacterias o micorrizas, producen exudados diferentes de los producidos en forma independiente, pero el efecto en la estructura es el mismo. La ventaja de las micorrizas es que las hifas actúan como una extensión de la raíz y se incrementa el fenómeno de empaquetamiento (Haynes y Beare, 1997). En el caso de la asociación con bacterias, hay mayor rizodepositación y nitrógeno, lo que aumenta las poblaciones microbianas involucradas en los procesos de transformación (Brimecombe *et al.*, 2001).

c. Enmiendas

Cuando el contenido de materia orgánica de un suelo se incrementa, aumenta también su fertilidad, calidad y sostenibilidad (Brimecombe *et al.*, 2001). La rizodepositación constituye una la fuente natural de materia orgánica (Varanini y Pinton, 2001), pero otros materiales, como subproductos de origen animal, compostas y residuos orgánicos, también suelen adicionarse al suelo para incrementar el contenido de materia orgánica y corregir la deficiencia de nutrimentos.

La transformación de los compuestos orgánicos finaliza por un lado, con su mineralización y por otro, con la síntesis de compuestos que afectan la calidad del suelo. Esta transformación está regulada por los organismos, el tipo de residuos y las prácticas de manejo (Neumann y Römheld, 2001). La biota edáfica interviene en la descomposición de los restos a través de su ingestión, fragmentación en partículas finas, distribución, liberación de nutrientes y resíntesis de compuestos orgánicos, como parte de su metabolismo (Gregorich *et al.*, 1995).

Dado que la constitución de cada planta es variable, lo es también la calidad de la materia orgánica que aportan sus restos al suelo, por ejemplo, las leguminosas son ricas en almidones y proteínas, mientras que las gramíneas lo son en celulosa (Uren, 2001). También son diferentes los productos proporcionados por las diferentes partes de la planta. En las hojas dominan las proteínas y el contenido de lignina es de 5,5 a 9%, lo que favorece una rápida mineralización. En la raíz, la lignina se encuentra en concentraciones de hasta 20%, lo que disminuye la velocidad de descomposición (Romera y Guerrero, 2002).

La velocidad de descomposición depende, también, de la relación carbono nitrógeno (C/N). Cuando se requiere de un aporte inmediato de nitrógeno, se recomiendan restos con una relación C/N baja, pero si se desea incrementar la materia orgánica, se debe utilizar especies con una relación C/N alta, para que la mineralización sea mínima y máxima la humificación (Sikora y Stott, 1996). Además, cuando la relación C/N del sustrato es mayor a la de las poblaciones microbianas, puede presentarse una inmovilización del nitrógeno, lo que repercute en la disponibilidad de otros nutrientes (Badalucco y Kulkman, 2001).

Por lo que respecta a la influencia del manejo en la transformación de la materia orgánica, la labranza cero, en muchos casos, reduce su pérdida y conserva la estructura, incrementando la productividad (Uren, 2001). En el caso de la labranza tradicional, el continuo movimiento del suelo lo deja expuesto a la

erosión, con lo que se pierde materia orgánica y se crean condiciones de temperatura y humedad que aceleran su descomposición. Cuando un bosque es incorporado a la agricultura, hay una pérdida de materia orgánica estimada entre 50 y 70%, dependiendo del cultivo y el sistema de labranza (Gregorich *et al.*, 1995). En contraste, los forrajes y leguminosas bien manejados, desarrollan un extenso sistema radical, que aporta cantidades importantes de materia orgánica al suelo, principalmente ácidos poliurónicos, que mejoran significativamente la estructura (Brimecombe *et al.*, 2001).

Cuando se recurre al uso de estiércoles para mejorar la fertilidad y calidad de un sustrato, debe considerarse que la liberación de nutrimentos y su incorporación a los procesos físicos y químicos del sistema, no es inmediata. En general, durante el primer año se libera entre el 15 y el 50% de los nutrimentos y el resto, a lo largo de 5 o 6 años (Domínguez, 1997). Después de la aplicación, una parte de los constituyentes del estiércol se pierde como CO₂, otra permanece en el suelo en compuestos como carbohidratos y sólo una mínima fracción se humifica. Lo que conlleva la necesidad de aplicarlos en grandes cantidades para que ejerzan una acción significativa sobre el sustrato (Labrador, 1998), aunque a veces, esto trae como consecuencia la liberación de una gran cantidad de nitrógeno que no es aprovechada por las plantas y que al lixiviarse, puede ser contaminante.

En general, los estiércoles contienen más del 25% de materia orgánica. El de bovino, que es quizás el de mayor uso en México, posee una relación C/N de 20/1; 1.84% de N, 1.73% de P₂O₅ y 3.10% de K₂O, además de todos los elementos que las plantas necesitan para desarrollarse, como Ca, Mg, S, Mn, Zn, B, Cu, Co, Mo (Labrador, 1998). Trinidad (1999), señaló que la aplicación de estiércol de bovino incrementó la materia orgánica, C.I.C., Ca, Mg y K en más del 100%, debido a que intensificó la actividad microbiana. En la estructuración, la aplicación de abono de bovino durante dos años, a un suelo pobremente estructurado, aumentó la estabilidad de los agregados y la porosidad (Topp *et al.*, 1995).

Los compuestos que resultan de la transformación de los productos de rizodepositación y estiércoles, tienen una influencia diferencial en la estructuración (Tisdall y Oades, 1982; Hayes y Tapp, 1994). Los agentes transitorios son descompuestos en algunos meses por los microorganismos, pero poseen una gran capacidad de aglutinar a las partículas minerales (Dinel *et al.*, 1991; Uren, 2001). Los más importantes son los carbohidratos, pero también influyen compuestos como enzimas y lípidos (Neumann y Römheld, 2001). Su acción se asocia con la formación de agregados >0.25 mm y la estabilización de los menores de 0.5 mm (Tisdall, 1994; Haynes y Beare, 1997).

El 25% de la materia orgánica está constituida por carbohidratos, los cuales pueden encontrarse como azúcares o hemicelulosa. Los carbohidratos con grupos carboxilo en sus moléculas son más activos que los restantes, ya que pueden actuar como sitios de intercambio iónico, puentes de unión o ion común, o bien, como quelatantes (Guggenberger y Zech, 1994; Crowley, 2001). Ciertas sustancias mucilaginosas denominadas poliuronidos (levanas y dextranas), que se originan durante la descomposición de los carbohidratos, actúan como cementantes muy estables y pueden adsorber iones que se enlazan con los coloides minerales (Perfect y Kay, 1990; Brimecombe *et al.*, 2001).

Los polisacáridos, que son los carbohidratos con mayor influencia en la estructuración, se unen a la fracción mineral por medio de cationes, puentes de hidrógeno y enlaces de coordinación. Los complejos que forman son muy estables, debido a que la fracción mineral bloquea los sitios activos de la orgánica, con lo que la protege de la degradación enzimática y microbiana. Estos agregados pueden permanecer sin alteración por más tiempo que los formados por cementantes inorgánicos (Hayes y Tapp, 1994). La influencia de los polisacáridos sobre la agregación, se asocia a la formación de complejos cuando los polímeros están cargados y a la de recubrimientos hidrófobos, cuando son neutros (Guggenberger y Zech, 1994).

Los agentes de unión permanente, están constituidos por sustancias húmicas y se relacionan con la formación de microagregados muy estables (Gupta y Germida, 1988). Las sustancias húmicas son el resultado de la transformación química de restos vegetales, animales, exudados, hifas y células bacterianas, a través de los microorganismos (Varanini y Pinton, 2001). Pueden incluir, también, algunos polisacáridos que se estabilizan al asociarse con metales o arcillas (Tisdall y Oades, 1982). Se dividen en huminas, ácido húmico y ácido fúlvico, de acuerdo con su solubilidad en ácido o en álcali.

Las sustancias húmicas son coloides con anillos aromáticos y cadenas alifáticas, que dan lugar a moléculas con área superficial de $900 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ y capacidad de intercambio catiónico de 1500 a 3000 $\text{cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, resultado de los grupos carboxilo (-COOH), carbonilo (-CO), hidroxilo (-OH), fenólicos (benceno-OH) y amino (-NH₂), que presentan (Stevenson, 1982). Contienen 3 a 6% de nitrógeno; de 0.1 a 1.0 % de fósforo en forma de inositol – hexafosfato en las fracciones con alto peso molecular y como ortofosfato inorgánico, en las de peso molecular bajo, así como cantidades variables de azufre, derivado de proteínas, aminoácidos y ésteres sulfatados (Varanini y Pinton, 2001).

Los mecanismos de unión de las sustancias húmicas con la fracción mineral son interacciones primarias, como los enlaces catiónicos o de intercambio aniónico con los grupos carboxilo y algunos grupos polares sin carga como NH₂ o C=H; interacciones secundarias, como los puentes de hidrógeno con los grupos amino, carboxilo e hidroxilo, así como fuerzas de Van der Waals en las porciones sin carga de las cadenas poliméricas, e interacciones indirectas, como los efectos de entropía causados por el desplazamiento de las moléculas de agua de la superficie de las arcillas por un polímero de cadena simple (Bohn *et al.*, 1993).

Christopher (1996) señaló que, teóricamente, el ácido fúlvico podría afectar en mayor grado la formación de agregados, debido a que es una molécula

pequeña, fuertemente cargada y más polar que la de húmico. Además, de que por tener un arreglo cerrado, la repulsión entre las cargas negativas, podría dar lugar a macromoléculas lineares, lo que facilitaría la unión con las partículas de arcilla. Lo que no ocurre con el ácido húmico, cuya molécula grande y esférica, no posee grupos funcionales expuestos. No obstante, en estudios experimentales, el mismo autor observó que en los agregados estables los agentes de unión tuvieron altos pesos moleculares y grupos fenólicos, lo que sugiere que los ácidos húmicos son más eficientes en la estabilización, que los grupos carboxilo del ácido fúlvico.

La dinámica de formación de agregados estables, después de la adición de compuestos orgánicos, puede resumirse de la siguiente manera: los compuestos como la glucosa, incrementan de manera transitoria la agregación (sólo por algunas semanas), ya que se trata de materiales altamente susceptibles a la descomposición; posteriormente, los materiales menos degradables como los tejidos vegetales y polisacáridos, actúan paulatinamente sobre los agregados y pueden permanecer por meses; finalmente, los compuestos húmicos enlazan fuertemente a las partículas y los agregados así formados, son los que mantienen la estructura del suelo (Tisdall y Oades 1982).

Finalmente, la influencia de los fertilizantes inorgánicos en la calidad del suelo es indirecta, a través del aporte de nutrimentos. Promueven el crecimiento radical de las plantas y estimulan el crecimiento de las poblaciones microbianas, lo que da como resultado una mayor cantidad de productos de rizodepositación que se incorporan al suelo e incrementan el contenido de materia orgánica (Badalucco y Kuikman, 2001). Sin embargo, su adición indiscriminada puede limitar la productividad y alterar las características químicas del suelo, por lo que su uso debe ser planeado (Domínguez, 1997; INPOFOS, 1997).

III. OBJETIVOS

1. Objetivo General

Caracterizar y dar seguimiento a los cambios provocados por el cultivo de higuera (*Ficus carica* L.) y pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth), así como por la adición de estiércol de bovino y fertilizante inorgánico, en la calidad física, química y bioquímica de un tepetate fragmentado, mediante el uso de indicadores de calidad de suelo, durante un período de dos años, en condiciones controladas y de campo.

2. Objetivos Específicos

- Evaluar la modificación del pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables y saturación de bases del tepetate, por influencia de higuera, pasto Rhodes, estiércol de bovino y fertilizante inorgánico.
- Cuantificar la frecuencia y velocidad de formación de agregados estables en el tepetate, por influencia de higuera, pasto Rhodes, estiércol de bovino y fertilizante inorgánico.
- Estimar, dentro del complejo orgánico, la cantidad de polisacáridos, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, aportada al tepetate por el cultivo de higuera y pasto Rhodes, así como por la adición de estiércol de bovino y fertilizante inorgánico.
- Determinar la relación entre la formación de agregados estables y el contenido de carbono total, polisacáridos, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, del tepetate.

IV. HIPOTESIS

- La higuera, el pasto Rhodes, la adición de estiércol de bovino y de fertilizante inorgánico, incrementan la fertilidad química del tepetate, en un período de dos años, mediante un aumento del contenido de materia orgánica, de la capacidad de intercambio catiónico, del porcentaje de bases intercambiables y manteniendo estable el pH.
- El incremento de la fertilidad química del tepetate es mayor bajo cultivo de pasto Rhodes y adición de estiércol de bovino, que bajo cultivo de higuera y fertilización inorgánica.
- Después de dos años de cultivo de higuera y pasto Rhodes con adición de estiércol de bovino y fertilizante inorgánico, el tepetate adquiere características físicas apropiadas para un uso frutícola o pecuario, debido a la desintegración de los fragmentos y la posterior formación de agregados estables.
- La frecuencia y velocidad de formación de agregados estables a partir de fragmentos de tepetate, son mayores bajo cultivo de pasto Rhodes y adición de estiércol de bovino, que bajo cultivo de higuera y fertilización inorgánica.
- El pasto Rhodes y el estiércol de bovino, aceleran la dinámica bioquímica del tepetate, mediante la adición de compuestos orgánicos susceptibles de ser transformados en compuestos de mayor estabilidad y complejidad, como las sustancias húmicas.
- La cantidad de polisacáridos y sustancias húmicas aportada al tepetate por el pasto Rhodes y el estiércol de bovino, es significativamente mayor que la adicionada por la higuera.
- La formación de agregados estables en tepetate está más relacionada con el contenido de polisacáridos y sustancias húmicas, que con el de carbono orgánico total.
- El seguimiento de la modificación de la calidad del tepetate por influencia de plantas y enmiendas, puede llevarse a cabo mediante indicadores de calidad de suelo.

V. METODOLOGIA

1. Indicadores Químicos

a. Diseño experimental

El diagnóstico de la modificación de los principales indicadores químicos de fertilidad (SEMARNAT, 2000) en un tepetate roturado: pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables y saturación de bases, modificados por influencia de higuera, *Ficus carica* L., pasto Rhodes, *Chloris gayana* Kunth, estiércol de bovino y fertilizante inorgánico, se realizó en escala de parcela, en el estado de Morelos, como parte del estudio que se desarrolla en el Instituto de Geología de la UNAM, sobre capas endurecidas.

Los factores considerados fueron:

- Plantas (sin planta, higuera y pasto)
- Estiércol de bovino (0 y 72 t/ha)
- Fertilizante inorgánico (0 y 80-80-20 para higuera; 0 y 250-200-00 para pasto)

La elección de las plantas se llevó a cabo con base en estudios realizados en condiciones de invernadero con tepetate roturado, por Acevedo *et al.* (2001) y Velázquez *et al.* (2001); en función de la cultura y aptitud agrícola de la zona, que es principalmente frutícola. Se utilizó estiércol de bovino, como enmienda orgánica, debido a que es el más empleado en México y de fácil obtención en la zona. El fertilizante inorgánico y su dosis, se seleccionaron con base en estudios sobre fertilización para higuera (Acevedo, 1984) y pastos (Bogdan, 1977; FAO, 2000) y considerando la conocida deficiencia de nitrógeno y fósforo que exhiben los tepetates (Apéndice 1).

Se establecieron 12 tratamientos (Tabla 2), de los cuales, el testigo absoluto, TAb, que estuvo constituido sólo por tepetate fragmentado sin plantas y sin

enmiendas, constituyó el punto de comparación, a partir del cual, se evaluaron los cambios ocurridos por efecto de los tratamientos.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos aplicados al tepetate fragmentado

No.	DESCRIPCIÓN	PLANTA	ESTIERCOL (t/ha)	FERTILIZANTE (kg/ha)	CLAVE
1	Testigo Absoluto	No	0	0	TAb
2	Testigo con Estiércol	No	72	0	TE
3	Testigo con Fertilizante	No	0	80 - 80 - 20	TF
4	Testigo Estiércol y Fertilizante	No	72	80 - 80 - 20	TEF
5	Higuera	Higuera	0	0	H
6	Higuera con Estiércol	Higuera	72	0	HE
7	Higuera con Fertilizante	Higuera	0	80 - 80 - 20	HF
8	Higuera Estiércol y Fertilizante	Higuera	72	80 - 80 - 20	HEF
9	Pasto	Pasto	0	0	P
10	Pasto con Estiércol	Pasto	72	0	PE
11	Pasto con Fertilizante	Pasto	0	250 - 200 - 00	PF
12	Pasto Estiércol y Fertilizante	Pasto	72	250 - 200 - 00	PEF

El diseño experimental fue factorial 3 x 2 x 2, con arreglo y distribución de los tratamientos en bloques al azar, con ocho repeticiones. La unidad experimental correspondió a una planta de higuera y cinco de pasto Rhodes. El período de experimentación fue de 24 meses, distribuidos en cuatro etapas de seis meses (E1, E2, E3, E4) y una etapa inicial (E0), que representó al tepetate en estado original.

El análisis de los resultados se llevó a cabo mediante un análisis de varianza multivariado (MANOVA) para un experimento con observaciones repetidas, en el que se tienen tratamientos asignados a sujetos y en el cual, cada uno se estudia en diferentes épocas. Las respuestas en el tiempo se utilizaron como vectores de las variables dependientes, lo que permitió evaluar tanto el efecto de los factores, como el del tiempo (Méndez *et al.*, 1994; Sánchez *et al.*, 2001). Para ello se utilizó el paquete estadístico JMP (Apéndice 2).

b. Descripción del experimento

El estudio se realizó en una parcela experimental, localizada en el Municipio de Tetela del Volcán, estado de Morelos, en el terreno conocido localmente como "Rodríguez". La parcela, de 900 m², se ubicó en las coordenadas 18°50'21" N y 98°45'15" W, a una altitud de 1910 m, aproximadamente a 13 km del poblado de Tetela del Volcán, sobre la carretera Tetela – Tlacotepec.

El municipio de Tetela del Volcán, forma parte del macizo del volcán Popocatepetl, por lo que en la zona de estudio la geología está constituida por rocas ígneas extrusivas, como basalto y brecha volcánica, que datan del Cuaternario, así como por flujos piroclásticos, derrames de lava y lahares o derrames de lodo (Macías *et al.*, 1995). El clima es templado húmedo, Cb(m)(w)ig, con lluvias en verano y menos del 5% de lluvias en invierno (García, 1988). La precipitación total anual es de 1062 mm y la temperatura media anual de 16°C (INEGI, 2000). En la Tabla 3, se muestran los datos de temperatura y precipitación prevalecientes durante el período de experimentación (1998 – 2000), de acuerdo con la estación meteorológica, Tetela del Volcán, ubicada aproximadamente, a 10 km de la parcela experimental.

La parcela presentó un área de, aproximadamente, 5 % de su superficie total, con una capa de suelo de espesor menor a 5 cm, clasificada como Luvisol, fuertemente intemperizado, con alto contenido de arcillas y bases (D. Flores Román. Comunicación personal, Julio 1998). Dicha área estuvo cultivada con amaranto, durante el ciclo de cultivo anterior. En el resto de la parcela, afloraba una capa endurecida (C_{qm}) de espesor superior a 1 m, conocida localmente como tepetate, misma que se encontraba sin uso agrícola desde años anteriores. Con base en la geología de la zona, la capa de tepetate debió tener su origen en una toba ligera o medianamente soldada, que permitió la acción del proceso de endurecimiento pedológico, posterior.

**Tabla 3. Condiciones de precipitación y temperatura
prevalcientes durante el periodo de experimentación**

ANO	MES	PRECIPITACION TOTAL (mm)	TEMPERATURA MEDIA (°C)
1998	Julio	161.60	16.80
1998	Agosto	146.00	16.20
1998	Septiembre	514.90	15.20
1998	Octubre	112.50	16.70
1998	Noviembre	54.20	16.60
1998	Diciembre	0.00	15.60
1999	Enero	0.00	15.50
1999	Febrero	0.00	16.50
1999	Marzo	0.00	18.30
1999	Abril	0.00	20.10
1999	Mayo	25.60	19.50
1999	Junio	165.30	18.20
1999	Julio	355.10	16.10
1999	Agosto	245.20	18.80
1999	Septiembre	212.30	16.10
1999	Octubre	94.50	15.30
1999	Noviembre	1.00	15.50
1999	Diciembre	0.00	14.70
2000	Enero	19.94	14.20
2000	Febrero	6.00	15.35
2000	Marzo	4.39	17.22
2000	Abril	19.08	18.51
2000	Mayo	89.50	18.31
2000	Junio	276.64	17.48
2000	Julio	204.09	15.74

Fuente: Ing. Aurelio Díaz, CNA del estado de Morelos.
Febrero 2001.

La capa de tepetate presentó características físicas y químicas (Tabla 4), que coinciden con las reportadas para otras capas endurecidas de origen volcánico de la zona (Marañón, 1994; Flores *et al.*, 1996 y Velázquez *et al.*, 2001) y permiten ubicarla como un tepetate, tipo duripán (Quantin *et al.*, 1993) de textura franco arcillosa, con un grado de dureza superior a 16 kg/cm², pH moderadamente ácido; contenido de materia orgánica muy bajo; capacidad de intercambio catiónico media; contenido medio de calcio, alto de magnesio y potasio y bajo de sodio; saturación de bases alta (SEMARNAT, 2000).

Tabla 4. Características físicas y químicas del tepetate presente en la parcela experimental

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS								
Color		D. A.	D. R.	Textura (%)			Compresión Simple	
Seco	Húmedo	(Mg/m ³)	(Mg/m ³)	Arena	Limo	Arcilla	(kg/cm ²)	
10YR 5/4 Pardo Amarillento	10YR 3/4 Pardo Am. Obscuro	1.7	2.3	32	35	33	16 – 19 Deformación Unitaria: 1.0%	
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS								
pH		M. O.	C.I.C.	Cationes Intercambiables				S. Bases
H ₂ O [1:2.5]	KCl 1N [1:2.5]	(%)	(Cmol ⁺ kg)	(Cmol ⁺ kg)			K ⁺	(%)
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺		
6.5	5.2	0.6	20.5	7.7	5.5	0.9	1.2	74.6

Para el estudio, en la parcela se abrieron 96 cepas de 30 x 30 x 30 cm, con una distancia de 3 m entre cada una. En cada cepa se colocaron 50 kg de tepetate roturado y se establecieron los tratamientos correspondientes. En los tratamientos con enmienda orgánica, se adicionó 1 kg de estiércol de bovino (15.7 % de humedad) por cepa, en una dosis única equivalente a 72 t/ha, el cual se mezcló con el tepetate antes del trasplante de las especies vegetales.

El fertilizante inorgánico, en los tratamientos sin planta y con higuera, estuvo constituido por 5.44 g de sulfato de amonio, 5.72 g de superfosfato de calcio simple y 0.46 g de cloruro de potasio. Se aplicó en dosis de 80-80-20 por cepa, 15 días después del trasplante y al año de establecido el experimento. En los tratamientos con pasto Rhodes, la fertilización inorgánica, 250-200-00, se dividió entre el número de cortes por año (cinco), aplicándose la primera parte, 15 días después del trasplante y las restantes, 10 días después de cada corte. Cada aplicación constó de 3.4 g de sulfato de amonio y 2.9 g de superfosfato de calcio simple. Lo mismo se hizo durante el segundo año de experimentación.

El trasplante de las especies vegetales a las cepas se realizó, en el caso del pasto Rhodes, a los quince días de la emergencia y en el de las higueras, de un año de edad, después de un periodo de 15 días de aclimatación a las condiciones de la zona. En ambos casos, el trasplante se hizo a raíz desnuda. El esquema de la Figura 3, muestra la distribución final de los tratamientos en la parcela experimental.

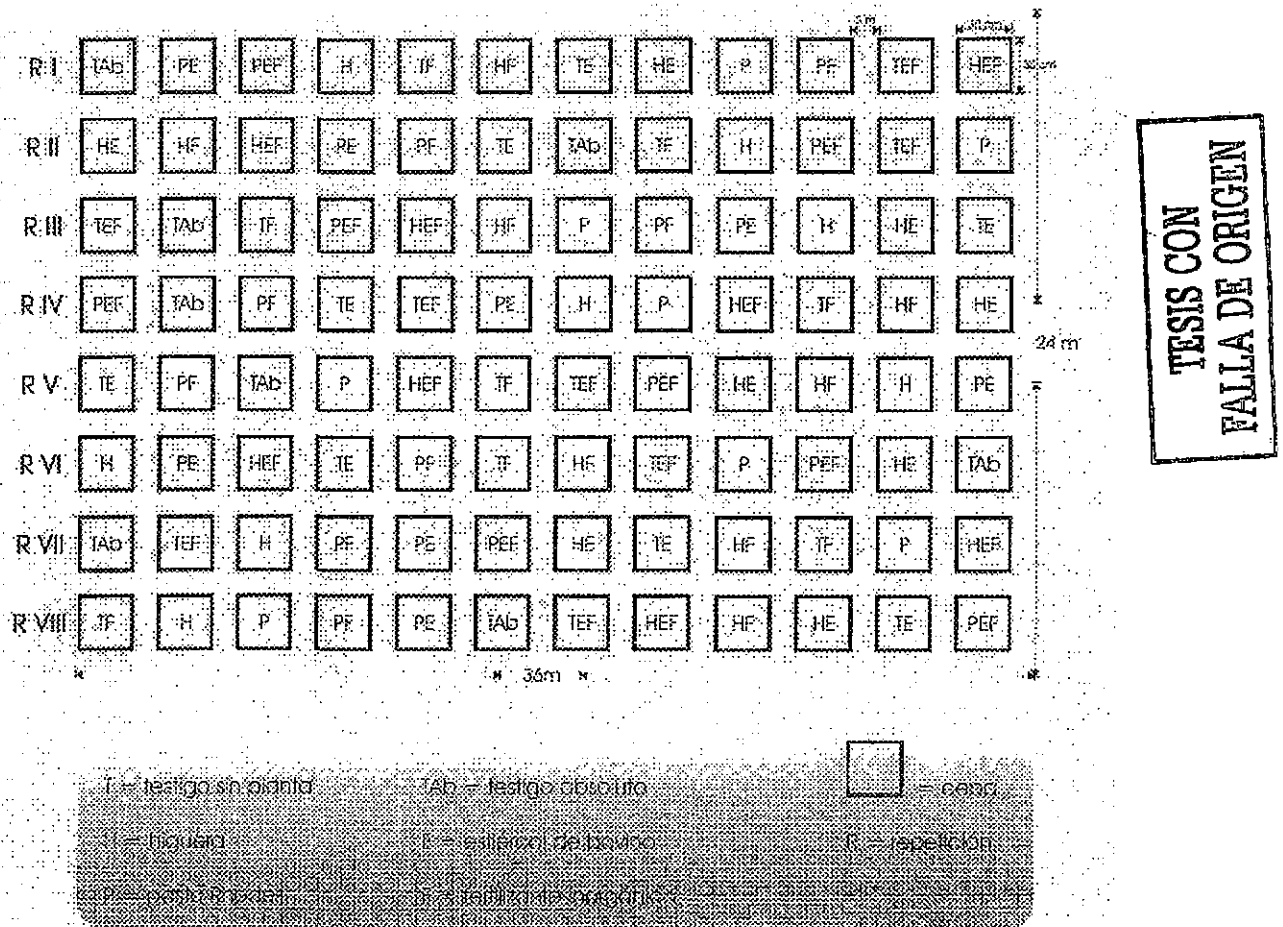


Figura 3. Distribución de los tratamientos en la parcela experimental

Al final de cada período de observación, se tomaron muestras del tepetate de cada una de las cepas, con una barrena para núcleos inalterados de 5 cm de diámetro y 30 cm de largo, elaborada *ex profeso*, lo que permitió considerar la

profundidad total de la cepa. Las muestras se tomaron en el punto medio entre la base de la planta y cada una de las esquinas de la cepa, con la finalidad de afectar lo menos posible el sistema radical. El tepetate se secó al aire para, posteriormente, tomar una muestra representativa, la cual se molió en un mortero de cerámica y se tamizó a 2.0 y 0.25 mm, para la evaluación de las características químicas propuestas.

c. Potencial hidrógeno

El pH se determinó a partir de muestras de 10 g de tepetate molido y tamizado a 2 mm, a las cuales se agregaron 25 ml de agua (relación 1:2.5). La mezcla se agitó durante 30 minutos con un agitador mecánico, después de lo cual se dejó reposar durante 15 minutos, para, posteriormente, llevar a cabo la determinación mediante el uso de un potenciómetro marca ORION modelo 920A (Sparks, 1996; SEMARNAT, 2000). La medición del pH también se realizó en solución de KCl 1N, en la misma relación que con agua, con la finalidad de estabilizar la variabilidad de las muestras, originada por la heterogeneidad natural del terreno (Fassbender, 1994).

d. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica de las muestras de tepetate, se evaluó por el método de Walkley y Black, el cual tiene su base en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio mediante el calor generado por la adición de ácido sulfúrico concentrado (Sparks, 1996; SEMARNAT, 2000). La cuantificación se llevó a cabo a partir de muestras de 0.5 g de tepetate molido y pasado por un tamiz de 0.25 mm. Previo a la molienda, se retiraron los fragmentos de raíces y material vegetal sin alterar.

e. Capacidad de intercambio catiónico

La determinación se realizó por centrifugación, a partir de muestras de 1 g de tepetate molido y tamizado a 2 mm. El método, recomendado para suelos no calcáreos, consiste en saturar la superficie de intercambio con una solución de cloruro de calcio 1 N pH 7, después de lo cual se lava el exceso de solución con alcohol etílico para, posteriormente, desplazar el catión índice, constituido por el calcio, con cloruro de sodio 1 N a pH 7. En el extracto, se cuantifica el contenido de sodio, por titulación con EDTA, el cual, mediante el uso una fórmula estandarizada, permite inferir la capacidad de intercambio (Jackson, 1970).

f. Bases intercambiables

El Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ , intercambiables, se determinaron a partir del extracto obtenido por centrifugación de 1 g de tepetate molido y tamizado a 2 mm, con acetato de amonio 1N, pH 7. Calcio y magnesio se determinaron por titulación del extracto con EDTA. Sodio y potasio, por flamometría, con un flamómetro marca CORNING, modelo 400 (Sparks, 1996).

g. Saturación de bases.

Corresponde a la superficie del suelo que se encuentra saturada con cationes intercambiables diferentes a hidrógeno y aluminio. Su porcentaje se calculó con base en Sparks (1996) y SEMARNAT (2000), mediante la fórmula que relaciona el contenido total de bases intercambiables, con la capacidad de intercambio catiónico:

$$\% \text{ S. B.} = \frac{\sum[\text{Ca}^{++} \text{ Mg}^{++} \text{ Na}^+ \text{ K}^+]}{\text{C.I.C.}} 100$$

2. Indicadores Físicos

a. Diseño experimental

La modificación de las características físicas del tepetate, involucradas directamente con su fertilidad y calidad (formación y estabilidad de agregados), se llevó a cabo con el mismo fundamento que el estudio de las características químicas. Por lo tanto, se consideraron los mismos factores y tratamientos, pero el experimento se desarrolló en condiciones de invernadero.

El diseño experimental fue factorial con distribución de los tratamientos completamente al azar y cuatro repeticiones. La unidad experimental correspondió a una planta de higuera y tres de pasto Rhodes. El período de observación fue de 24 meses, dividido en dos etapas de 12 meses (E1, E2) y una etapa inicial (E0), debido a que estudios anteriores (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001) mostraron que un año fue el tiempo mínimo necesario para observar cambios significativos con respecto a la agregación del tepetate.

El análisis de los resultados se llevó a cabo con el paquete estadístico JMP, mediante un análisis de varianza multivariado (MANOVA), para un experimento con observaciones repetidas (Méndez *et al.*, 1994; Sánchez *et al.*, 2001). La etapa inicial se consideró constante, con la finalidad de satisfacer el supuesto de homogeneidad de covarianzas (Apéndice 3).

b. Descripción del experimento

El experimento se desarrolló en el Invernadero del Instituto de Geología de la UNAM, con 400 kg de tepetate del municipio de Tetela del Volcán, de la misma zona en la que se estableció la fase de campo. El sitio de muestreo del tepetate se

ubicó a 18°51'34.3" N y 98°44'16.6" W y 2127 m de altitud, aproximadamente a 9 km del poblado, sobre la carretera Tetela del Volcán - Tlacotepec.

Las características físicas y químicas del tepetate (Tabla 5), fueron similares a las que presentó el de la parcela experimental. La dureza fue característica de los tepetates tipo duripán (Quantin *et al.*, 1993), pero mayor a la presentada por el tepetate de la parcela; la textura fue franca, con alto contenido de arena; pH neutro; contenido de materia orgánica muy bajo; capacidad de intercambio media; contenido de bases intercambiables alto y saturación de bases alta (SEMARNAT, 2000).

Tabla 5. Características físicas y químicas del tepetate para el invernadero

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS								
Color		D. A. (Mg/m ³)	D. R. (Mg/m ³)	Textura (%)			Compresión Simple* (kg/cm ²)	
Seco	Húmedo			Arena	Limo	Arcilla		
10YR 6/4 Pardo Am. Claro	10YR 4/4 Pardo Am. Obscuro	1.7	2.3	50	27 Franco	23	24	Deformación Unitaria: 0.07%
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS								
pH		M. O. (%)	C.I.C. (Cmol ⁺ kg)	Cationes Intercambiables (Cmol ⁺ kg)				S.Bases (%)
H ₂ O (1:2.5)	KCl 1N (1:2.5)			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	
7.1	5.7	0.3	22.7	11.5	7.2	1.3	1.0	92.5

Los bloques de tepetate se roturaron con herramientas metálicas comunes y el material resultante se hizo pasar a través de un tamiz, hasta obtener fragmentos menores o iguales a 20 mm, los cuales, de acuerdo con experiencias previas (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001), constituyen un tamaño susceptible de ser reorganizado en agregados. Los fragmentos se colocaron en cantidades de 5 kg, en macetas de plástico con capacidad para 6 kg, sin perforaciones, para evitar la pérdida de la fracción fina, durante el riego.

Para los tratamientos con enmienda orgánica, se adicionaron 106 g de estiércol de bovino (72 t/ha), por maceta, antes del trasplante, como dosis única. La fertilización inorgánica fue anual; en los tratamientos sin planta y con higuera, estuvo constituida por 0.57g de sulfato de amonio, 0.60 g de superfosfato de calcio simple y 0.05g de cloruro de potasio (equivalentes a una aplicación de 80-80-20 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O) y, para los de pasto, por 0.36g de sulfato de amonio y 0.30 g de superfosfato de calcio simple (equivalentes a una aplicación de 250-200-00 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O). La dosis se dividió entre el número de cortes por año (cinco), aplicándose la primera a los 15 días del trasplante y las restantes 10 días después del corte. El trasplante se realizó a raíz desnuda, para la higuera después de un período de 15 días de aclimatación a las condiciones del invernadero y para el pasto, a 15 días de la emergencia.

Para el muestreo del tepetate, se cortaron las plantas desde la base y el contenido de la maceta se vertió sobre periódico, se retiraron las raíces y el sustrato se dejó secar al aire. Posteriormente, se tomó una muestra representativa de, aproximadamente 500 g, para realizar las pruebas de estabilidad en húmedo. El tepetate sobrante se utilizó para la determinación de agregación en seco.

El contenido promedio de fragmentos (Tabla 6), después de la roturación (E0), muestra que más del 50 % del tepetate contenido en cada maceta, estuvo constituido por fragmentos de diámetro > 5 mm, mientras que la fracción < 0.25 mm, fue la que se presentó en porcentajes más bajos.

Tabla 6. Contenido promedio (%) de fragmentos de tepetate de diferente diámetro, por maceta, al inicio del experimento

TRATAMIENTO	DIAMETRO DE LOS FRAGMENTOS (mm)					
	< 0.25	0.25 - 1	1 - 2	2 - 5	5 - 10	> 10
TAb Etapa 0	3.68	9.38	7.17	16.78	25.93	37.06

Los valores de estabilidad de los fragmentos en estado inicial, E0, al igual que en el caso de la agregación en seco, mostraron que los más estables fueron los > 5 mm de diámetro y los menos estables, los de diámetro comprendido entre 0.25 y 0.5 mm (Tabla 7).

Tabla 7. Estabilidad promedio (%) de los fragmentos de tepetate de diferente diámetro, por maceta, al inicio del experimento

TRATAMIENTO	DIÁMETRO DE LOS FRAGMENTOS (mm)						
	< 0.25	0.25 - 0.5	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 5	> 5
TAb Etapa 0	8.95	1.41	4.65	7.09	13.85	6.63	57.41

c. Formación de agregados

La formación de agregados en tepetate, por influencia de los tratamientos, se evaluó a través de la técnica descrita por Sávinov (citado por Kaurichev *et al.*, 1984), la cual constituye una modificación de la técnica de Yoder (Klute, 1998). Se hizo pasar una muestra de 4.4 kg del tepetate de cada maceta, a través de una columna de tamices de 0.25, 1.0, 2.0, 5.0 y 10.0 mm de abertura, la columna se agitó durante 5 minutos en forma manual y, posteriormente, se determinó el peso de las fracciones contenidas en cada tamiz, lo que permitió expresar los resultados del diámetro medio de los agregados, como un porcentaje del total de la muestra.

d. Estabilidad de agregados

La estabilidad en húmedo de los agregados, se determinó por el método propuesto por Klute (modificado por Oleshko, 1995). Se hizo pasar una muestra de 50 g de tepetate, previamente humedecidos, a través de una columna de

tamices de 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 5.0 mm de abertura, inmersa en un contenedor con agua. La columna se agitó, en forma manual, durante 5 minutos, después de lo cual, la fracción retenida en cada tamiz se colocó en cápsulas de porcelana y se secó en la estufa a 100°C, para, posteriormente, registrar el peso. La fracción <0.25 mm correspondió a la diferencia entre el peso de la muestra y la suma del peso de las fracciones. Los resultados se expresaron como porcentajes.

3. Indicadores Bioquímicos

a. Diseño experimental

Los compuestos orgánicos involucrados en la formación de agregados estables en el tepetate: carbono, polisacáridos, ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, se evaluaron en un grupo, estadísticamente representativo, de 24 muestras (dos repeticiones por tratamiento), de cada etapa de observación, provenientes del ensayo en invernadero. La selección de las muestras se hizo mediante un análisis exploratorio (Pablos Hach J. L. Comunicación personal, noviembre 2000). El análisis de los resultados se realizó con el paquete estadístico JMP, mediante un análisis de varianza multivariado (MANOVA), para un experimento con observaciones repetidas. La etapa inicial se consideró constante (Apéndice 4).

b. Carbono

El carbono total de las muestras de tepetate, se obtuvo al dividir el porcentaje de materia orgánica, obtenido por el método de oxidación con dicromato de potasio, entre 1.724 que constituye el factor de Van Bemmelen, (Sparks, 1996; SEMARNAT, 2000).

c. Polisacáridos

Los polisacáridos totales se determinaron con la técnica del ácido - fenol - sulfúrico (Sparks, 1996). Para la obtención de los hidrolizados se utilizaron muestras de 2.5 g de tepetate tamizado a 2 mm, las cuales se trataron con ácido sulfúrico al 72% y se colocaron en autoclave durante 60 minutos a 15 PSI. Posteriormente, se determinó la absorbancia de las muestras, a 480 nm, con un espectrofotómetro Pye Unicam y celdas de vidrio igualadas marca BACHARA, de 12 x 75 mm, a partir de 1 ml del hidrolizado, al que se agregó fenol al 5% y ácido sulfúrico concentrado. El porcentaje de glucosa se calculó con la fórmula propuesta por el autor.

d. Acidos fúlvicos

Se evaluaron mediante el método de espectroscopía visible de los ácidos húmicos (Sparks, 1996), a partir de muestras de 100 g de tepetate tamizado a 2 mm. Primero se extrajeron todos los compuestos húmicos con una solución de NaOH y $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, después de lo cual, se separaron los ácidos fúlvicos por precipitación de los húmicos con ácido sulfúrico en proporción 1:1. El carbono se evaluó por el método de oxidación con dicromato de potasio.

e. Acidos húmicos

Los ácidos húmicos se determinaron por el método de espectroscopía visible, como un paso posterior a la separación de los fúlvicos. La solución, libre de fúlvicos, se centrifugó y se precipitaron los ácidos húmicos con ácido sulfúrico 1:1, después de lo cual, se dializaron hasta la eliminación total de los iones. El carbono se evaluó por el método de oxidación con dicromato de potasio (Sparks, 1996).

4. Compuestos Orgánicos – Agregación Estable

a. Diseño experimental

La relación entre los compuestos orgánicos y la agregación estable en tepetate, se estableció a partir de los datos de la segunda etapa de observación (24 meses), debido a que el contenido de compuestos orgánicos en la E0 y la E1, no fue cuantitativamente significativo. Se realizaron análisis exploratorios, matrices de correlación, análisis multivariados y correlaciones canónicas, en las que sólo se consideraron las variables cuyo efecto fue significativo en MANOVA (I. Méndez Ramírez, comunicación personal, julio 2001). Los análisis se hicieron con el paquete estadístico JMP (Apéndice 5).

b. Compuestos orgánicos y agregación

La relación entre los compuestos orgánicos y la formación de agregados en seco, se estableció a partir de análisis multivariados y correlaciones canónicas, en las que se consideró a los compuestos orgánicos como variables dependientes del tamaño de agregados y, de manera complementaria, a los tamaños de agregados como variables dependientes de los compuestos orgánicos.

c. Compuestos orgánicos y estabilidad

A semejanza del análisis anterior, para conocer la relación entre los compuestos orgánicos y la estabilidad de los agregados, se hicieron análisis multivariados y correlaciones canónicas, en las que se consideró a los compuestos orgánicos como dependientes del tamaño de agregados y viceversa.

VI. RESULTADOS Y DISCUSION

1. Indicadores Químicos

a. pH

El pH en agua del tepetate, no se modificó por influencia de los factores estudiados ni de su interacción (Tabla 8). Sin embargo, la interacción con el tiempo denota la existencia de cambios altamente significativos ($p < 0.0001$), con respecto al pH inicial, asociados a la presencia de las especies vegetales (Tabla 9).

Tabla 8. Análisis de los factores principales, para la variable pH en H₂O.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.26
Enmiendas	0.36
Interacción	0.86

$p < 0.01$ diferencias altamente significativas
 $p < 0.05$ diferencias significativas

Tabla 9. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para la variable pH en H₂O.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.001
Tiempo*Enmienda	0.36
Tiempo*Especie*Enmienda	0.98

Para determinar la intensidad del efecto de las plantas sobre el pH y la etapa en que se presentó, se realizó un análisis de MANOVA para cada etapa de observación, así como uno de contrastes, para aquellas etapas en que se presentaron los cambios (Tabla 10). Dicho análisis mostró que las plantas modificaron el pH únicamente durante los primeros 6 meses, mientras que en las etapas posteriores, las diferencias no fueron significativas. Durante esta primera etapa, las plantas indujeron valores de pH significativamente mayores que los de

los testigos. El valor más alto se obtuvo con el pasto Rhodes (Figura 4). El pH en KCl no mostró influencia de los factores ($p = 0.53$) ni del tiempo ($p = 0.08$).

Tabla 10. Análisis secuencial de la interacción tiempo - factores y contrastes específicos para la variable pH en H₂O (Probabilidad de F).

FACTOR	TIEMPO			
	E0 - E1	E0 - E2	E0 - E3	E0 - E4
Especie	0.0283	0.81	0.69	0.64
CONTRASTES PARA ESPECIE				
No vs Especies	0.02			
No vs Higuera	0.23			
No vs Pasto	0.13			
Higuera vs Pasto	0.01			

*No: sin planta

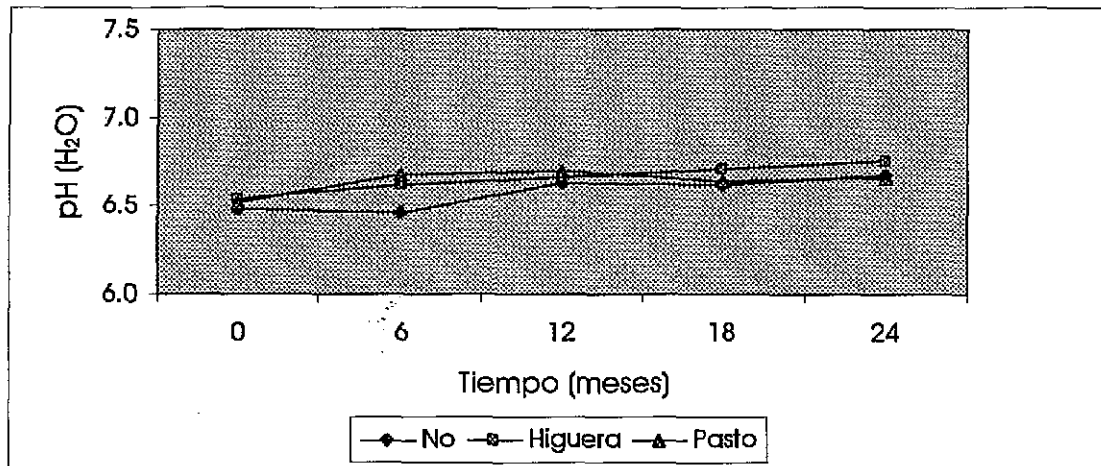


Figura 4. Influencia de la interacción tiempo - especies vegetales sobre el pH en H₂O del tepetate.

Los resultados indican que la higuera y el pasto Rhodes incrementaron el pH en agua del tepetate en 0.2 y 0.3 unidades, respectivamente (Tabla B, apéndice 2), pero el cambio no se manifestó en KCl, que denota que el aumento estuvo relacionado con un incremento en la fuerza iónica de la solución en equilibrio con el tepetate. El KCl es una sal neutra que reduce el efecto de las sales en solución.

En el caso del pasto Rhodes, los resultados concuerdan y complementan lo reportado en otros estudios con tepetate (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001), en los que se ha destacado su capacidad de elevar el pH de 6.9 a 7.2, en un período de 18 meses. De acuerdo con Neumann y Römheld (2001), lo que causa la elevación del pH, es la liberación a la rizósfera de compuestos orgánicos, iones y gases, producidos por la raíz durante el metabolismo vegetal. Estos, son producidos en mayor cantidad por las plantas con sistemas fasciculares, que por aquellas con raíz axonomorfa, debido a la diferencia en el número de sitios fisiológicamente activos (Badalucco y Kuikman, 2001). Además, la gran densidad de las raíces fasciculares, limita la lixiviación y permite la acumulación de cationes en la rizósfera, por lo que el pH en agua es más alcalino esta zona, que en el resto del perfil (Troeh y Thompson, 1993). Planteamientos que justifican, ampliamente, los diferentes valores de pH obtenidos con los tratamientos.

Adicionalmente a lo anterior, el que los cambios sólo hayan sido significativos durante los primeros seis meses de observación, pudo deberse a que la rizodepositación es especialmente intensa durante las etapas de crecimiento activo de la raíz (Brimecombe *et al.*, 2001). Posteriormente, las reacciones que se llevan a cabo entre los componentes con capacidad compensadora del sistema, como los coloides inorgánicos y ácidos orgánicos débiles, establecen un equilibrio, manteniendo estable el pH (Tamhane *et al.*, 1986; Oades, 1993).

Una variación de 0.3 unidades de pH no representa un efecto significativo en la calidad agrícola del tepetate, ya que tanto la disponibilidad de nutrimentos, como el desarrollo de biota y especies vegetales, son óptimos en pHs que van de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos (6.5 - 7.5). Además, la variación fue sólo temporal, como se demostró al adicionar electrolitos al medio (pH en KCl), para estabilizar la variabilidad (Fassbender, 1994). De tal manera, que los tratamientos mantuvieron valores de pH, en el tepetate, que hacen factible su uso agrícola, sin limitar su integración al proceso productivo.

b. Materia orgánica

El contenido de materia orgánica del tepetate manifestó una influencia marginalmente significativa de las especies vegetales y altamente significativa de la aplicación de enmiendas (Tabla 11). La interacción de los factores con el tiempo (Tabla 12), destacó el efecto de las enmiendas, pero no el de las plantas, por lo que se recurrió a un análisis individual de las etapas de observación.

Tabla 11. Análisis de los factores principales para la variable materia orgánica.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.05
Enmiendas	0.002
Interacción	0.42

Tabla 12. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales para la variable materia orgánica.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.09
Tiempo*Enmienda	0.04
Tiempo*Especie*Enmienda	0.56

A través del análisis por etapas (Tabla 13), se constató que la influencia de las plantas fue significativa sólo hasta los 18 meses de establecido el experimento y que las diferencias fueron significativas entre especies. Con todos los tratamientos hubo un incremento paulatino de materia orgánica, con respecto al contenido inicial. Sin embargo, en la tercera etapa, con el pasto Rhodes se obtuvo el porcentaje más alto y con la higuera el más bajo, pero en ambos casos, los valores fueron estadísticamente equivalentes al del testigo (Figura 5). Respecto a la aplicación de enmiendas, los contrastes mostraron el destacado efecto del estiércol, con el que se incrementó en forma altamente significativa, el contenido

de materia orgánica del tepetate (de 0.6 a 1.6%) durante los primeros 12 meses, tanto en los tratamientos con estiércol solo, como en aquellos en los que, además, se adicionó fertilizante. Posteriormente, la cantidad de materia orgánica de dichos tratamientos comenzó a disminuir, hasta ser equivalente al del testigo (Figura 6).

Tabla 13. Análisis secuencial de la interacción del tiempo con los factores principales para la variable materia orgánica (Probabilidad de F).

FACTOR	TIEMPO			
	E0 – E1	E0 – E2	E0 – E3	E0 – E4
Especie	0.47	0.57	0.03	0.32
Enmienda	0.01	0.003	0.38	0.14
Especie*Enmienda	0.69	0.14	0.06	0.49
CONTRASTES PARA ESPECIE				
No vs Especies			0.87	
No vs Higuera			0.15	
No vs Pasto			0.24	
Higuera vs Pasto			0.01	
CONTRASTE PARA ENMIENDA				
No vs Est. y Fert.	0.15	0.29		
No vs Fertilizante	0.90	0.41		
No vs Estiércol	0.005	0.0003		

*No: sin planta y sin enmiendas, respectivamente

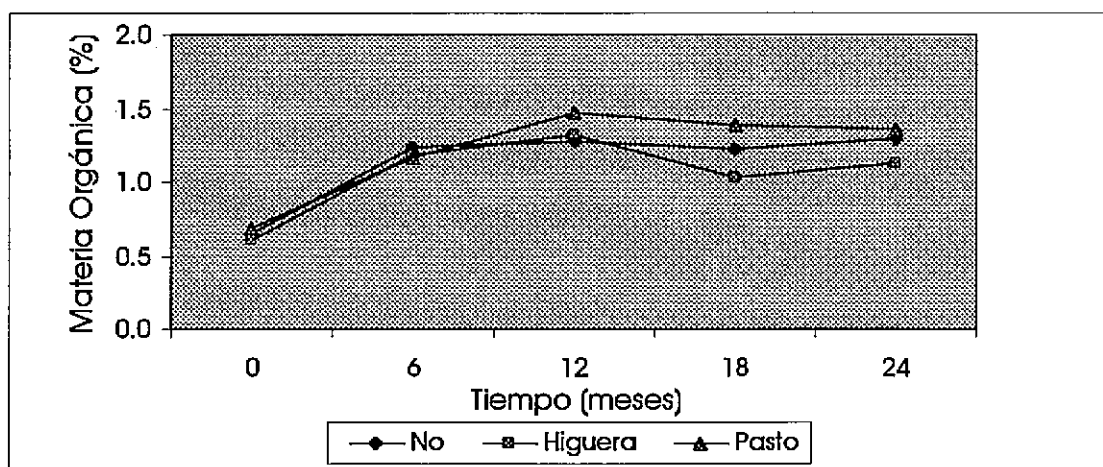


Figura 5. Efecto de la interacción tiempo – especie en el contenido de materia orgánica del tepetate.

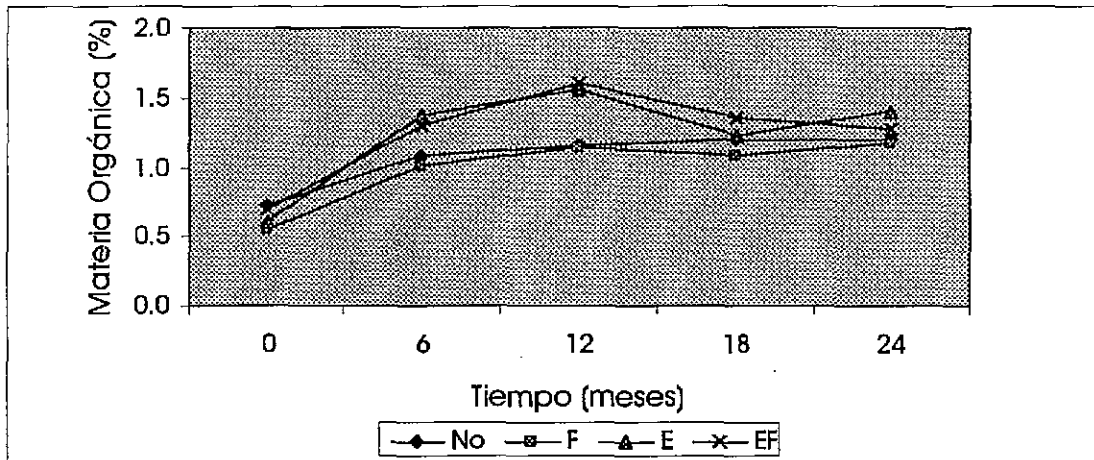


Figura 6. Efecto de la interacción tiempo - enmienda en el contenido de materia orgánica del tepetate.

De acuerdo con los resultados, el pasto Rhodes incrementó el contenido de materia orgánica del tepetate después de 18 meses de establecido el experimento, lo que permite asociar el cambio con el desarrollo del sistema radical, cuya liberación a la rizósfera de compuestos con alto contenido de carbono, es mayor cuando la planta alcanza la madurez fisiológica y durante las etapas de crecimiento radical activo (Brimecombe *et al.*, 2001).

Cuando las plantas se encuentran en el punto máximo de desarrollo, existe un aporte considerable de materia orgánica, proveniente del depósito y descomposición de los restos, tanto de la parte aérea, como de la radical (Haynes, 1999). Al respecto Troeh y Thompson (1993) y Gijsman *et al.* (1997), destacan que en las arbóreas, la mayor parte de los restos proviene del follaje, debido a que las raíces permanecen activas durante varios años, motivo por el cual, la liberación de compuestos orgánicos a la rizósfera es reducida. A diferencia de los pastos, cuyas raíces se renuevan constantemente, por lo que su contribución a la materia orgánica del suelo es inmediata. Por otra parte, el proceso de asimilación,

transferencia y liberación de carbono, se intensifica al aumentar la densidad radical (Badalucco y Kuikman, 2001).

En experimentos realizados en invernadero (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001), se observó un incremento de materia orgánica en el tepetate, desde los primeros 6 meses de establecido el cultivo. En el presente estudio, en condiciones no controladas, el incremento se presentó hasta los 18 meses, lo que sugiere que la mineralización fue mayor (García y Hernández, 1997), así como los procesos de pérdida, como la lixiviación y el consumo del carbono por la biota edáfica, cuyas poblaciones se incrementan una vez que el tepetate se fragmenta (Ferrera *et al.*, 1997). Como consecuencia de lo anterior, la acumulación disminuye. Por otra parte, durante las primeras etapas de descomposición de los restos, existe una competencia entre plantas y microorganismos, por el carbono y nitrógeno liberados, lo que estimula la actividad microbiana (Uren, 2001). Mientras que en las etapas tardías, la naturaleza recalcitrante de los restos, permite satisfacer los requerimientos de la biota, pero también, la acumulación de compuestos orgánicos (Alvarez *et al.*, 1998; Haynes, 1999).

De tal manera que, el que el pasto Rhodes aportara más materia orgánica al tepetate, puede ser atribuido a la mayor cantidad de compuestos orgánicos de rizodepositación (Gregorich *et al.*, 1995; Haynes, 2000) y a que se trata de una especie con follaje denso, cuyos restos con alto contenido de hemicelulosa y una relación carbono nitrógeno 10:1, constituyen un sustrato de fácil descomposición. A diferencia de la higuera, en cuya composición predominan compuestos aromáticos y cerosos, con una relación carbono nitrógeno 20:1, que requieren de una biota especializada y más tiempo, para su degradación, transformación e incorporación al sustrato (Howard *et al.*, 1998).

Por otra parte, el aporte diferencial de exudados, que mostraron las plantas, pudo estar relacionado con la morfología radical (Brimecombe *et al.*, 2001; Jastrow

et al., 1998). La raíz fascicular del pasto Rhodes, posee numerosos sitios fisiológicamente activos, que son los encargados de la producción y secreción de exudados. En el caso de la higuera, por poseer una raíz de tipo axonomorfa, el número de sitios activos es, comparativamente, menor. De acuerdo con Hogg y Schjoerring (2001), en una pradera la rizodepositación es la principal contribución de carbono al suelo, en donde la cantidad que aporta dicho proceso, llega ser más alta que la extraída por el cultivo, para su mantenimiento.

Por lo que se refiere al efecto de las enmiendas, los resultados coincidieron con lo reportado en otros estudios (Gregorich *et al.*, 1995; Feller *et al.*, 1996). El estiércol, por ser un material formado por compuestos orgánicos con diferente velocidad de transformación y de liberación gradual (Troeh y Thompson, 1993), permitió la disponibilidad inmediata de nitrógeno, pero también, la acumulación de compuestos orgánicos en el tepetate, durante el primer año.

De acuerdo con Aoyama *et al.* (2000), cuando se adiciona abono orgánico a un suelo, la celulosa y hemicelulosa, se descomponen fácilmente, provocando un incremento temporal del contenido de materia orgánica, ya que los productos son utilizados por los microorganismos. Sin embargo, la degradación de los componentes recalcitrantes, da lugar a una acumulación de materia orgánica, susceptible de ser transformada hasta compuestos más estables. Además, se ha observado que en los pastos, el nitrógeno favorece el desarrollo de numerosas raíces finas e incrementa significativamente la producción de mucilagos (Badalucco y Kulkman, 2001).

En el caso de los fertilizantes, la disponibilidad de nutrimentos para las plantas y biota es inmediata, su adición acelera el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que se manifiesta en un incremento de la producción de exudados (Brimecombe *et al.*, 2001), pero no necesariamente, favorece su acumulación. Lo que explica que los tratamientos con fertilizante, tuvieran porcentajes de materia

orgánica menores a los obtenidos con abono de bovino y que las diferencias con respecto a los tratamientos con planta, pero sin enmiendas, no fueran significativas. Así como que, cuando el abonado se complementó con la aplicación de fertilizante, la acumulación de materia orgánica en el tepetate haya sido significativamente mayor a la de los tratamientos restantes.

La tendencia de la materia orgánica con respecto al tiempo, coincidió con las observaciones de McCartney *et al.* (1997). Durante los meses siguientes a la introducción de plantas y adición de estiércol, hubo un incremento de materia orgánica, por la descomposición de los restos lábiles, seguido por una disminución, provocada por la utilización de los productos, para el desarrollo de las plantas y la biota. Posteriormente, hubo un nuevo incremento, debido al aporte de compuestos de rizodepositación para, finalmente, declinar en forma gradual al aumentar la edad de las plantas y disminuir la producción de exudados, así como al agotarse el abono. Por otra parte, al inicio del experimento, hubo un incremento de materia orgánica, relacionado con el aumento de las poblaciones microbianas por la roturación del tepetate, tal como lo demuestran los datos del testigo. Los resultados corroboran lo obtenido por Ferrera *et al.* (1997), en estudios específicos sobre este tipo de materiales.

En general, los resultados implican, que la dosis de estiércol de bovino considerada (72 t/ha), cubrió los requerimientos del pasto y la higuera durante el período de experimentación, pero sólo permitió la acumulación de materia orgánica durante el primer año. Por lo tanto, plantean también, la necesidad de utilizar dosis y frecuencias de abonado que satisfagan las necesidades reales del cultivo y, al mismo tiempo, favorezcan la acumulación en el sustrato, sin que lleguen a transformarse en una fuente de contaminación. El incremento de la materia orgánica del tepetate por las plantas y el estiércol, constituye un indicio del mejoramiento, desde el punto de vista de fertilidad, de la calidad del tepetate, por las implicaciones que tiene sobre las características químicas y físicas del mismo.

c. Capacidad de intercambio catiónico

De acuerdo con los resultados (Tabla 14), los factores principales no tuvieron efecto sobre la capacidad de intercambio catiónico del tepetate fragmentado, la cual tampoco se modificó con respecto al tiempo de observación (Tabla 15). Este comportamiento apoya lo citado por Wang *et al.* (1995), esto es, que la capacidad de Intercambio catiónico responde lentamente a los disturbios antropogénicos, por lo que su modificación necesita desde una década, hasta cientos de años, lo que depende del manejo a que esté sujeto el sustrato. De tal manera, que el tiempo de duración del presente estudio, comparativamente, fue limitado como para obtener cambios significativos por efecto de los tratamientos.

Tabla 14. Análisis de los factores principales para la variable C.I.C.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.88
Enmiendas	0.80
Interacción	0.83

Tabla 15. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para la variable C.I.C.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.15
Tiempo*Enmienda	0.16
Tiempo*Especie*Enmienda	0.26

La moderada sensibilidad de la capacidad de intercambio catiónico a factores antropogénicos, radica en que su valor está dado, principalmente, por la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos en el sustrato (SSSA, 2001). El tepetate en estado natural, presentó una C.I.C. alta (20.5 cmol⁺kg⁻¹), si se considera el contenido (33%) y tipo de arcilla que posee (haloísita 7Å y haloísita 10 Å), así como su bajo contenido de materia orgánica (0.6%). Sin embargo, está constituido

por cantidades significativas de amorfos (Flores *et al.*, 1992; Acevedo *et al.*, 2002), lo que justifica el valor de la capacidad de intercambio.

Tomando como base los datos vertidos en los trabajos de Howard *et al.* (1998), Jastrow *et al.* (1998), Kay (1998) y Martens (2000), el que la C.I.C. del tepetate no se modificara, aun cuando el contenido de materia orgánica se incrementó significativamente, se debió al dominio de compuestos fácilmente degradables y la mínima síntesis de compuestos orgánicos coloidales, asociada al tiempo de experimentación. De acuerdo con Aoyama *et al.* (2000), para la modificación de la C.I.C. de un suelo, se requirió la aplicación frecuente de grandes cantidades de estiércol de bovino durante 18 años, de manera que pudiera superarse la capacidad buffer del sistema de intercambio.

De las pruebas estadísticas a las que se sometieron los datos de C.I.C. en este estudio, algunas mostraron valores que indican una influencia marginalmente significativa de las plantas y enmiendas. Esto, puede constituir un indicio de que en un período de experimentación mayor, con especies vegetales con tasas de rizodepositación altas y dosis adecuadas de enmiendas orgánicas, la capacidad de intercambio catiónico de los tepetates puede incrementarse y, con ello, su fertilidad. Es importante reiterar, que la C.I.C. del tepetate en estado natural es alta, por lo que no constituye una limitante para el uso agrícola de estas capas endurecidas y su integración al proceso productivo.

d. Bases intercambiables

El contenido de calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiables del tepetate (7.7, 5.5, 0.9 y 1.2 $\text{cmol}^+\text{kg}^{-1}$, respectivamente), no se modificó significativamente por efecto de los factores, ni con respecto al tiempo de observación (Tabla 16).

Tabla 16. Análisis de los factores principales para las variables calcio, magnesio, sodio y potasio del tepetate (Probabilidad de F).

FUENTE DE VARIACION	CALCIO	MAGNESIO	SODIO	POTASIO
Especies vegetales	0.70	0.83	0.17	0.81
Enmiendas	0.97	0.11	0.53	0.10
Interacción	0.32	0.43	0.55	0.66

De acuerdo con SEMARNAT (2000), el contenido de cationes intercambiables de este tepetate resulta adecuado para un uso agrícola, pecuario o forestal. En comparación con lo reportado para otros tepetates del estado de Morelos (Flores *et al.*, 1992 y 1993; Velázquez *et al.*, 2001), el contenido de calcio fue bajo ($8 - 10 \text{ cmol}^+\text{kg}^{-1}$) y el de sodio ligeramente alto, después de la adición de enmiendas, debido a que el abono de bovino tiene cantidades significativas de este elemento (Labrador, 1998). No obstante, ninguno de los cationes presentó valores que pudieran limitar el establecimiento de especies vegetales en el tepetate.

e. Saturación de bases

Los factores estudiados no modificaron ($p = 0.26$) la saturación de bases del tepetate (74%). La Interacción con el tiempo, mostró un cambio significativo asociado a la presencia de las especies vegetales (Tabla 17), pero el análisis por etapa demostró que los cambios no fueron significativos (Tabla 18).

Tabla 17. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para la variable saturación de bases.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.02
Tiempo*Enmienda	0.47
Tiempo*Especie*Enmienda	0.99

Tabla 18. Análisis secuencial de la interacción tiempo – factores para la variable saturación de bases (Probabilidad de F).

FACTOR	TIEMPO			
	E0 – E1	E0 – E2	E0 – E3	E0 – E4
Especie	0.89	0.38	0.41	0.26
Enmienda	0.35	0.45	0.23	0.34
Especie*Enmienda	0.78	0.95	0.52	0.79

Dado que la saturación de bases corresponde al porcentaje de sitios de intercambio ocupados por bases y, analíticamente, a la suma de los cationes intercambiables dividida entre la C.I.C. (Troeh y Thompson, 1993), los resultados concuerdan con lo esperado, ya que ninguna de dichas características se modificaron por influencia de los tratamientos.

f. Comentario general

Al igual que en el caso de otras capas endurecidas de origen volcánico, la limitante química para la habilitación de este tepetate, es su casi nulo contenido de materia orgánica. Sin embargo, como se pudo observar, se trata de un problema susceptible de corregir mediante la aplicación de cantidades de enmiendas orgánicas, como estiércol de bovino, convenientemente planeadas y adecuadas a las necesidades del cultivo y a las características del tepetate. Es necesario destacar, también, la importancia de elegir especies vegetales con capacidad de aclimatación a las condiciones del tepetate y un alto potencial de rizodepositación (como el pasto Rhodes y la higuera), para incrementar en forma significativa el contenido de materia orgánica.

Cabe señalar la eficacia de las variables evaluadas como indicadores de la condición química del tepetate, ya que además de tratarse de características que afectan directamente el desarrollo de plantas y microorganismos, constituyen,

también, un reflejo de su fertilidad y de la sostenibilidad del recurso, una vez habilitado a un uso determinado. Además, son características que se modificaron en un periodo corto y cuya evaluación fue metodológicamente factible a través de técnicas de análisis de suelos de uso común y bajo costo.

La única variable que no reflejó eficazmente la condición química del tepetate fue la saturación de bases. Lo cual pudo estar relacionado con la evaluación de la C.I.C., ya que la técnica empleada no considera el problema de dispersión que presentan estos materiales como resultado de su consolidación geológica. Aunado a lo anterior, el valor de C.I.C. pudo ser sobrestimado, como resultado de la carga variable de los amorfos que forman parte de la constitución de estas capas endurecidas de origen volcánico.

Con base en la evaluación de los principales indicadores químicos del tepetate de Tetela del Volcán, se puede afirmar que se trata de un material que desde el punto de vista químico, presenta condiciones adecuadas para el establecimiento de especies vegetales y susceptible de habilitarse a un uso pecuario o frutícola.

2. Indicadores Físicos

a. Agregación en seco

De los factores estudiados, el fertilizante y su interacción con las plantas y el estiércol tuvieron una influencia significativa sobre las unidades <0.25 mm (microagregados) del tepetate (Tabla 19). El análisis del tiempo también mostró la presencia de cambios, pero asociados sólo con las plantas y el estiércol, por lo que se recurrió a un análisis de contrastes para dicha interacción (Tabla 20). Los contrastes para el factor fertilizante no mostraron diferencias significativas.

Tabla 19. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades <0.25 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.24
Fertilizante	0.02
Estiércol	0.80
Especies*Fertilizante	0.17
Especies*Estiércol	0.29
Fertilizante*Estiércol	0.99
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.01

* $p < 0.01$ diferencias altamente significativas

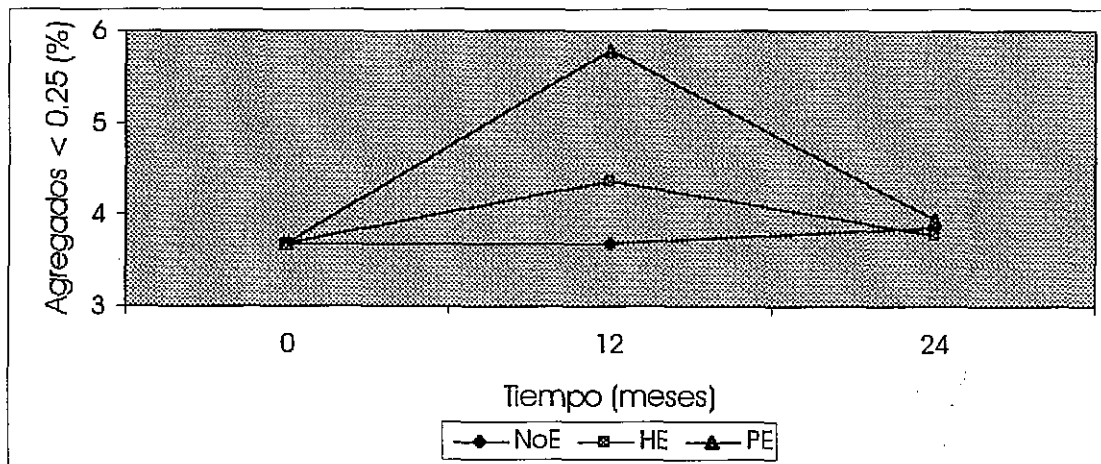
$p < 0.05$ diferencias significativas

Tabla 20. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para las unidades < 0.25 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.36
Tiempo*Fertilizante	0.54
Tiempo*Estiércol	0.33
Tiempo*Especie*Fertilizante	0.54
Tiempo*Especie*Estiércol	0.04
Tiempo*Especie*Fert*Est	0.14
CONTRASTES PARA ESPECIE – ESTIERCOL	
HE vs PE	0.02
No E vs HE	0.52
No E vs PE	0.07

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; E: estiércol

De acuerdo con los contrastes, el cambio en la microagregación se debió a la presencia de las plantas con adición de estiércol. En el testigo el contenido de microagregados no se modificó a lo largo de las tres etapas de observación, a diferencia de los tratamientos con plantas y estiércol, con los cuales, hubo un incremento significativo de la E0 (material en estado inicial) a la E1 (12 meses) y una disminución de la E1 a la E2 (24 meses), hasta quedar un porcentaje estadísticamente equivalente al inicial. Entre especies, el incremento fue mayor con el pasto Rhodes (Figura 7).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

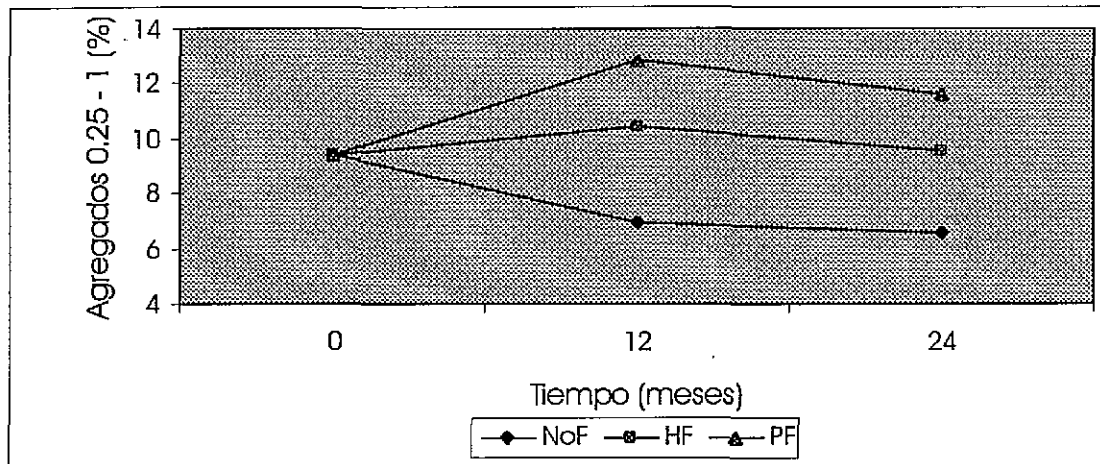
Figura 7. Influencia de la interacción especie - estiércol, en el porcentaje de unidades <0.25 mm de diámetro del tepetate.

En el intervalo de 0.25 a 1.0 mm, los factores que influyeron sobre el contenido de unidades fueron las especies vegetales y el fertilizante (Tabla 21). De acuerdo con los contrastes para la interacción, el cambio se presentó como resultado de la presencia de las plantas, entre las cuales, las diferencias no fueron significativas, pero sí con respecto al testigo. El análisis del tiempo, no mostró cambios significativos ($p = 0.35$) de la etapa 1 a la etapa 2. Sin embargo, de la E0 a la E1, en los tratamientos con plantas se incrementó el contenido de unidades de 0.25 a 1.0 mm de diámetro, con respecto al testigo (Figura 8).

Tabla 21. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades de 0.25 a 1.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.18
Fertilizante	0.03
Estiércol	0.09
Especies*Fertilizante	0.01
Especies*Estiércol	0.82
Fertilizante*Estiércol	0.57
Especies*Fertilizante*Estiércol	0.05
CONTRASTES PARA ESPECIE – FERTILIZANTE	
HF vs PF	0.89
No F vs HF	0.01
No F vs PF	0.004

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; F: fertilizante



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

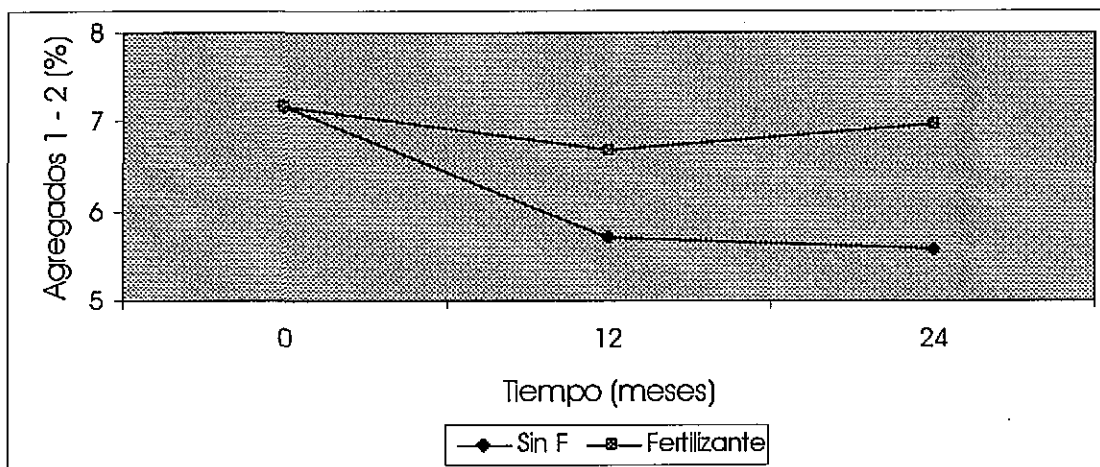
Figura 8. Influencia de la interacción especie - fertilizante, en el porcentaje de unidades de 0.25 a 1 mm de diámetro del tepetate.

En el intervalo de 1 a 2 mm, el fertilizante y su interacción con las especies vegetales tuvo una influencia altamente significativa (Tabla 22), la cual, de acuerdo con los contrastes, se debió al fertilizante, ya que los correspondientes a la interacción, no mostraron diferencias. Con el fertilizante incrementó el porcentaje unidades, con respecto al testigo, a lo largo del período de observación (Figura 9).

Tabla 22. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades de 1.0 a 2.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.45
Fertilizante	0.001
Estiércol	0.25
Especies*Fertilizante	0.03
Especies*Estiércol	0.04
Fertilizante*Estiércol	0.68
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.53
CONTRASTES PARA FERTILIZANTE	
Sin F vs Con F	0.002
CONTRASTES PARA ESPECIE – FERTILIZANTE	
No F vs Especies con F	0.17
HF vs PF	0.14
No F vs HF	0.66
No F vs PF	0.06
CONTRASTES PARA ESPECIE – ESTIERCOL	
No E vs Especies con E	0.67
No E vs HE	0.64
No E vs PE	0.01
HE vs PE	0.02

*No: sin planta o sin enmienda, respectivamente;
 H: Higuera; P: pasto; F: fertilizante; E: estiércol



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 9. Influencia del fertilizante, en el porcentaje de unidades de 1 a 2 mm de diámetro del tepetate.

Como se mostró en la Tabla 22, se presentó también un efecto de la interacción de las plantas con el estiércol, sobre las unidades de 1 a 2 mm, mismo que se relacionó con el pasto Rhodes. Con la higuera hubo una disminución, tanto con respecto al testigo, como al porcentaje inicial, pero las diferencias no fueron significativas. Con el pasto Rhodes, por el contrario, de E0 a E1 hubo un incremento altamente significativo y, posteriormente, una disminución paulatina, hasta quedar con un porcentaje estadísticamente equivalente al inicial (Figura 10).

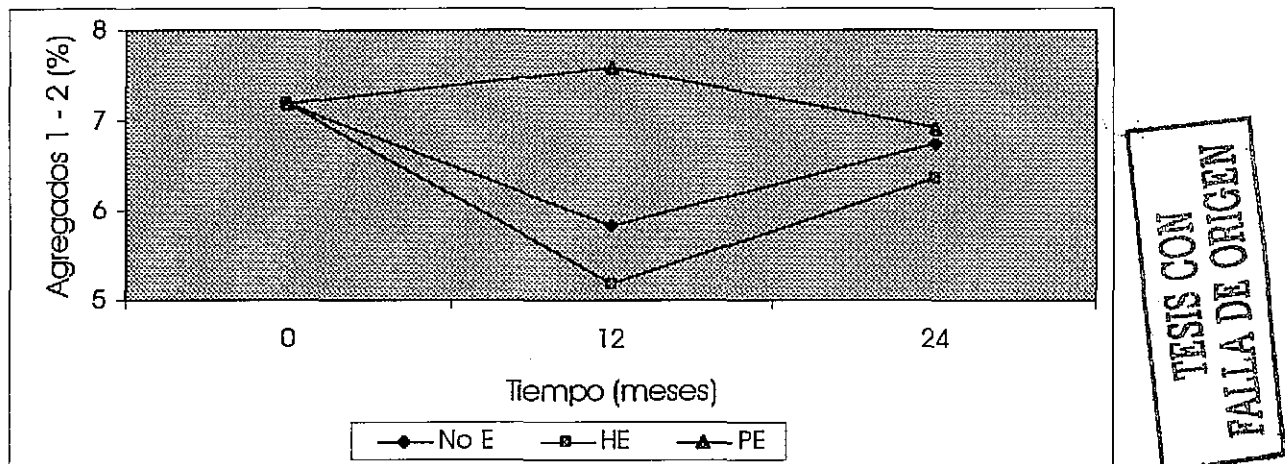


Figura 10. Influencia de la interacción especie - estiércol, en el porcentaje de unidades de 1 a 2 mm de diámetro del tepetate.

En el intervalo de unidades de 2 a 5 mm de diámetro, destacó la influencia de las especies vegetales y el fertilizante, lo que se reflejó en la triple interacción. De acuerdo con los contrastes para el factor especies, las diferencias fueron altamente significativas entre plantas y con respecto al testigo (Tabla 23). Los contrastes para el fertilizante y la interacción, no mostraron efectos significativos.

A diferencia del análisis de factores, el del tiempo destacó la influencia de la interacción de las plantas con el fertilizante y del estiércol, por lo que se recurrió a un segundo análisis de contrastes, el cual corroboró que las diferencias fueron

significativas entre el testigo y los tratamientos con higuera y, entre especies (Tabla 24). El efecto de la interacción especie – estiércol no fue significativo.

Tabla 23. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades de 2.0 a 5.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	<0.0001
Fertilizante	0.01
Estiércol	0.27
Especies*Fertilizante	0.12
Especies*Estiércol	0.94
Fertilizante*Estiércol	0.14
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.04
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs H	0.03
No vs P	0.01
H vs P	<0.0001

*No: sin planta; H: Higuera; P: pasto

Tabla 24. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para las unidades de 2 a 5 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.65
Tiempo*Fertilizante	0.13
Tiempo*Estiércol	0.04
Tiempo*Especie*Fertilizante	0.002
Tiempo*Especie*Estiércol	0.76
Tiempo*Especie*Fert*Est	0.61
Tiempo*Especie*Fert*Est	0.61
CONTRASTES PARA ESPECIE – FERTILIZANTE	
No F vs HF	0.02
No F vs PF	0.19
HF vs PF	0.001

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; F: fertilizante

De E0 a E1 no se presentaron diferencias entre tratamientos. Sin embargo, posteriormente, hubo un incremento con respecto al testigo y al contenido inicial, con la higuera y una disminución con el pasto Rhodes (Figura 11).

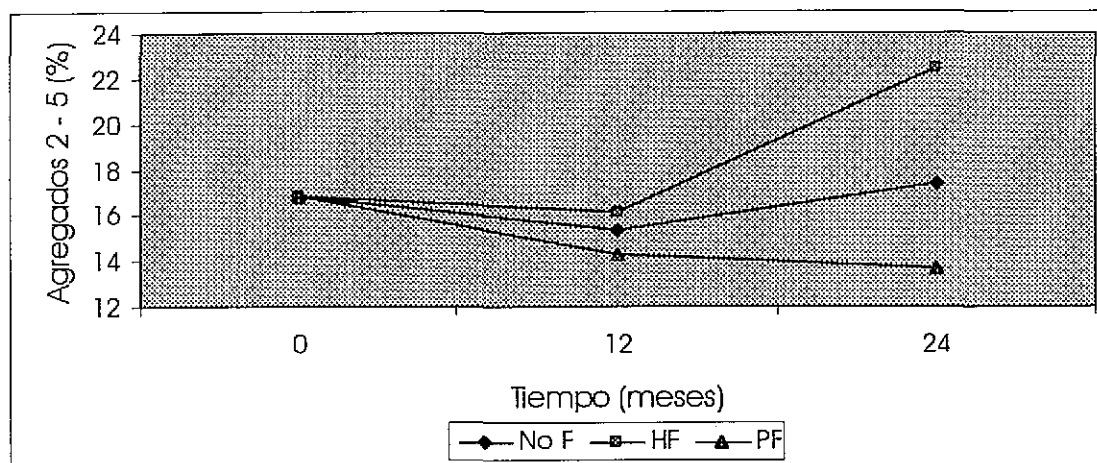


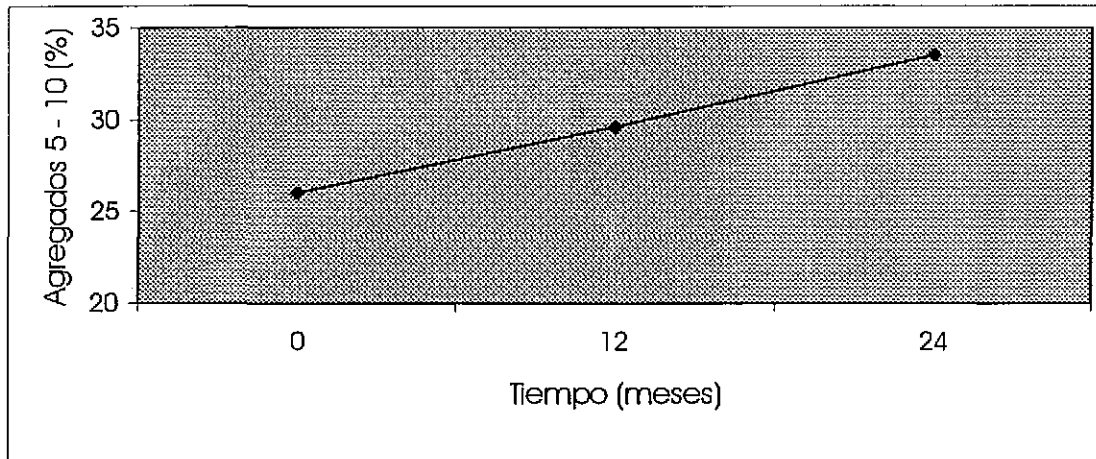
Figura 11. Influencia de la interacción especie – fertilizante, en el porcentaje de unidades de 2 a 5 mm de diámetro del tepetate.

En el intervalo de unidades de 5 a 10 mm de diámetro, ni los factores principales ni sus interacciones, tuvieron un efecto significativo sobre el porcentaje inicial (Tabla 25). Sin embargo, con respecto al tiempo, se presentó un incremento paulatino de la etapa 0 a la 2, pero no relacionado con los factores estudiados (Figura 12), lo que implica que puede tratarse de un intervalo en el que se acumularon aquellos fragmentos resultado de la alteración de los > 10 mm.

Tabla 25. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades de 5.0 a 10.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.14
Fertilizante	0.64
Estiércol	0.96
Especies*Fertilizante	0.43
Especies*Estiércol	0.65
Fertilizante*Estiércol	0.76
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.21

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 12. Influencia del tiempo en el porcentaje de unidades de 5 a 10 mm de diámetro del tepetate.

Finalmente, en el intervalo de unidades >10 mm de diámetro, se observó que el fertilizante, así como su interacción con las especies vegetales, provocó cambios significativos en el contenido inicial de dichas unidades (Tabla 26). El análisis del tiempo corroboró el efecto de la interacción y permitió descartar el del fertilizante (Tabla 27). Los contrastes realizados a partir de los factores principales mostraron diferencias significativas entre los testigos y los tratamientos con plantas. Con respecto al tiempo, los contrastes destacaron diferencias entre especies.

En los tratamientos con higuera, el contenido de unidades >10 mm disminuyó en forma constante a lo largo de todo el período de observación, tanto con respecto al testigo como al porcentaje inicial. Sin embargo, con el pasto Rhodes, de E0 a E1 la disminución fue estadísticamente equivalente a la obtenida con higuera, pero de E1 a E2, la disminución fue significativamente menor, sin que se presentaran diferencias significativas con respecto al testigo (Figura 13).

Tabla 26. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades > 10 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.07
Fertilizante	0.001
Estiércol	0.06
Especies*Fertilizante	0.01
Especies*Estiércol	0.31
Fertilizante*Estiércol	0.52
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.47
CONTRASTES PARA ESPECIE – FERTILIZANTE	
No F vs Especies F	0.0002
No F vs HF	0.002
No F vs PF	0.05
HF vs PF	0.18

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; F: fertilizante

Tabla 27. Análisis del tiempo y su interacción con los factores principales, para las unidades > 10 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Tiempo*Especie	0.96
Tiempo*Fertilizante	0.55
Tiempo*Estiércol	0.09
Tiempo*Especie*Fertilizante	0.04
Tiempo*Especie*Estiércol	0.50
Tiempo*Fertilizante*Estiércol	0.70
Tiempo*Especie*Fert*Est	0.27
CONTRASTES PARA ESPECIE – FERTILIZANTE	
No F vs Especies F	0.82
No F vs HF	0.19
No F vs PF	0.21
HF vs PF	0.01

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; F: fertilizante

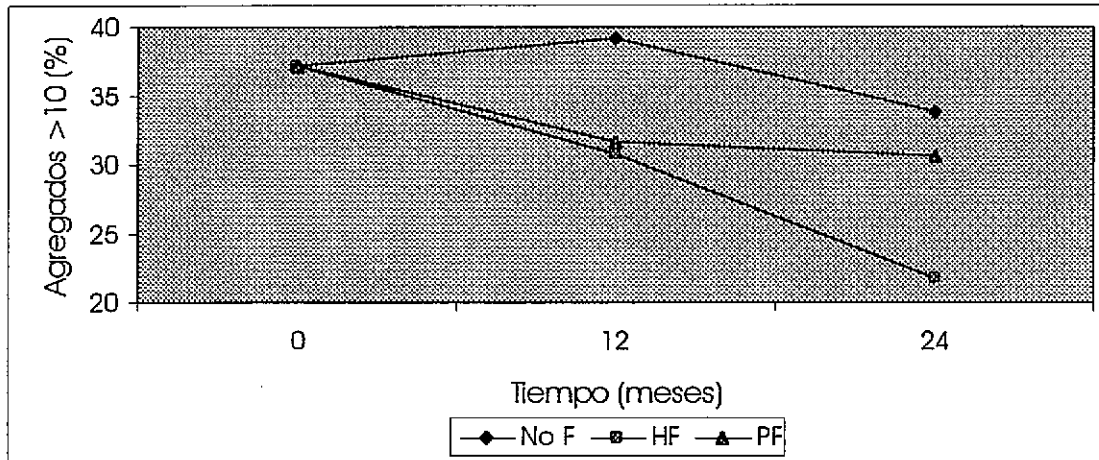

 TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 13. Influencia de la interacción especie – fertilizante, en el porcentaje de unidades > 10 mm de diámetro del tepetate.

En resumen (Tabla 28), los resultados del análisis de agregación en seco, denotan que las especies vegetales con adición de fertilizante inorgánico constituyeron el factor decisivo para la alteración y formación de agregados en tepetate, excepto en el caso de los microagregados (< 0.25 mm), en los que el factor determinante fueron también las plantas, pero con adición de estiércol y los de 5 a 10 mm de diámetro, cuya modificación se presentó como resultado de un proceso de acumulación de fragmentos alterados > 10 mm.

Tabla 28. Resumen del efecto de los factores principales y el tiempo de observación, sobre la formación de agregados en el tepetate.

VARIABLE Agregados (mm)	FACTORES PRINCIPALES*		TIEMPO		
	Interacción	Efecto	Interacción	Efecto	Efecto Total
< 0.25	-	-	T - Sp - E	PE>HE>NoE	E0<E1>E2
0.25 - 1	Sp - F	PF=HF>NoF	-	-	E0=E1=E2
1 - 2	F	Con F>Sin F	-	-	E0=E1=E2
2 - 5	Sp - E	PE>NoE>HE	T - Sp - F	HF>NoF>PF	E0=E1<E2
5 - 10	-	-	-	-	E0<E1<E2
> 10	Sp - F	NoF>PF=HF	T - Sp - F	NoF>PF>HF	E0>E1>E2

* Sp: especies vegetales; F: fertilizante; E: estiércol; P: pasto Rhodes; H: higuera; No: sin planta; T: tiempo

El análisis de los porcentajes promedio en cada nivel, por tratamiento y para las tres etapas de observación, permite tener una visión general de la dinámica de los fragmentos de tepetate a lo largo del período de experimentación. Para ello, es necesario destacar que las macetas no presentaron perforaciones, lo que impidió la pérdida de la fracción fina, por lo que los promedios son muy cercanos al valor total. La suma de las fracciones de cada tratamiento o etapa corresponde al 100%, de tal forma que es posible deducir la ubicación final del material resultante de la alteración de los fragmentos iniciales.

La distribución promedio de fragmentos y agregados, por influencia de las especies vegetales con adición de estiércol de bovino (Figura 14), corroboró que dicha interacción sólo tuvo efecto sobre las fracciones < 0.25 y de 1 a 2 mm. El porcentaje más alto se presentó bajo la influencia del pasto Rhodes y entre el testigo y los tratamientos con higuera, las diferencias no fueron significativas.

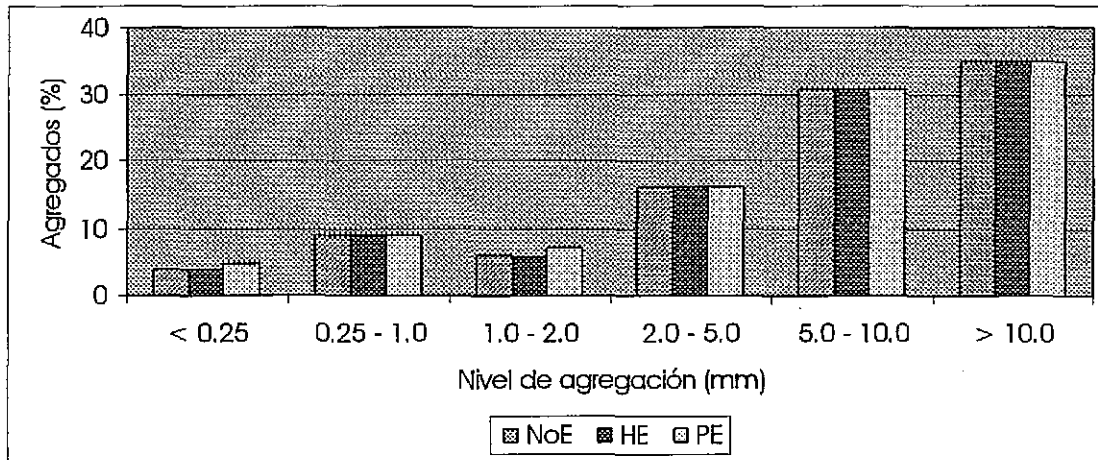


Figura 14. Influencia de la interacción especie – estiércol, en el porcentaje de agregados del tepetate.

Con respecto a las especies vegetales con adición de fertilizante (Figura 15), la representación gráfica de los promedios, ratificó su influencia sobre las unidades de 0.25 a 5 y > 10 mm. En la fracción 0.25 a 2, el porcentaje más alto se presentó con el pasto Rhodes; en el de 2 a 5 con higuera y en el >10, con el testigo.

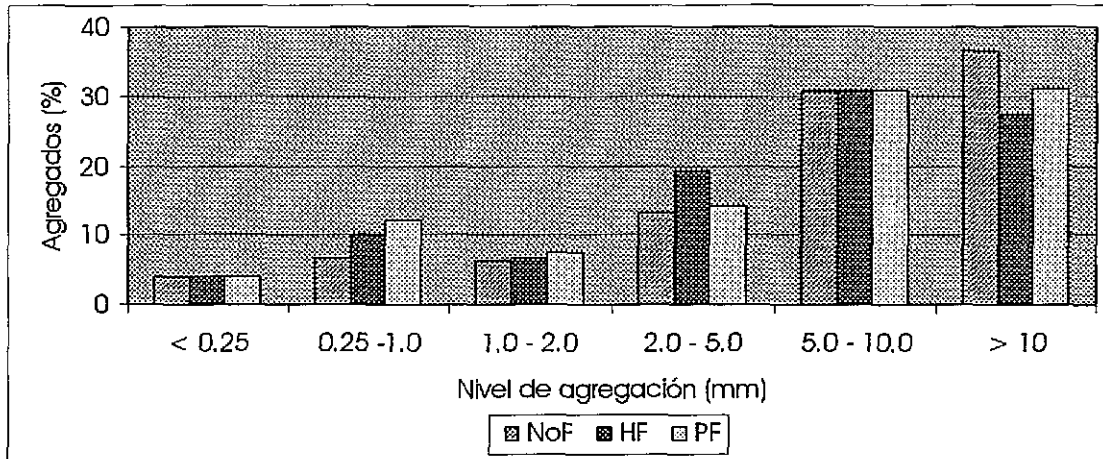


Figura 15. Influencia de la interacción especie – fertilizante, en el porcentaje de agregados del tepetate.

La disminución de los fragmentos >10 mm, con respecto al contenido inicial, implica un proceso de dispersión o disgregación, en unidades de menor tamaño. El que el efecto fuera más intenso en los tratamientos con plantas y fertilizante, pone de manifiesto la destacada influencia del sistema radical como factor de alteración del sustrato (Wild, 1992; Uren, 2001). Esto es de gran importancia para los tepetates, ya que la disgregación constituye la fase inicial de la estructuración y es indispensable para la posterior formación de agregados.

La desintegración ocasionada por las plantas, se presenta como resultado de la presión ejercida durante el crecimiento radical, los ciclos de desecación y humedecimiento provocados durante la absorción de nutrimentos y la liberación de compuestos metabólicos (Jastrow *et al.*, 1998). Por lo tanto, el grosor, densidad y distribución radical, así como la composición de los exudados, determinan el grado y tiempo de alteración (Gregorich *et al.*, 1995; Brimecombe *et al.*, 2001).

El que la disgregación de los fragmentos >10 mm fuera mayor con la higuera que con el pasto Rhodes (aun cuando desde el punto de vista estadístico

no hubo diferencias), debió estar relacionado con que se trata de una especie con raíz axonomorfa, formada por un eje principal y ramificaciones de más de 2 mm de diámetro, lo que le confiere una fuerza de penetración, mayor que la del pasto, que posee una raíz fascicular en la que predominan las raíces finas y muy finas, con diámetros menores de 1.0 mm (Badalucco y Kuikman, 2001). De acuerdo con Oades (1993) y Springett y Gray (1997), la fuerza de penetración radical de las arbóreas es superior a 9 MPa, por lo que pueden penetrar en capas endurecidas sin utilizar el espacio poroso, como sucede con las herbáceas.

Los ciclos de humectación–deseccación, provocados durante la absorción de nutrimentos, constituyen un factor de alteración, cuyo grado de participación depende de la densidad radical. A mayor densidad, mayor efecto sobre el sustrato (Kay, 1998). De las plantas utilizadas en el presente estudio, debido a su morfología, el pasto posee una mayor densidad de raíces, pero las de la higuera abarcaron totalmente el tepetate contenido en la maceta, lo que sugiere que la influencia de este fenómeno pudo ser similar con las dos plantas.

Aunado a lo anterior, durante la respiración y como parte del metabolismo de las plantas, se liberan a la rizósfera protones y ácidos orgánicos como succínico, pirúvico, glucorónico, glucónico, galacturónico, oxálico, málico y compuestos fenólicos, capaces de promover la alteración del sustrato (Uren, 2001), proceso que se intensifica con las raíces gruesas (Badalucco y Kuikman, 2001). Con gramíneas, por ejemplo, los compuestos de rizodepositación y las tasas de respiración son menores que con arbóreas, debido a que sus raíces son finas (Howard *et al.*, 1998; Kay, 1998). Lo que explica que la disgregación provocada por el pasto Rhodes haya sido menor a la de la higuera.

Por lo tanto, como se observó, la disgregación del tepetate estuvo más relacionada con la fuerza de penetración radical y la cantidad de compuestos de rizodepositación, que con la densidad de raíces.

Las unidades de 5 a 10 mm no se modificaron por influencia de las plantas ni de las enmiendas. Sin embargo, su contenido se incrementó con respecto al tiempo, lo que implica que una parte del material resultado de la disgregación de los fragmentos >10 mm, quedó comprendida en este nivel. Esto se corroboró, cuantitativamente, a través de la suma de los porcentajes correspondientes y, cualitativamente, mediante un análisis visual, que mostró un dominio casi total de fragmentos sobre agregados, en esta fracción.

La fracción de 2 a 5 mm se modificó con respecto al tiempo y por efecto de las especies vegetales con adición de fertilizante. Con la higuera se obtuvo hasta 20% de estas unidades, mientras que con el pasto y el testigo, el máximo fue 14%, lo que pone de manifiesto la influencia de la planta, en su formación. Sin embargo, también se observó, que la disminución de los fragmentos >10 mm provocada por la higuera, fue cercana al incremento de la fracción de 2 a 5 mm, con la misma planta, lo que sugiere que una porción de estas unidades fue el resultado de la alteración de los fragmentos de diámetro mayor.

Además de acumulación, en la fracción de 2 a 5 mm también hubo formación de agregados, ya que la diferencia entre el contenido total y la fracción correspondiente a la alteración de los fragmentos más grandes, sólo puede explicarse como resultado de la unión de unidades de diámetro menor. Supuesto que fuera corroborado al analizar la tendencia de los fragmentos más pequeños, cuyo contenido inicial disminuyó por efecto del pasto Rhodes.

El que al final del período experimental, se obtuviera un porcentaje de unidades de 2 a 5 mm equivalente al inicial, sugiere procesos de agregación y acumulación, de intensidad y frecuencia similar, lo que puede interpretarse como una alta estabilidad. Esto es de suma importancia en el tepetate, debido a que unidades de este diámetro, permiten la existencia de espacios intra - agregados que facilitan la emergencia de las plántulas, el crecimiento radical, el intercambio

gaseoso, el movimiento del agua (Primavesi, 1982; García *et al.*, 2001) y resisten el impacto del manejo, lo que es determinante para su integración al proceso productivo (Martínez *et al.*, 1991; Lauffer *et al.*, 1997; Prat *et al.*, 1997; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001).

La fracción de 1 a 2 mm, se modificó tanto por efecto de las especies vegetales con estiércol, como por la adición de fertilizante inorgánico. En ambos casos, con el pasto Rhodes se incrementó el porcentaje de estas unidades, con respecto al testigo, mientras que con la higuera disminuyó. Este comportamiento, puede ser explicado, si se considera que la capacidad de agregación de las plantas está directamente relacionado con la escala espacial (Jastrow *et al.*, 1998; Haynes, 1999), como se detalla más adelante.

La fracción de 0.25 a 1 mm, se incrementó con respecto al contenido inicial, debido a la influencia de las plantas con adición de fertilizante. El incremento más alto se obtuvo con el pasto Rhodes, lo que denota una capacidad de aglutinación de fragmentos de diámetro menor, mayor que la higuera. Sin embargo, si se retoma la tendencia de las fracciones anteriores, es posible notar que la higuera fue más eficiente en la formación de agregados de diámetro superior a 2 mm, fracciones en las que los porcentajes más altos se presentaron con higuera.

Finalmente, la fracción correspondiente a lo unidades <0.25 mm, se incrementó por influencia de las plantas con adición de estiércol, específicamente del pasto Rhodes, comportamiento que al igual que en las unidades de 0.25 a 2 mm, implica la formación de agregados a partir de la unión de dichas unidades, mediante los compuestos orgánicos aportados por el pasto y el estiércol. Lo más notable fue la influencia del estiércol, misma que no se manifestó en ninguno de los otros niveles.

Con base en la descripción de la tendencia en cada una de las fracciones consideradas, el proceso de agregación se presentó como resultado de la unión de las unidades <5 mm y estuvo supeditado a la presencia de las especies vegetales con adición de fertilizante y, parcialmente, de estiércol. Esto se debió a que, como se ha mencionado en otros trabajos (Feller *et al.*, 1996; Gijlsman *et al.*, 1997; Bottner *et al.*, 1999), la agregación constituye un fenómeno complejo, en el que la acción mecánica y química de las raíces es primordial. Por lo tanto, está determinado, en gran parte, por el tipo, tamaño, grosor y densidad del sistema radical de las especies involucradas (Webster *et al.*, 2000; Neumann y Römheld, 2001).

En los estudios relacionados con estructuración, se jerarquiza la influencia de los enlaces que dan lugar a la formación de los agregados, haciéndose énfasis en la escala, desde un punto de vista espacial, a la que actúan, misma que depende de sus características y complejidad química (Feller *et al.*, 1996; Kay, 1998; Six *et al.*, 2000). Cabe destacar, que dicha ordenación no implica la acción aislada de los factores involucrados, sino que su intervención es simultánea, aun cuando bajo determinadas circunstancias, domine uno u otro.

Cuando se introducen especies vegetales, al sistema constituido por el suelo, la raíz se desarrolla y crea una red que une mecánicamente a grupos de partículas y fragmentos, lo que da lugar a la formación de unidades estructurales de diferentes diámetros, denominadas "agregados". Este proceso sólo se lleva a cabo mientras la raíz está presente, por lo que su efecto sobre la agregación es transitorio y la estructura desaparece al morir la raíz. Por lo tanto, durante esta primera etapa, el tamaño de los agregados formados depende, básicamente, del grosor y fuerza de penetración del sistema radical (Jastrow *et al.*, 1998; Haynes, 1999).

Durante lo que puede considerarse una segunda etapa, la formación de agregados involucra compuestos orgánicos de rizodepositación, cuya cantidad y

calidad, dependerá de las especies vegetales, la biota edáfica y las enmiendas. En los dos primeros casos, los compuestos orgánicos son el resultado de la transformación del follaje muerto y de las gomas, ceras, resinas, mucílagos y exudados, secretados por las plantas y microorganismos como parte de su metabolismo (Martens, 2000; Brimecombe *et al.*, 2001). En las enmiendas, la calidad de los compuestos liberados al sustrato, depende de su grado de procesamiento y constitución original (Gijsman *et al.*, 1997; Labrador, 1998).

De acuerdo con la compilación realizada por Kay (1998), cuando la materia orgánica se encuentra en estadios tempranos de descomposición y está constituida por restos vegetales fragmentados, su capacidad de enlace se centra en la formación de grandes macroagregados, en los que se observan fibras y raíces empaquetando a las unidades. Cuando hay un grado mayor de descomposición, el efecto principal es de los mucílagos, péptidos y polisacáridos, que favorecen la formación de agregados > 1 mm. Finalmente, cuando se lleva a cabo la síntesis de compuestos de alto peso molecular, como los ácidos húmicos y fúlvicos, su acción se enfoca en las unidades más pequeñas, los microagregados (<0.25 mm), en los que constituyen un fuerte enlace entre las partículas y cuya estabilidad depende de la arcilla presente en el sustrato.

En el caso del pasto Rhodes, su acentuado efecto en la formación de agregados de 2 a 5 mm, a partir de unidades <2 mm, puede ser atribuido al sistema radical, el cual por ser morfológicamente muy ramificado, con dominio de raíces finas, demostró poseer una fuerza de penetración y tasas de rizodepositación apropiadas para ello (Badalucco y Kuikman, 2001). En general, el efecto de las raíces de los pastos se relaciona con la formación de agregados >2 mm, por tratarse de una escala espacial susceptible de ser modificada por dichas estructuras. A diferencia de las raíces gruesas, como las de la higuera, que ejercen presiones considerablemente mayores sobre el sustrato, lo que les permite actuar en escalas superiores y agrupar fragmentos de mayor tamaño (Jastrow *et al.*, 1998).

Como se observó en el presente estudio, en el que la higuera aglutinó unidades de 0.25 a 2 mm, para formar agregados >5 mm.

En general, las raíces finas tienen influencia sobre los agregados >2 mm y, las muy finas sobre los de menor tamaño, principalmente sobre los de 1 a 2 mm, debido a que como su densidad es alta, resulta físicamente imposible la formación de agregados grandes, aun cuando la producción de compuestos orgánicos sea elevada (Jastrow *et al.*, 1998). Por otra parte, la distancia entre las raíces es determinante en la escala de agregación, ya que al disminuir, mayor es la competencia por nutrimentos, el efecto de los ciclos de humectación-desección, el volumen de suelo explorado y el desarrollo de las poblaciones microbianas (Bottner *et al.*, 1999; Badalucco y Kuikman, 2001).

Por lo que se refiere al restringido efecto del estiércol en la agregación, éste se debió, a que su adición constituye un aporte inmediato de carbono y nitrógeno al sustrato, el cual es utilizado como recurso energético de la biota. Mientras que, para la síntesis de compuestos con capacidad de enlace, es necesaria la transformación de los componentes recalcitrantes, proceso que requiere de más tiempo para llevarse a cabo (Six *et al.*, 2000; Varanini y Pinton, 2001). Tal es el caso de la lignina, cuya transformación requiere de períodos mayores de 12 meses (Aoyama *et al.*, 2000; Martens, 2000). Esto explica, también, que la influencia del estiércol de bovino en la formación de agregados en el tepetate, se manifestara sólo hasta los 24 meses. Sin embargo, su efecto sobre la fracción <0.25 y de 1 a 2 mm difiere con lo reportado en la literatura (Kay, 1998), debido a que se trata de un tamaño de agregados en el que, generalmente, domina la unión por coloides y cementantes de naturaleza inorgánica

Es importante destacar, que el cambio en la fracción <0.25 mm se presentó como resultado de la interacción del estiércol con las especies vegetales, lo que implica que, en parte, la agregación se debió a fenómenos de empaquetamiento

radical y aglutinación por mucílagos. Muchos de los compuestos secretados por las plantas, presentan formas químicas con capacidad de enlace, por lo que no es necesaria su previa transformación. Esto no sucede con los componentes del estiércol (Puget *et al.*, 1999; Webster *et al.*, 2000).

El que no hubiera efecto del estiércol sobre los macroagregados, se debió a que los compuestos orgánicos no se encontraban en una forma química susceptible de actuar como enlace entre las partículas minerales; a que la estabilidad de los agregados formados a partir de sus componentes fue temporal; o bien, a que los compuestos obtenidos de su descomposición, fueron inmovilizados por la biota (Brimecombe *et al.*, 2001). En los trabajos de Aoyama *et al.* (2000) y Six *et al.* (2000), se enfatiza, que cuando la materia orgánica está constituida por restos fibrosos, su acción sobre la agregación es temporal, debido a que las fracciones gruesas constituyen materia orgánica fresca, alrededor de la cual se forman grandes agregados, pero cuya estabilidad disminuye cuando los restos son descompuestos.

Finalmente, como se mencionó, tanto en la disgregación de los fragmentos iniciales de tepetate, como en la formación de agregados, destacó la influencia las especies vegetales con adición de fertilizante inorgánico. El fertilizante, en forma aislada, no interviene en la estructuración. Sin embargo, cuando se adiciona al sustrato, la disponibilidad de nutrimentos para las plantas es inmediata, lo que incrementa el desarrollo aéreo y radical de las mismas (Troeh y Thompson, 1993). En consecuencia, la tasa metabólica se aumenta y hay mayor producción de exudados, los cuales son depositados en la rizósfera, convirtiéndose en cementantes orgánicos con un alto potencial de agregación (Gregorich *et al.*, 1995; Haynes, 1999; Badalucco y Kuikman, 2001). Razón por la cual, el efecto del fertilizante sobre los fragmentos de tepetate, no se manifestó en forma individual, sino a través de la interacción con las especies vegetales.

b. Estabilidad de agregados en húmedo

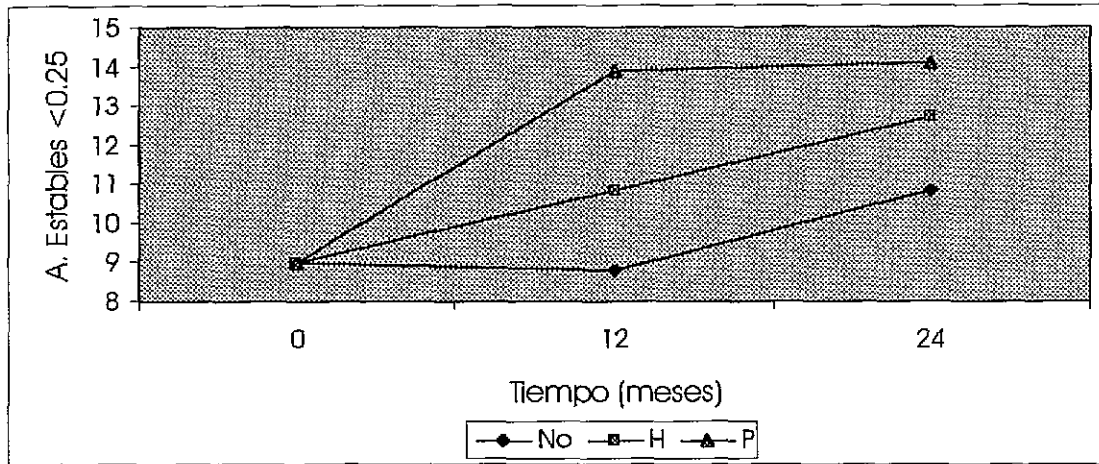
En la estabilidad de las unidades <0.25 mm, destacó la influencia de las especies vegetales (Tabla 29). De acuerdo con los contrastes, las diferencias fueron altamente significativas entre el pasto Rhodes y el testigo y marginalmente significativas entre plantas.

Tabla 29. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo <0.25 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.002
Fertilizante	0.44
Estiércol	0.68
Especies*Fertilizante	0.72
Especies*Estiércol	0.78
Fertilizante*Estiércol	0.71
Especies*Fertilizante*Estiércol	0.35
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	0.002
No vs H	0.08
No vs P	0.0005
H vs P	0.05

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto

Los cambios con respecto al tiempo no fueron significativos ($p = 0.27$), de tal manera, que las diferencias observadas sólo se presentaron entre tratamientos. Como se observa en la Figura 16, en la primera etapa de observación hubo un incremento en el porcentaje de microagregados estables en húmedo, por efecto del pasto Rhodes, tanto con respecto al testigo, como a los tratamientos con higuera. Durante la segunda etapa, las diferencias fueron significativas entre el pasto Rhodes y el testigo, pero no entre especies.



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 16. Influencia de las especies vegetales en el porcentaje de unidades estables en húmedo <math><0.25\text{ mm}</math> de diámetro del tepetate.

En las unidades de 0.25 a 0.5 mm, se presentó un efecto altamente significativo de las especies vegetales y de su interacción con el fertilizante (Tabla 30). Los contrastes, en ambos casos, mostraron diferencias entre el testigo y los tratamientos con pasto, así como entre especies. Con respecto al tiempo de observación los cambios no fueron significativos ($p = 0.16$). El porcentaje más alto, tanto con respecto al contenido inicial, como al testigo, se obtuvo con el pasto Rhodes. Durante los primeros 12 meses las diferencias entre especies no fueron significativas, pero a los 24, la influencia del pasto fue significativamente mayor (Figura 17).

Tabla 30. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo de 0.25 a 0.5 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.001
Fertilizante	0.05
Estiércol	0.84
Especies*Fertilizante	0.002
Especies*Estiércol	0.31
Fertilizante*Estiércol	0.59
Especies*Fertilizante*Estiércol	0.53
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	0.02
No vs H	0.59
No vs P	0.001
H vs P	0.003
CONTRASTES PARA ESPECIE Y FERTILIZANTE	
No F vs Especies F	0.0004
No F vs HF	0.04
No F vs PF	0.0005
HF vs PF	0.10

*No: sin planta; H: Higuera; P: pasto

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

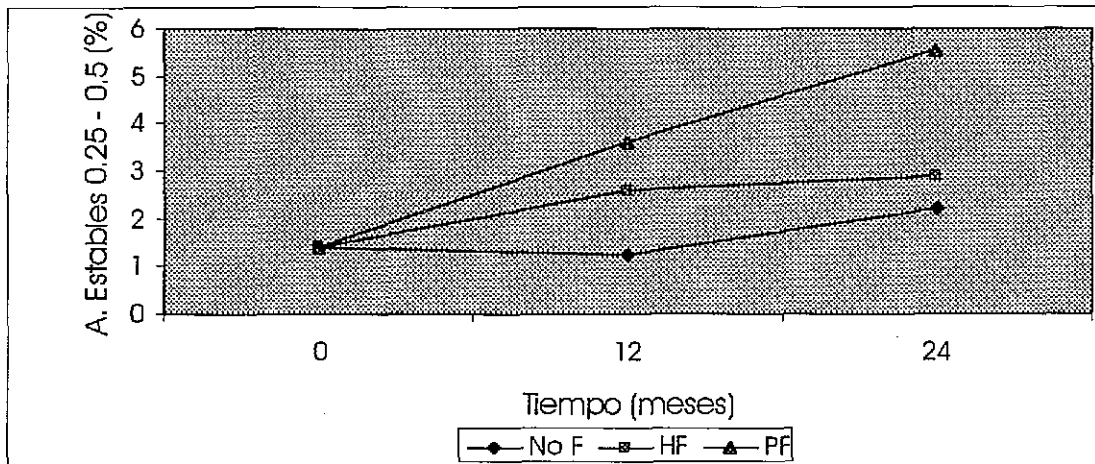


Figura 17. Influencia de la interacción especie - fertilizante en el porcentaje de unidades estables en húmedo de 0.25 a 0.5 mm de diámetro del tepetate.

En las unidades de 0.5 a 1.0 mm, también destacó el efecto de las plantas y su interacción con el fertilizante (Tabla 31). Las diferencias entre tratamientos y la

tendencia en el tiempo ($p = 0.34$), fueron similares a las descritas para la fracción anterior. El porcentaje más alto se obtuvo con el pasto Rhodes (Figura 18).

Tabla 31. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo de 0.5 a 1.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.01
Fertilizante	0.06
Estiércol	0.44
Especies*Fertilizante	0.001
Especies*Estiércol	0.23
Fertilizante*Estiércol	0.61
Especies*Fertilizante*Estiércol	0.40
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	0.09
No vs H	0.95
No vs P	0.005
H vs P	0.01
CONTRASTES PARA ESPECIE Y FERTILIZANTE	
No F vs Especies F	0.0001
No F vs HF	0.02
No F vs PF	0.0002
HF vs PF	0.09

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto; F: fertilizante

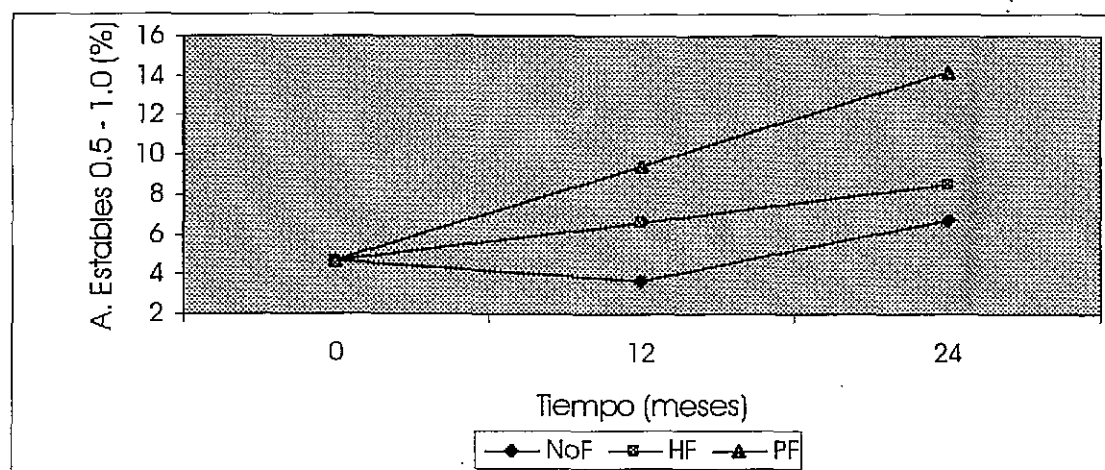


Figura 18. Influencia de la interacción especie - fertilizante en el porcentaje de unidades estables en húmedo de 0.5 a 1.0 mm de diámetro del tepetate.

La estabilidad de la fracción de 1 a 2 mm, no se modificó por los tratamientos (Tabla 32). Con respecto al tiempo, se presentó un incremento significativo ($p = 0,01$), independiente de los factores estudiados.

Tabla 32. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo de 1.0 a 2.0 mm.

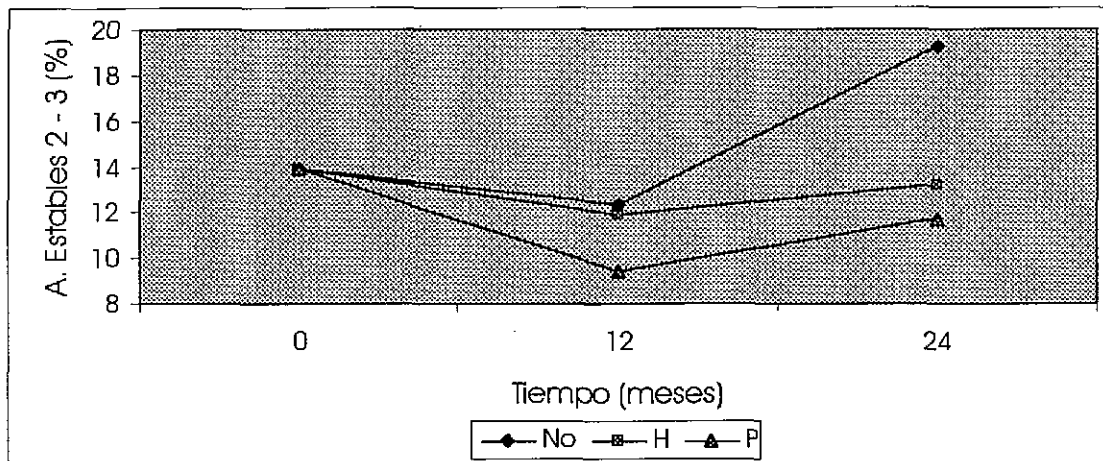
FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0,84
Fertilizante	0,35
Estiércol	0,84
Especies*Fertilizante	0,35
Especies*Estiércol	0,39
Fertilizante*Estiércol	0,70
Especie*Fertilizante*Estiércol	0,48

En las unidades de 2 a 3 mm, destacó la influencia de las especies vegetales (Tabla 33). El porcentaje de dichas unidades disminuyó en los tratamientos con plantas, con respecto al testigo. Entre especies las diferencias no fueron significativas (Figura 19). Las diferencias entre etapas no fueron significativas.

Tabla 33. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo de 2.0 a 3.0 mm.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.01
Fertilizante	0,28
Estiércol	0,32
Especies*Fertilizante	0,32
Especies*Estiércol	0,97
Fertilizante*Estiércol	0,42
Especies*Fertilizante*Estiércol	0,79
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	0.003
No vs H	0.04
No vs P	0.002
H vs P	0,19

*No: sin planta; H: Higuera; P: pasto



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 19. Influencia de las especies vegetales en el porcentaje de unidades estables en húmedo de 2.0 a 3.0 mm de diámetro del tepetate.

Por lo que respecta a las unidades estables en húmedo de 3.0 a 5.0 y > 5 mm (Tabla 34), su porcentaje no se modificó por efecto de los tratamientos, ni con respecto al tiempo de observación ($p = 0.40$).

Tabla 34. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para las unidades estables en húmedo de 3.0 a 5.0 y > 5 mm.

FUENTE DE VARIACION	3 - 5 mm PROBABILIDAD DE F	> 5 mm PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.07	0.59
Fertilizante	0.76	0.68
Estiércol	0.77	0.64
Especies*Fertilizante	0.39	0.88
Especies*Estiércol	0.54	0.60
Fertilizante*Estiércol	0.26	0.54
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.41	0.77

El resumen de los resultados (Tabla 35), muestra que, al igual que en la formación de agregados en seco, el factor determinante en la estabilidad en húmedo de las unidades < 3 mm de diámetro, fue la presencia de especies vegetales con y sin adición de fertilizante. En las de mayor tamaño, ninguno de los tratamientos influyó significativamente. El efecto de las especies vegetales se manifestó directamente sobre las unidades < 0.25 y de 2 a 3 mm de diámetro, mientras que el efecto de la interacción con el fertilizante, fue significativo en las unidades de 0.25 a 1 mm. Los cambios con respecto al tiempo de observación, excepto para la fracción de 1 a 2 mm, no fueron significativos, lo que implica que el efecto de los tratamientos sobre la estabilidad en húmedo fue sólo temporal

Tabla 35. Resumen del efecto de los factores principales y el tiempo de observación, sobre la estabilidad en húmedo de los agregados del tepetate.

VARIABLE	FACTORES EXPERIMENTALES*		TIEMPO		
	Interacción	Efecto	Interacción	Efecto Interacción	Efecto Total
Agregados (mm)					
< 0.25	Sp	P>H>No	-	-	E0=E1=E2
0.25 – 0.5	Sp – F	P>H>No	-	-	E0=E1=E2
0.5 – 1.0	Sp – F	P>H>No	-	-	E0=E1=E2
1.0 – 2.0	-	-	-	-	E0=E1<E2
2.0 – 3.0	Sp	No>H=P	-	-	E0=E1=E2
3.0 – 5.0	-	-	-	-	E0=E1=E2
> 5.0	-	-	-	-	E0=E1=E2

* Sp: especies vegetales; F: fertilizante; E: estiércol; P: pasto Rhodes; H: higuera; No: sin planta; T: tiempo

Como se muestra en las Figuras 20 y 21, el contenido de unidades < 1.0 mm mostró la siguiente tendencia P > H > No, con y sin adición de fertilizante; la fracción de 1 a 2 mm no se modificó y, en el intervalo de 2 a 3 mm, la tendencia se invierte, No > H > P, pero el cambio sólo se presentó cuando no se adicionó fertilizante.

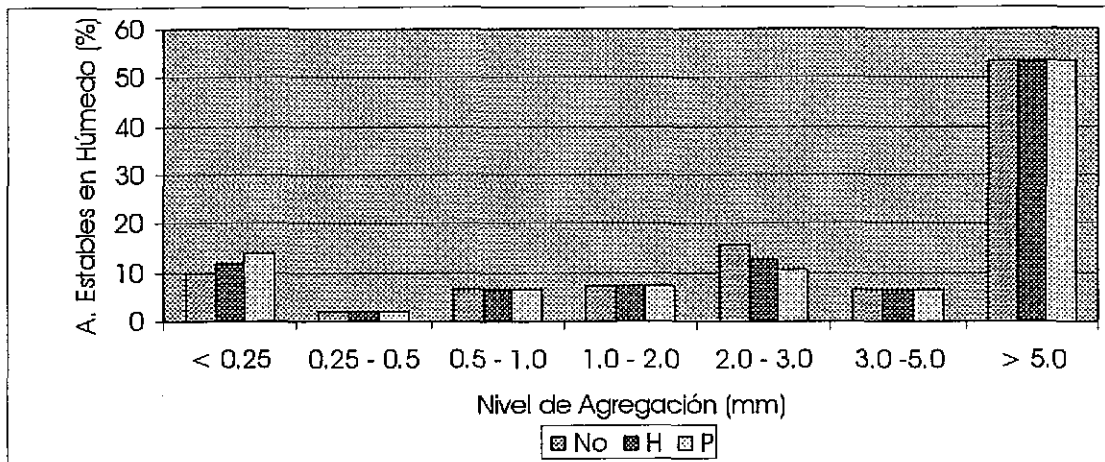


Figura 20. Influencia de las especies vegetales, en el porcentaje de agregados estables en húmedo del tepetate.

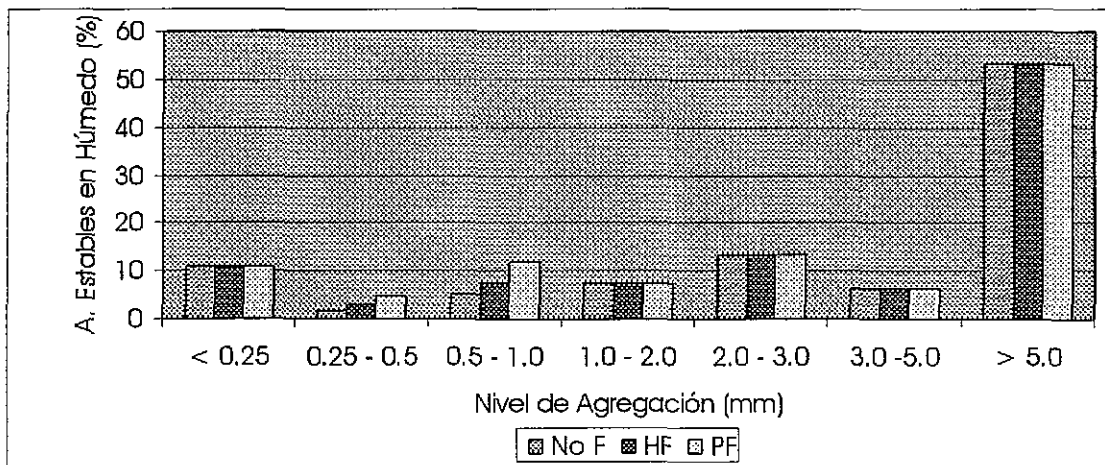


Figura 21. Influencia de la interacción especie – fertilizante, en el porcentaje de agregados estables en húmedo del tepetate.

La estabilidad en húmedo es una medida de la resistencia de las unidades de diferente diámetro (agregados y fragmentos), a fuerzas de dispersión o rompimiento en condiciones de humedad (Klute, 1998). Su medición permite hacer inferencias sobre la resistencia del sustrato a la lluvia, el riego, la labranza y la erosión hídrica, así como sobre el diámetro óptimo de las unidades, para disminuir el riesgo de disgregación, recompactación y recementación (Dinel *et al.*, 1998; Kay, 1998).

La resistencia a la dispersión depende del tipo de unidades que se consideren, es decir, fragmentos o agregados. En el caso del tepetate, por tratarse de un material consolidado desde el momento de su formación y cementado por procesos geológicos y edafogénicos (Zebrowski, 1992; Hidalgo *et al.*, 1997, Acevedo y Flores, 2000), la resistencia de los fragmentos creados en forma mecánica, es mayor que la de los agregados formados como resultado de los tratamientos. En éstos, los enlaces entre la fracción mineral, están constituidos por compuestos orgánicos de efecto temporal y transitorio (Martens, 2000), lo que los hace altamente susceptibles a la dispersión cuando se humedecen.

Por lo tanto, la tendencia que en un suelo representa incremento o disminución de la estabilidad estructural, en el tepetate debe interpretarse tomando en consideración sus características. Un cambio en el contenido de unidades de una fracción determinada, puede reflejar el dominio de fragmentos sobre agregados o viceversa, tal como se ha demostrado en estudios realizados bajo condiciones controladas, con tepetates de los estados de México y Morelos (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001).

La pérdida de estabilidad ante el fenómeno de humedecimiento ha sido ampliamente estudiada (Topp *et al.*, 1995; Klute, 1998; Kay, 1998), de tal forma que se considera a este fenómeno, como la causa principal de disgregación en el suelo. Lo que sucede cuando un agregado se pone en contacto con el agua, es

que ésta tiende a ocupar el espacio intra e inter agregados, con lo que se provoca la salida abrupta del aire contenido en los poros, ocasiona el rompimiento de los enlaces y la dispersión de las unidades.

Este es un fenómeno relevante, ya que la desintegración da como resultado unidades susceptibles de ser arrastradas tanto por el agua, como por el aire y, por consiguiente, incrementa el riesgo de erosión del sustrato (Wang *et al.*, 1995; Dinel *et al.*, 1998). En el caso de los tepetates, en numerosos estudios (Baumann y Werner, 1997; Fechter *et al.*, 1997; Prat *et al.*, 1997) se ha destacado su resistencia a las lluvias, así como su fragilidad ante los fenómenos erosivos regresivos, que conducen, por concentración del agua que no puede filtrarse a causa de la débil porosidad de este material, a la formación de profundas cárcavas, corriente abajo. Esto, en condiciones naturales, no sólo hace imposible el manejo de los tepetates como medio de cultivo, sino que también conllevan una severa pérdida de agua, sedimentos y nutrimentos, que repercute negativamente en la fertilidad.

El menor porcentaje de unidades >5 mm, obtenido en el análisis en húmedo (50%), en comparación con el del análisis en seco (70%), implica que muchas de las unidades se disgregaron, por estar unidas, principalmente, mediante enlaces temporales y transitorios. Esto corrobora lo expuesto en el apartado anterior, en el que se caracterizó a esta fracción por estar formada casi en su totalidad por fragmentos y algunos grandes agregados enlazados mecánicamente por las raíces. Por otra parte, el hecho de que el contenido inicial, en el análisis en húmedo, no disminuyera por efecto de los tratamientos, confirma la presencia de una cantidad significativa de unidades de alta estabilidad, es decir, de fragmentos.

De acuerdo con Puget *et al.* (1999), los macroagregados se caracterizan por tener más carbono lábil que los microagregados, por lo que su estabilidad es menor. Sin embargo, durante la fase inicial del proceso de agregación, la

estabilidad de estructural está determinada por los efectos directos e indirectos de raíces e hifas, más que por el tipo de C orgánico presente (Feller *et al.*, 1996), cuya acción mecánica constituye, también, el factor inicial de estabilización. Los fenómenos posteriores, por lo tanto, se deben a toda una serie de actividades que se llevan a cabo dentro de los agregados (Six *et al.*, 2000).

Las unidades >5 mm formadas por efecto de los tratamientos, constituyeron una fracción en la que los enlaces actuaron durante un período que se limitó a la permanencia de las raíces en el tepetate. Esto confirma la necesidad de considerar, como parte de la habilitación, de estas capas endurecidas, plantas, cuya permanencia en el sustrato sea prolongada y mínimos los requerimientos de labranza. De tal manera que la incipiente estructura se mantenga por tiempo suficiente, para que los procesos de estabilización bioquímica se lleven a cabo.

La fracción de 3 a 5 mm manifestó una gran estabilidad, al no modificarse por efecto de los tratamientos, ni durante el humedecimiento. Particularidad que se ha reportado para tepetate en otros trabajos (Martínez *et al.*, 1991; Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001), en los que se designa como un tamaño de unidades susceptible de aportar características de drenaje y manejo apropiadas para el establecimiento de especies vegetales.

En el análisis en seco, la fracción de 2 a 3 mm estuvo comprendida en las unidades de 2 a 5 mm, la cual se distinguió por estar constituida, tanto por fragmentos, como por agregados formados, principalmente, por de pasto Rhodes. El análisis húmedo permitió detallar las características de esta fracción, ya que la alta estabilidad asociada a la de 2 a 3 mm, implica un dominio de fragmentos. Por lo tanto, es posible sugerir que, de la fracción de 2 a 5 mm, las unidades de 3 a 5 corresponden a fragmentos y las de 2 a 3, a agregados. Lo que justifica la estabilidad que mostró cada grupo y la diferente influencia de los tratamientos. Otra forma de elucidar lo anterior, es que las unidades que mantuvieron un

contenido superior al 30%, después de ser sometidas al análisis de estabilidad en húmedo, corresponden a unidades muy resistentes, comportamiento característico de los fragmentos consolidados desde su origen.

Lo anterior, se corroboró a través de la estabilidad de las unidades de 2 a 3 mm, las cuales mostraron diferencias tanto con respecto al tiempo, como por efecto de las especies vegetales. Se trata de una fracción conformada casi en su totalidad por agregados, que debido a la naturaleza de los compuestos de enlace (Feller *et al.*, 1996; Puget *et al.*, 1999), presentaron una estabilidad menor que la de los fragmentos. El hecho de que la menor estabilidad se presentara con el pasto Rhodes; confirma que la formación de agregados se debió, principalmente, a la influencia de esta especie. En los tratamientos sin planta, la estabilidad fue mayor por la escasa existencia de agregados.

En las unidades de este diámetro, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Gregorich *et al.*, 1995; Kay, 1998; Haynes, 1999), la estabilidad depende en gran parte del efecto mecánico de las raíces, pero también hay una mayor participación de enlaces transitorios que en las > 5 mm. La ventaja de la presencia de este tipo de enlaces, como los exudados radicales, radica en que pueden mantener unidas a las partículas, aun después de que la planta ha sido extraída del sustrato (Brimecombe *et al.*, 2001).

Como se ha mencionado, los exudados influyen en la estabilidad al formar capas impermeables que recubren a los agregados y al actuar como lubricantes que recubren las paredes de los poros y galerías, facilitando el crecimiento radical (Uren, 2001). La capacidad de los polisacáridos como agentes estabilizadores, depende de su polaridad, los de naturaleza alcalina y aromática incrementan el carácter hidrófobo de las moléculas (Guggenberger y Zech, 1994). Dentro de los compuestos producidos por los pastos, se encuentran los ácidos glucorónico, glucónico, galacturónico, manurónico, pirúvico y succínico, azúcares libres,

péptidos y lípidos, los cuales se caracterizan por ser de naturaleza hidrófoba y poseer una carga neta negativa (Haynes, 1999, 2000; Hogg y Schjoerring, 2001), lo que repercute en un incremento de la estabilidad. Esta información puede explicar, que la mayor estabilidad se presentara con el pasto Rhodes.

La proporción relativa de fragmentos y agregados en la fracción de 2 a 5 mm, le confiere una estabilidad superior a la de cualquiera de las fracciones consideradas. Esto, aunado a las características favorables de porosidad que aporta a la estructura (Wu *et al.*, 1990, Kay, 1998), hacen de ésta, una fracción adecuada para el establecimiento de especies vegetales y que, por lo tanto, debe ser considerada para la integración de los tepetates al proceso productivo.

La estabilidad de la fracción 0.25 a 2 mm de diámetro, se modificó por influencia de las especies vegetales, pero no con respecto al tiempo de observación. En este nivel, las unidades dominantes fueron agregados (de acuerdo con el análisis en seco), por lo que la interpretación de los resultados, debe hacerse en forma inversa a la de las fracciones constituidas por fragmentos. De tal manera, que el incremento o decremento del porcentaje, refleja directamente un aumento o disminución de la estabilidad, ya que se trata de unidades en las que los enlaces entre la fracción mineral podrían ser de naturaleza orgánica.

Que el tiempo no haya influido en la estabilidad de los agregados de 0.25 a 2 mm, pudo deberse a la carencia de una cantidad significativa de compuestos orgánicos de alta estabilidad, ya que el periodo de observación fue corto como para que se llevara a cabo la síntesis de compuestos orgánicos con características coloidales, cuya acción sobre la estabilidad es la única que se considera permanente (Topp *et al.*, 1995; Haynes, 1999). Aunque cabe señalar, que se ha reportado una correlación mayor entre la estabilidad y el contenido de polisacáridos, que con el de humus (Martens, 2000).

Con base en los estudios de Howard *et al.* (1998), el mejoramiento de la estructura requiere un mínimo de dos años, mientras que la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, de períodos mayores, además de un aporte constante y suficiente de materia orgánica, para satisfacer las necesidades nutrimentales de las plantas, pero también, susceptible de ser transformada y resintetizada. Por lo tanto, al considerar el tiempo de experimentación del presente estudio, es posible suponer que los compuestos orgánicos predominantes fueron polisacáridos, compuestos fácilmente degradables por la biota, altamente susceptibles a la mineralización y de efecto transitorio (Alvarez *et al.*, 1998), por lo que su influencia en la estabilización no fue altamente significativa.

No obstante lo observado en la fracción anterior, la estabilidad de los microagregados (<0.25 mm) se incrementó significativamente con respecto al tiempo, lo que sugiere la incipiente formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Varanini y Pinton, 2001). Este incremento resulta de suma importancia para la integración de los tepetates al proceso productivo, ya que una microagregación estable es la base más sólida para la formación de macroagregados estables.

La influencia de cada una de las plantas en la estabilidad en húmedo de las unidades de tepetate fue diferente y determinante. En la fracción < 2 mm, la estabilidad fue mayor con el pasto Rhodes y siguió la misma tendencia que la formación de agregados en seco $P > H > No$. Esto denota la sobresaliente capacidad del pasto para formar agregados de este diámetro y de incrementar su estabilidad a través de una producción de exudados mayor que la de la higuera, lo cual se relaciona con el tipo de sistema radical, su densidad y escala de acción (Jastrow *et al.*, 1998; Haynes, 1999; Badalucco y Kuikman, 2001).

Por otra parte, la acción del fertilizante en la estabilidad de los fragmentos y agregados del tepetate, al igual que en la formación de agregados en seco, fue indirecta, a través del incremento del metabolismo vegetal y microbiano. Esto dio

lugar a una mayor producción de compuestos de rizodepositación, susceptibles de ser utilizados en forma inmediata o transformados en compuestos de mayor peso molecular (Haynes, 1999; Badalucco y Kuikman, 2001; Varanini y Pinton, 2001).

En general, la estabilidad de los agregados y fragmentos de tepetate presentó una tendencia que se justifica al considerar el tipo de agentes de unión involucrados en su formación y durabilidad. Los resultados denotan que el tipo de uniones orgánicas depende directamente de las diferentes escalas espaciales y, del tipo de raíz involucrado. Por lo tanto, para fomentar la creación de una estructura estable a partir de tepetate fragmentado, es necesario incluir especies vegetales con sistemas radicales fuertes y densos, con un alto potencial de producción de exudados, así como considerar sistemas de labranza que impliquen poco movimiento del tepetate, para evitar la pérdida de la incipiente estructura. De igual forma, los resultados sugieren la necesidad de un período mínimo de dos años, para que tanto de las enmiendas, como las plantas, favorezcan el desarrollo de unidades estructurales estables y se lleve a cabo la síntesis de compuestos orgánicos de alto peso molecular, capaces de mantener el tamaño y distribución de los agregados, aun con los cambios bruscos de humedad y labranza.

Tanto los resultados del análisis de agregación en seco, como los de estabilidad en húmedo, aportaron información destacada sobre la evolución de la estructura del tepetate, bajo la influencia de especies vegetales y adición de enmiendas, lo que permite considerar a ambas determinaciones como buenos indicadores físicos de la calidad estructural del mismo, con la finalidad de mejorarla y tratar de integrar estas capas endurecidas de origen volcánico, al proceso productivo.

3. Indicadores Bioquímicos

a. Carbono total

El carbono total del tepetate sólo se modificó, significativamente, por influencia del estiércol (Tabla 36), cuya adición única en E0, favoreció un incremento, tanto con respecto al contenido inicial, como al testigo (Figura 22). Los cambios ocurridos de E1 a E2 no fueron significativos ($p = 0.81$).

Tabla 36. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para la variable carbono total.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.14
Fertilizante	0.91
Estiércol	<0.0001
Especies*Fertilizante	0.14
Especies*Estiércol	0.67
Fertilizante*Estiércol	0.61
Especies*Fertilizante*Estiércol	>0.90

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

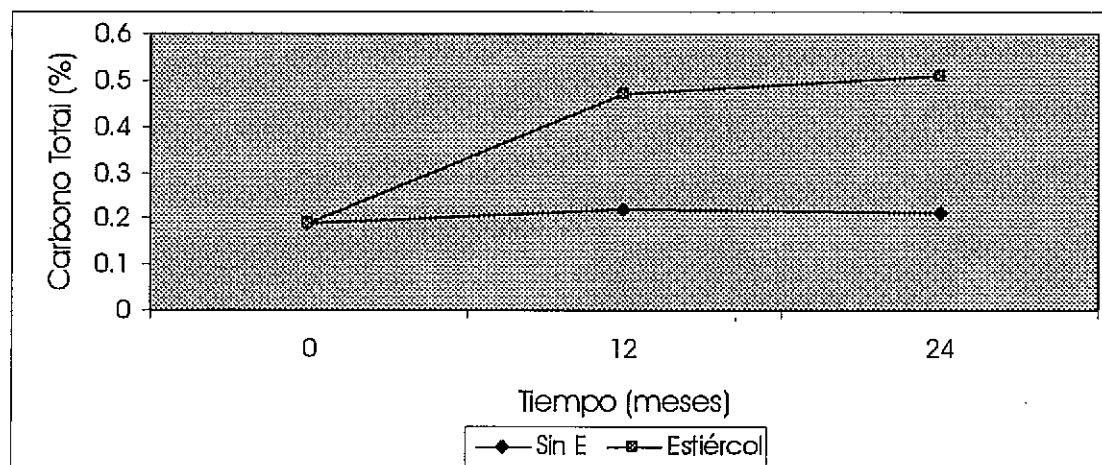


Figura 22. Efecto del estiércol en el contenido de carbono total del tepetate.

b. Polisacáridos totales

El contenido de polisacáridos (porcentaje con respecto al contenido de carbono total) del tepetate estuvo influenciado por las especies vegetales y el estiércol (Tabla 37). De acuerdo con los contrastes y, como se observa en la Figura 23, los tratamientos con plantas presentaron una cantidad significativamente mayor de polisacáridos que el testigo. Entre especies las diferencias no fueron significativas. Con respecto al estiércol (Figura 24), su adición incrementó significativamente el contenido de polisacáridos. Las diferencias de E1 a E2 no fueron significativas ($p = 0.49$).

Tabla 37. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para la variable carbono total.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.0003
Fertilizante	0.70
Estiércol	<0.0001
Especies*Fertilizante	0.32
Especies*Estiércol	0.12
Fertilizante*Estiércol	0.08
Especie*Fertilizante*Estiércol	>0.90
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	<0.0001
No vs H	0.0013
No vs P	0.0001
H vs P	0.20

*No: sin especies; H: higuera; P: pasto; E: estiércol

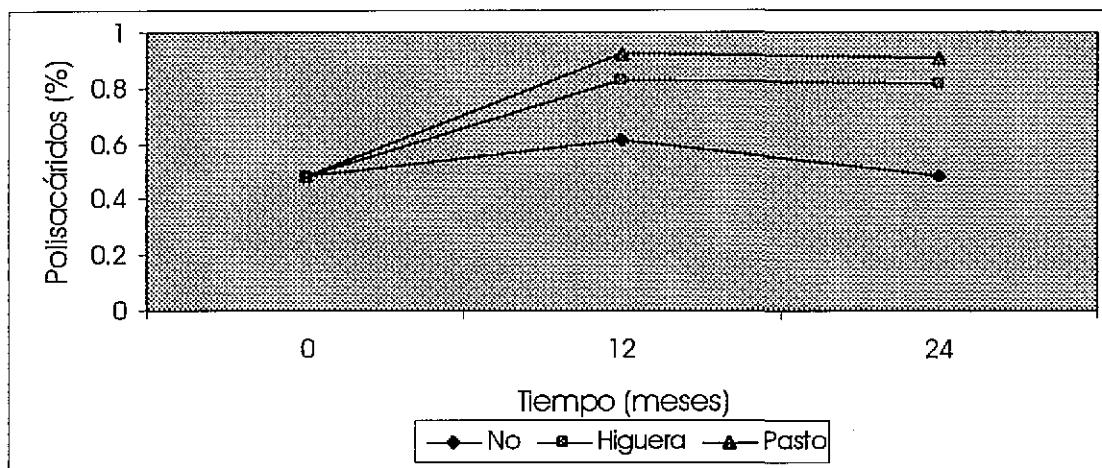


Figura 23. Efecto de las especies vegetales en el contenido de polisacáridos totales del tepetate.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

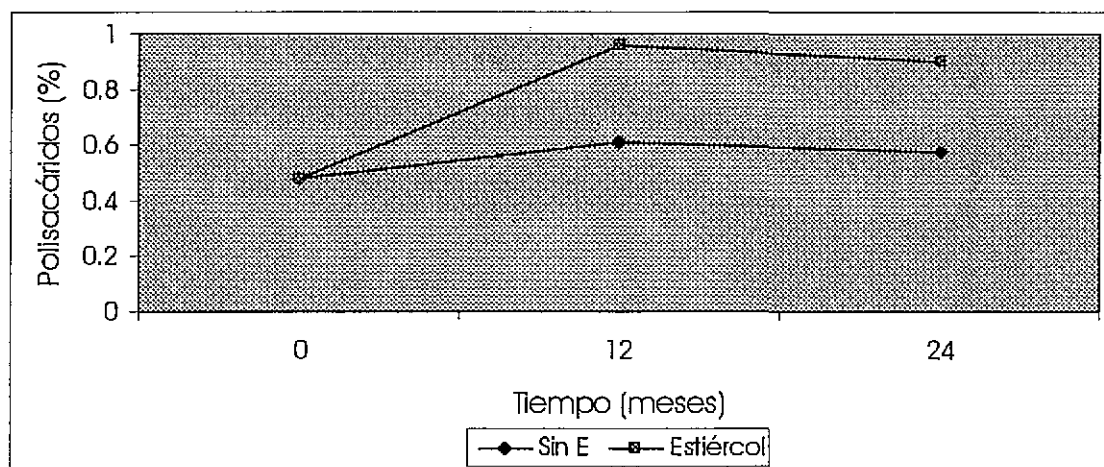


Figura 24. Efecto del estiércol en el contenido de polisacáridos totales del tepetate.

c. Ácidos fúlvicos

Las especies vegetales incrementaron el contenido de ácidos fúlvicos del tepetate, tanto con respecto al testigo, como al porcentaje inicia (Tabla 38), excepto con el pasto Rhodes, el incremento fue paulatino. El análisis de la interacción con el tiempo no mostró diferencias ($p = 0.37$) significativas de E1 a E2. Con la higuera se obtuvo el porcentaje más alto de ácidos fúlvicos, aun cuando en E1, las diferencias entre especies no fueron significativas (Figura 25).

Tabla 38. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para la variable ácidos fúlvicos.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.03
Fertilizante	0.07
Estiércol	0.07
Especies*Fertilizante	0.14
Especies*Estiércol	0.35
Fertilizante*Estiércol	0.72
Especie*Fertilizante*Estiércol	>0.90
CONTRASTES PARA ESPECIE	
No vs Especies	0.04
No vs H	0.01
No vs P	0.32
H vs P	0.07

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

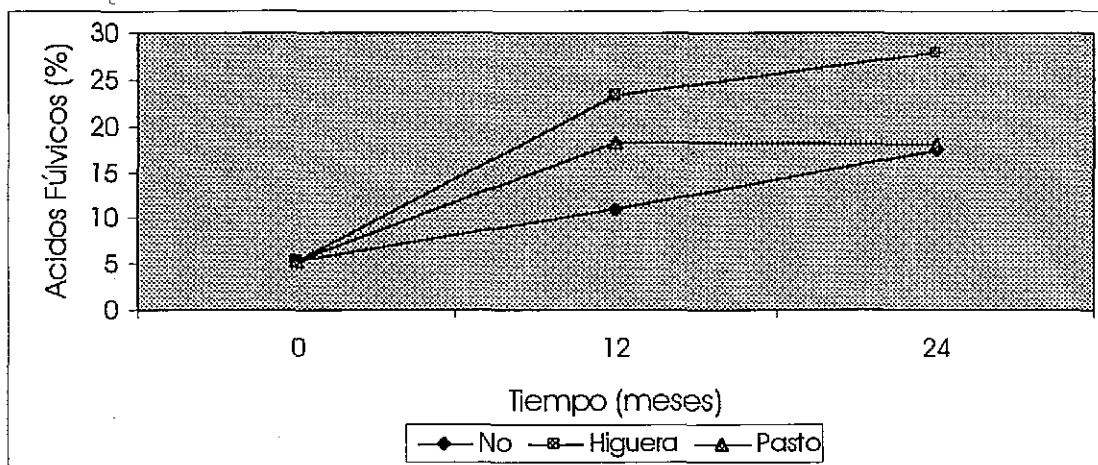


Figura 25. Efecto de las especies vegetales en el contenido de ácidos fúlvicos del tepetate.

d. Ácidos húmicos

Con respecto a los ácidos húmicos (Tabla 39), sólo la adición de estiércol influyó en su contenido (porcentaje respecto al contenido de carbono total). El porcentaje más alto se presentó con los tratamientos en los que se adicionó (Figura 26). Por lo que se refiere al tiempo de observación ($p = 0.03$), hubo un incremento significativo de E0 a E1 y una disminución de E1 a E2. Sin embargo, el efecto fue global y no relacionado con los factores principales.

Tabla 39. Análisis de los factores principales y sus interacciones, para la variable ácidos húmicos.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
Especies Vegetales	0.96
Fertilizante	0.29
Estiércol	0.004
Especies*Fertilizante	0.89
Especies*Estiércol	0.32
Fertilizante*Estiércol	0.65
Especie*Fertilizante*Estiércol	0.27

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

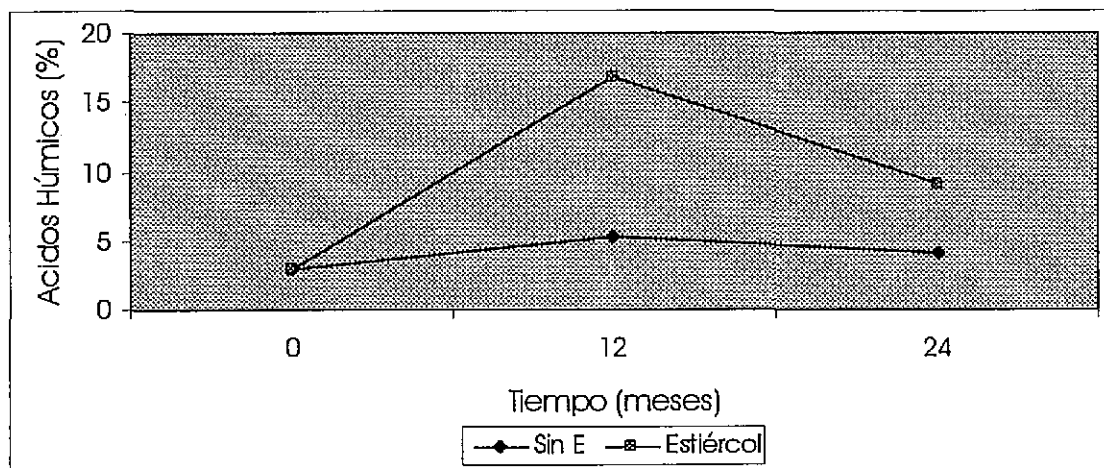


Figura 26. Efecto del estiércol en el contenido de ácidos húmicos del tepetate.

La tendencia de los compuestos orgánicos del tepetate, con relación a los tratamientos, mostró que las especies vegetales y el estiércol, influyeron significativamente en su contenido. Las plantas favorecieron la acumulación de polisacáridos y ácidos fúlvicos, mientras que el estiércol, la de carbono total, polisacáridos y ácidos húmicos. En ninguno de los casos hubo cambios con respecto al tiempo, relacionados con los tratamientos (Tabla 40).

Tabla 40. Resumen del efecto de los factores principales y el tiempo, sobre el contenido de compuestos orgánicos del tepetate.

VARIABLE	FACTORES PRINCIPALES*		TIEMPO
	Interacción	Efecto	Efecto Total
Carbono Total	E	E > No E	E0 = E1 = E2
Polisacáridos	Sp	P = H > No	E0 = E1 = E2
Totales	E	E > No E	
Acidos Fúlvicos	Sp	H > P = No	E0 = E1 = E2
Acidos Húmicos	E	E > No E	E0 < E1 > E2

*Sp: especies vegetales; E: estiércol; P: pasto; H: higuera; No: sin planta o sin enmienda, respectivamente.

El aporte de polisacáridos y ácidos fúlvicos al tepetate, por efecto de las plantas, puede atribuirse, tanto a la depositación y alteración de restos de la parte aérea, como a los compuestos de rizodepositación (Uren, 2001). Aun cuando las plantas contienen los mismos compuestos (ceras, resinas, proteínas, carbohidratos, celulosa y lignina), su proporción depende de la especie, lo que influye en la velocidad de descomposición de los restos (Gregorich *et al.*, 1995; Howard *et al.*, 1998) y explica el aporte diferencial de compuestos orgánicos de la higuera y el pasto Rhodes.

Labrador (1998) y Romera y Guerrero (2002), mencionan que el follaje y raíces de las gramíneas están compuestos por 5 – 12% de grasas, 5 – 10% de proteínas, 25 – 30% de celulosa, 25 - 30% de hemicelulosa y carbohidratos y de 15 – 20% de lignina. Mientras que los árboles caducifolios poseen una composición promedio de 3 – 5% de grasas, 4 – 10% de proteínas, 15 – 25% de celulosa, 10 – 20% de hemicelulosa y carbohidratos y 10% de lignina.

Si se analiza la composición de las plantas, podría esperarse que el pasto aportara al tepetate, una cantidad mayor de compuestos orgánicos que la higuera, debido a que las gramíneas contienen restos de fácil descomposición, lo que implica un aporte significativo de azúcares libres al medio. Sin embargo, en el caso de los polisacáridos, las diferencias entre especies no fueron significativas, lo que pudo deberse, a que por tratarse de compuestos lábiles, su medición es difícil ya que no se acumulan (Neumann y Römheld, 2001). Pero sugiere, también, que la producción de compuestos de rizodepositación por la higuera, fue alta, lo cual es posible, si se considera que las raíces gruesas producen cantidades elevadas de mucílagos (Uren, 2001). Con respecto a los ácidos fúlvicos, que el aporte fuera mayor con la higuera, implica una importante participación de los compuestos recalcitrantes, cuyo contenido en las arbóreas es mayor que en las gramíneas.

Al finalizar el estudio, se observó que la transformación de los restos de la parte aérea y radical de las plantas fue muy limitada. En el caso del follaje, la mayor parte se encontró sólo ligeramente fragmentado sobre el tepetate y por lo que respecta a las raíces, al retirar las plantas del tepetate, se constató una ausencia casi total de tejido necrosado, hecho que corroboró lo anteriormente expuesto, acerca del destacado efecto de los productos de rizodepositación, específicamente de los exudados, sobre el contenido de polisacáridos.

Los exudados radicales, representados por gomas, mucílagos, ceras y resinas de naturaleza orgánica, están constituidos por gomas poliurónicas y polisacáridos de bajo peso molecular (Neumann y Römheld, 2001), motivo por el cual, su fraccionamiento en moléculas simples requiere de un menor gasto energético e involucra menos tiempo, que la alteración de restos más complejos, incluso, pueden ser directamente liberados al suelo en forma de azúcares simples, por lo que ejercen inmediatamente su acción aglutinante sobre las partículas del suelo (Haynes, 1999).

En el caso del pasto, su densidad radical le confiere una alta capacidad de producción de mucílagos, lo cual se reflejó en los resultados, como un incremento significativo de polisacáridos. Sin embargo, no se presentaron diferencias entre especies, aun cuando la higuera posee un sistema radical axonomorfo y, por consiguiente, menos denso (Wild, 1992). Esto pudo estar relacionado con el dominio de raíces gruesas en la higuera, las que de acuerdo con los estudios de Badalucco y Kuikman (2001), producen cantidades mayores de compuestos de rizodepositación, que las raíces finas, que constituyen el sistema radical de los pastos.

Por lo que se refiere a los compuestos húmicos, su presencia en los tratamientos con higuera podría explicarse con base en que los restos de esta planta son ricos en polifenoles (Romera y Guerrero, 2002), por lo que permanecen en el sustrato durante el tiempo necesario para que la alteración, mediante complejos enzimáticos de poblaciones microbianas específicas, se lleve a cabo (Kay, 1998; Varanini y Pinton, 2001).

En los trabajos realizados por McCartney *et al.* (1997), se observó que la hojarasca con una elevada relación carbono – nitrógeno y rica en polifenoles, puede tardar varios años en descomponerse e integrarse al suelo. A diferencia de la hojarasca rica en nitrógeno y carbohidratos solubles, cuya alteración puede llevarse a cabo en menos de un año. Los árboles caducifolios, como la higuera, poseen relaciones C/N de 40 a 50, mientras que en las gramíneas perennes se encuentra entre 15 y 20 (Labrador, 1998), lo que implica períodos relativamente cortos de permanencia de la materia orgánica derivada del pasto en el tepetate, como para favorecer altas tasas de humificación.

Howard *et al.* (1998) destacaron la rápida formación de ácidos fúlvicos, respecto a la de húmicos, a partir de los polisacáridos, cuando existe un mecanismo de protección que les permite permanecer en el suelo durante el

tiempo suficiente para que los procesos de síntesis y polimerización se lleven a cabo. Los autores apoyan sus observaciones en la mayor complejidad química que presentan las moléculas de ácidos húmicos, que están constituidas por radicales de polisacáridos poco modificados, derivados aromáticos de la lignina y largas cadenas de anillos bencénicos con grupos alquilo. A diferencia de los fúlvicos, que están formados, principalmente, por polisacáridos modificados u oxidados y cantidades variables de carbono en grupos alquilo.

Por lo tanto, la mayor síntesis de ácidos fúlvicos, que de húmicos, en el tepetate, pudo ser resultado de la composición de los residuos vegetales, rica en carbohidratos y del corto período para su síntesis. Además, tanto los amorfos (Acevedo *et al.*, 2002), como la arcilla (23%), pudieron constituir mecanismos de protección de los polisacáridos, lo que facilitó la formación de ácidos fúlvicos a partir de carbohidratos.

Por lo que se refiere a la participación del estiércol, su adición implicó un aporte significativo de materia orgánica con diferente grado de descomposición al tepetate, por lo que su transformación pudo llevarse a cabo en menor tiempo que la del follaje o que la producción de compuestos de rizodepositación (Aoyama *et al.*, 2000). Esto se manifestó como un incremento significativo de carbono, polisacáridos y ácidos húmicos.

El que la liberación de nutrimentos del estiércol sea paulatina, permite que la materia orgánica lábil sea inmediatamente aprovechada por las plantas y la biota como recurso energético, mientras que la recalcitrante, permanece en el suelo hasta la biosíntesis de compuestos de alta estabilidad (Labrador, 1998). De acuerdo con Howard *et al.* (1998), la materia orgánica derivada del abono, entra al suelo como una partícula alrededor de la cual se aglutina la fracción mineral, hasta la formación de macroagregados. Posteriormente, la fracción orgánica se transforma dentro del agregado hasta la formación de compuestos

de alta estabilidad, con capacidad de asociarse a nuevas partículas minerales finas, para constituir microagregados. Proceso que puede explicar la influencia de los tratamientos con estiércol de bovino, sobre el contenido de polisacáridos y ácidos húmicos en el tepetate.

Los resultados de los indicadores bioquímicos mostraron que el contenido de materia orgánica no es suficiente para determinar la calidad del tepetate roturado y ponen de manifiesto la importancia de conocer el tipo de compuestos que se introducen a este sistema a través de las prácticas de manejo. Esto permite estimar la calidad y potencialidad del sustrato para un uso determinado y establecer programas de mejoramiento y aprovechamiento. Un ejemplo lo constituye el contenido de carbono como indicador de calidad estructural, el cual no es suficiente, ya que la agregación involucra sólo algunos compuestos como polisacáridos, ácidos húmicos y fúlvicos, cuya cuantificación aporta información más precisa al respecto.

En el caso de los tepetates, el mejoramiento de su calidad para un uso agrícola, pecuario o forestal, implica la adición de compuestos que aporten nutrimentos en cantidad suficiente para las plantas y microorganismos, pero también, con capacidad de establecer, a corto y mediano plazo, enlaces entre los fragmentos creados en forma mecánica. La identificación, así como la cuantificación de polisacáridos, ácidos húmicos y fúlvicos, aportó información sobresaliente con respecto a la dinámica de la materia orgánica adicionada al tepetate a través de las plantas y enmiendas. Esta información, aunada a la obtenida de los análisis de agregación y estabilidad, permite tener una visión integral de la posible reorganización de los fragmentos de tepetate y plantea la posibilidad de aplicar el conocimiento adquirido, a revertir los factores que limitan su habilitación.

4. Compuestos Orgánicos – Agregación

Los resultados de los análisis físicos y bioquímicos, sugirieron la existencia de una relación entre el tipo de compuestos orgánicos y la formación de agregados estables. El esclarecimiento de dicha relación, permitiría confirmar el grado de participación de cada compuesto en la agregación y corroborar la naturaleza de los enlaces entre fragmentos. Por tal motivo, con los datos mencionados se formaron tres grupos, cuyas interacciones se analizaron a través de correlaciones canónicas. El primer grupo, el de los compuestos orgánicos, estuvo constituido por los polisacáridos, ácidos húmicos y fúlvicos (O); el segundo, por los agregados de diferente diámetro, cuantificados mediante el análisis de agregación en seco (A) y el tercero, por los agregados estables en húmedo (AE).

a. Compuestos orgánicos y agregación

Al considerar a los compuestos orgánicos como variables dependientes de la agregación (Figura 27), en la canónica uno (O1), el carbono total y los polisacáridos presentaron pesos muy altos y, en la dos (O2), los ácidos húmicos y fúlvicos. Por otra parte, cuando se consideraron como variables independientes (Figura 28), el mayor peso en la canónica uno (A1) se presentó con los agregados de 0.25 – 1.0 mm y, en la dos (A2), con los <0.25 y de 2.0 – 5.0 mm. Comportamiento que señala una asociación (correlación positiva) entre el contenido de carbono y polisacáridos, con los agregados de 0.25 a 1 mm; entre los ácidos húmicos y los agregados de 2 a 5 mm y, entre los ácidos fúlvicos y los agregados <0.25 mm.

Las correlaciones se complementaron con un análisis de varianza multivariado (Tabla 41), el cual, corroboró que la relación de los compuestos orgánicos con los agregados <0.25 mm y de 0.25 a 1.0 mm, fue significativa.

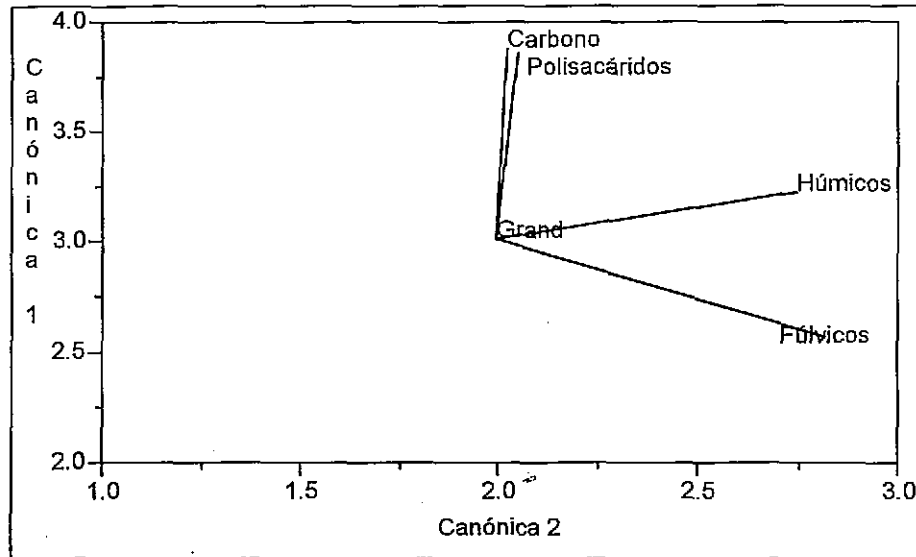


Figura 27. Correlaciones canónicas para los compuestos orgánicos como variables dependientes del tamaño de agregados formados en el tepetate.

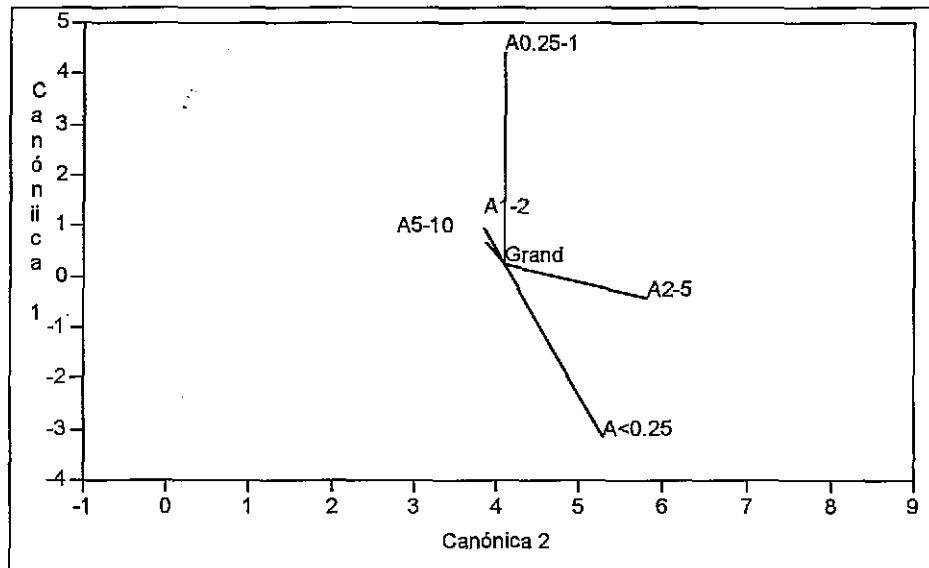


Figura 28. Correlaciones canónicas para los tamaños de agregados como variables dependientes de los compuestos orgánicos del tepetate.

Tabla 41. MANOVA para la relación compuestos orgánicos – agregación, del tepetate.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
A<0.25	0.02
A0.25 – 1.0	0.02
A1.0 – 2.0	0.51
A2.0 – 5.0	0.12
A5.0-10.0	0.61

Las fórmulas de las canónicas se expresaron como:

$$O1 = 1.20 \text{ carbono} + 0.01 \text{ húmicos} + -0.01 \text{ fúlvicos} + 0.6 \text{ polisacáridos.}$$

$$O2 = 0.04 \text{ carbono} + 0.03 \text{ húmicos} + 0.01 \text{ fúlvicos} + 0.04 \text{ polisacáridos.}$$

$$A1 = -0.50 A<0.25 + 0.14 A0.25-1 + 0.09 A1-2 + 0.02 A2-5 + 0.02 A5-10$$

$$A2 = 0.17 A<0.25 + -0.00001 A0.25-1 + -0.03 A1-2 + 0.04 A2-5 + -0.01 A5-10$$

La asociación de las variables, de acuerdo con el análisis de las gráficas y las fórmulas, fue:

$$O1 = \text{Carbono y polisacáridos} \quad \text{VS} \quad A1 = A \text{ 0,25 – 1.0}$$

$$O2 = \text{Húmicos y fúlvicos} \quad \text{VS} \quad A2 = A \text{ 2.0 – 5.0 y } A <0.25$$

Por lo tanto, la primer pareja de variables canónicas (O1–A1) indicó, con un valor de correlación de 0.79, que el incremento de carbono total y polisacáridos, estuvo asociado con un incremento significativo de agregados de 0.25 a 1.0 mm de diámetro. La segunda pareja (O2–A2) indicó, con un valor de correlación de 0.65, que al aumentar el contenido de ácidos húmicos, aumentó, aunque no en forma significativa, la formación de agregados de 2.0 a 5.0 mm y que un incremento de ácidos fúlvicos, favorece la formación de agregados <0.25.

b. Compuestos orgánicos y estabilidad

Con respecto a la relación de los compuestos orgánicos (O) con la estabilidad en húmedo (AE) de los agregados formados en el tepetate, se observó que al considerarlos como dependientes de la estabilidad (Figura 29), las variables con mayor peso fueron, para la canónica uno, ácidos fúlvicos y carbono total y, para la dos, polisacáridos y ácidos húmicos. Cuando los compuestos orgánicos se consideraron como variables independientes, el mayor peso se presentó en los agregados 0.25 a 1 y <0.25 en la canónica uno y, con los de 2 a 3 y de 0.25 a 0.5 mm, para la dos (Figura 30). Lo que denota una correlación positiva entre las variables correspondientes.

El análisis de varianza multivariado (Tabla 42) mostró que el contenido de carbono y ácidos fúlvicos influyó significativamente en la estabilidad de los agregados de 0.5 a 1 mm y, el de polisacáridos y ácidos húmicos, en la estabilidad de los 0.25 a 0.5 mm.

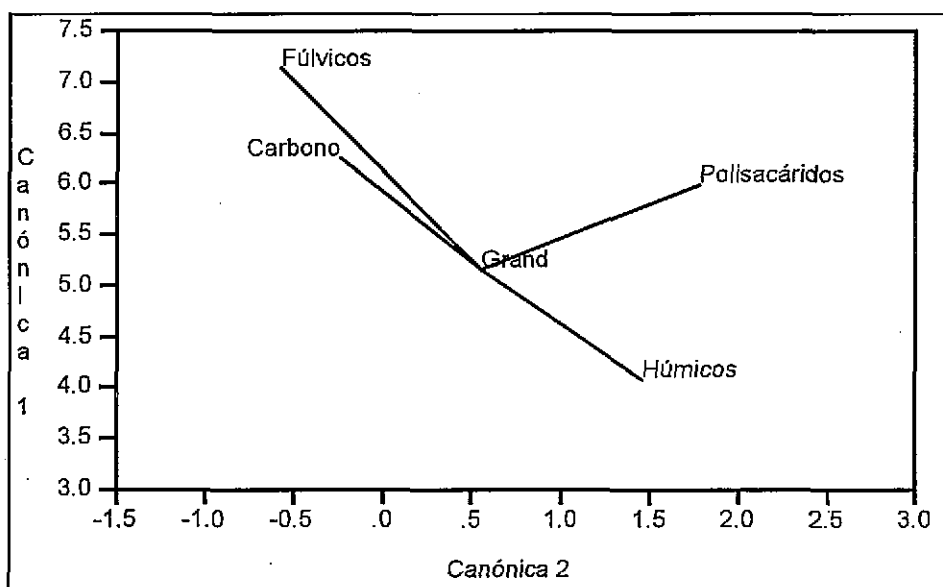


Figura 29. Correlación canónica para los compuestos orgánicos como variables dependientes de la estabilidad de los agregados en el tepetate.

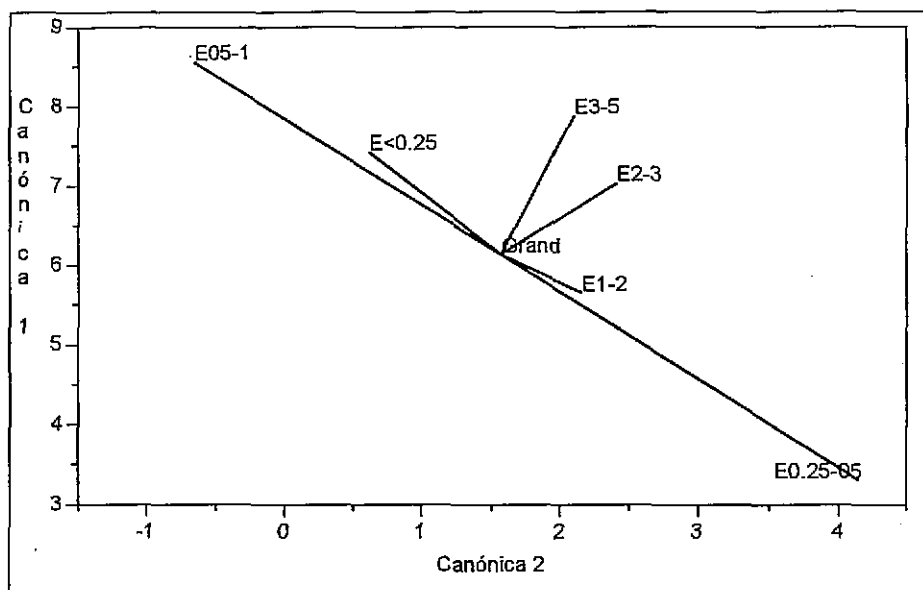


Figura 30. Correlaciones canónicas para la estabilidad de los agregados como variables dependientes de los compuestos orgánicos del tepalcote.

Tabla 42. MANOVA para la relación compuestos orgánicos - agregación, del tepalcote.

FUENTE DE VARIACION	PROBABILIDAD DE F
AE <0.25	0.10
AE 0.25 - 0.5	0.02
AE 0.5 - 1.0	0.02
AE 1.0 - 2.0	0.62
AE 2.0 - 3.0	0.23
AE 3.0 - 5.0	0.27

Las fórmulas correspondientes a las canónicas, se expresan como:

$$O1 = 1.57 \text{ carbono} + -0.04 \text{ húmicos} + 0.03 \text{ fúlvicos} + 0.56 \text{ polisacáridos}$$

$$O2 = -1.13 \text{ carbono} + 0.03 \text{ húmicos} + -0.02 \text{ fúlvicos} + 0.84 \text{ polisacáridos}$$

$$AE1 = -0.04 AE<0.25 + 0.28 AE0.25-0.5 + -0.10 AE0.5-1.0 + 0.05 AE1-2 + 0.03 AE2-3 + 0.02 AE3-5.$$

$$AE2 = 0.06 AE<0.25 + -0.31 AE0.25-0.5 + 0.10 AE0.5-1.0 + -0.04 AE1-2 + 0.03 AE0-3 + 0.08 AE3-5.$$

La asociación de las variables, de acuerdo con el análisis de las gráficas y las fórmulas fue:

$$\begin{array}{ll} O1 = \text{Carbono y Ácidos fúlvicos} & \text{VS} \quad E1 = AE <0.25 \text{ y } 0.5 - 1.0 \\ O2 = \text{Polisacáridos y ácidos húmicos} & \text{VS} \quad E2 = AE 0.25 - 0.5 \text{ y } 2 - 3 \end{array}$$

La primer pareja de canónicas (O1 - AE1) indicó, con un valor de correlación de 0.81, que el incremento en el contenido de carbono y ácidos fúlvicos, dio como resultado un aumento en la estabilidad de los agregados <0.25 y de 0.5 a 1.0 mm. Por otra parte, la segunda pareja (O2 - AE2) mostró, con un valor de correlación de 0.72, que al incrementarse el contenido de polisacáridos y ácidos húmicos, hubo un incremento en la estabilidad de los agregados de 0.25 a 0.5 y de 2 a 3 mm.

El conjunto de resultados mostró la existencia de una correlación positiva entre el contenido de los compuestos orgánicos y la formación de agregados estables, a partir de fragmentos de tepetate. Como se muestra en la Tabla 43, el carbono total y los polisacáridos actuaron como enlace, para la formación de agregados de 0.25 a 1.0 mm de diámetro, pero la estabilidad de dicha fracción, así como la de 0.25 a 0.5 mm, la determinó el contenido de carbono total y sustancias húmicas.

Los ácidos húmicos y fúlvicos, por otra parte, sirvieron de enlace tanto en los microagregados, como en los macroagregados de 2 a 5 mm, aun cuando el

efecto sólo fue significativo en los primeros. La estabilidad de las unidades <0.25 mm se incrementó, aunque no significativamente, por efecto del carbono total y los ácidos fúlvicos y, la de las unidades de 2 a 3 mm, por los polisacáridos.

Tabla 43. Efecto de los compuestos orgánicos sobre la formación de agregados estables en tepetate fragmentado.

COMPUESTOS ORGANICOS (%)	AGREGADOS (mm)						
	<0.25	0.25-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-5.0	>5.0
Carbono Total	&	*	* &				
Polisacáridos		*	*		&		
Ac. Fúlvicos	* &		&		*	*	
Ac. Húmicos	*	&			*	*	

* Influencia en la formación de agregados.

& Influencia en la estabilidad en húmedo.

Los resultados concuerdan con lo mencionado en otros estudios (Topp *et al.*, 1995; Kay, 1998, Puget *et al.*, 1999), respecto a la relación que guarda la materia orgánica con la agregación; entre mayor fue el contenido de materia orgánica, mayor fue el porcentaje de agregados estables. Sin embargo, se presentaron algunas diferencias, de acuerdo con lo que dichos autores reportan sobre la naturaleza química de los compuestos involucrados en cada tamaño de agregados. Por otra parte, se corroboró la importancia de la escala, desde el punto de vista espacial, a la que actuaron las plantas y enmiendas. Que los productos de rizodepositación (carbono, polisacáridos y sustancias húmicas) hayan influido en la formación y estabilidad de las unidades de 0.25 a 1.0 mm, confirmó que éstas, son susceptibles de enlazarse mediante compuestos orgánicos y no sólo por empaquetamiento radical (Martens, 2000).

En todos los tratamientos, más del 80% del carbono orgánico presente en el tepetate, estuvo constituido por polisacáridos, de tal manera, que la formación de agregados estables de diferente tamaño, se relacionó, directamente, con su

contenido, lo que coincide con lo reportado por Dinel *et al.* (1998) y Jastrow *et al.* (1998), quienes destacan que la evolución estructural no depende del contenido de carbono orgánico, sino de fracciones como polisacáridos, lípidos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y enzimas.

Los polisacáridos tienen la capacidad de enlazar a las partículas minerales cuando se trata de formas químicas lineales (Kay, 1998) y la de formar capas semipermeables, cuando la molécula es de naturaleza aromática (Guggenberger y Zech, 1994), con lo que incrementan la estabilidad de las unidades formadas. Aun cuando en el presente estudio no se realizaron análisis para determinar la naturaleza química de los polisacáridos, tomando como base la información anterior, es factible asumir que ambas formas se encontraron presentes en el tepetate, por lo que actuaron sobre la formación de agregados y su estabilidad.

La influencia de los polisacáridos como agentes estabilizadores se manifestó en las unidades de 0.25 a 0.5 mm y en los grandes macroagregados, la estabilidad dependió de los agentes temporales (Martens, 2000; Six *et al.*, 2000). Sin embargo, la correlación positiva entre los polisacáridos y la formación de agregados de 0.25 a 1 mm, así como el efecto parcial de estabilización de los de 2 a 3 mm, implica que estos compuestos poseen mayor capacidad de enlace y recubrimiento en el tepetate, que la reportada para suelo, en la que se únicamente se incluyen medios <0.25 mm (Puget *et al.*, 1999).

Esta ampliación de la escala de acción de los polisacáridos, reviste una gran importancia para el manejo del tepetate, ya que de la roturación de estas capas se obtienen numerosos fragmentos de diámetro superior al considerado como óptimo para la acción de los polisacáridos, tal como se mostró durante la evaluación de los indicadores físicos. De tal manera, que si la acción de estos compuestos es factible en fragmentos > 0.25 mm, se incrementa la posibilidad de formar agregados en el tepetate a partir de una roturación común. Otra

implicación relevante es, que al ser los polisacáridos compuestos de síntesis rápida (comparada con la de los coloides orgánicos), a partir tanto de la rizodepositación, como del estiércol, su efecto sobre la agregación en tepetate, constituye un indicio de que su estructuración puede llevarse a cabo a corto o mediano plazo.

En el caso de los coloides orgánicos, constituyen enlaces permanentes con capacidad de intercambio catiónico y estabilidad, mayores a las que presentan el resto de los componentes orgánicos. Sin embargo, de acuerdo con los estudios de Topp *et al.* (1995), para que su efecto sobre la estructura sea significativo, se requieren períodos largos y condiciones de alteración y síntesis favorables. Reportan un promedio de 4.5 años para el mejoramiento de la estructura de un suelo arcilloso bajo cultivo de forrajes, de 7 a 9 para un franco – arenoso y de 4 a 6 para un franco – limoso, aunque señalan que, con aporte de estiércol de bovino, el tiempo puede reducirse hasta en un 40%. De acuerdo con lo anterior, la limitada síntesis de compuestos coloidales y su acción en la formación de agregados estables en el tepetate, se debió al restringido tiempo de observación considerado.

La influencia de los ácidos húmicos y fúlvicos, en suelo, se asocia a unidades < 0.25 mm de diámetro (Feller *et al.*, 1996; Howard *et al.*, 1998, Aoyama *et al.*, 2000), lo cual fue coincidente en el tepetate roturado, en el que como se describió, influyeron tanto en la formación, como en la estabilidad de los microagregados. Como la estructura del tepetate carece de agregados, este resultado tiene implicaciones primordiales, ya que de una microestructuración estable, depende la formación de una macroestructura eficiente y permanente (Six *et al.*, 2000). De hecho, Puget *et al.* (1999) enfatizan que, específicamente, la fracción > 0.05 mm es la responsable de la estabilidad de los macroagregados. Aunado a lo anterior, en el tepetate, los ácidos húmicos y fúlvicos también influyeron en la fracción de 0.25 a 5.0 mm; su efecto como agentes estabilizantes se manifestó en unidades de hasta 1 mm de diámetro y en la formación de grandes macroagregados (2 a 5 mm). Tamaños totalmente inusuales, de acuerdo

con lo reportado en otros estudios (Jastrow *et al.*, 1998; Martens, 2000), en los que su formación se atribuye únicamente a agentes de unión temporales y transitorios.

Finalmente, a partir de la correlación entre los compuestos orgánicos y la agregación, es posible señalar que la formación de agregados de alta estabilidad, capaces de resistir las fuerzas de impacto y ruptura provocadas por la lluvia, el viento y el laboreo, a partir de fragmentos de tepetate, puede ser factible a mediano plazo. Así mismo, que el carbono total no constituye una base sólida para la evaluación del efecto de la materia orgánica en la agregación de tepetate fragmentado, a diferencia de los polisacáridos, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, cuya evaluación contribuye con información más detallada y útil sobre este tópico.

VII. CONCLUSIONES

- El tepetate presentó valores de pH, C.I.C., bases intercambiables y saturación de bases, potencialmente apropiados para un uso frutícola o pecuario, mismos que no se modificaron por efecto de las plantas y enmiendas.
- La fertilidad química del tepetate aumentó, al incrementarse el contenido de materia orgánica por influencia de las plantas y el estiércol. El mayor aporte fue del pasto Rhodes. El fertilizante acentuó la rizodepositación.
- La formación de agregados estables estuvo determinada por la morfología radical de las plantas y la naturaleza química de los compuestos de rizodepositación, debido a su diferente capacidad de enlace entre partículas.
- La higuera propició la desintegración de los fragmentos >10 mm y la formación de agregados de 2 a 5 mm. El efecto del pasto Rhodes se centró en la formación de agregados <2 mm. La influencia del estiércol se manifestó en el ámbito de la microagregación. La participación del fertilizante fue indirecta.
- Los agregados manifestaron menor estabilidad que los fragmentos de tepetate, debido a la naturaleza orgánica de los enlaces entre partículas. Las plantas incrementaron la estabilidad de la fracción <0,5 mm, por estar constituida de agregados. Las enmiendas no tuvieron efecto en la estabilidad.
- Las plantas aportaron polisacáridos al tepetate y propiciaron la síntesis de ácidos fúlvicos. El estiércol incrementó el carbono total, los polisacáridos y la síntesis de ácidos húmicos.
- La higuera y el estiércol propiciaron mayor síntesis de sustancias húmicas en el tepetate, que el pasto Rhodes, debido a la naturaleza recalcitrante de sus restos.
- La correlación entre el contenido de polisacáridos y sustancias húmicas, con la formación de agregados estables en el tepetate, fue positiva. El carbono total no influyó en el proceso de agregación.
- A excepción de la C.I.C., los indicadores seleccionados, permitieron evaluar la calidad del tepetate y su modificación por influencia de plantas y enmiendas.

VIII. LITERATURA CITADA

- **Acevedo S. O. A.** 1984. Monografía y enraizamiento de estacas de higuera (*Ficus carica* L.) tratadas con AIB en dosis de 100 y 200 ppm en dos tipos de estaca: basal y apical. Tesis Ingeniero Agrícola. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, U.N.A.M. Cuautitlán Izcalli, Estado de México. 139 p.
- **Acevedo S. O. A. y Flores R. D.** 2000. Genesis of white fragipans of volcanic origin. *Revista Mexicana de ciencias Geológicas* 17(2): 152 - 162.
- **Acevedo S. O. A., Cruz S. M. y Cruz Ch. E.** 2002. Distribución de óxidos de Fe, Al y Si en horizontes endurecidos de origen volcánico. Aceptado para su publicación en la *Revista Agrociencia* 36(4).
- **Acevedo S. O. A., Velázquez R. A. S. y Flores R. D.** 2001. Agregación por especies vegetales y abonos orgánicos en tepetates fracturados bajo condiciones de invernadero. *Terra* 19 (4): 363 - 373.
- **Alvarez C. R., Grigera M. S. and Lavado R.S.** 1998. Associations and the active soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 30(6): 767 - 773.
- **Aoyama M., Angers D. A., N'Dayegamiye A. N. and Bissonnette N.** 2000. Metabolism of ¹³C-Labeled glucose in aggregates from soils with manure application. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 295 - 300.
- **Arias R. H. M. y García T. G.** 1992. Evaluación de la reforestación sobre tepetates en la zona oriente de la cuenca de México. *Terra* 10 (Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 430 - 436.
- **Arshad M. A., Lowery B. and Grossman B.** 1996. Physical test for monitoring soil quality. *In:* J. W. Doran and A. J. Jones (Eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, U. S. A. p. 123 - 142.
- **Badalucco L. and Kuikman P. J.** 2001. Mineralization and immobilization in the Rhizosphere. *In:* R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). *The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil - plant interface*. Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 159 - 196.
- **Bathke G. R., Cassel D. K., Eargrove W. L. and Porter P. M.** 1992. Modification of soil physical properties and growth response. *Soil Science* 154: 316 - 329.
- **Baumann J. y Werner G.** 1997. Erodability of volcanic ash soils in the central mexican highlands. *In:* C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.) *Suelos volcánicos endurecidos*. Quito, Ecuador. p. 343 - 350.
- **Bohn H. L., Mc Neal B. L. y O' Connor G. A.** 1993. *Química del suelo*. Limusa. México, D.F. 370 p.

- **Bogdan A. V.** 1977. Tropical pasture and fodder plants (grasses and legumes). Longman. London, U. K. 475 p.
- **Botner P., Pansu M. And Sallih Z.** 1999. Modelling the effect of active roots on soil organic matter turnover. *Plant and Soil* 216:15 - 25.
- **Brimecombe M. J., De Leij F. A. and Lynch J. M.** 2001. The effect of root exudates on rhizosphere microbial populations. *In:* R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil – plant interface. Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 95 - 140.
- **Christopher T. B. S.** 1996. Humic substances. http://agri.upm.edu.my/ist/resources/as/om_fractions.htm
- **Crowley D.** 2001. Function of siderophores in the plant rhizosphere. *In:* R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil – plant interface. Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 223 - 261.
- **De León F. y Guérif J.** 1993. Relación entre características morfológicas y propiedades mecánicas de terrones y cilindros compactados. *Terra* 11(1): 18 - 32.
- **Dinel H., Mehuyus G. R. and Lévesque M.** 1991. Influence of humic and fibrics materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty clay. *Soil Science* 151: 146 - 158.
- **Dinel H., Monreal C. M. and Bergstrom D.** 1998. Assessing soil structural stability. *In:* C. M. Monreal. Development of standard methodologies: bio-indicators and methodologies to quantify soil quality. COESA Report No. RES/MON-003/97, Canadá.
- **Domínguez V. A.** 1997. Tratado de fertilización. Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 181 - 199.
- **Doran W. J. and Zeiss R. M.** 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3 - 11.
- **Dorioz J. M., Robert M. and Chenu C.** 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma* 56:179 - 194.
- **Dubroeuq D., Quantin P. y Zebrowski C.** 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra* 7(1): 3 - 12.
- **Etchevers B. J. D.** 1999. Indicadores de la calidad del suelo. *In:* C. Siebe, H. C. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y K. Oleschko (Eds.). Conservación y restauración de suelos. Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 654 p.
- **Etchevers B. J. D., Pérez M. A. y Navarro G. H.** 1997. Dinámica de la materia orgánica y el N en tepetates habilitados para producción agrícola. *In:* C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.). Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 213 - 224.

- **Etchevers B. J. D., Cruz H. L., Mares J. A. y Zebrowski C.** 1992. Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). *Terra* 10 (Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 379 - 383.
- **Food Agriculture Organization (FAO).** 2000. En: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/DATA/Pf000199.htm>
- **Fassbender H. W.** 1994. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 420 p.
- **Fechter E. U., Vera A. y Werner G.** 1997. Erosión hídrica en un suelo volcánico endurecido (tepetate t₃) en el bloque de Taxcala, México. *In:* C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.) Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 351-358.
- **Feller C., Albrecht A. and Tessier D.** 1996. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. *In:* M. R. Carter and B. A. Stewart (Eds.) Structure and organic matter storage in agricultural soils. Lewis Publishers. New York, U. S. A. p. 310 - 359.
- **Ferrera C. R., Ortiz A., Delgadillo J. y Santamaria S.** 1997. Uso de la materia orgánica en la recuperación de tepetates y su influencia en los microorganismos. *In:* C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.) Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 225 - 237.
- **Flach K. W., Nettleton W. D., Gile L. H. and Cady J. G.** 1969. Pedocementation: induration by silica, carbonates and sesquioxides in the Cuaternary. *Soil Science* 107(6): 442 - 453.
- **Flach K. W., Nettleton W. D. and Chadwick O. A.** 1992. The criteria of duripans in the U.S. soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra* 10 (Núm. especial Suelos Volcánicos Endurecidos): 34 - 35.
- **Flores R. D., Alcalá M. J. R., González V. A. and Gama C. J. E.** 1992 (1993). Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo - el caso del noreste del estado de Morelos, México. *Revista del Instituto de Geología, U.N.A.M.* 10(2): 151 - 163.
- **Flores R. D., Alcalá M. J. R., González V. A. and Gama C. J. E.** 1996 (1997). Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the trans-Mexico volcanic belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13(2): 228 - 239.
- **García E.** 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 246 p.
- **García C. A., Velázquez R. A. S. y Flores R. D.** 2000. Agregación en tepetate por influencia de especies vegetales, abono y fertilizante. *In:* R. Quintero L., T. Reyna T., L. Corlay C., A. Ibáñez H. y N. E. García (Eds.). La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I Colegio de Posgraduados, Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México, México. p. 186 - 190.
- **García C. and Hernández. T.** 1997. Biological and biochemical indicators in derelict soil subject to erosion. *Soil Biology and Biochemistry* 29(2): 171 - 177.

- **Gijsman A. J., Alarcon H. F. and Thomas R. J.** 1997. Root decomposition in tropical grasses and legumen, as affected by soil texture and season. *Soil Biology and Biochemistry* 29(9/10): 1443 - 1450.
- **Gregorich E. G., Angers D. A., Campbell C. A., Carter M. R., Drury C. F., Ellert B. H., Groenevelt P. H., Holmstrom D. A., Monreal C. M., Rees H. W., Voroney R. P. and Vyn T. J.** 1995. Changes in soil organic matter. *In: D. F. Acton and L. J. Gregorich (Eds.) The health of our soils. Toward sustainable agriculture in Canadá. Publication 1906/E. Canadá. p. 41- 50.*
- **Guggenberger G. and Zech W.** 1994. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin - degradation products in two coniferous forest, N. E. Bavaria, Germany. *Soil Biology and Biochemistry* 26(1): 19 - 27.
- **Gupta V. S. R. and Germida J. J.** 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 20: 777 - 786.
- **Hair J. F., Anderson R. E., Tatham R. L. and Black W. C.** 1999. Análisis multivariante. Prentice Hall, Madrid, España. 799 p.
- **Hayes H. B. M. and Tapp H.** 1994. Interactions of humic substances and polysacharides with soil mineral components. *Transaction 15th World Congress of Soil Science* 3A:14.
- **Haynes R. J.** 1999. Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term grass-based leys. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 1821 - 1830.
- **Haynes R. J.** 2000. Labile organic matter as an indicator for organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zeland. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 211 - 219.
- **Haynes R. J. and Beare M. H.** 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry* 29 (11/12): 1647 - 1653.
- **Hernández X. E.** 1987. Etnobotánica de Tlaxcala. *In: F. J. Ruiz F. (Ed.) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México, México. p. 1 - 17.*
- **Herrera R. S. M.** 1999. Efecto de especies frutales y abono orgánico en la agregación de un tepetate fracturado durante seis meses en condiciones de invernadero. Tesis Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 75 p.
- **Herrick J. E.** 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology* 15: 75 - 83.
- **Hidalgo C., Quantín P. y Elsass F.** 1997. Caracterización mineralógica de los tepetates tipo fragipán del valle de México. *In: C. Zebrowski, P. Quantín y G. Trujillo (Eds.) Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 65 - 72.*
- **Hillel D.** 1982. Introduction to soil physics. Academic Press, Inc. New York, U.S.A. 364 p.

- **Hogh-J. H. and Schjoerring J. K.** 2001. Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 439 - 448.
- **Howard P. J. A., Howard D. M. and Lowe L. E.** 1998. Effects of tree species and physico-chemical conditions on the nature of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 30(3): 285 - 297.
- **Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).** 1998. Génesis, identificación y uso de los suelos de México: distribución, propiedades y manejo de suelos residuales y transportados con aplicaciones a la ingeniería civil. Documento Técnico No. 19. IMT - SCT. Sanfandila, Qro. México. 221 p.
- **Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).** 2000. Anuario estadístico del estado de Morelos. INEGI - Gobierno del estado de Morelos. Aguascalientes, México. 426 p.
- **Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS).** 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Potash and Phosphate Institute (Ed.) Querétaro, México. 127 p.
- **Jackson M. L.** 1970. Análisis químico de suelos. Omega. Barcelona, España. 662 p.
- **Janeau J. L., Jerome G. y Miranda M. M. E.** 1992. Evolución estructural de la superficie de los suelos con tepetate. *Terra* 10 (Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 374 - 378.
- **Jastrow J. D., Miller R. M. and Lussenhop J.** 1998. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry* 30(7): 905 - 916.
- **Karimian N. and Razmi K.** 1990. Influence of perennial plants on chemical properties of arid calcareous soils in Iran. *Soil Science* 150: 717 - 721.
- **Karlen D. L., Mausbach M.J., Doran J. W., Cline R. G., Harris R. F. and Shuman G. E.** 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4 - 10.
- **Kaurichev I. S., Panov N. P., Stratonovich M. V. y Grechin I. P.** 1984. Prácticas de edafología. Mir. Moscú. 276 p.
- **Kay B. D.** 1998. Soil structure and organic carbon: a review. *In:* R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet and B. A. Stewart. *Soil processes and the carbon cycle.* CRC Press. New York, USA. 609 p.
- **Kittrick J. A.** 1969. Soils minerals in the $Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ system and the theory of their formation. *Clays and Clay Minerals* 17: 157 - 166.
- **Klufe A.** 1998. Methods of soils analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Book Series: 5. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1188 p.
- **Labrador M. J.** 1998. La materia orgánica en los agrosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Mundi - Prensa (Eds.). Madrid, España. 174 p.

- **Lauffer M., Leroux Y., Prat C. y Janeau J. L.** 1997. Organización superficial de los tepetates cultivados. In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.). Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 443 - 456.
- **Macías J. L., Carrasco G. y C. Siebe.** 1995. Zonificación de peligros volcánicos del Popocatepetl. In: Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres - Universidad Nacional Autónoma de México (Eds.) Volcán Popocatepetl estudios realizados durante la crisis de 1994 - 1995. Capítulo III. México, D. F. p. 79 - 92.
- **Marañón G. G.** 1994. Caracterización de suelos con tepetate y su relación con la vegetación en el municipio de Tetela del Volcán, estado de Morelos. Tesis Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 90 p.
- **Mariens D. A.** 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 361 - 369.
- **Martínez M.** 1979. Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 849 p.
- **Martínez T. M., Oleschko K. y Arias R. H.** 1991. Estimación del estado óptimo del tepetate en el proceso de su recuperación. In: Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. Colegio de Posgraduados. Estado de México, México. p. 56.
- **McCarthy D. A., Sfinner B. R. and Bohlen P. J.** 1997. Organic matter dynamics in maize agroecosystems as affected by earthworm manipulations and fertility source. *Soil: Biology and Biochemistry* 29(3/4): 397 - 400.
- **Méndez R. I., Posadas A., Mundo E. y Marín S.** 1994. Análisis de experimentos con observaciones repetidas. Un ejemplo farmacológico. Monografías del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS). Volumen 4 Número 13. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 21 p.
- **Navarro G. H.** 1998. Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos. In: H. Navarro, H. Poupon y M. A. Pérez (Eds.). Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (Tepetates). Estado de México, México. p. 37 - 60.
- **Navarro G. H. y Zebrowski C.** 1992. Análisis agronómico comparativo en tepetate. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 450 - 459.
- **Neumann G. and Römheld V.** 2001. The release root exudates as affected by the plant's physiological status. In: R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil - plant interface. Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 41-94.
- **Oades J. M.** 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377 - 400.

- **Oleschko L. K.** 1995. Prácticas de física de suelos. Apuntes. Colegio de Postgraduados, Estado de México, México. 110 p.
- **Oleschko L. K., Zebrowski C., Quantin P., Fedoroff N., Osoreo E.** 1994. Hardened volcanic soils (tepetate) in Mexico: their geological, pedological or anthropological origin. *In: Transactions of the 15 th World Congress of Soil Science. Vol. 6ª. Acapulco, México. p. 229 - 249.*
- **(ORSTOM).** 1997. Orientación y problemática del programa "regeneración y conservación de suelos volcánicos endurecidos y estériles de América Latina: Chile, Ecuador y México. Informe técnico. Comisión Europea/ORSTOM. Contrato No. ERB.TS3*CT930252.
- **Perfect E. and Kay B. D.** 1990. Relations between aggregate stability and organic components for a silt loam soil. *Canadian Journal of Soil Science 70(4): 731 - 735.*
- **Prat C., Báez A. y Márquez A.** 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t_3 en Texcoco, México. *In: C. Zebrowski, P. Quantin y G. Trujillo (Eds.) Suelos volcánicos endurecidos. Quito, Ecuador. p. 3371 - 383.*
- **Primavesi A.** 1982. Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales. El Ateneo. Buenos Aires, Argentina. p. 183 - 227.
- **Puget P., Angers D. A. and Chenu C.** 1999. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soil. *Soil Biology and Biochemistry 31: 55 - 63.*
- **Quantin P.** 1998. Orientación y problemática científica para la regeneración y conservación de suelos volcánicos endurecidos y estériles. *In: H. Navarro, H. Poupon y M. A. Pérez (Eds.) Aptitud productiva en suelos volcánicos endurecidos (Tepetates). ORSTOM - C. P. Estado de México, México. p. 7 - 16.*
- **Quantin P., Prat C. Y Zebrowski C.** 1998. Soil restoration and conservation: The tepetates-indurated volcanic soils- in Mexico. *In: D. Harper and T. Brown (Eds.). The sustainable management of tropical catchments. John Wiley and Sons Ltd. New York, U.S.A. p. 109 - 119.*
- **Quantin P., Arias A., Etchevers B. J. D., Ferrera C. R., Oleschko L. K., Navarro H., Werner, G. y Zebrowski, Z.** 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura (Informe final del proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM). *Terra 11 p. 3 - 69.*
- **Quantin P., Zebrowski C. And Hidalgo C.** 1992. El material original de los tepetates t_2 y t_3 de la región de Texcoco (México): loess o cineritas?. *Terra 10 (Número Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 178 - 182.*
- **Romera P. M. P. y Guerrero L.** 2002. Agricultura ecológica. <http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura-ecologica> ó <http://www.infoagro.com>
- **Russell E. W.** 1988. Soil conditions and plant growth. British Library Cataloguing in Publication Data. Logman Scientific and Technical. London, England. p. 115 - 137.
- **Sánchez G. M. G., Duccoing W. A. M., Méndez R. I. y Gutiérrez O. C.** 2001. El análisis de varianza multivariado para observaciones repetidas en un estudio sobre los niveles de selenio en

- ovinos. Monografías del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS). Volumen 10 Número 24. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 42 p.
- **Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)**. 2000. Catálogo de normas oficiales mexicanas. *In*: Diario Oficial de la Federación. 17 de octubre de 2000. Primera Sección. p. 1 – 77.
 - **Servenay A. and Prat C.** 2000. Clasificación from landsat TM of indurated volcanic materials (tepetates) of the mexican neovolcanic belt. *Geocarto Internacional* 15(1): 55 - 62.
 - **Seybold C. A., Mausbach M. J., Karlen D. L. and Rogers H. H.** 1998. Quantification of soil quality. *In*: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follet and B. A. Stewart. Soil processes and the carbon cycle. CRC Press. New York, U.S.A. 609 p.
 - **Shoji S., Nanzyo M. and Dahlgren R. A.** 1993. Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization. Elsevier. The Netherlands. 288 p.
 - **Sikora S. L. and Stoff D.** 1996. Soil organic carbon and nitrogen. *In*: J. W. Doran and A. J. Jones (Eds.), Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, U.S.A. p. 157 - 168.
 - **Simpson K.** 1991. Fertilizers and manures. John Wiley and Sons. New York, U.S.A. p. 110 - 135.
 - **Sims T.** 2000. Soil fertility evaluation. *In*: M. E. Sumner (Ed.), Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, U.S.A. p. D113 – D151.
 - **Singer M. J., Southard R. J., Warrington D. N. and Janitzky P.** 1992. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. *Soil Science Society American Journal* 56: 1843 - 1848.
 - **Six J., Elliot E. T. and Paustian K.** 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099 - 2103.
 - **Soil Science Society of America (SSSA)**. 2001. Glossary of soil science terms. http://www.soils.org/cgibin/gloss_search.cgi?QUERY=cation+exchange+capacity&SOURCE=1
 - **Sparks D. L.** 1996. Methods of soils analysis. Part 3. Chemical methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Book Series: 5. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1390 p.
 - **Springett J. and Gray R.** 1997. The interaction between plant roots and earthworm burrows in pasture. *Soil Biology and Biochemistry* 29 (3/4): 621 - 625.
 - **Stevenson F. J.** 1982. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. John Wiley and Sons, Inc. New York, U.S.A. 443 p.
 - **Thamane R. V., Motiramani D. P., Bali P. B. y Donahue R. L.** 1986. Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Diana. México, D. F. 483 p.
 - **Thiry M. and Millot G.** 1987. Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcretes. *Journal Sedimentary Petrology* 57(2): 343 - 352.

- **Tisdall J. M.** 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil* 159: 115 - 121.
- **Tisdall J. M. and Oades J. M.** 1982. Organic matter and water - stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141 - 163.
- **Topp G. C., Wires K. C., Angers D. A., Carter M. R., Cuijley J. L. B., Holmstrom D. A., Kay B. D., Lafond G. P., Langille D. R., McBride R. A., Patterson G. T., Perfect E., Rasiah V., Rodd A. V. and Webb K. T.** 1995. Changes in soil structure. *In: D. F. Acton and L. J. Gregorich (Eds.) The health of our soils. Toward sustainable agriculture in Canada. Publication 1906/E. Canadá.* p. 51 - 60.
- **Troeh F. R. and Thompson L. M.** 1993. *Soils and soil fertility.* Oxford University Press. USA. p. 129 - 170.
- **Trinidad S. A.** 1999. El papel de los abonos orgánicos en la productividad de los suelos *In: Simposium Internacional y Primera Reunión Nacional de Lombricultura y abonos orgánicos.* Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México, México. p. 3 - 16.
- **Uren N. C.** 2001. Types, amounts and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil - grown plants. *In: R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil - plant interface.* Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 19 - 40.
- **Utomo W. H. and Dexter A. R.** 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Science* 33: 623 - 637.
- **Varanini Z. and Pinton R.** 2001. Direct versus indirect effects of soil humic substances on plant growth and nutrition. *In: R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri (Eds.). The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil - plant interface.* Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. p. 141 - 158.
- **Vázquez C., Batiz M., Alcocer A., Gual D. y Sánchez D.** 2000. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Proyecto J-084-CONABIO: <http://www.conabio.gob.mx/arboles/pdf/especies/50-morac5m.pdf>
- **Velázquez R. A. S., Flores R. D. y Acevedo S. O. A.** 2001. Formación de agregados en tepetate por influencia de especies vegetales. *Agrociencia* 35(3): 311 - 320.
- **Velde B.** 1995. *Origin and mineralogy of clays. Clays and the environment.* Springer. Verlag, Berlin, Germany.
- **Wang C., Gregorich L. J., Rees H. W., Walker B. D. Holmstrom D. A., Kenney E. A., King D. J., Kozak L. M., Michalyna W., Nolin M. C., Webb K. T. and Woodrow E. F.** 1995. Benchmark sites for monitoring agricultural soils quality. *In: D. F. Acton and L. J. Gregorich (Eds.) The health of our soils. Toward sustainable agriculture in Canadá. Publication 1906/E. Canadá.* p. 31 - 40.

- **Webster E. A., Chudek J. A. and Hopkins D. W.** 2000. Carbon transformations during decomposition of different components of plant leaves in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 301 - 314.
- **Werner G.** 1992. Suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en el estado de Tlaxcala: distribución, rehabilitación, manejo y conservación. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 318 - 331.
- **Wild A.** 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi - Prensa. Madrid, España. 1045 p.
- **World Reference Base for Soil Resources (WRB).** 1999. Report No. 84. FAO - ISRIC - IUSS - UISS - IBU.
- **Wu L., Vomocil J. A. and Childs S. W.** 1990. Pore size and water retention. *Soil Sci. Am. J.* 54: 952 - 956.
- **Zebrowski C.** 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. *Terra* 10 (Núm. Especial: Suelos Volcánicos Endurecidos): 15 - 23.

APÉNDICES

APENDICE 1

**ESPECIES VEGETALES, ABONO Y FERTILIZANTE
JUSTIFICACION**

ESPECIES VEGETALES

Las especies vegetales se seleccionaron tomando en cuenta tanto los resultados de estudios previos, como la cultura y aptitud agrícola de la zona de estudio, que es principalmente frutícola y, en la que gran parte de la vegetación original ha sido sustituida por frutales y cultivos de ciclo corto, favoreciéndose con ello la pérdida del suelo y la exposición del tepetate.

La higuera (*Ficus carica* L.), es originaria de Asia Sudoccidental y se desarrolla en altitudes de 900 a 1800 m. En México requiere de una temperatura media de 17 a 19°C y una precipitación de 900 a 1200 mm. Es muy tolerante a la sequía; el pH óptimo para su desarrollo es de 8.0 a 8.5; crece tanto en suelos fértiles, como pobres o degradados; la producción de frutos está influenciada por el contenido de calcio; es tolerante a las sales y cloruros. Perteneció a la familia *Moraceae*, es un árbol caducifolio o perennifolio de 5 a 10 m de altura, con un diámetro del tallo de hasta 18 cm; el sistema radical es fibroso, de desarrollo superficial y extendido, el 80% se encuentra en los primeros 20-45 cm; la copa es gruesa redondeada; las hojas son simples, alternas, rugoso-pubescentes y palmadas, con 3 a 7 lóbulos, irregularmente dentadas, de 10 a 20 cm de longitud; el tronco posee de 12 a 30 ramas glabras, extendidas o ascendentes; se ramifica a poca altura del suelo; la corteza es lisa, de color grisáceo, con células laticíferas. Consta de inflorescencias en las que la flor femenina, de 5 pétalos y un solo carpelo, se localiza en el fondo y la masculina, de 3 sépalos y 3 estambres, en la entrada; el fruto es un sícono (infrutescencia) blando, ovoide, carnoso, con numerosos aquenios, de color azulado, verde, negro o morado, mide de 3 a 10 cm de largo y tiene sabor dulce (Martínez, 1979; Vázquez *et al.*, 2000).

La importancia del cultivo de higuera radica en la comercialización del fruto. Sin embargo, se utiliza en programas de reforestación, por su capacidad de recrear entornos deteriorados y mejorar el suelo. Controla la erosión y estabiliza la estructura, mediante el desarrollo de su sistema radical y la cantidad de materia orgánica que aporta. Su rusticidad, fácil establecimiento en condiciones adversas y rápida multiplicación, hacen de esta planta, un frutal apropiado para la rehabilitación de zonas degradadas (Vázquez *et al.*, 2000). En capas endurecidas de origen volcánico, ha demostrado una importante influencia sobre la estructuración (Herrera, 1999).

El pasto Rhodes (*Chloris gayana* Kunth) es una gramínea usada en la rotación de cultivos en áreas tropicales y subtropicales, debido a su capacidad de establecimiento en condiciones climáticas y edáficas diversas. Es un pasto perenne, originario de África, en donde se encuentra en forma silvestre en altitudes de 660 a 2160 m. Prospera en un amplio gradiente de temperaturas, siendo la óptima de 30°C. Es resistente a la sequía, crece con una precipitación mínima de 600 mm y soporta períodos de inundación mayores a 15 días. Tolera condiciones edáficas variables, excepto un pH menor a 4.5 y mayor de 8.4; es tolerante al sodio, al litio y sensible al magnesio. Perteneció a la familia *Poaceae*. Posee una raíz fascicular modificada, estolones con tallos rectos o geniculadamente ascendentes y entrenudos comprimidos. Las hojas son glabras, de 15 a 50 cm de largo y de 2 a 20 mm de ancho. La panícula es digitada o subdigitada; las espiguillas forman racimos de 4 a 15 cm de largo; la lema es hispida en el margen; las espiguillas presentan de 3 a 4 flores. Las flores secundarias son cortas con una pequeña arista masculina; la floración se da 15 días después de la emergencia de la panícula. El fruto es un cariósipide de 2 mm de longitud (Bogdan, 1977, FAO, 2000).

Se cultiva por su producción de semilla, fácil establecimiento, hábitos de crecimiento y porque no es susceptible al ataque de patógenos. Su vida productiva es de 3 años, pero puede durar hasta 5. Al igual que otros pastos, el Rhodes ha sido usado para evitar la erosión, debido a sus fuertes rizomas y a que la parte aérea actúa como barrera en la erosión eólica. Constituye una fuente de alimento para el ganado, debido a su digestibilidad (40-60%) y palatabilidad. Mejora la estructura del suelo y, en capas endurecidas incrementó significativamente el contenido de materia orgánica y favoreció la formación de agregados estables (Acevedo *et al.*, 2001; Velázquez *et al.*, 2001).

Las plantas de pasto Rhodes se obtuvieron de almácigo, a partir de semillas compradas en una casa comercial. Las de higuera, de dos años de edad, fueron donadas por el vivero Nezahualcoyotl, perteneciente a la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural del Gobierno del Distrito Federal (CORENADER).

ABONO

Estudios realizados con tepetates, han mostrado la importancia de adicionar materia orgánica durante la habilitación, con la finalidad de aportar nutrimentos a las plantas, incrementar la actividad biológica y favorecer los procesos relacionados con la estructuración. En el estudio realizado por Acevedo *et al.* (2001), se comparó el efecto de gallinaza y estiércol de bovino sobre la estructuración de tepetate fragmentado y, aunque los resultados se inclinaron favorablemente hacia la primera, las diferencias con respecto al estiércol, no fueron significativas. Con base en esto y, considerando que el estiércol de bovino constituye un subproducto que se obtiene con cierta facilidad y a bajo costo en la zona de estudio, se eligió éste como fuente de materia orgánica para la presente investigación. La dosis se seleccionó de acuerdo con el contenido nutrimental del estiércol, los requerimientos de las especies vegetales consideradas, las deficiencias del tepetate y las cantidades normalmente empleadas por los campesinos como enmienda.

El estiércol de bovino es uno de los más empleados en México. Tiene un contenido aproximado de NPK de 5.0-7.0, 2.5-3.5 y 4.5-7.0 kg/t, respectivamente, además de Ca, Mg, S, Mn, Zn, B, Cu, Co y Mo, en cantidades más que suficientes para el desarrollo de especies vegetales. Las cantidades reales pueden variar y no están disponibles en su totalidad después de su aplicación, sino que se liberan paulatinamente (Labrador, 1998). Durante el primer año se libera aproximadamente la sexta parte de los nutrimentos y el resto a lo largo de los siguientes cinco años, lo que garantiza, además, que los elementos móviles como el N no sean lavados fácilmente, sino que permanecen en el suelo a disposición de las especies vegetales (Domínguez, 1997).

FERTILIZANTE

Los fertilizantes y sus dosis, se seleccionaron con conocimiento de que la principal deficiencia nutrimental del tepetate la constituyen el nitrógeno y el fósforo. Se analizaron, también, estudios sobre fertilización inorgánica para higuera y pastos en México. Con base en ello, se utilizó sulfato de amonio, cloruro de potasio y superfosfato de calcio simple como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

El sulfato de amonio, $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$, es un fertilizante nitrogenado simple, de liberación rápida y altamente soluble en agua. Contiene 21% de N amoniacal y 24% de S. Por la forma en que se encuentra el N, participa directamente en los procesos bioquímicos del sistema suelo y, por su alto contenido de S da una reacción ácida. Tiene una reacción positiva con micronutrimentos como Fe, Zn, Mn y Cu. Aun cuando acidifica el suelo, su uso es muy importante debido a que el N no se lava fácilmente (Domínguez, 1997). El superfosfato de calcio simple, contiene de 18 a 21% de P_2O_5 , es una mezcla de fosfato monocálcico y yeso. Aporta, además del fósforo, nutrimentos como S, Ca, Mg, Na, Si y Mn, así como compuestos que mejoran la estructura, tales como fosfato cálcico y yeso. Es de acción inmediata y su acción sobre el suelo puede ser ligeramente acidificante, dependiendo de la cantidad de impurezas u otros elementos presentes. El cloruro de potasio, KCl, es totalmente hidrosoluble y contiene 60% de K_2O . Influye muy poco en el pH del suelo debido a que es neutro. Puede aportar algunos otros nutrimentos como Cl, Na y Mg (Simpson, 1991).

APENDICE 2

**ANALISIS ESTADISTICO DE LOS INDICADORES QUIMICOS
DATOS DEL ENSAYO EN CAMPO**

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL DISEÑO Y ANALISIS ESTADISTICO

El diseño experimental utilizado para los indicadores químicos, correspondió a un factorial con tres factores: especies vegetales, enmiendas y tiempo, con distribución de los tratamientos en bloques al azar y ocho repeticiones. El análisis de los resultados se llevó a cabo considerando un experimento factorial con observaciones repetidas.

De acuerdo con Hair *et al.* (1999), Méndez *et al.* (1994) y Sánchez *et al.* (2001), El objetivo del análisis de datos mediante observaciones repetidas es examinar y comparar tendencias de la variable de respuesta sobre el tiempo, lo que puede involucrar comparaciones de tratamientos a tiempos específicos o promediar sobre el tiempo, o bien, comparaciones del tiempo dentro de un tratamiento. La ventaja de este diseño es que permite obtener más información de cada sujeto, por lo tanto, se requiere de un menor número de sujetos en el estudio.

Para este tipo de análisis, se necesitan métodos estadísticos especiales, ya que los de regresión y varianza requieren suposiciones estadísticas que no se cumplen con datos de mediciones repetidas, como por ejemplo, la de esfericidad u homogeneidad de varianzas. Aunque existen algunos procedimientos para ajustar los grados de libertad y adaptar los datos a dicho supuesto, resulta más adecuado considerar un enfoque multivariado, ya que éste no requiere de la suposición de esfericidad y es más potente.

El análisis de varianza multivariado (MANOVA), permite examinar y comparar tendencias de la variable de interés sobre el tiempo, lo que involucra comparaciones de tratamientos a tiempos específicos (promediar sobre el tiempo) o comparaciones del tiempo dentro de un tratamiento. Por lo tanto, al aplicarse al análisis de observaciones repetidas, se hace en dos partes:

- Se prueba el efecto de los factores entre sujetos (cepas), tanto los principales, como las interacciones.
- Se prueba el efecto dentro de sujetos, es decir, el efecto del tiempo y su interacción con los factores entre sujetos, para cada sujeto.

Para llevar a cabo las pruebas entre y dentro de sujetos, se forman nuevas variables. En el primer caso, una que es el promedio de las respuestas de cada sujeto a través del tiempo (T) y cuyo análisis se lleva a cabo con un enfoque univariado, puesto que sólo hay una variable de respuesta para cada sujeto (cepa), la que se usa para probar todos los efectos. Para probar los efectos dentro de sujetos, es decir, la tendencia a través del tiempo o comparaciones entre tiempos, las nuevas variables son combinaciones lineales de la respuesta de cada sujeto a los diferentes tiempos y representan las comparaciones específicas que se desean probar, en este caso, diferencias entre las respuestas a puntos consecutivos en el tiempo, lo que corresponde al cambio de T0 a T1, T0 a T2, T0 a T3 y T0 a T4; de tal manera que, dependiendo del número de mediciones en el tiempo, se tiene más de una variable y por lo tanto, el análisis es multivariado.

Finalmente, cuando se comprueba la existencia de interacciones entre los diferentes factores o entre los factores y el tiempo, el análisis de los casos se realiza mediante contrastes específicos entre los elementos del factor de interés, lo que permite conocer la causa de dicha interacción. Con la precaución de ser más estrictos en los niveles de significancia, los contrastes se hacen en dos partes: entre sujetos y dentro de sujetos. En ambos casos, se reporta el valor de probabilidad resultado de las pruebas de F.

Tabla A. Promedios generales para el factor tiempo.

VARIABLE	TIEMPO (meses)				
	0	6	12	18	24
pH (H ₂ O)	6.5	6.6	6.7	6.7	6.7
pH (KCl)	5.23	5.29	5.27	5.28	5.31
M.O.	0.64	1.19	1.36	1.21	1.26
Carbono	0.37	0.69	0.78	0.70	0.73
C.I.C.	20.50	18.59	21.06	17.29	16.14
Calcio	7.65	9.23	8.47	8.32	6.77
Magnesio	5.54	5.20	3.65	3.42	3.66
Sodio	0.84	1.43	0.76	0.58	0.59
Potasio	1.23	1.63	1.19	1.05	0.84
S.Bases	74.85	95.19	67.33	78.50	74.61

Tabla B. Promedios generales para el factor especies vegetales.

VARIABLE	ESPECIE*	TIEMPO (meses)				
		0	6	12	18	24
pH (H ₂ O)	No	6.48	6.46	6.62	6.61	6.67
	H	6.53	6.61	6.66	6.71	6.75
	P	6.51	6.67	6.68	6.64	6.66
pH (KCl)	No	5.23	5.23	5.25	5.24	5.28
	H	5.25	5.34	5.27	5.31	5.31
	P	5.22	5.31	5.30	5.29	5.33
M. O.	No	0.64	1.23	1.28	1.22	1.29
	H	0.60	1.18	1.32	1.03	1.12
	P	0.68	1.16	1.47	1.39	1.36
Carbono	No	0.37	0.71	0.74	0.71	0.75
	H	0.34	0.69	0.76	0.60	0.65
	P	0.39	0.67	0.84	0.80	0.79
C.I.C.	No	20.21	18.10	20.85	17.33	16.31
	H	21.53	18.54	20.81	17.06	16.13
	P	19.75	19.12	21.52	17.48	15.99
Calcio	No	7.63	8.74	8.95	8.08	6.55
	H	8.09	9.12	8.36	8.68	6.87
	P	7.24	9.83	8.10	8.20	6.90
Magnesio	No	5.31	5.42	3.65	3.10	3.61
	H	5.98	5.08	3.70	3.58	3.34
	P	5.33	5.09	3.61	3.56	4.03
Sodio	No	0.86	1.34	0.77	0.53	0.58
	H	0.90	1.43	0.83	0.64	0.55
	P	0.77	1.54	0.69	0.57	0.64
Potasio	No	1.14	1.61	1.26	1.08	0.88
	H	1.28	1.72	1.13	1.10	0.82
	P	1.26	1.55	1.17	0.97	0.84
S. Bases	No	74.48	95.55	70.47	74.81	72.71
	H	75.97	94.81	68.35	83.33	72.68
	P	74.09	95.20	63.18	77.34	78.46

*Especie: No: sin planta; H: higuera; P: pasto Rhodes

Tabla C. Promedios generales para el factor enmienda.

VARIABLE	ENMIENDA*	TIEMPO (Meses)				
		0	6	12	18	24
pH (H ₂ O)	No	6.43	6.58	6.69	6.63	6.67
	F	6.50	6.51	6.62	6.61	6.65
	E	6.60	6.65	6.70	6.74	6.72
	EF	6.49	6.57	6.61	6.64	6.73
pH (KCl)	No	5.17	5.20	5.26	5.24	5.28
	F	5.23	5.22	5.21	5.21	5.25
	E	5.32	5.39	5.32	5.35	5.39
	EF	5.22	5.35	5.30	5.31	5.30
M. O.	No	0.72	1.08	1.15	1.19	1.20
	F	0.54	1.01	1.14	1.08	1.17
	E	0.61	1.37	1.55	1.23	1.39
	EF	0.69	1.29	1.59	1.35	1.26
Carbono	No	0.41	0.63	0.65	0.69	0.70
	F	0.30	0.59	0.66	0.63	0.68
	E	0.35	0.79	0.90	0.71	0.80
	EF	0.39	0.75	0.92	0.78	0.73
C.I.C.	No	20.03	18.10	21.18	17.64	16.11
	F	20.23	18.32	19.89	16.96	16.72
	E	21.73	19.26	21.55	17.19	15.38
	EF	20.00	18.65	21.62	17.37	16.36
Calcio	No	7.59	9.31	7.92	8.52	7.00
	F	7.68	9.04	8.12	8.43	6.80
	E	7.54	9.37	8.89	8.27	6.52
	EF	7.79	9.20	8.96	8.06	6.78
Magnesio	No	5.68	4.44	3.95	3.12	3.62
	F	5.18	4.85	3.24	3.23	3.59
	E	5.78	5.30	3.61	3.59	3.77
	EF	5.52	6.19	3.80	3.73	3.67
Sodio	No	0.84	1.46	0.84	0.59	0.64
	F	0.86	1.39	0.76	0.56	0.58
	E	0.80	1.42	0.71	0.64	0.60
	EF	0.88	1.47	0.74	0.53	0.55
Potasio	No	1.37	1.29	1.03	0.96	0.77
	F	1.07	1.74	1.03	0.94	0.85
	E	1.28	1.61	1.36	1.13	0.87
	EF	1.19	1.88	1.34	1.17	0.90
S. Bases	No	78.22	92.11	66.58	75.79	75.53
	F	73.80	94.17	66.03	78.53	72.95
	E	70.80	92.58	68.29	80.83	76.85
	EF	76.56	101.9	68.42	78.83	73.13

*Enmienda: No: sin enmienda; F: fertilizante; E: estiércol de bovino.

APENDICE 3

**ANALISIS ESTADISTICO DE LOS INDICADORES FISICOS
DATOS DEL ENSAYO EN INVERNADERO**

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL DISEÑO Y ANALISIS ESTADISTICO

El diseño experimental utilizado para los indicadores físicos, correspondió a un factorial con tres factores: especies vegetales, enmiendas y tiempo, con distribución de los tratamientos completamente al azar y cuatro repeticiones. Al igual que en el caso de los químicos, el análisis de los resultados se llevó a cabo considerando un experimento factorial con observaciones repetidas.

Cabe señalar, que en este caso la etapa uno (material en estado inicial), no se consideró dentro del análisis, debido a que se trata de valores constantes y por lo tanto, no cumplen con el supuesto de esfericidad u homogeneidad de varianzas (Hair et al., 1999; Méndez et al., 1994 y Sánchez et al., 2001). Por tal motivo sólo se mencionan los promedios generales en la primera tabla de este apartado.

A diferencia de las tablas del Anexo 1, en el presente, se incluyen también las correspondientes a los promedios para cada una de las enmiendas y interacciones, para las variables que presentaron diferencias significativas o que requirieron de la contrastación de los resultados, pero el desarrollo de la metodología estadística fue el mismo.

Tabla A. Promedios generales para el factor tiempo.

VARIABLE	TIEMPO (meses)			PROMEDIO
	0	12	24	
Agregación				
<0.25	3.68	4.37	3.83	3.96
0.25-1.0	9.38	8.90	8.16	8.81
1.0-2.0	7.17	6.18	6.27	6.54
2.0-5.0	16.78	14.90	16.52	16.07
5-10	25.93	29.60	36.50	30.68
>10	37.03	36.06	31.73	34.94
Estabilidad				
<0.25	8.95	11.16	12.51	10.87
0.25-0.5	1.41	2.43	2.95	2.26
0.5-1.0	4.65	6.27	8.55	6.49
1.0-2.0	7.09	6.71	8.47	7.42
2.0-3.0	13.85	11.17	14.70	13.24
3.0-5.0	6.63	5.66	6.86	6.38
>5.0	57.41	56.59	45.96	53.32

Tabla B. Promedios generales para el factor especies vegetales.

VARIABLE	ESPECIE*	TIEMPO (meses)	
		12	24
Agregación			
<0.25	No	3.90	3.81
	H	4.30	3.63
	P	4.90	4.06
0.25-1.0	No	8.54	7.50
	H	8.20	7.29
	P	9.96	9.69
1.0-2.0	No	6.20	6.56
	H	5.81	6.00
	P	6.54	6.24
2.0-5.0	No	15.10	16.70
	H	16.40	18.70
	P	13.20	14.20
5-10	No	28.02	31.95
	H	31.75	34.62
	P	29.00	33.91
>10	No	38.23	33.52
	H	33.57	29.77
	P	36.36	31.89
Estabilidad			
<0.25	No	8.77	10.80
	H	10.80	12.70
	P	13.90	14.10
0.25-0.5	No	1.95	2.36
	H	2.25	2.47
	P	3.10	4.02
0.5-1.0	No	5.58	7.36
	H	5.35	7.72
	P	7.88	10.60
1.0-2.0	No	X	X
	H	X	X
	P	X	X
2.0-3.0	No	12.26	19.22
	H	11.87	13.21
	P	9.38	11.66
3.0-5.0	No	8.62	8.05
	H	4.78	7.39
	P	3.59	5.13
>5.0	No	56.24	43.93
	H	59.20	47.37
	P	54.32	46.56

* Especie: No: sin planta; H: higuera; P: pasto Rhodes
X: Valores no estimados

Tabla C. Promedios generales para el factor enmienda (estiércol)*

VARIABLE	ENMIENDA*	TIEMPO (Meses)	
		12	24
Agregación			
<0.25	No	4.22	3.90
	E	4.52	3.77
0.25-1.0	No	7.99	7.37
	E	9.81	8.95
1.0-2.0	No	6.17	5.87
	E	6.20	6.66
2.0-5.0	No	15.2	15.5
	E	14.6	17.5
5-10	No	30.11	33.04
	E	29.07	33.95
>10	No	36.30	34.30
	E	35.81	29.16
Estabilidad			
<0.25	No	11.41	11.89
	E	10.90	13.14
0.25-0.5	No	3.05	2.39
	E	1.82	3.50
0.5-1.0	No	7.80	7.62
	E	4.75	9.48
1.0-2.0	No	X	X
	E	X	X
2.0-3.0	No	11.32	15.80
	E	11.03	13.59
3.0-5.0	No	4.68	7.45
	E	6.65	6.27
>5.0	No	54.57	46.68
	E	58.60	45.23

* No: sin enmienda; E: estiércol de bovino

X: Valores no estimados

Tabla D. Promedios generales para el factor enmienda (fertilizante)*

VARIABLE	ENMIENDA*	TIEMPO (Meses)	
		12	24
Agregación			
<0.25	No	3.92	3.52
	F	4.82	4.15
0.25-1.0	No	7.77	7.07
	F	10.03	9.25
1.0-2.0	No	5.69	5.56
	F	6.67	6.97
2.0-5.0	No	14.50	15.20
	F	15.30	17.80
5-10	No	29.81	33.88
	F	29.37	33.10
>10	No	38.26	34.74
	F	33.85	28.72
Estabilidad			
<0.25	No	11.31	11.66
	F	11.01	13.37
0.25-0.5	No	X	X
	F	X	X
0.5-1.0	No	X	X
	F	X	X
1.0-2.0	No	X	X
	F	X	X
2.0-3.0	No	11.48	15.76
	F	10.87	13.63
3.0-5.0	No	4.55	7.56
	F	6.78	6.15
>5.0	No	57.34	46.35
	F	55.83	45.56

* No: sin enmienda; F: fertilizante
X: Valores no estimados

Tabla E. Promedios para la interacción especie – abono.

VARIABLE	INTERACCION*	TIEMPO (Meses)		PROMEDIO
		12	24	
Agregación				
<0.25	No N	4.13	4.04	
	No E	3.67	3.85	3.76
	HN	4.51	3.49	
	HE	4.36	3.77	3.88
	PN	4.01	4.18	
	PE	5.78	3.95	4.86
1.0 – 2.0	No N	6.57	6.39	
	No E	5.83	6.37	6.10
	HN	6.45	5.65	
	HE	5.17	6.35	5.76
	PN	5.49	5.57	
	PE	7.58	6.91	7.24

*No: sin planta; H: higuera; P: pasto Rhodes
N: sin estiércol; E: estiércol de bovino.

Tabla F. Promedios para la interacción especie – fertilizante.

VARIABLE	INTERACCION*	TIEMPO (Meses)		PROMEDIO
		12	24	
Agregación				
0.25-1.0	No N	10.20	8.43	
	No F	6.89	6.57	6.73
	HN	6.04	5.00	
	HF	10.40	9.58	9.99
	PN	7.08	7.79	
	PF	12.80	11.60	12.2
1.0-2.0	No N	6.46	6.39	
	No F	5.93	6.72	6.32
	HN	5.67	4.74	
	HF	5.95	7.26	6.60
	PN	4.94	5.55	
	PF	8.13	6.93	7.53
2.0-5.0	No N	14.88	16.02	
	No F	15.32	17.30	16.31
	HN	16.60	14.97	
	HF	16.11	22.41	19.26
	PN	12.15	14.67	
	PF	14.32	13.73	14.02
>10	No N	37.27	33.31	
	No F	39.19	33.74	36.46
	HN	36.43	37.76	
	HF	30.72	21.77	27.24
	PN	41.09	33.15	
	PF	31.64	30.64	31.14
Estabilidad				
0.25-0.5	No N	2.68	2.53	
	No F	1.21	2.18	1.69
	HN	1.91	2.06	
	HF	2.59	2.87	2.73
	PN	2.59	2.49	
	PF	3.61	5.55	4.58
0.5-1.0	No N	7.55	8.09	
	No F	3.62	6.62	5.12
	HN	4.17	6.94	
	HF	6.53	8.49	7.51
	PN	6.31	6.99	
	PF	9.45	14.14	11.79

* No: sin planta; H: higuera; P: pasto Rhodes.
N: sin fertilizante; F: fertilizante

APENDICE 4

**ANALISIS ESTADISTICO DE LOS INDICADORES BIOQUIMICOS
DATOS DEL ENSAYO EN INVERNADERO**

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL DISEÑO Y ANALISIS ESTADISTICO

El diseño experimental utilizado para los indicadores bioquímicos, correspondió a un factorial con tres factores: especies vegetales, enmiendas y tiempo, con distribución de los tratamientos completamente al azar y dos repeticiones. Al igual que en el caso de los químicos y físicos, el análisis de los resultados se llevó a cabo considerando un experimento factorial con observaciones repetidas (Méndez *et al.*, 1994 y Sánchez *et al.*, 2001). No se consideró la etapa uno por tratarse de valores constantes. Los promedios generales para esta etapa se señalan en la primera tabla.

Tabla A. Promedios generales para el factor tiempo.

VARIABLE	TIEMPO (meses)		
	0	12	24
Carbono	0.19	0.34	0.36
Polisacáridos	0.48	X	X
Fúlvicos	5.30	X	X
Húmicos	2.85	11.0	6.57

X: Valores no estimados

Tabla B. Promedios generales para el factor especies vegetales*

VARIABLE	ESPECIE*	TIEMPO (meses)	
		12	24
Carbono	No	0.26	0.32
	H	0.38	0.38
	P	0.39	0.39
Polisacáridos	No	0.61	0.48
	H	0.83	0.81
	P	0.92	0.91
Ac. Fúlvicos	No	11.01	17.24
	H	23.27	27.74
	P	18.14	17.96
Ac. Húmicos	No	12.30	5.35
	H	10.27	8.03
	P	10.41	6.34

*Especie: No: sin planta; H: higuera; P: pasto Rhodes

Tabla C. Promedios generales para el factor enmienda (fertilizante)*

VARIABLE	ENMIENDA*	TIEMPO (Meses)	
		12	24
Carbono	No F	0.28	0.42
	F	0.41	0.31
Polisacáridos	No F	X	X
	F	X	X
Ac. Fúlvicos	No F	X	X
	F	X	X
Ac. Húmicos	No F	10.67	4.31
	F	11.32	8.83

*Enmienda: No F: sin fertilizante; F: fertilizante
X: Valores no estimados

Tabla D. Promedios generales para el factor enmienda (estiércol)*

VARIABLE	ENMIENDA*	TIEMPO (Meses)	
		12	24
Carbono	No E	0.22	0.21
	E	0.47	0.51
Polisacáridos	No E	0.61	0.57
	E	0.96	0.90
Ac. Fúlvicos	No E	X	X
	E	X	X
Ac. Húmicos	No E	5.22	4.09
	F	16.77	9.05

*Enmienda: No E: sin estiércol; E: estiércol de bovino
X: Valores no estimados

APENDICE 5

**ANALISIS ESTADISTICO DE LA RELACION COMPUESTOS ORGANICOS- AGREGACION
DATOS DEL ENSAYO EN INVERNADERO**

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL DISEÑO Y ANALISIS ESTADISTICO

Se realizaron análisis exploratorios, matrices de correlación y correlaciones canónicas, con la finalidad de establecer la relación entre los indicadores bioquímicos y los físicos, específicamente, entre el contenido y tipo de materia orgánica y la formación de agregados estables de diferentes diámetros, del tepetate.

El análisis de correlación canónica es una técnica estadística que permite valorar la relación entre variables predictoras métricas o categóricas y múltiples medidas dependientes o independientes y que tiene como objetivo, cuantificar la validez de la relación. Mientras que la regresión múltiple predice una única variable dependiente a partir de un conjunto de múltiples variables dependientes, la correlación canónica predice simultáneamente múltiples variables dependientes a partir de múltiples variables independientes. En situaciones con múltiples variables dependientes e independientes, la correlación canónica es la técnica multivariante más apropiada y potente. De este análisis se obtienen dos valores: los teóricos canónicos, que representan las combinaciones lineales óptimas de las variables dependientes e independientes y la correlación canónica, que representa la relación entre ellas (Hair *et al.*, 1999; I. Méndez Ramírez. Comunicación personal, octubre 2001).

La comparación de las variables da como resultado un número de correlaciones canónicas igual al número de variables que hay en el conjunto de datos menor; sin embargo, sólo se analizan aquellas funciones cuyos coeficientes de correlación son estadísticamente significativos para un nivel de 0.05 o mayor. En el presente estudio, se consideraron dos grupos de variables: los compuestos orgánicos y los fragmentos y agregados de diferentes diámetros del tepetate, así como su estabilidad en húmedo.